

Anfänge der Halbleiterforschung und -entwicklung

**Dargestellt an den Biographien von
vier deutschen Halbleiterpionieren**

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von Diplom-Physiker

Kai Christian Handel

aus Neustadt an der Weinstraße

Berichter: Universitätsprofessor Dr. Walter Kaiser
Universitätsprofessor Dr. Klaus Heime

Tag der mündlichen Prüfung: 29. Juni 1999

INHALTSVERZEICHNIS

EINLEITUNG.....	5
Ansatz und Methodik.....	5
Biographischer Ansatz.....	6
Inhaltsüberblick.....	8
Forschungsstand.....	9
Prolog: die Quantentheorie des festen Körpers.....	11
Klassische Elektronentheorie der Metalle.....	11
Semiklassische Elektronentheorie der Metalle.....	11
Quantenmechanische Elektronentheorie der Metalle.....	13
Gibt es überhaupt Halbleiter? (1935).....	16
Vorkriegszeit.....	20
Kollaborationsverhältnisse.....	20
Heinrich Welker.....	23
Karl Seiler.....	27
Herbert Mataré.....	29
Eberhard Spenke.....	30
Die Schottky-Theorie des Metall-Halbleiter-Kontakts.....	31
Was ist ein Halbleiter? (1939).....	42
KRIEGSFORSCHUNGEN.....	45
„Funkmeß“: Radarentwicklung in Deutschland.....	45
Vorgeschichte.....	45
Forschungen an Zentimeterwellen.....	49
Die Organisation der Hochfrequenz-Forschung im NS-Staat.....	50
Die „Arbeitsgemeinschaft Rotterdam“.....	58
Siliziumdetektoren von <i>Telefunken</i>.....	64
Überlagerungsempfang.....	65
Direktempfang.....	66
Synthetische Siliziumschichten.....	68
Ersatzschaltbilder und Konstruktion eines Detektors.....	70
Detektorserie ED 700 bis ED 705.....	72
Weitere Forschungen im <i>Telefunken</i> Laboratorium.....	73
Germaniumdetektoren.....	74
Die Machbarkeit von Zentimeterwellendetektoren.....	76
Welker und die U.K.-Stellung.....	77
Experimente am Institut von Klaus Clusius.....	78
Technische Detektor konstruktion.....	84
Detektoren bei <i>Siemens</i>	85
Welkers Arbeiten am „Dreielektrodenkristall“.....	88
Welchem Halbleitermaterial gehört die Zukunft ? (1945).....	93
Exkurs: Siliziumdetektoren im britisch-amerikanischen Radarprojekt.....	95
Kriegsforschungen und die Zukunft der Halbleitermaterialien.....	98

ZWISCHENLÖSUNGEN UND PROVISORIEN	101
Allgemeine wirtschaftliche Lage in (West-)Deutschland	101
Verdrängung und Verleugnung	102
Gleichrichterentwicklung in Deutschland - Seiler und Spenke.....	107
Vom „Garagenbetrieb“ zum Laborleiter - Karl Seiler	107
Von der Kriegsforschung zum Selen - Eberhard Spenke.....	110
Transistorentwicklung in Frankreich - Mataré und Welker	117
Germaniumdioden.....	120
Von der Kristallduodiode zum „Transistron“	122
„Transistron“ - der französische Transistor.....	124
Exkurs: Erfindung des Punktkontakt-Transistors in den Bell Laboratorien.....	127
Vergleich zwischen den Bell Laboratorien und CFS <i>Westinghouse</i> (Paris).....	136
Der „Transistron“ in der Serienproduktion.....	137
Selbständiges wissenschaftliches Profil.....	139
Welchem Halbleitermaterial gehört die Zukunft? (1950)	145
INDUSTRIELLE HALBLEITERFORSCHUNG UND -ENTWICKLUNG.....	147
Das Forschungslaboratorium der <i>Siemens-Schuckertwerke</i>.....	148
Die Abteilung „Festkörperphysik“	149
Theoretische Voraussagen über III-V-Halbleiter in Paris.....	151
Konzentration auf III-V-Halbleiter in Erlangen	156
Galvanomagnetische Effekte	158
III-V-Halbleiter in Konkurrenz zu anderen Materialien.....	165
Das Laboratorium für Halbleiter in Pretzfeld.....	167
Umorientierung der Arbeiten.....	167
Neue Halbleitermaterialien für Leistungsanwendungen?	169
Reinstdarstellung von Siliziumeinkristallen.....	171
Tiegelfreies Zonenziehverfahren.....	173
Der Blick auf die internationale Konkurrenz	176
Silizium-Leistungsbaulemente.....	179
Pretzfeld: ein kleines, flexibles und unabhängiges Labor.....	183
<i>Süddeutsche Apparat-Fabrik (SAF)</i> in Nürnberg	185
<i>Intermetall</i>.....	190
Gründung von <i>Intermetall</i> in Düsseldorf.....	191
Germaniumdioden.....	192
Germanium-Transistoren.....	195
Materialfragen	196
Verkauf an <i>Clevite</i>	198
Die Philosophie des „schnellsten Zweiten“	202
Übersiedlung der Firma <i>Intermetall</i> nach Freiburg.....	204
Welchem Halbleitermaterial gehört die Zukunft? (ca. 1957).....	205
EPILOG	207

LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS	211
Abkürzungsverzeichnis	211
Unveröffentlichte Quellen.....	212
Archivbestände	212
Unveröffentlichte Manuskripte.....	212
Interviews.....	213
Patente.....	214
Veröffentlichte Quellen und Literatur	215
DANK	237
ANHANG.....	239
Interview mit Herbert Mataré	239

Einleitung

Der Aufstieg der Halbleitertechnik nach dem Zweiten Weltkrieg ist sehr eng mit dem Material Silizium verknüpft. Das Silicon Valley ist zum Inbegriff einer erfolgreichen Industrieregion geworden. Elektronische Bauelemente aus Silizium kontrollieren einen großen Teil unseres täglichen Lebens (nicht nur durch Computer, sondern auch in der Waschmaschine und im Auto). Daher wird verschiedentlich davon ausgegangen, daß die jetzige Epoche in der späteren Geschichtsschreibung im Anschluß an Bezeichnungen wie Steinzeit, Eisenzeit und Bronzezeit einmal Siliziumzeit heißen wird.¹

Dies ist aber unwahrscheinlich, da die Materialität der Halbleiterbauteile wie Integrierte Schaltkreise und Mikroprozessoren – im Gegensatz zu den Werkzeugen der Steinzeit – im Verborgenen bleibt. Sichtbar ist heutzutage nur das eigentlich „Technische“ an den Halbleiterbauelementen, das als „reproduzierbares, kontrolliertes und effektives Funktionieren“² angesehen werden kann.

Das war nicht immer so. In den Anfängen der Halbleiterforschung und -entwicklung funktionierte nur wenig reproduzierbar, kontrolliert und effektiv, und die Frage nach dem am besten geeigneten Halbleitermaterial war völlig offen.

In der vorliegenden Arbeit wird mit Blick auf die Entwicklung in Deutschland untersucht, wie es ausgehend von der Frage nach der Existenz von Halbleitern in den 1930er Jahren zu der klaren Entscheidung für Silizium als dem am besten geeigneten Halbleitermaterial in den späten 1950er Jahren gekommen ist.

Ansatz und Methodik

Jede historische Arbeit orientiert sich implizit oder explizit an einer Fragestellung und verfolgt eine Methode. Diese bilden die Grundlagen des wissenschaftlichen Arbeitens. Bedauerlicherweise gilt jedoch, wie die Historikerin Ute Daniel in einem Artikel über die „aktuellen Debatten in der Geschichtswissenschaft“ ausführlich:

„Diskussionen über die Grundlagen wissenschaftlichen Arbeitens nehmen häufig den Charakter von Ausgrenzungsdiskursen an, in denen ‚wissenschaftliche‘ von ‚unwissenschaftlichen‘ Beiträgen geschieden werden - wobei das Spielfeld, auf dem sich die ‚wissenschaftliche‘ Wissenschaft vollzieht, relativ eng umgrenzt ist und meist nicht viel mehr als den eigenen Ansatz, die eigene Methode umfaßt. Um die Metapher des Spielfelds etwas weiterzuspinnen: Wissenschaftliche Grundlagendebatten unterscheiden sich vom Fußballfeld dadurch, daß der Tabellenstand weniger aus den (Eigen-)Toren als aus den Platzverweisen errechnet wird.“³

Um mich nicht an solchen „Ausgrenzungsdiskursen“ zu beteiligen, möchte ich an dieser Stelle nur kurz erläutern, was in der vorliegenden Arbeit wie untersucht und dargestellt werden soll. Damit möchte ich zunächst der häufig erhobenen Forderung nach Offenlegung der „erkenntnisleitenden Fragestellungen“ entsprechen, jedoch keinen Anspruch auf Ausschließlichkeit dieser Fragen erwecken, sondern vielmehr dazu aufrufen, meine Darstellung durch anders ausgerichtete zu ergänzen.

Im folgenden sollen die „Anfänge der Halbleiterforschung und -entwicklung“ dargestellt werden. Ein Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Frage nach dem für die Anwendung am besten geeigneten Halbleitermaterial. Diese Frage läßt sich aber

¹ Vergleiche etwa Queisser, *Kristallene Krisen*, 1985, S. 8 und Kirpal, *Siliziumzeit*, 1993. Zum Silicon Valley als Inbegriff einer erfolgreichen Industrieregion siehe Gall, *IBM zu Silicon Valley*, 1999.

² Mehrtens, *Trennungssaxiom*, 1995, S. 238.

³ Daniel, *Clio unter Kulturschock*, 1997, S. 195.

nicht losgelöst von den Akteuren und dem historischen Kontext beantworten, da, wie wir sehen werden, ihre Beantwortung von der konkreten historischen Situation abhängig ist.

Daher orientiert sich die hier dargestellte Geschichte am Konkreten und stellt notwendigerweise eine Auswahl. Denn:

„Die Geschichtswissenschaft ist ... bedingungslos an das Konkrete gebunden. Auch wenn der Historiker sich explizit oder implizit auf eine Reihe von vergleichbaren Phänomenen beziehen muß, bleiben die Strategie seiner Erkenntnis und seine Ausdrucksweise zutiefst individualisierend (und auch dann, wenn das Individuum eine soziale Gruppe oder eine ganze Gesellschaft ist).“⁴

Doch auch dieses Konkrete ist nicht unmittelbar zugänglich, da die „Erkenntnis der Geschichte indirekt, durch Indizien vermittelt“ ist, die mit detektivischem Spürsinn zusammengesetzt werden müssen. Historische Arbeit hat daher viel gemein mit der Tätigkeit von Fährtenlesern und Detektiven, die versuchen, aus Spuren und Indizien eine Handlung oder einen Tathergang schlüssig zu rekonstruieren.⁵

Bei einem Thema der Zeitgeschichtsschreibung ist man meistens mit einem „zuviel“ anstatt „zuwenig“ der Indizien konfrontiert. Durch die im wesentlichen exponentiell ansteigende wissenschaftliche und technische Produktivität steht eine Vielzahl von wissenschaftlichen Publikationen, Patenten, unveröffentlichten Manuskripten, Briefen, Rückblicken der Akteure, Abbildungen und Objektmaterial zur Verfügung. Eine Auswahl der Quellen muß getroffen werden und ihr kommt eine besondere Bedeutung zu.⁶

Es gibt viele Möglichkeiten dies zu tun und bei jeder Möglichkeit bleiben bestimmte Aspekte der Geschichte unbeachtet, beziehungsweise können nicht dargestellt werden. Ich habe in der vorliegenden Studie das Mittel der Biographie gewählt.

Biographischer Ansatz

Im folgenden werde ich die Anfänge der Halbleiterforschung und -entwicklung anhand der Biographien von vier Halbleiterpionieren erzählen.⁷

Durch ihre Lebenswege wird nicht nur das Thema entsprechend ihrer wissenschaftlich-technischen Hauptarbeitsphase zeitlich und inhaltlich, sowie ihrem Werdegang folgend auch geographisch eingeschränkt, sondern sie bieten auch „das Konkrete“ und den „roten Faden“ der Geschichte, anhand dessen „die Vielfalt von Bedeutungen und Bezügen im Verlauf einer wissenschaftlichen Entwicklung“ aufgezeigt und interpretiert werden kann.⁸ Ziel ist es dabei „eine verbundene Reihe von Ereignissen wiederherzustellen und mit deren Hilfe zu versuchen, einem Leser ihre geschichtliche Einheit faßbar zu machen“. Im Zentrum steht dabei die Darstellung von Handlungen und Motiven einzelner Personen.⁹

⁴ Ginzburg, *Spurensicherung*, 1995, S. 19-20.

⁵ Ebenda, S. 20. Siehe auch Handel/Hess, *Sozialgeschichte der Wissenschaften*, 1998, insb. 24-28.

⁶ Einen vollständigeren Überblick über dieses und weitere Probleme der Zeitgeschichtsschreibung von Wissenschaft und Technik sowie einiger Lösungsansätze gibt Söderqvist, *Historiography*, 1994. Siehe darin insbesondere den einleitenden Beitrag von Thomas Söderqvist und die geistreiche Replik von Jeff Hughes.

⁷ Einen ähnlichen Weg beschreitet Michael Eckert in seiner ausgezeichneten Darstellung „Die Atomphysiker - eine Geschichte der theoretischen Physik am Beispiel der Sommerfeldschule“ (siehe Eckert, *Atomphysiker*, 1993).

⁸ Eckert, *Physikgeschichte*, 1995, S. 10.

⁹ Mehrtens, *Social History*, 1981, S. 258 (Übersetzung KH).

Mehrtens schreibt im Original: „The historian's ultimate aim is to reconstruct an interconnected series of events, attempting to render their historical unity understandable to the reader mainly by describing the actions and motives of individuals.“

Darüber hinaus bietet der biographische Ansatz die Möglichkeit, das zunächst von der Perspektive des Rückblicks auf eine wichtige physikalisch-technische Entwicklung hergeleitete Thema aus einer anderen Perspektive zu betrachten. Durch Einnahme der Perspektive einiger Hauptakteure werden die technischen Artefakte und die wissenschaftlichen Erkenntnisse nicht von ihren Entstehungsbedingungen und ihrer historischen Situation getrennt. Auch „Fehlentwicklungen“ und unklare Gedankengänge, die einen wesentlichen Teil der alltäglichen Wissenschafts- und Technikentwicklung ausmachen, können so festgehalten und aus ihrem Zusammenhang heraus verständlich gemacht werden. Die Ordnung der Geschichte wird so nicht durch die „erfolgreiche“ Technik oder durch die gültige Physik bestimmt, sondern orientiert sich an den Einschätzungen und Prioritäten der historischen Akteure.

Die gleichzeitige Betrachtung von mehreren Biographien wird zusätzlich einem Wesenszug moderner Wissenschaft und Technik gerecht, da an den meisten Entwicklungen mehrere Personen beteiligt waren. Darüber hinaus kann so etwas gefunden werden, das trotz der Verwurzelung der historischen Arbeitsweise im Einzelfall auf etwas „Typisches“ hinweist und so Anlaß zu, wenn auch vorsichtigen, Generalisierungen geben kann. Insofern stellt die vorliegende Arbeit einen Versuch des Auswegs aus dem Dilemma dar, als insbesondere „Innovationsverläufe - nach wie vor das Herzstück der technikhistorischen Forschung“ - nicht strukturgeschichtlich, das heißt ohne Rekurs auf Autonomie und individuelles Handeln erfaßt werden können, Biographien aber als Einzelfälle wenig Strukturelles und Generalisierbares bieten.¹⁰

Entscheidend für das Gelingen einer solchen Darstellung ist sicherlich die geeignete Auswahl der Hauptakteure. Hier muß einerseits die Themenstellung „Anfänge der Halbleiterforschung und -entwicklung“ berücksichtigt werden, und andererseits sollten die ausgewählten Personen große Gemeinsamkeiten in ihrem Lebensweg und ihrer wissenschaftlich-technischen Tätigkeit aufweisen. Im folgenden werden Eberhard Spenke (1905-1992), Karl Seiler (1910-1991), Heinrich Welker (1912-1981) und Herbert Mataré (*1912) betrachtet, da sie einerseits viele Gemeinsamkeiten aufweisen:

- Alle vier gehörten der gleichen Generation an.
- Sie haben in Deutschland Physik studiert, drei von ihnen haben in Theoretischer Physik promoviert.
- Sie sind während der Zeit des Nationalsozialismus in Deutschland geblieben, unter anderem weil sie als sogenannte „arische“ Deutsche nicht verfolgt wurden.
- Sie haben während des Krieges in der Kriegsforschung, hauptsächlich auf dem Gebiet der Halbleiterforschung und -entwicklung, gearbeitet.
- Alle vier hatten nach dem Krieg großen Anteil an der Etablierung der Halbleiterforschung und -entwicklung in West-Deutschland.

Andererseits repräsentieren diese vier Personen mit ihren verschiedenen Forschungsfeldern und Arbeitsweisen einen guten Querschnitt durch die deutsche Halbleiterforschung und -entwicklung.

Man mag an der Auswahl beanstanden, daß die Vaterfigur der deutschen Halbleiterphysik, Walter Schottky, nicht als eine der Hauptpersonen mit aufgenommen wurde. Doch Schottky wurde bereits 1886 geboren und war somit etwa zwanzig Jahre älter als die betrachteten Personen. Er gehörte daher nicht mehr zu derselben Generation und sein Lebensweg hat sich somit zu sehr von dem der anderen unterschieden. Der großen Bedeutung der von ihm in den 1930er Jahren entwickelten Schottky-Theorie wird jedoch insbesondere dadurch Rechnung getragen, daß Eberhard Spenke, der

¹⁰ Siehe zu dieser Thematik Trischler, *Individuum und Gesellschaft*, 1998 (Zitat auf S. 47) und weitere Beiträge in Füßl/Ittner, *Biographie und Technikgeschichte*, 1998.

zehn Jahre als Schottkys „Mathematischer Assistent“ tätig war und an der Genese der Schottky-Theorie mitwirkte, zu den Hauptpersonen gehört.

Man mag auch andere Halbleiterpioniere von ähnlicher Bedeutung wie die Ausgewählten und mit ähnlichem Lebensweg vermissen. Die getroffene Auswahl ist zwar pragmatisch und mit Sicherheit bis zu einem gewissen Grade zufällig, jedoch wird durch diese vier Personen eine große Bandbreite der deutschen Halbleiterforschung und -entwicklung abgedeckt. Letztlich muß sich aber auch diese Auswahl durch die Qualität und Überzeugungskraft der dargestellten Geschichte erweisen.

Inhaltsüberblick

Die Lebenswege der vier Personen verliefen zunächst getrennt, da sie sich in den 1930er Jahren noch nicht kannten und während ihres Studiums und ihrer ersten wissenschaftlichen Tätigkeit an recht unterschiedlichen Themen arbeiteten. Daher wird diese erste Phase in zwei Unterkapiteln der Einleitung dargestellt.

Im „Prolog: die Quantentheorie des festen Körpers“ wird die Geschichte der sich in den 1920er und 1930er Jahren entwickelnden Quantentheorie der festen Körper betrachtet, an der die vier Hauptpersonen zwar keinen Anteil hatten. Die Kenntnisse dieser theoretischen Vorstellungen und der damit verbundenen experimentellen Unsicherheiten bilden aber eine Voraussetzung für das Verständnis der weiteren Entwicklung.

Auch in der „Vorkriegszeit“ treten Welker, Seiler und Mataré noch nicht als handelnde Akteure auf, aber ihre Lebenswege und Berufsentscheidungen sind vom Nationalsozialismus beeinflusst. Ein einführender Teil schildert die grundsätzliche Problematik der Zusammenarbeit mit dem nationalsozialistischen System, bevor Heinrich Welkers Studienzeit und erste wissenschaftliche Tätigkeit im Nationalsozialismus exemplarisch diskutiert wird, da sie aufgrund der Quellenlage am zugänglichsten ist.

Eberhard Spenke hatte sein Studium schon lange vor 1933 abgeschlossen und war seit 1929 bei *Siemens* als „mathematischer Assistent“ von Walter Schottky tätig. Daher war er Ende der 1930er Jahre an der Formulierung der Schottky-Randschicht-Theorie maßgeblich beteiligt. Diese ist für den weiteren Verlauf wichtig und wird daher ausführlich erläutert. Dabei zeigt sich, daß die erfolgreiche Schottky-Theorie nur bruchstückhaft auf die neuesten Erkenntnisse der Quantentheorie der festen Körper zurückgriff, in dieser Vermeidung von analytischer Strenge aber die wesentlichen Phänomene zu erklären vermochte.

Im folgenden Kapitel „Kriegsforschungen“ wird zunächst ausführlich am Beispiel der Radarforschung in die Struktur der Kriegsforschungen im Nationalsozialismus eingeführt. Daraus kann erklärt werden, warum bestimmte Entwicklungen, insbesondere solche auf dem Zentimeterwellenbereich, zunächst unterblieben sind, ab 1943 aber intensiv vorangetrieben wurden. Während Karl Seiler und Herbert Mataré in den *Telefunken*-Laboratorien in Breslau erfolgreich Siliziumdetektoren zum Empfang von Zentimeterwellen entwickeln konnten, gelang es *Siemens* zunächst nicht - trotz Rückgriff auf Welkers Forschungsarbeiten an Germanium - ebenso erfolgreich Zentimeterwellendetektoren zu produzieren. Bei Kriegsende waren die wenigen technischen Experten in Deutschland auf dem Halbleitergebiet - von den Produktions- und Fertigungstechniken einmal abgesehen - auf einem ähnlichen Wissensstand wie ihre alliierten Kollegen.

Im Kapitel „Zwischenlösungen und Provisorien“ werden vor dem Hintergrund der allgemeinen wirtschaftlichen Lage im westlichen Nachkriegsdeutschland und der Bewältigung der nationalsozialistischen Vergangenheit die Möglichkeiten aller vier Protagonisten diskutiert, weiter auf dem Halbleitersektor wissenschaftlich-technisch tätig zu sein. Während sich Seiler mit einem „Garagenbetrieb“ zur Produktion von Siliziumdetektoren selbständig machte, ergriff Spenke die Möglichkeit, für die

Siemens-Schuckertwerke ein Forschungs- und Entwicklungslaboratorium für Selen-gleichrichter einzurichten. Mataré und Welker gingen, unzufrieden mit den politischen und materiellen Umständen im Nachkriegsdeutschland, nach Frankreich und etablierten dort im Auftrag der französischen Post ein Halbleiterlaboratorium für Germaniumdetektoren. Ihre dortigen Forschungsarbeiten an reinen Germaniumkristallen führten sie zur Beobachtung des Transistoreffekts und weisen erstaunliche Parallelen zur bekannten, etwa zeitgleichen Erfindung des Punktkontakt-Transistors in den Bell Laboratorien 1947 auf. Im Gegensatz zu ihren amerikanischen Kollegen gelang es Welker und Mataré allerdings nicht, eine theoretische Erklärung der beobachteten Erscheinungen zu liefern.

Das Kapitel „Industrielle Halbleiterforschung und -entwicklung“ bietet schließlich einen Überblick über die industrielle Forschung und Entwicklung auf dem Halbleitergebiet der 1950er Jahre in ihrer vollen Breite von der Grundlagenforschung über die Forschung und Entwicklung bis zur industriellen Entwicklungstätigkeit und der kommerziellen Umsetzung. Während unter Welkers Leitung im Forschungslaboratorium der *Siemens-Schuckertwerke* die physikalischen Eigenschaften der III-V-Halbleiter erforscht wurden, konzentrierte sich Spenkes Laboratorium auf die Erforschung und Beherrschung der technischen Eigenschaften des Siliziums. In der von Mataré mitgegründeten und von Seiler ab 1956 geleiteten Firma *Intermetall* wurde Anfang der 1950er Jahre auch an III-V-Halbleitern geforscht, während Germaniumdioden und -transistoren hergestellt und verkauft wurden. Mit dem Übergang in neue Besitzverhältnisse Mitte der 1950er Jahre kam es dort zu einer Umorientierung auf Silizium, die Forschungsarbeiten an III-V-Halbleitern wurden eingestellt, und die Firma strebte langsam auf die Gewinnzone zu, die Anfang der 1960er Jahre auch erreicht wurde.

Neben den Biographien zieht sich die physikalisch-technische Frage nach dem am besten geeigneten Halbleitermaterial als „roter Faden“ durch die gesamte Arbeit. Sie wird zu Ende eines jeden Kapitels neu aufgeworfen. Dabei stellt sich heraus, daß zu Beginn des Krieges noch keine Sicherheit darüber bestand, welche Materialien überhaupt Halbleiter sind. Während des Krieges kristallisierte sich die Überlegenheit der Elementhalbleiter Silizium und Germanium für die Benutzung als Spitzendetektoren in Radarsystemen heraus. In der unmittelbaren Nachkriegszeit setzte sich mit der Erfindung des Germanium-Punktkontakt-Transistors der Halbleiter Germanium als beinahe ausschließlich verwendeter und untersuchter Halbleiter für kurze Zeit durch. Ab ca. 1950 wurden verstärkt neue Halbleitermaterialien diskutiert, die durch die Verbindung von zwei Elementen entstanden. Hier sind insbesondere die III-V-Halbleiter zu nennen, auf die eine Zeitlang große Hoffnungen gesetzt wurden. Ab Mitte der 1950er Jahre begann sich Silizium als das überlegende Halbleitermaterial für Massen Anwendungen langsam durchzusetzen. Der endgültige Durchbruch für Silizium kam aber erst mit der Erfindung und Verbreitung des integrierten Schaltkreises und seiner Herstellung durch den Planarprozeß in den 1960er Jahren. Dadurch wird der eigentliche Beginn der Mikroelektronik markiert. Mit dieser Entwicklung hatten die Physiker Mataré, Seiler, Spenke und Welker aber nichts mehr zu tun, und sie ist daher auch nicht mehr Gegenstand dieser Arbeit.

Forschungsstand

Auf den ersten Blick scheint es, als seien die Anfänge der Halbleiterforschung und -entwicklung gut erforscht. Innerhalb des *International Project for the History of Solid State Physics* wurden 1986 die Grundlagen gelegt, doch blieb der abschließende Bericht von Ernest Braun mit dem Titel „Selected Topics from the History of Semiconductor Physics and Its Application“ so oberflächlich und fragmentarisch, wie es der Titel erwarten läßt. Der Beitrag von Jürgen Teichmann und Krzysztof Szymborski

konzentriert sich auf die Alkalihalogenidkristalle, die Ionenleiter sind und auch häufig als Halbleiter betrachtet wurden. Von ihnen soll hier aber nicht die Rede sein.¹¹ Eine detaillierte und zusammenhängende Darstellung der Anfänge der Halbleiterforschung und -entwicklung findet sich zwar in den Arbeiten von Lillian Hoddeson und Michael Riordan, insbesondere mit Blick auf die Erfindung des Punktkontakt-Transistors in den Bell Laboratorien. Doch diese Arbeiten konzentrieren sich fast ausschließlich auf die Entwicklung in den USA.¹² Auch zum Thema Radar im Zweiten Weltkrieg liegen zum Teil voluminöse Abhandlungen vor, in denen aber die Entwicklung von Radardetektoren auf Halbleiterbasis wenig beachtet wird, obwohl ihre Wichtigkeit größtenteils anerkannt wird.¹³

Die (Wirtschafts-) Geschichte insbesondere der amerikanischen Halbleiterindustrie ist umfassend dargestellt. Der Schwerpunkt dieser Darstellungen liegt allerdings auf den wirtschaftlichen Entwicklungen, die hauptsächlich nach der Erfindung und Etablierung des Integrierten Schaltkreises einsetzen.¹⁴ Die bundesdeutsche Halbleiterindustrie bis ca. 1960 wird kaum beachtet.¹⁵ Es existieren jedoch kürzere Abhandlungen zur Halbleiterentwicklung bei *Siemens*, auf die hier aufgebaut werden konnte.¹⁶

Zur Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik im Nationalsozialismus¹⁷, zur allgemeinen wirtschaftlichen Entwicklung nach dem Zweiten Weltkrieg in (West-) Deutschland¹⁸ und zur Bewältigung der nationalsozialistischen Vergangenheit¹⁹ liegen geeignete Darstellung vor, die herangezogen werden konnten.

¹¹ Siehe Hoddeson u.a., *Crystal Maze*, 1992 und darin insbesondere Braun, *Semiconductor Physics*, 1992 und Teichmann/Szymborski, *Point Defects*, 1992. Von Teichmann ist zu diesem Thema auch eine Monographie erschienen (Teichmann, *Farbzentrenforschung*, 1988).

¹² Siehe insbesondere Hoddeson, *Point-Contact Transistor*, 1981; Riordan/Hoddeson, *Crystal Fire*, 1997.

¹³ Zur Geschichte des Radars insbesondere in Deutschland siehe Kern, *Radarverfahren*, 1984; Reuter, *Funkmeß*, 1971 und Trenkle, *Funkmeßverfahren*, 1979. Das US amerikanische Radarprojekt des Zweiten Weltkrieges beschreibt ausführlichst Guerlac, *Radar*, 1987.

Zur Geschichte der Entwicklung der Halbleiterdetektoren während des Zweiten Weltkrieges ist man auf die technischen Berichte aus den jeweiligen Projekten angewiesen. Für Deutschland siehe Seiler, *Detektoren*, 1948 und für die Alliierten Torrey/Whitmer, *Crystal Rectifiers*, 1948.

¹⁴ Braun/Macdonald, *Revolution in Miniature*, 1982; Halfmann, *Entstehung der Mikroelektronik*, 1984; Molina, *Social Basis*, 1989; Morris, *Semiconductor Industry*, 1990.

¹⁵ Eine Ausnahme stellt eine 1971 von der „Kommission für wirtschaftlichen und sozialen Wandel“ der Bundesregierung in Auftrag gegebene Studie dar, die Technologie und Innovation in der industriellen Produktion am Beispiel der Mikroelektronik untersuchte. Gemäß ihres Auftrags ist aber auch sie auf die industrielle Produktion der Integrierten Schaltkreise konzentriert (Scholz, *Technologie und Innovation*, 1974).

¹⁶ Schubert, *Industriellaboratorien*, 1987; Osietzki, *Frühe Halbleiterforschung*, 1989. Zum Verhältnis *Siemens* und *Philips* auf dem Halbleitersektor siehe Schopmann, *Philips' Antwort*, 1983; Erker, *Forschung und Entwicklung*, 1993.

¹⁷ Siehe insbesondere Ludwig, *Technik*, 1974; Beyerchen, *Scientist under Hitler*, 1977; Walker *Uranmaschine*, 1990; Renneberg/Walker, *Science, Technology*, 1994; Meinel/Voswinkel, *Medizin, Naturwissenschaft, Technik*, 1994 und Hentschel, *Physics*, 1996.

¹⁸ Abelshausen, *Wirtschaftsgeschichte*, 1983; Abelshausen, *Neuanfang oder Wiederaufbau*, 1986; Radkau, *Technik in Deutschland*, 1989; Stokes, *Wirtschaftswunder*, 1991; Wellhöner, *Wirtschaftswunder*, 1996.

¹⁹ Frei, *Vergangenheitspolitik*, 1996.

Prolog: die Quantentheorie des festen Körpers

Die Beschäftigung mit den elektrischen Eigenschaften fester Körper ist so alt wie die Beschäftigung mit Elektrizität. Doch erst nach der Entdeckung des Elektrons als freies Teilchen und Träger der elektrischen Ladung wurden konkrete Modellvorstellungen zur Elektrizitätsleitung in Festkörpern entwickelt. Die von Paul Drude 1900 veröffentlichte Elektronentheorie der Metalle stellte einen ersten erfolgreichen Ansatz in dieser Richtung dar. Ausgebaut und um die neuesten Erkenntnisse der Quantenmechanik bereichert, ermöglichte es die quantenmechanische Elektronentheorie der Metalle seit Anfang der 1930er Jahre, mit theoretischer Begründung zwischen Metallen, Isolatoren und Halbleitern zu unterscheiden. Die daraus hervorgegangene Bandtheorie der Festkörper markiert den Übergang von der Elektronentheorie der Metalle zu einer physikalischen Theorie der festen Körper, die ihrerseits den Ausgangspunkt für die moderne Halbleiterphysik bildete.²⁰

Klassische Elektronentheorie der Metalle

In seinen Berechnungen war es Paul Drude 1900 gelungen, aufgrund einfacher Modellvorstellungen sowohl die elektrische Leitfähigkeit als auch die Wärmeleitfähigkeit von Metallen zu bestimmen und daraus das empirisch gut gesicherte Wiedemann-Franz-Gesetz abzuleiten. Doch detaillierte Annahmen, beispielsweise die Verfeinerung der benutzten klassischen Statistik für die sich im Metall frei bewegenden Elektronen, hatten vor der vollständigen quantenmechanischen Formulierung der Elektronentheorie der Metalle stets zu quantitativen aber auch konzeptionellen Schwierigkeiten geführt. Den Abschluß dieses ersten Abschnitts - auch als klassische Phase der Elektronentheorie der Metalle bekannt - markierte eine Arbeit des theoretischen Physikers Wolfgang Pauli von Ende 1926.²¹

Semiklassische Elektronentheorie der Metalle

Pauli hatte sich 1926 mit den beiden in der Atomphysik diskutierten Statistiken, der Fermi-Dirac-Statistik und der Bose-Einstein-Statistik, beschäftigt und sich gefragt, welche der beiden auf Materie angewendet werden müsse. Wie er in einem Brief an Erwin Schrödinger schrieb, hatte ihn erst die Anwendung der Fermi-Dirac-Statistik auf das Problem des Paramagnetismus von Metallen davon überzeugt, daß Metall-elektronen der Fermi-Dirac-Statistik und nicht der Bose-Einstein-Statistik gehorchen:

„Ich habe mich schweren Herzens dazu bekehren lassen, daß nicht Einstein-Bose, sondern Fermi ... die richtige Statistik ist. Über eine Anwendung davon auf Paramagnetismus will ich eine kleine Note schreiben.“²²

Die angekündigte Theorie des Paramagnetismus von Pauli ergab im Gegensatz zur klassischen Elektronentheorie der Metalle die richtige Größenordnung des Effekts

²⁰ Zur Geschichte der Elektronentheorie der Metalle liegen mittlerweile einige Darstellungen vor. Hier soll daher nur ein knapper Überblick gegeben werden, der auf die Frage hinführt, was unter einem Halbleiter in den 1930er Jahren verstanden wurde.

Eine erste Einteilung in drei Phasen der Entwicklung, die klassische (1900-1926), semiklassische (1926-1928) und quantenmechanische (ab 1928) Phase, geben Hoddeson/Baym, *Development*, 1980; zur klassischen Elektronentheorie der Metalle siehe Kaiser, *Early Theories*, 1987 und Eckert/Schubert/Tokar, *Roots*, 1992, S. 27-41; zur semiklassischen und quantenmechanischen Theorie siehe Hoddeson/Baym/Eckert, *Electron Theory*, 1992 und Hoddeson/Baym/Eckert, *Development*, 1987; eine Darstellung der Entwicklung der Bandtheorie ab 1933 gibt Hoch, *Band Theory*, 1992.

²¹ Pauli, *Gasentartung*, 1927. Zur klassischen Elektronentheorie der Metalle siehe ausführlich Kaiser, *Early Theories*, 1987 und Eckert/Schubert/Tokar, *Roots*, 1992, S. 27-41.

²² Pauli an Schrödinger, 22.11.1926, in: Pauli, *Briefwechsel I*, 1979, Nr. 147, S. 356.

und lieferte eine Übereinstimmung mit der beobachteten Temperaturunabhängigkeit der magnetischen Suszeptibilität. Pauli interpretierte diese Erfolge als beinahe direkte Bestätigung für die Hypothese der Existenz eines Elektronengases in Metallen, das der Fermi-Dirac-Statistik gehorcht.²³ Nachdem die Frage nach der richtigen Statistik für materielle Teilchen geklärt schien, war Pauli nicht mehr daran interessiert, die weiteren Anwendungen der neuen Statistik auf die Elektronentheorie der Metalle auszuarbeiten. Er erinnerte sich aber daran, daß sein ehemaliger Lehrer Arnold Sommerfeld die Druckfahnen seines Artikels über Paramagnetismus auf einem Treffen im Frühjahr 1927 in Hamburg gesehen hatte und sofort an den entsprechenden Anwendungen interessiert war.²⁴ Dies entsprach dem wissenschaftlichen Stil Sommerfelds, der weniger als seine Schüler Werner Heisenberg und Wolfgang Pauli an prinzipiellen Fragen der neuen Quantenmechanik interessiert war, sondern sich häufig auf die exakte Bewältigung eines mathematisch interessanten Problems konzentrierte. Darüber hinaus sah Sommerfeld, der dafür bekannt war, daß er seine Schüler insbesondere in den mathematischen Methoden der Physik gut ausbildete, in den Anwendungen der Fermi-Dirac-Statistik auf die Elektronentheorie der Metalle nicht nur ein wichtiges Forschungsfeld, sondern auch eine gute mathematisch-physikalische Übung für seine Studenten. Sofort setzte er im Sommersemester 1927 eine Spezialvorlesung zur Elektronentheorie der Metalle an und arbeitete darin die Konsequenzen der Fermi-Dirac-Statistik aus. Er konnte so schon bald selbst einige der Schwierigkeiten der klassischen Elektronentheorie der Metalle beheben und beschäftigte mit weiteren Fragen seine Studenten und die Gäste aus dem Ausland, die wegen des guten Rufs der Sommerfeldschule zahlreich in München vertreten waren. Beispielsweise erinnerte sich der amerikanische Physiker William Houston, der nach München gekommen war, um von Sommerfeld Atomphysik zu lernen, daß dieser ihn statt dessen mit einer Rechnung zur freien Weglänge der Elektronen in Metallen betraute.²⁵ Durch solche Forschungsaufgaben und durch seine Auslandsreisen machte Sommerfeld das neue Thema bekannt und trug somit zur raschen Ausbreitung der Theorie bei, noch bevor die ersten speziellen Artikel in der Fachliteratur erschienen.²⁶

Die semiklassische Theorie Sommerfelds wies allerdings noch gravierende konzeptionelle Mängel auf. So war beispielsweise immer noch nicht klar, warum die Elektronen im Metall als frei aufgefaßt werden konnten. Sommerfeld erklärte dazu, daß er mit der neuen Statistik noch keine neue Theorie habe schaffen wollen, sondern die alte nur abwandeln und verbessern wollte.

„Die vorstehenden Betrachtungen werden gekennzeichnet durch die Abwesenheit jeder besonderen Hypothese über die Wechselwirkung zwischen Elektronen und Metallatomresten. Wir haben die primitivsten Vorstellungen der alten Theorie übernommen und sie nur durch das zwangsläufig vorgeschriebene Verfahren der FERMI'schen Statistik in neuer Weise bearbeitet.“²⁷

Die erste begrifflich konsistente Formulierung der Elektronentheorie der Metalle auf Grundlage der Quantentheorie wurde 1928 von Felix Bloch, dem ersten Doktoranden des inzwischen zum ordentlichen Professor in Leipzig aufgestiegenen Sommerfeldschülers Werner Heisenberg, vorgeschlagen.

²³ Pauli, *Gasentartung*, 1927.

²⁴ Pauli an Rasetti, Oktober 1956, AHQP, Mikrofilm 66, Sek.12 - nach Eckert/Schubert, *Kristalle*, 1986, S. 94.

²⁵ Houston-Interview mit G. Phillips und W. J. King, 3.8.1964, AHQP - nach Eckert/Schubert, *Kristalle*, 1986, S. 96.

²⁶ Siehe dazu Eckert, *Propaganda*, 1987.

²⁷ Sommerfeld, *Elektronentheorie*, 1927, S. 831-832.

Quantenmechanische Elektronentheorie der Metalle

Der Generationswechsel in der Physik und der damit verbundene Durchbruch der quantenmechanischen Vorstellungen von der Materie während der zwanziger Jahre ist nirgendwo deutlicher als an der Universität Leipzig zu erkennen. Noch Anfang 1926 wurde in Leipzig Physik im Stile der Jahrhundertwende betrieben. Der Lehrstuhlinhaber für Theoretische Physik, Theodor Des Coudres, hatte sowohl klassische theoretische Physik als auch Experimentalphysik betrieben und es vermieden, quantenmechanische Vorstellungen in seinen Lehrplan aufzunehmen. Ähnlich stand es um den Experimentalphysiker Otto Wiener. Als wenig später in kurzem Abstand sowohl Des Coudres als auch Wiener verstarben, wurden die Posten der zwei Institutsdirektoren mit den beiden Sommerfeldschülern Peter Debye und Werner Heisenberg besetzt. Nachdem auch das Extraordinariat für Theoretische Physik bereits kurz zuvor an den Sommerfeldschüler Gregor Wentzel gegangen war, waren so zum Wintersemester 1927/28 alle Leipziger Physikprofessuren neu und mit Sommerfeldschülern besetzt. Der neue Direktor des Instituts für Experimentalphysik Peter Debye war an theoretischen wie experimentellen Fragestellungen gleichermaßen interessiert, so daß der Kontakt zwischen den beiden Instituten weit besser war als an den übrigen deutschen Universitäten.²⁸

Als Felix Bloch im Herbst 1927 in das „neue“ Leipzig kam, hatte er zuvor bei einem weiteren Begründer der modernen Quantenmechanik, Erwin Schrödinger, in Zürich studiert. Da dieser aber im Begriff war, die Nachfolge von Max Planck in Berlin anzutreten, hatte er sich entschieden, nach Leipzig zu gehen, um bei Werner Heisenberg seine Doktorarbeit zu schreiben. Heisenberg interessierte sich zu dieser Zeit sehr für die Probleme der Physik der festen Körper und unterstützte ihn, sich ein Promotions-thema in diesem Bereich zu suchen. So entschied sich Bloch, die Grundlagen der Elektronentheorie der Metalle genauer zu studieren und diese ohne klassische Annahmen von Grund auf quantenmechanisch zu betrachten. In seiner Dissertation betrachtete Bloch daher die Wellenfunktion eines Elektrons in einem periodischen dreidimensionalen Gitter und löste die entsprechende Schrödingergleichung für den Fall, daß die kinetische Energie des Elektrons viel kleiner als seine Bindungsenergie ist. (Dies ist heute als die Methode der starken Bindung bekannt.) Er fand zu seiner Überraschung, daß die Wellenfunktion für ein perfekt periodisches Gitter die einfache Form einer ebenen Welle hat, die durch eine periodische Funktion mit der Gitterperiode moduliert wird.²⁹

Das bedeutete, daß sich Elektronen völlig frei durch ein perfektes Gitter bewegen können und die endliche Leitfähigkeit der realen Metalle nur durch Gitterfehler und Ionenbewegungen hervorgerufen wird. So stellte die Blochsche Arbeit 1928 einerseits eine Rechtfertigung für Sommerfelds semiklassische Theorie dar, markierte aber andererseits den Beginn der rein quantenmechanischen Theorie der Elektronen in Festkörpern, die keine grundlegenden Konzepte der klassischen Elektronentheorie der Metalle unbegründet akzeptieren mußte.

Während Bloch diese Gedanken noch ausformulierte und aufschrieb, kam Rudolf Peierls nach Leipzig. Peierls war erst 1926 als Student zu Sommerfeld gekommen und war in seinem fünften Semester von diesem nach Leipzig geschickt worden, da Sommerfeld selbst auf eine längere Vortragsreise ging, die ihn fast ein Jahr von München fernhalten würde.³⁰ Peierls setzte sich in Leipzig auf Anraten Heisenbergs mit der Theorie des Halleffekts auseinander. Aufbauend auf Blochs Vorstellungen erhielt er ein Ergebnis für die Hallkonstante, das im Falle eines wenig gefüllten Bandes zum klassischen Resultat führte, im Falle eines fast gefüllten Bandes aber das Vorzeichen

²⁸ Hoddeson/Baym/Eckert, *Electron Theory*, 1992, S. 104-107; Eckert, *Atomphysiker*, 1993, S. 97-102.

²⁹ Bloch, *Elektronen in Kristallgittern*, 1928. Unabhängig von Bloch kam Hans Bethe in München zu einem ähnlichen Ergebnis. Siehe dazu Hoddeson/Baym/Eckert, *Electron Theory*, 1992, S. 111-112.

³⁰ Zu dieser Reise und ihrer Funktion siehe Eckert, *Propaganda*, 1987.

wechselte. Diese Tatsache konnte so interpretiert werden, daß positive Ladungsträger von der Anzahl der ungefüllten Zustände zum Wert der Hallkonstante beitrugen.³¹ Peierls Interpretation war aber noch recht undeutlich. Das Konzept der Löcher beziehungsweise Defektelektronen fand sich erst zwei Jahre später in völliger Klarheit in einem Beitrag Heisenbergs, der klar ausdrückte:

„Atomare Systeme, bei denen n Elektronen zu einer abgeschlossenen Schale fehlen, lassen sich näherungsweise behandeln, indem man eine Schrödingergleichung in den Koordinaten der n ‚Löcher‘ löst.“³²

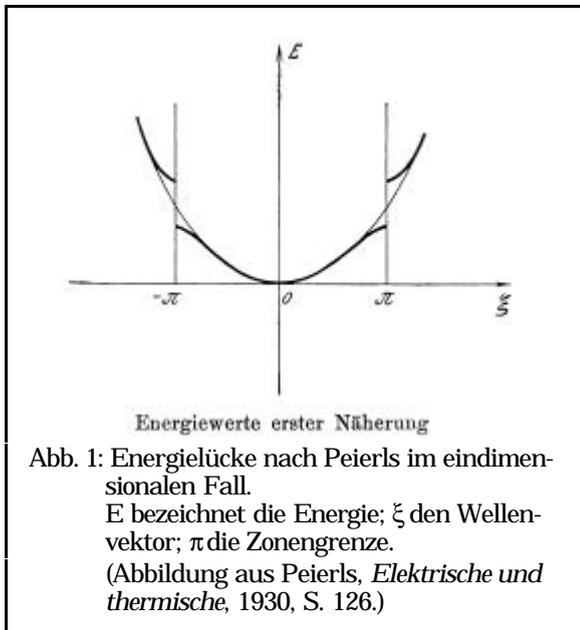


Abb. 1: Energielücke nach Peierls im eindimensionalen Fall.
 E bezeichnet die Energie; ξ den Wellenvektor; π die Zonengrenze.
 (Abbildung aus Peierls, *Elektrische und thermische*, 1930, S. 126.)

Im April 1928 hatte Wolfgang Pauli an der ETH Zürich die Nachfolge von Peter Debye angetreten und begonnen, einen weiteren Standort der modernen Quantenmechanik aufzubauen. Zwischen den Instituten in Leipzig und Zürich entspann sich ein intensives wissenschaftliches und freundschaftliches Verhältnis. In der Folgezeit tauschten Pauli und Heisenberg „ihre Studenten und Assistenten aus, regten Gaststipendiaten zu gegenseitigen Aufenthalten an und sorgten auch bei der Vergabe von Doktorarbeiten für eine Kontinuität des gemeinsamen quantenmechanischen Forschungsprogramms.“³³ So war es für Peierls natürlich, daß er, als Heisenberg 1929 zu einer halbjährigen Vortragsreise aufbrach, zu Pauli nach Zürich wechselte.

Pauli interessierte sich, obwohl er in späteren Jahren stets ein ambivalentes Verhältnis zur Theorie der Festkörper ausdrückte, zu dieser Zeit sehr für grundlegende Festkörperprobleme und schlug Peierls das Thema Wärmeleitung in nichtmetallischen Kristallen vor. Im Anschluß an seine aus diesen Untersuchungen hervorgegangene Doktorarbeit, die Peierls im Oktober 1929 bei Heisenberg in Leipzig einreichte, untersuchte er die elektrische und thermische Leitfähigkeit von Metallen. Bloch hatte bisher nur den Fall der starken Bindung der Elektronen an die Ionenrümpfe betrachtet. Peierls untersuchte nun den Fall, in dem die Elektronen nur schwach an die Ionenrümpfe gebunden waren, und kam zur heute klassischen Schlußfolgerung, daß periodische Variationen des Potentials innerhalb des Kristalls zu verbotenen Energien führen, die heute als Bandlücken bekannt sind (siehe Abb. 1).³⁴ Aus diesen ersten Vorstellungen entwickelte der englische Physiker Alan Wilson während eines Aufenthalts in Leipzig die Bandtheorie der Festkörper.

³¹ Peierls, *Galvanomagnetische Effekte*, 1929, S. 262-264.

Eine Erklärung des Halleffekts wird im Kapitel „Halleffekt“ ab S. 159 gegeben.

³² Heisenberg, *Zum Ausschließungsprinzip*, 1931, S. 904.

Es ist häufig darüber spekuliert worden, daß das Konzept der Löcher im Festkörper etwas mit den zu gleichen Zeit postulierten Diracschen Löchern in der Quantenelektrodynamik zu tun haben müsse, weil beide Konzept sich so ähnlich seien. Es scheint aber, daß beide Konzepte unabhängig aus Paulis Ideen über beinahe gefüllte Elektronenschalen in Atomen hervorgegangen sind (Hoddeson/Baym/Eckert, *Electron Theory*, 1992, S. 113-114). Peierls erinnerte sich an ein Gespräch mit Heisenberg, in dem dieser das beinahe gefüllte Bandes mit der beinahe gefüllten Elektronenschale von Atomen verglich. Er konnte sich aber nicht mehr genau erinnern, ob das vor oder nach seiner Arbeit von 1929 war. Siehe dazu Peierls, *Early Work*, 1993, S. 251 und Peierls, *Recollections*, 1980, S. 30.

³³ Eckert, *Atomphysiker*, 1993, S. 103.

³⁴ Peierls, *Elektrische und thermische*, 1930.

Unabhängig von Peierls wurden ähnliche Rechnungen von dem amerikanischen Physiker Philip Morse und von Maximilian Julius O. Strutt in Eindhoven unternommen. Wie Peierls hatten auch sie nur ein eindimensionales Modell durchgerechnet. Dieses wurde von dem französischen Physi-

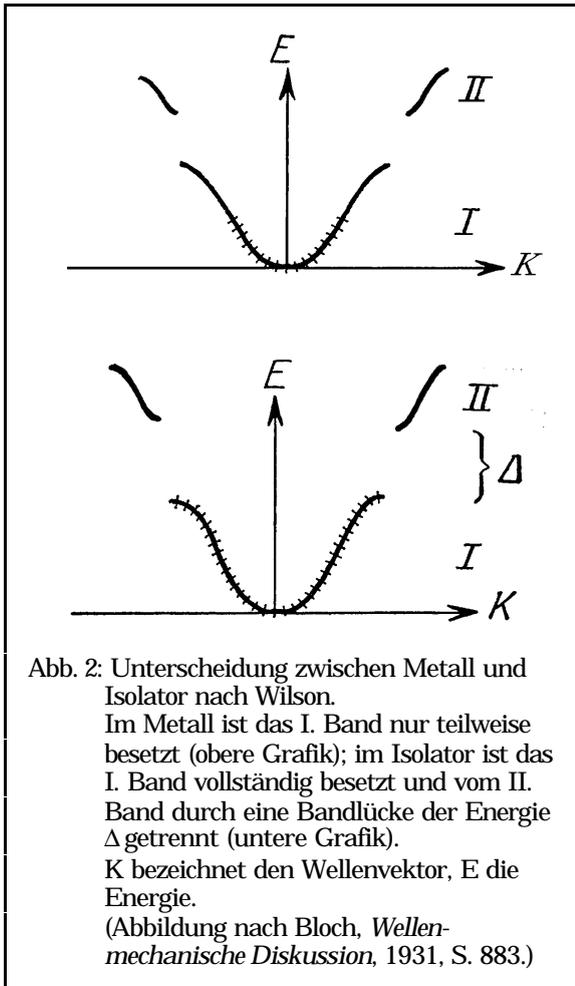


Abb. 2: Unterscheidung zwischen Metall und Isolator nach Wilson.
 Im Metall ist das I. Band nur teilweise besetzt (obere Grafik); im Isolator ist das I. Band vollständig besetzt und vom II. Band durch eine Bandlücke der Energie Δ getrennt (untere Grafik).
 K bezeichnet den Wellenvektor, E die Energie.
 (Abbildung nach Bloch, *Wellenmechanische Diskussion*, 1931, S. 883.)

Schon bevor Wilson Anfang 1931 mit einem Stipendium der Rockefeller Foundation von Cambridge nach Leipzig zu Heisenberg kam, hatte er sich intensiv mit dem Einfluß von Magnetfeldern auf die elektrische Leitfähigkeit von Metallen auseinandergesetzt. Daher wurde er von Heisenberg aufgefordert, darüber im Kolloquium vorzutragen. Dabei sollte er auch die neueren Arbeiten von Bloch und Peierls berücksichtigen, die nach Heisenbergs Auffassung wichtig waren, aber deren physikalischen Argumente durch komplizierte Mathematik verdeckt sei. Wilson sah sich gefordert, diese Theorien zu vereinfachen und nahm dazu an, daß quasifreie Elektronen im Kristall wie Valenzelektronen im Atom abgeschlossene oder offene Schalen bilden könnten. Dadurch konnte er nach weiteren Diskussionen mit Bloch demonstrieren, daß ein elementarer Festkörper mit einer ungeraden Anzahl von Valenzelektronen immer ein Metall sein müsse, während bei einer geraden Anzahl sich sowohl ein Metall durch überlappende Bänder als auch ein Isolator ergeben könne (Abb. 2).³⁵

Diese Ansicht stellte Wilson in seinem ersten Vortrag in Leipzig im Februar 1931 vor. In der anschließenden ersten Ver-

öffentlichung zum Thema schrieb er:

„Suppose the number of electrons is just sufficient to fill up the lowest band of allowed energies when all the electrons are in their lowest possible states. ... In this case, therefore, we have no conduction electrons, and we have the rather curious result that not only it is possible to obtain conduction with bound electrons, but it is also possible to obtain non-conduction with free electrons.“³⁶ (siehe Abb. 2)

Er erklärte damit die Existenz von Isolatoren, die sich nicht wie bisher angenommen nur quantitativ von guten Leitern unterschieden, sondern durch die Bandlücke auch qualitativ. War die Bandlücke klein genug, eröffnete sie, wie Wilson 1931 klar sah, die Möglichkeit der Existenz von elektronischen Halbleitern, die dadurch entstanden, daß Elektronen aus dem voll besetzten Band in das leere Band thermisch angeregt wurden.³⁷ Diese Stoffe würden die für Halbleiter charakteristische Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes aufweisen. Von niedrigen Temperaturen her kommend würde eine Erhöhung der Temperatur zur Bereitstellung weiterer Lei-

ker Léon Brillouin 1930 auf den dreidimensionalen Fall erweitert. Brillouin konnte zeigen, daß in drei Dimensionen die Lücken im Impulsraum einen Polyeder abgrenzen. Heute ist dieser als Brillouin-Zone bekannt. Siehe dazu Hoddeson/Baym/Eckert, *Electron Theory*, 1992, S. 116-118; Pippard, *Electrons in Solids*, 1995, S. 1291-1293 und 1311-1313.

³⁵ Wilson, *Opportunities*, 1980, S. 44-46; Hoddeson/Baym/Eckert, *Electron Theory*, 1992, S. 119-122. Peierls hatte schon in einer früheren Arbeit festgestellt, daß die elektrische Leitfähigkeit im Falle eines vollständig gefüllten Bandes verschwindet und damit implizit einen Isolator charakterisiert, ohne diese Feststellung allerdings explizit zu machen (Peierls, *Galvanomagnetische Effekte*, 1929, S. 264).

³⁶ Wilson, *Electronic Semi-Conductors I*, 1931, S. 460.

³⁷ Heute spricht man von einem „intrinsischen“ oder Eigen-Halbleiter, bei dem Elektronen und Löcher aus dem Valenzband in das Leitungsband angeregt werden.

tungselektronen führen und der elektrische Widerstand würde sinken. Bei höheren Temperaturen würde schließlich wie bei den Metallen der Einfluß der Gitterschwingungen überwiegen und der Widerstand würde wieder steigen. Dieses Verhalten des elektrischen Widerstands war im Artikel über die metallische Leitfähigkeit im neuesten „Handbuch der Physik“ als charakteristisch für Halbleiter angesehen worden.³⁸

Wilson mochte sich aber auf die Existenz von Halbleitern nicht festlegen, denn obwohl er der Meinung war, daß sich die Theorie auf dem richtigen Weg befand, war die Situation experimentell keineswegs so klar. Er schrieb:

„From the experimental side ... the existence or non-existence of semiconductors remains an open question ... Theoretically there is no reason why semiconductors should not exist ...“³⁹

Gibt es überhaupt Halbleiter? (1935)

Widerspruch zur Existenz von elektronischen Halbleitern kam beispielsweise von dem Erlanger Professor für Experimentalphysik, Bernhard Gudden, der bereits 1924 aufgrund der unbefriedigenden experimentellen Situation anzweifelte,

„ob es tatsächlich Elektronenleiter gibt mit Abweichungen vom Ohmschen Gesetz ... und positiven Temperaturkoeffizienten der Leitfähigkeit, bei denen diese auffallenden Erscheinungen nicht nur auf Grenzflächenwirkungen und Inhomogenitäten zurückzuführen sind.“⁴⁰

Um 1930 vertrat er die Meinung, daß keine reine Substanz jemals ein Halbleiter sei, und war der Ansicht,

„daß die ganze elektrische Leitfähigkeit der elektronischen Halbleiter keine Stoffeigenschaft sei, sondern durch geringfügige Zusätze bedingt ist. ... Alle derartigen Halbleiter sollten ... bei streng stöchiometrisch zusammengesetztem Gitter Isolatoren sein.“⁴¹

Guddens Meinung konnte von niemanden ignoriert werden, da Gudden gemeinsam mit seinem Lehrer und Mentor Robert Wichard Pohl zu den grauen Eminenzen der experimentellen Festkörperphysik in Deutschland zählte und grundlegende Arbeiten zu lichtelektrischen Erscheinungen in Festkörpern und zur Ionenleitung in Kristallen veröffentlicht hatte. Gudden war es auch, der beim Thema „elektrische Leitfähigkeit elektronischer Halbleiter“ immer wieder darauf hinwies, daß es experimentell schwierig sei, zwischen Elektronen- und Ionenleitung zu unterscheiden und häufig Irrtümer in der Einschätzung vorkamen, welcher Leitungstyp vorliege.⁴²

³⁸ Grüneisen, *Metallische Leitfähigkeit*, 1928, S. 60-64; Wilson, *Electronic Semi-Conductors I*, 1931, S. 460-461.

³⁹ Wilson, *Electronic Semi-Conductors I*, 1931, S. 490.

⁴⁰ Gudden, *Elektrizitätsleitung*, 1924, S. 143-144.

⁴¹ Gudden, *Elektrische Leitfähigkeit*, 1934, S. 231. Das Zitat ist eine Zusammenfassung seiner Argumentation von 1930, die er auch 1934 noch im wesentlichen für zutreffend hielt.

⁴² Ebenda, S. 225-227.

Zu Gudden und der Bedeutung der Pohl-Schule für die experimentelle Festkörperphysik siehe Teichmann, *Farbzentrenforschung*, 1988, insb. S. 29-38. Zu Guddens einflußreichen Publikationen auf dem Gebiet der Elektrizitätsleitung in nichtmetallischen Festkörpern zählten insbesondere Gudden, *Elektrizitätsleitung*, 1924 und Gudden, *Lichtelektrische Erscheinungen*, 1928.

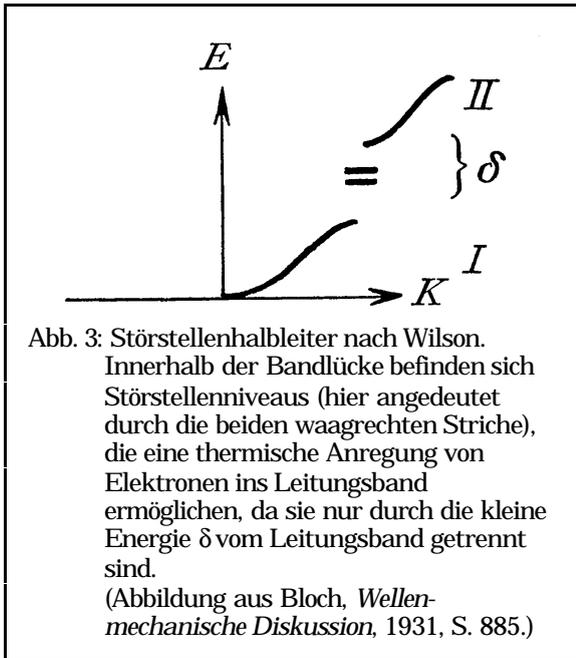


Abb. 3: Störstellenhalbleiter nach Wilson. Innerhalb der Bandlücke befinden sich Störstellenniveaus (hier angedeutet durch die beiden waagrechten Striche), die eine thermische Anregung von Elektronen ins Leitungsband ermöglichen, da sie nur durch die kleine Energie δ vom Leitungsband getrennt sind. (Abbildung aus Bloch, *Wellenmechanische Diskussion*, 1931, S. 885.)

Guddens Skepsis bezüglich der Existenz reiner elektronischer Halbleiter war Wilson erst nach seinem ersten Vortrag in Leipzig zu Ohren gekommen. In einem wenige Monate später stattfindenden Kolloquium, zu dem sich auch Gudden mit einigen Mitarbeitern angemeldet hatte, ging er daher auf die Rolle der Verunreinigungen detailliert ein. Er entwarf ein Modell, bei dem Störatome diskrete Elektronenniveaus innerhalb der verbotenen Zone bilden können, und dadurch halbleitende Eigenschaften aufweisen. Heute ist dieser Fall als Störstellenhalbleiter bekannt (siehe Abb. 3).⁴³ Von der theoretischen Seite her schien die Situation damit prinzipiell geklärt, doch blieb die Frage offen, ob reine Materialien ohne Störstellen auch Halbleitereigenschaften aufweisen würden. Das bezweifelten nicht nur Experimentalphysiker wie

Bernhard Gudden, sondern auch führende Theoretiker wie Wolfgang Pauli. Der schrieb in seiner bekannten drastischen Art an seinen Assistenten Peierls im September 1931:

„Über Halbleiter soll man nicht arbeiten, das ist eine Schweinerei, wer weiß ob es überhaupt Halbleiter gibt.“⁴⁴

In Anbetracht der Gesamtsituation war Paulis Äußerung keinesfalls völlig unbegründet. Zwar schien das theoretische Modell die Existenz von Eigenhalbleitern zu ermöglichen, aber Wilson hatte sich bei seinen Rechnungen auf Elementkristalle aus gleichen Atomen beschränken müssen und erwartete nicht, die Theorie auf Verbindungen unterschiedlicher Elemente unverändert übernehmen zu können.⁴⁵ In einem Überblick über die „Elektrische Leitfähigkeit elektronischer Halbleiter“ listete Gudden im Gegensatz dazu aber nur Verbindungen in der Klasse der möglichen Halbleiter auf und vertrat die explizite Ansicht: „Metalle wie Graphit, Silizium, Titan, Zirkon usw. sollten nun wirklich nicht mehr mit den elektronischen Halbleitern in einen Topf geworfen werden“.⁴⁶

⁴³ Wilson, *Electronic Semi-Conductors II*, 1931.

Hoddeson/Baym/Eckert, *Electron Theory*, 1992, S. 122-123.

⁴⁴ Pauli an Peierls, 29. Sept. 1931, in: Pauli, *Briefwechsel II*, 1985, Nr. 287, S. 94.

Paulis Bemerkung bezieht sich auf einen Brief von Peierls vom 4. Aug. 1931, der nicht erhalten ist, und ist daher nicht sicher zuzuordnen. Es ist aber möglich, daß Peierls in seinem Brief die Ansätze von Wilson referiert und sein eigenes Interesse an der Frage der Halbleiter bekundet hatte und dafür von Pauli gerügt wurde. Denn schon zuvor hatte Pauli sein Mißfallen an Peierls Arbeitsthemen geäußert, als dieser sich mit dem Restwiderstand in Metallen beschäftigt hatte. Pauli äußerte sich dazu: „Erstens halte ich es für schädlich, wenn die (relativ zu mir) jüngeren Physiker sich an die Größenordnungsphysik gewöhnen. Zweitens ist der Restwiderstand ein Dreckeffekt, und im Dreck soll man nicht wühlen. [...] Viertens sollten Sie doch vernünftiger Fragestellungen haben als solche kleinen Problemchen; ich finde, Sie verzetteln sich in letzter Zeit zu sehr mit Kleinigkeiten.“ (Pauli an Peierls, 1. Juli 1931, in: Pauli, *Briefwechsel II*, 1985, Nr. 279, S. 85). Zu einer späteren Gelegenheit äußerte er sich bedauernd über die Tatsache, „... daß Sie immer noch nicht von der Physik des festen Körpers losgekommen sind.“ (Pauli an Peierls, 22. Mai 1933, in: Pauli, *Briefwechsel II*, 1985, Nr. 310, S. 163).

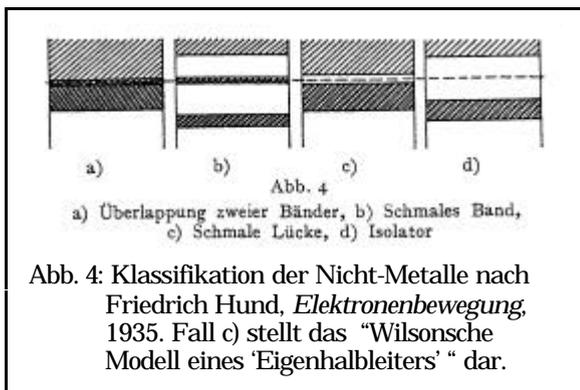
⁴⁵ Wilson, *Electronic Semi-Conductors I*, 1931, S. 490.

⁴⁶ Gudden, *Elektrische Leitfähigkeit*, 1934, S. 231. Bereits zehn Jahre zuvor hatte er beinahe wörtlich die gleiche Ansicht geäußert: „Wie Graphit, so wird man vermutlich auch Si[lizium] und Ti[tan] von der Liste der Halbleiter streichen und sie den eigentlichen Metallen zuordnen müssen.“ (Gudden, *Elektrizitätsleitung*, 1924, S. 143). Im Gegensatz dazu waren aber 1928 Bor, Silizium, Titan, Zirkon, Germanium und Tellur von Emil Grüneisen im Rahmen der experimentellen

Auch Wilson hatte sich zu einer ähnlichen Ansicht (möglicherweise durch Gudden beeinflußt) bekehren lassen. Er schrieb daher in der Einleitung seiner zweiten Arbeit zum Thema elektronische Halbleiter:

„In the first place, there are substances such as silicon which show a negative temperature coefficient in the impure state, but which are good metallic conductors in the pure state and are therefore to be classed as metals. ... Lastly, there are some substances such as germanium which probably belong to both cases. That is, in some modifications they are metallic and in others insulating.“⁴⁷

Als Halbleiter sah Wilson nur Substanzen an, deren elektrischer Widerstand bei höheren Temperaturen kleiner wurde und die im unreineren Zustand besser leiteten. Als Beispiel nannte er lediglich „Kupferoxydul“ (Kupfer(I)Oxid, Cu_2O).⁴⁸ In einer der ersten zusammenfassenden Betrachtungen über die quantenmechanische Elektromechanik der Metalle zog es Peierls daher vor, auf die Materialfrage gar nicht einzugehen.⁴⁹



So bestand Mitte der 1930er Jahre nach wie vor ein Mißverhältnis zwischen theoretischer Beschreibung und experimenteller Evidenz, da einerseits experimentell weder geklärt war, welche Materialien als Halbleiter anzusehen waren, noch ob es Eigenhalbleiter tatsächlich gab. Andererseits konnte die Wilsonsche Bandtheorie der Festkörper auf der 11. Deutschen Physikertagung in Stuttgart im September 1935 von Friedrich Hund, Professor für Theoretische Physik in Leipzig, in fast lehr-

buchartiger Klarheit vorgestellt werden (siehe Abb. 4). Aber auch Hund mochte sich auf die Existenz von Eigenhalbleitern nicht festlegen und betrachtete sie nur als „denkbaren Fall“. ⁵⁰ Gudden ergänzte auf der gleichen Tagung (in einem gemeinsam mit Walter Schottky angekündigten Vortrag): „Für das eben erwähnte einfachste Modell eines elektronischen Halbleiters ist jedoch bisher noch kein Beispiel mit Sicherheit beobachtet.“⁵¹ Andererseits bestand zwischen Experimentatoren und

Ungenauigkeiten zu den Halbleitern gezählt worden (Grüneisen, *Metallische Leitfähigkeit*, 1928, S. 60-64). Bereits 1914 hatte Joh. Königsberger in einer umfassenden Zusammenstellung des experimentellen Materials die Elemente Silizium, Titan, Zirkon, Bor und Tellur als „variable Leiter“ bezeichnet, die sich durch „eine geringe mit der Temperatur und anderen Bedingungen stark variierende Elektronenzahl“ auszeichneten (Königsberger, *Variable Leiter*, 1914, S. 85).

⁴⁷ Wilson, *Electronic Semi-Conductors II*, 1931, S. 277.

Vom heutigen Standpunkt muß man sich über diese Aussagen zur Leitfähigkeit von Silizium wundern, da reines Silizium schlechter leitet als verunreinigtes und sicher nicht als „good metallic conductor“ charakterisiert werden kann. Die experimentellen Unsicherheiten waren aber in den 1930er Jahren noch sehr groß. Zwar hatte Emil Grüneisen 1928 in seinen Handbucharikel eine Reihe von Halbleitern aufgenommen, deren Widerstandskurve über der Temperatur ein Minimum aufwies, doch blieben weitere Unklarheiten. Beispielsweise war bekannt, daß sich diese Kurven in Anwesenheit von kleineren Verunreinigungen vollständig veränderten. Zum anderen lieferten neuere Messungen an Germanium eine Widerstandskurve mit zwei Minima, bei Silizium wurden mehrere Diskontinuitäten gefunden und Titan hatte sich bei tiefen Temperaturen kürzlich als Supraleiter erwiesen. Siehe Grüneisen, *Metallische Leitfähigkeit*, 1928, S. 60-64; Wilson, *Electronic Semi-Conductors I*, 1931, S. 490.

⁴⁸ Ebenda.

⁴⁹ Peierls, *Elektronentheorie*, 1932. Ähnliches gilt für Sommerfeld/Bethe, *Elektronentheorie*, 1933 und Fröhlich, *Elektronentheorie*, 1936.

⁵⁰ Hund, *Elektronenbewegung*, 1935.

⁵¹ Gudden/Schottky, *Ionen- und Elektronenleitung*, 1935, S. 719.

Theoretikern große Einigkeit über den Einfluß von Donatoren und Akzeptoren auf die Leitfähigkeit und über ihre Darstellung im Bändermodell.⁵²

Gudden faßte 1934 zusammen, daß „wir hinsichtlich einer wirklichen Beherrschung der elektronischen Halbleiter noch am Anfang stehen. Das gilt für das Experiment und auch für die Theorie.“ Als Aufgaben formulierte er:

„[D]ie Theorie ... hat die Aufgabe, aus den bekannten Atomenergiewerten und dem Gitterbau Lage und Art der erlaubten und verbotenen Energiezustände des Gitters und damit die Größe der Leitfähigkeit vorherzusagen und nicht nur nachträglich verständlich zu machen. ... Experimentell wird es vor allem nötig sein, wesentlich mehr gesicherte Beobachtungstatsachen beizubringen als das bisher geschehen ist ... Experimentalphysiker und Theoretiker, Chemiker und Physikochemiker werden mehr miteinander als nebeneinander wirken müssen.“⁵³

Dieses Arbeitsprogramm konnte in Deutschland schon wegen der etablierten akademischen Struktur und der damit verbundenen institutionellen Trennung von theoretischer und experimenteller Physik kaum verwirklicht werden. Hinzu kamen die große Wissenschaftsemigration und die zurückgehenden Studierendenzahlen während der 1930er Jahre. Das Jahr 1933 markiert in diesem Sinne in doppelter Hinsicht einen Umbruch. Einerseits waren die Grundlagen der quantenmechanischen Elektronentheorie der Metalle gelegt und in Handbuchartikeln zusammengefaßt, aber es waren noch keine (der von Gudden geforderten) quantitativen Berechnungen von spezifischen Materialien durchgeführt worden.⁵⁴ Andererseits entstanden durch die 1933 einsetzende massenhafte Emigration von Wissenschaftlern in den USA und England neue Zentren der Festkörpertheorie, die sich der Berechnung von konkreten Materialeigenschaften widmeten.⁵⁵

So paßten Mitte der 1930er Jahre die theoretische Beschreibung und die experimentellen Ergebnisse auf dem Halbleitergebiet nur in einzelnen Punkten zueinander. In vielen Bereichen mußten sowohl die experimentellen Daten als auch die theoretischen Berechnungen noch viele Entwicklungsschritte durchlaufen, bevor sich ein einheitliches Bild durchsetzte. Beispielsweise hatten Wilson und andere sofort nach der theoretischen Erklärung eines Halbleiters begonnen, Theorien der Gleichrichtung am Metall-Halbleiter-Kontakt gemäß dem Bändermodell zu entwickeln, waren aber zunächst gescheitert.⁵⁶

⁵² Hund, *Elektronenbewegung*, 1935, S. 729; Gudden/Schottky, *Ionen- und Elektronenleitung*, 1935, S. 719.

Bei Gudden und Schottky findet sich ein Hinweis, daß Peierls die Unterscheidung von Donatoren und Akzeptoren eingeführt habe. Siehe dazu Peierls, *Elektronentheorie*, 1932, S. 319.

⁵³ Gudden, *Elektrische Leitfähigkeit*, 1934, S. 254.

⁵⁴ Siehe beispielsweise Sommerfeld/Bethe, *Elektronentheorie*, 1933. Erste Ansätze auf dem Gebiet der Berechnung spezifischer Materialparameter wurden 1933-1934 von dem ungarischen Physiker Eugene Wigner und seinem Studenten Frederick Seitz in Princeton formuliert und sind heute als die Methode der Wigner-Seitz-Zelle zur Bandstrukturberechnung bekannt. Zur Geschichte der Bandtheorie siehe Hoch, *Band Theory*, 1992.

⁵⁵ Siehe dazu Eckert, *Atomphysiker*, 1993, S. 173-195; Hoddeson/Baym/Eckert, *Electron Theory*, 1992, S. 153-160.

Aber auch ohne die Emigration wäre es in Deutschland kaum zu einer solch engen Kooperation von Experimentatoren, Metallurgen, Chemikern und Theoretikern wie in England und den USA gekommen. Siehe zu diesem Punkt insb. Schweber, *Empiricists Temper*, 1986 und Eckert, *Theoretical Physics*, 1996, S. 69-74.

⁵⁶ Zur Gleichrichtung am Metall-Halbleiter-Kontakt siehe das Kapitel „Die Schottky-Theorie des Metall-Halbleiter-Kontakts“ ab S. 31.

Vorkriegszeit

Kollaborationsverhältnisse

Nachdem die Nationalsozialisten in Deutschland die Macht übernommen hatten, änderten sich auch (und vielleicht insbesondere) an den Hochschulen die Verhältnisse dramatisch. Durch das „Gesetz zur Wiederherstellung des Berufsbeamtentums“ wurden in den ersten Jahren der nationalsozialistischen Herrschaft um die 15% der aktiven Personen des Lehrkörpers an deutschen Universitäten, zumeist Personen jüdischer Abstammung, entlassen, ohne daß es zu nennenswertem Widerstand an den deutschen Hochschulen gekommen wäre.⁵⁷

Die rassistische Gesetzgebung wurde sogar von einem großen Teil der Studierenden freudig begrüßt, die in der frühen Phase des Nationalsozialismus die nationalsozialistische Avantgarde an den Hochschulen darstellten. Nach der Machtübergabe an Hitler, von den Nationalsozialisten selbstbewußt „Machtergreifung“ genannt, erlahmte das politische Interesse der Studierenden aber schnell. So lassen sie sich in ihrer Mehrheit wie die meisten Deutschen weder als eingefleischte Nationalsozialisten noch als radikale Systemgegner charakterisieren. Eher war wohl eine Mischung aus Konsens und Dissens bezeichnend, bei der eine weit verbreitete Unzufriedenheit über einzelne Maßnahmen des nationalsozialistischen Machthaber mit der grundsätzlichen Zustimmung zur nationalsozialistischen Politik einherging.⁵⁸

Auch auf der Seite der Professoren beherrschte Schweigen und Stillhalten das Bild, als wenige Tage nach Inkrafttreten des Gesetzes die ersten jüdischen Professoren entlassen waren und sich wenige Wochen später die Wissenschaftslandschaft in Deutschland radikal geändert hatte. Die Universitäten haben häufig schon 1933 ohne nennenswerten Widerstand und teilweise mit Eifer das „Führerprinzip“ etabliert und sich so „selbst gleichgeschaltet“. Als Begründung für dieses Verhalten der Professoren gilt, daß sie in ihrer Mehrheit der Weimarer Republik stets ausgesprochen skeptisch gegenübergestanden hatte und den neuen Machthabern ambivalent bis zustimmend gesinnt waren. Sie wurden daher auch manchmal die „Totengräber der Republik“ genannt.

„Wenn die ungeliebte Republik nicht gerade durch den Nationalsozialismus abgelöst worden wäre, würde dieses Urteil wohl keinen Anstoß erregen, denn den wenigsten [Professoren] war die Republik ein Gegenstand der Verehrung. Da jedoch politische Optionen von Zeitgenossen der Weimarer Republik heute automatisch unter der Fragestellung, wer verhalf Hitler zur Macht, betrachtet werden, impliziert die Formel ‚Totengräber der Republik‘ den Vorwurf, ‚Schuld‘ am Nationalsozialismus zu tragen, und gerät in besonderen politischen Meinungsstreit und moralische Rechtfertigungszwänge.“⁵⁹

Festzustellen bleibt aber, daß „Widerstand“ an den Universitäten seltener war als in anderen gesellschaftlichen Bereichen.⁶⁰

Die unbeschreiblichen Grausamkeiten und das nicht wieder gutzumachende Unrecht, welches das nationalsozialistische Regime ganzen Bevölkerungsgruppen und halb Europa zugefügt hat, wird immer wieder von der Geschichtsschreibung ein morali-

⁵⁷ Siehe dazu Mommsen, *Beamtentum*, 1966, insb. S. 39-42 und 151-155.

⁵⁸ Siehe dazu die ausführliche Studie zum Thema „Studenten im Dritten Reich“ von Michael Grüttner und Literaturverweise darin (Grüttner, *Studenten*, 1995).

⁵⁹ Vogel, *Anpassung und Widerstand*, 1991, S. 18.

⁶⁰ Siehe zur Begründung und Erläuterung die Analyse von Barbara Vogel zum Verhältnis der Hochschullehrer zum Staat und Literaturverweise darin (Vogel, *Anpassung und Widerstand*, 1991). Zur Selbst-Gleichschaltung siehe auch Reimann, *Selbst-Gleichschaltung*, 1984.

sches Urteil abverlangen. Das gilt selbstverständlich auch für die Wissenschafts- und Technikgeschichtsschreibung des Nationalsozialismus.⁶¹ In einem der besten Bände zu diesem Thema heißt es daher in der Einleitung programmatisch:

„When the Allies won the Second World War in 1945, they had defeated a criminal National Socialist regime which had murdered, enslaved and oppressed other peoples in the name of German racial superiority. The incomprehensible horror remains. A moral judgment is still required for the historical examination of National Socialism.“⁶²

Doch aufgrund welcher Kriterien kann ein Urteil gefällt werden? Nur wenige haben sich eindeutig vorbildhaft oder eindeutig verurteilenswert verhalten. Die meisten Deutschen standen dem Nationalsozialismus ambivalent gegenüber.

Die wenigen Ausnahmen sind immer wieder hervorgehoben worden. Das gilt insbesondere für den Nobelpreisträger James Franck, der seine Professur in Göttingen niederlegte, um gegen die neue Beamtengesetzgebung öffentlich zu protestieren, und sich somit entschieden gegen den Nationalsozialismus stellte.⁶³ Auf der anderen Seite sind Johannes Stark und Philipp Lenard, ebenfalls Nobelpreisträger, zu nennen, die sich als prominente Vertreter der „Deutschen Physik“ gegen den „jüdischen Geist in der Physik“ einen Namen und ein Profil in der Befürwortung des Nationalsozialismus geschaffen haben.⁶⁴ Bei diesen wenigen ließe sich eine moralische Bewertung möglicherweise noch vornehmen.

Schwieriger erscheint es aber schon bei Persönlichkeiten wie Werner Heisenberg, die während der Zeit des Nationalsozialismus zunächst unter Druck gerieten, dann aber in exponierter Stellung mit Staat und Partei kollaboriert haben.⁶⁵ Ein noch größeres Problem ergibt sich bei denjenigen, die einerseits nicht als bedeutende Wissenschaftler zum Zeitpunkt der Machtergreifung 1933 im Lichte der Öffentlichkeit standen, und andererseits weder als engagierte Nationalsozialisten noch als Gegner des Regimes aufgefallen sind. Zu dieser Personengruppe gibt es selten geeignete Quellen, und darüber hinaus waren ihre Handlungsalternativen durch Zwänge wie den Erwerb des Lebensunterhalts stärker eingeschränkt als bei international renommierten Wissenschaftlern, denen im Falle der Emigration ein Auskommen im Ausland sicher war.

Die vier Hauptpersonen dieser Arbeit gehören der letztgenannten Gruppe an. Sie standen 1933 am Anfang ihrer wissenschaftlichen Karriere. Als sogenannte „arische Deutsche“ konnten sie nach 1933 größtenteils unbehelligt studieren und ihre Abschlüsse machen. Dafür war es natürlich notwendig, daß sie mit dem nationalsozialistischen System kollaborierten.

„Notwendig steht jeder in Kooperationsverhältnissen und jeder ist an ihrer Herstellung und Erhaltung beteiligt. Auch ein diktatorisches politisches System mit weitgreifenden Monopolansprüchen ist auf Kooperationsverhältnisse angewiesen,

⁶¹ Zur Wissenschafts- und Technikgeschichte des Nationalsozialismus liegen mittlerweile eine beachtliche Anzahl von Studien vor. Hier kann nur auf wenige verwiesen werden. Die Sammelbände Renneberg/Walker, *Science, Technology*, 1994 und Meinel/Voswinkel, *Medizin, Naturwissenschaft, Technik*, 1994 geben mit den in ihnen enthaltenen Aufsätzen einen Überblick über den Forschungsstand. Für die Physik im Nationalsozialismus stellen Beyerchen, *Scientist under Hitler*, 1977 und Walker *Uranmaschine*, 1990 grundlegende Werke dar. Hentschel, *Physics*, 1996 gibt einen Überblick über den Forschungsstand zur Physik im Nationalsozialismus und bietet neben einer Sammlung von Quellen ausgezeichnete Kurzcharakterisierungen von wichtigen Personen und Institutionen sowie ein umfangreiches Literaturverzeichnis. Zur Technik im Nationalsozialismus ist immer noch Ludwig, *Technik*, 1974 die beste und umfassendste Darstellung.

⁶² Renneberg/Walker, *Scientists and Engineers*, 1994, S. 12.

⁶³ Siehe zum Beispiel Beyerchen, *Scientist under Hitler*, 1977, insb. S. 15-19; Mehrtens, *Kollaborationsverhältnisse*, 1994, S. 21-22; Wolff, *Vertreibung und Emigration*, 1993, S. 268.

⁶⁴ Siehe dazu zum Beispiel ebenda, S. 79-167 und Walker, *Nazi Science*, 1995, S. 5-56.

⁶⁵ Eine differenzierte Darstellung, die auf eine moralische Bewertung weitgehend verzichtet aber Heisenbergs Ambivalenz zum Nationalsozialismus deutlich zeigt, gibt Cassidy, *Heisenberg*, 1995. Beinahe ein Widerstandskämpfer gegen Hitler ist er bei Powers, *Heisenberg's War*, 1993.

die nicht von ihm alleine produziert werden. Und angesichts einer politischen Macht wie dem Nationalsozialismus, kann man durchaus von ‚Kollaborationsverhältnissen‘ sprechen - mit dem politischen-moralischen Anklang, daß die Alternative zur Kollaboration die Resistenz, der Widerstand ist, wenn auch nicht unbedingt allein im pathetischen Sinne einer Widerstandsbewegung.“⁶⁶

Auch Mataré, Seiler, Spenke und Welker standen in solchen Kollaborationsverhältnissen mit dem System. Jeder auf seine Weise. Sie haben getan, was sie als nötig empfanden und es wie die meisten Wissenschaftler als „unpolitisch“ beurteilt. „Unpolitisch“ ist dabei aber eine Kategorie, die Veränderungen unterworfen ist. Während es vor dem ersten Weltkrieg als „unpolitisch“ galt, die Politik des Kaisers zu unterstützen, galt danach die Opposition gegen die Weimarer Republik einem Großteil der Wissenschaftler als „unpolitisch“. Mit der Machtergreifung wurden die Wissenschaftler auf die Probe gestellt und arrangierten sich bald. Die meisten Wissenschaftler verhielten sich auch nach 1933 der neuen Regierung gegenüber als staatstreue, loyale Beamte.⁶⁷

Es muß immer wieder betont werden, daß es Handlungsalternativen gegeben hat, und daß der Einsatz „im Dienste der Wissenschaft“ nicht automatisch ein Einsatz für das moralisch Gute war. Denn „in der und für die Wissenschaft hat man die unmenschliche Ausgrenzung und Vertreibung hingenommen und damit einen entscheidenden Schritt in das NS-System und seine destruktive Dynamik hinein getan.“⁶⁸ Allerdings gibt es kaum ein Beispiel für Physiker, die von den Naziregelungen nicht betroffen waren und trotzdem öffentlich protestierten oder emigrierten.⁶⁹ Die überwiegende Mehrheit kollaborierte, obwohl alle sehr deutlich sehen konnten, wie ihre jüdischen Kollegen aus ihren Stellen vertrieben wurden. Denn: „Ein unverhältnismäßig hoher Prozentsatz von Physikern in Deutschland waren Juden. Bis 1935 war bereits jeder vierte Physiker aus Deutschland aus seiner Stellung vertrieben.“⁷⁰

Es muß an dieser Stelle betont werden, daß das Verhalten der Mehrheit der Physiker (und wohl auch der Deutschen) hier nicht entschuldigt werden soll. Aber eine Schuldzuweisung an einzelne scheint auch nicht der richtige Weg zu sein.

„There will be no simple and no complete answer to the question of how all this could happen. We will not find an explanation bringing full relief, and we should certainly not seek it by ascribing responsibility and guilt to selected individuals. Most important are the questions themselves and the careful discussion of partial explanations. Such questions and explanations concern not only history and not only Germany, but the present and the future, everywhere.“⁷¹

⁶⁶ Mehrtens, *Kollaborationsverhältnisse*, 1994, S. 16.

⁶⁷ Walker, *Uranmaschine*, 1990, S. 15; Mehrtens, *Kollaborationsverhältnisse*, 1994, S. 21.

⁶⁸ Mehrtens, *Kollaborationsverhältnisse*, 1994, S. 21.

⁶⁹ Siehe Wolff, *Vertreibung und Emigration*, 1993. Stefan Wolff arbeitet an einer umfassenden Darstellung zu Vertreibung und Emigration von Physikern durch den Nationalsozialismus. Ihm sind von wenigen nicht gut recherchierbaren Ausnahmen abgesehen keine Beispiele von Physikern bekannt, die in Protest gegen den Nationalsozialismus ihre Ämter niederlegten oder emigrierten, ohne direkt von der nationalsozialistischen Ausgrenzung betroffen gewesen zu sein (Wolff, pers. Mitteilung, 9. Juni 1998).

Selbst der vielzitierte James Franck war als Jude persönlich vom Beamtengesetz betroffen und nur durch Ausnahmeregelungen noch verschont. Er wäre aber als Nicht- „Reichsbürger“, nach der Definition des „Reichsbürgergesetzes“ vom 15. Sept. 1935, spätestens am 30. Sept. 1935 beurlaubt und spätestens zum Ende des Jahres entlassen worden. (Beyerchen, *Scientists under Hitler*, 1977, S. 15-19; Mehrtens, *Kollaborationsverhältnisse*, 1994, S. 21-22; zu den Gesetzen und Verordnungen siehe Walk, *Sonderrecht*, 1996, S. 12, 127, 134 und 144).

⁷⁰ Walker, *Uranmaschine*, 1990, S. 19-20.

⁷¹ Mehrtens, *Mathematics at War*, 1996, S. 120.

Daher sollen im folgenden die Bedingungen des individuellen Handelns in ihrem jeweiligen Kontext bestimmt werden, ohne moralisch entlang einer „gut-böse“ Unterscheidung zu urteilen.⁷²

Heinrich Welker

Welker war 1931 im Alter von 19 Jahren als Kind eines mittleren Reichsbahn-Beamten von seiner Geburtsstadt Ingolstadt nach München gekommen, um Mathematik und Physik für das höhere Lehramt zu studieren. Seine Eltern waren von dieser Entscheidung zunächst nicht begeistert, zumal sie das Studium finanzieren mußten und in der Familie bisher nur studiert worden war, um katholischer Pfarrer zu werden. Welkers Eltern selbst hatten keine höhere Schulbildung und gaben ihre Einwilligung zum Studium nur, da Welker in der Schule gut genug war, um die „Anwartschaft auf die Anstellung an höheren Schulen“ zuerkannt zu bekommen. Damit war ihm nach Abschluß des Studiums eine Stelle als Lehrer sicher. Zusätzlich konnte Welker mit Hinweis auf den Verdienst seines Vaters eine teilweise Hörengeldebefreiung ab dem 2. Semester erreichen.⁷³

Anfangs besuchte er neben mathematischen Vorlesungen die Veranstaltungen des Münchner Experimentalphysikers Walther Gerlach. Erst ab seinem dritten Semester kamen Veranstaltungen der Theoretiker Leo Graetz (Extraordinarius) und Arnold Sommerfeld (Ordinarius) hinzu.⁷⁴ Intensive Beziehungen zu Sommerfeld entwickelten sich in Welkers sechstem Semester, als Sommerfeld ihn bat, die Vorlesung über die „Maxwellsche Theorie“ auszuarbeiten. Welker „fertigte nach dieser Vorlesung eine Niederschrift an, ... und diese Ausarbeitung bildete die Grundlage für sein [Sommerfelds] Buch über Elektrodynamik.“⁷⁵ Im folgenden Semester wählte Welker auch Sommerfeld als den Betreuer seiner Staatsarbeit.

„Ich wollte mir zunächst eine Zulassungsarbeit fürs Examen von den Mathematikern geben lassen, und die waren schon voll besetzt. Dann ging ich zu Sommerfeld, und der war eben nicht voll besetzt. Ja, aus gewissen Gründen, denn seine Zulassungsarbeiten scheinen doch wesentlich schwieriger zu sein, als die der Mathematiker oder anderer Professoren. Und da kam ich eben gut an, er gab mir im Zusammenhang mit der Relativitätstheorie ein Thema.“⁷⁶

Danach wurde Welker Studienreferendar an einer Schule. Er ließ sich aber trotzdem von Sommerfeld ein Promotionsthema geben, der im auftrag, die Frage zu klären, warum die Feinstrukturkonstante den Wert $\alpha = 1/137$ hat. Schon bald mußte er sich allerdings ein anderes Thema suchen, da sich dieses Problem, das bis heute ungelöst ist, nicht als geeignet für eine Doktorarbeit erwies.⁷⁷

Letztlich schrieb Welker über „Allgemeine Koordinaten und Bedingungsgleichungen in der Wellenmechanik“ und erinnerte sich, daß er Schwierigkeiten hatte, Sommerfeld die Ergebnisse des wellenmechanischen Formalismus nahezubringen:

⁷² Gelungene Beispiele für dieses Vorgehen stellen die biographischen Studien zum Physiker Werner Heisenberg und zum Astronomen Otto Heckmann dar (Cassidy, *Heisenberg*, 1995; Hentschel/Renneberg, *Heckmann*, 1995). Im folgenden kann allerdings wegen der teilweise unbefriedigenden Quellenlage nicht in solchem Detail auf die Lebenswege von Mataré, Seiler, Spenke und Welker eingegangen werden.

⁷³ Die „Höregeldpflicht“ variierte in den folgenden Jahren von 0 bis 40% des normalen Hörengeldes. (Siehe Studienbuch Heinrich Welker, Korrespondenz Teichmann, DM-Archiv)

⁷⁴ In späteren Semestern kamen auch Veranstaltungen bei den Dozenten Kirchner, Scherzer und Bechert hinzu.

⁷⁵ Welker-Interview 1981, S. 10.

⁷⁶ Ebda., S. 9.

⁷⁷ Zur gleichen Zeit waren mehrere andere Versuche von namhaften Physikern gescheitert, den Wert der Feinstrukturkonstanten theoretisch zu bestimmen. Ernsthafte physikalische Bemühungen wurden zusätzlich von den Zahlenspielerien des englischen Physikers Arthur S. Eddington diskreditiert (siehe dazu Sigurdsson, *Physics, Life*, 1996, S. 57-60).

„Ich hatte meine liebe Mühe mit dem alten Papa Sommerfeld, ihm das klarzumachen, daß das in ganz neue Betrachtungen hineinführt, daß garnicht in der Wellenmechanik herauskommen muß, was man klassisch erwarten würde, sondern daß da Zusatzglieder auftreten und so weiter.“⁷⁸

Nach Abschluß dieser Arbeit im Jahre 1936 wurde Welker Assistent bei Sommerfeld und wählte sich zur Habilitation ein Thema aus dem Bereich der Elektronentheorie der Metalle. Diese war am Sommerfeldschen Institut seit 1927 das Paradebeispiel für die Anwendung der Quantenmechanik gewesen. Trotz ihres großen Erfolgs in vielen Bereichen war das Problem der Supraleitung bisher noch nicht einmal ansatzweise gelöst. So formulierte der mittlerweile emigrierte Sommerfeldschüler Herbert Fröhlich am Ende der Einleitung seiner umfassenden und von Welker später häufig zitierten Darstellung der quantenmechanischen Elektronentheorie der Metalle:

„Das wichtigste ungelöste Problem ist die Supraleitfähigkeit. Zu ihrer Behandlung fehlt gegenwärtig noch jede Grundidee. Es ist aber zu hoffen, daß auch dieses Problem im Rahmen der allgemeinen Grundlagen der Metalltheorie gelöst werden kann.“⁷⁹

Ähnliche Bemerkungen finden sich auch in anderen zusammenfassenden Darstellungen zu Elektronentheorie der Metalle, so daß Welker den Entschluß faßte, dieses Problem anzugehen.⁸⁰

Inzwischen hatten die Nationalsozialisten in Deutschland die Macht übernommen und viele Kollegen Welkers aus München und Deutschland vertrieben. An die „nationalsozialistischen sogenannten Studentenkrawalle“ des Jahres 1932 erinnerte sich Welker lebhaft. Das waren seiner „Meinung nach gar keine Studenten“, die beispielsweise die Veranstaltungen des jüdischen Staatsrechtlers Hans Nawiasky in München gestört hatten. Welker selbst hatte aber offenbar unbeeindruckt von den teilweise dramatischen Veränderungen an der Hochschule weiter studiert und später auch seine Doktorarbeit beendet.⁸¹

Sommerfeld war allerdings seit dem Inkrafttreten des „Gesetzes zur Wiederherstellung des Berufsbeamtentums“ am 7. April 1933 damit beschäftigt, seinen als „nicht arisch“ eingestuften Schülern und Kollegen Berufsmöglichkeiten im Ausland und damit die Möglichkeit zur Emigration zu schaffen.⁸² Die ganze Situation hat ihn offenbar sehr belastet. Welker erinnert sich:

„Sehr viel hat man in der Sommerfeldvorlesung nicht gemerkt. Aber irgendwie muß das Ganze den Sommerfeld furchtbar mitgenommen haben, denn er wurde gegen Ende eines Sommersemesters krank und mußte die Vorlesung abbrechen.“⁸³

⁷⁸ Welker-Interview 1981, S. 12. Siehe auch Welker, *Allgemeine Koordinaten*, 1936.

⁷⁹ Fröhlich, *Elektronentheorie*, 1936, S. 2.

⁸⁰ Siehe zum Beispiel auch Sommerfeld/Bethe, *Elektronentheorie*, 1933, worin Bethe seiner Überzeugung Ausdruck gab, „daß sich die Supraleitung auf Grund unserer heutigen quantenmechanischen Kenntnisse erklären lassen muß.“ [Hervorhebung in Original].

Zum Problem Elektronentheorie der Metalle und Supraleitung siehe Hoddeson/Baym/Eckert, *Electron Theory*, 1992, S. 140-153. Zu Welkers Theorie der Supraleitung von 1938-1939 siehe Handel, *Historische Entwicklung*, 1994, S. 44-46.

⁸¹ Welker-Interview 1981, S. 8. Zur Universität München in den ersten Jahren des Dritten Reiches siehe Böhm, *Selbstverwaltung zum Führerprinzip*, 1995.

⁸² Siehe dazu Eckert, *Atomphysiker*, 1993, S. 147-172.

⁸³ Welker-Interview 1981, S. 14. Welker erinnert sich, daß er zu diesem Zeitpunkt eine Vorlesung zur Quantenmechanik bei Sommerfeld hörte. Wenn das stimmt, wäre das im Sommersemester 1934 gewesen. Nach Welkers Studienbuch hat er im Sommersemester 1933 „Mechanik der Kontinua“ bei Sommerfeld gehört und erst im Sommersemester 1934 etwas zur Quantenmechanik (Studienbuch Welker, Korrespondenz Teichmann, DM-Archiv).

Aber an Sommerfelds Institut selbst hatten nach Welkers Erinnerung die Nazi-Gegner immer die Oberhand, zu denen er sich auch selbst von Anfang an zählte.⁸⁴ Im Widerspruch dazu war Welker in seiner Zeit als Studienreferendar Mitglied des Nationalsozialistischen Lehrerbundes (NSLB) geworden, aber im August 1938 wegen „Berufsaufgabe“ wieder ausgetreten.⁸⁵ Von 1934 bis 1939 war er auch als „SA-Student“ registriert und somit Mitglied einer einflußreichen und radikalen nationalsozialistischen Organisation, in der er aber nicht durch besondere Aktivitäten hervorgetreten ist.⁸⁶

Die SA war im Frühjahr 1934 zur einflußreichsten Parteiformation an den Hochschulen geworden. Mitgliederquoten von um die 50% aller männlichen, sogenannten „arischen“ deutschen Studenten waren keine Seltenheit. Die SA-Hochschulämter organisierten politische Schulungen und vormilitärische Trainingsstunden, die den Studenten ein Engagement von 10 bis 25 Stunden pro Woche abverlangten, so daß diese kaum noch Zeit zum Studieren hatten. Die SA-Veranstaltungen waren aber für die Studenten nicht sonderlich attraktiv, der Kasernenhofton der SA-Führer kam nicht gut an, und die „politischen Ausbilder“ füllten, nach Meinung des Münchner Studentenführers, die Zeit mit „mehr oder weniger leeren Phrasen“ aus.⁸⁷

Die Münchner Studenten fingen im Juni 1934 an, gegen die Verhältnisse zu rebellieren, da unter der hohen zeitlichen Belastung von Pflichtveranstaltungen für die Fachschaften, der Studentenführung und der SA kein ordnungsgemäßes Studium möglich war. Die Rebellion verstummte zeitgleich mit der Entmachtung der SA durch den „sogenannten ‚Röhm-Putsch‘ vom 30. Juni 1934, der in der Bevölkerung vielfach als Beweis interpretiert wurde, daß Hitler bereit sei, auch gegen ‚Mißstände‘ in den eigenen Reihen unerbittlich vorzugehen.“⁸⁸ Als Folge der Reorganisation der SA wurden im Oktober 1934 die SA-Hochschulämter aufgelöst. Die Belastung der Studenten sank damit erheblich.⁸⁹

Welker hat sich innerhalb der SA in keiner herausragenden Weise betätigt. Worin seine Aktivitäten genau bestanden, ließ sich nicht ermitteln.⁹⁰ Aufgrund der Unterlagen ist es aber wahrscheinlich, daß Welker als passiver Student im Frühjahr 1934 in die SA eingetreten ist, als alle „arischen“ deutschen Studenten, „durch ein Schreiben des Reichsinnenministers und durch entsprechende Anordnungen der Kultusministerien verpflichtet [wurden], künftig beim SA-Hochschulamt eine Ausbildung zu absolvieren“.⁹¹ Später ist er wohl aus Opportunismus zunächst weiter darin geblieben. Von 1937, als die Mitgliedschaft in der NSDAP wieder möglich wurde, bis 1939 war Welker sogar Anwärter auf die Mitgliedschaft in der NSDAP, ohne aber jemals einzutreten.

Dies mag mit den Vorgängen am Sommerfeld-Institut in Zusammenhang stehen. Denn Welkers wissenschaftliche Ausrichtung und Spezialisierung in theoretischer Physik brachte ihn trotz Zugehörigkeit zu nationalsozialistischen Organisationen in Konflikt mit den ideologischen Vorkämpfern des Nationalsozialismus - zunächst nur

⁸⁴ „Also, ich haßte das 3. Reich von Anfang an. Es hat bei mir nie eine andere Phase gegeben - ich hab' es nie fertiggebracht irgendwelche Sympathien für das Dritte Reich zu entwickeln.“ (Welker-Interview 1981, S. 20).

⁸⁵ Welkers Mitgliedskarte des NSLB im BA-BDC.

⁸⁶ Siehe Welkers „Spruchkammerbescheid“ in LMU E-II-N Welker.

⁸⁷ Grüttner, *Studenten*, 1995, insb. S. 245-260. Zitat auf S. 252.

Siehe auch Hentschel, *Physics*, 1996, S. xxxix-xlvi.

⁸⁸ Ebenda, S. 257-258.

Zum „Röhm-Putsch“ und den „wirklichen“ Motiven Hitlers für eine Entmachtung der SA siehe ausführlich Longerich, *Braune Bataillone*, 1989, S. 206-224.

⁸⁹ Ebenda, S. 260.

⁹⁰ Eine Mitgliedskarte Welkers von der SA gibt es im *Berlin Document Center* nicht. Seine Mitgliedskarte des NSLB weist bis August 1938 keine „Betätigung in der NSDAP - SA -HJ - BdM - Luftschutz usw.“ aus (siehe BA-BDC).

⁹¹ Grüttner, *Studenten*, 1995, S. 252.

mittelbar, aber ab Ende 1939 auch unmittelbar. Denn das Sommerfeld-Institut war als Vertreter der modernen Theoretischen Physik stets ein Dorn im Auge der nationalsozialistisch ausgerichteten „Deutschen Physik“. Als im Jahre 1935 Sommerfelds Emeritierung anstand, wurde der Vorschlag, mit Werner Heisenberg Sommerfelds Wunsch Kandidaten für seine Nachfolge zu berufen, ordnungsgemäß auf den Weg gebracht. Doch die Vertreter der „Deutschen Physik“, Johannes Stark und Philipp Lenard, entfesselten eine öffentliche Kampagne, um Heisenbergs Berufung zu durchkreuzen, indem sie Heisenberg als einen „theoretischen Formalisten“ beschimpften, der „Geist vom Geiste Einsteins“ sei. Die Diskussion um die Nachfolge Sommerfelds weitete sich so zu einer machtpolitischen Angelegenheit innerhalb der unterschiedlichen Nazi-Organisationen aus, an deren Ende die „Deutsche Physik“ einen Pyrrhussieg feierte. Mit dem Aerodynamiker Wilhelm Müller wurde zwar im Dezember 1939 ein zuverlässiger Nationalsozialist zum Nachfolger Sommerfelds berufen, aber von moderner theoretische Physik verstand dieser so wenig, daß sich auch praktisch ausgerichtete Industriephysiker und die *Deutsche Physikalische Gesellschaft* offiziell über diese Art Berufungspolitik beschwerten.⁹² In einem Memorandum zur „Gefährdung des Physikernachwuchses“, das auch von der *Deutschen Physikalischen Gesellschaft* verbreitet wurde, äußerte sich der bekannte Aerodynamiker Ludwig Prandtl:

„Für eine Ausbildung des technischen Physikernachwuchses ist die Kenntnis von den Arbeiten der theoretischen Physiker schlechthin unentbehrlich. Es sollte also nichts unversucht bleiben, an den Hochschulen dieses entscheidende Grundfach durch eine sachgemäße Personenauswahl zu fördern. Statt dessen geschieht leider das Gegenteil. ... Der schlimmste Fall ist ohne Zweifel die Berufung des Herrn W. M. als Nachfolger des weltberühmten theoretischen Physikers an der Universität München A. Sommerfeld. Die Berufung dieses Mannes muß als völlig sinnlos angesehen werden, wenn man nicht etwa den Sinn darin sehen will, daß zerstört werden soll. Herr M. bringt für die theoretische Physik nichts, aber auch rein gar nichts.“⁹³

Solange die Diskussion um seine Nachfolge anhielt, hatte Sommerfeld selbst sein Amt vertretungsweise ausgeübt und Welker konnte als sein Assistent anscheinend uneingedrückt seinen Forschungen zur Supraleitung nachgehen, die er auf dem *Deutschen Physiker- und Mathematikertag* im September 1938 in Baden-Baden erstmals der wissenschaftlichen Öffentlichkeit vorstellte.⁹⁴

Wenn diese Theorie auch nicht die vollständige Lösung des Problems der Supraleitung darstellte, so wurde sie doch als ein Schritt in die richtige Richtung angesehen und zunächst viel diskutiert.⁹⁵ Auch Sommerfeld fand, „dass Dr. Welker soeben eine wie ich glaube bedeutsame Arbeit abgeschlossen hat, die er als Grundlage für den Dr. habil. bei der Fakultät einzureichen im Begriffe steht.“ Diese Tatsache nutzte er auch, um bei der Fakultät die Verlängerung von Welkers Amtszeit als ordentlicher Assistent um zwei Jahre zu beantragen, da eine Entscheidung über seine Nachfolge im Sommer 1939 immer noch nicht getroffen war.⁹⁶ Da die Dozentenschaft gegen die Verlängerung von Welkers Amtszeit nichts einzuwenden hatte, wurde er neu vereidigt und war somit für weitere zwei Jahre bei der Universität angestellt.⁹⁷

⁹² Zur Diskussion um die Nachfolge Sommerfelds siehe ausführlich Cassidy, *Heisenberg*, 1995, S. 426-507. Zur Auseinandersetzung um die „Deutsche Physik“ und der Initiative von Carl Ramsauer siehe Eckert, *Atomphysiker*, 1993, S. 198-206 und Walker, *Uranmaschine*, 1990, S. 92-101.

⁹³ Aus einer Denkschrift von Ludwig Prandtl zur „Gefährdung des Physikernachwuchses“, 1941, abgedruckt u.a. in Ramsauer, *Eingabe an Rust*, 1947.

⁹⁴ Siehe dazu einen der beiden wortgleichen Berichte Welker, *Elektronentheoretisches Modell (Phys. Zeit.)*, 1938 und Welker, *Elektronentheoretisches Modell (Tech. Phys.)*, 1938.

⁹⁵ Diskussionen finden sich im Briefwechsel Welkers, HWD 006 und im Anhang an die beiden Berichte Welker, *Elektronentheoretisches Modell (Tech. Phys.)* sowie *(Phys. Zeit.)*, 1938.

⁹⁶ Sommerfeld an den Rektor, 17. Juli 1939, HWD 005.

⁹⁷ Dozentenschaft an Rektor, 2. August 1939, HWD 005; Niederschrift über die Vereidigung der Beamten des Instituts für theoretische Physik der Universität München, 11. Nov. 1939, LMU E-II-N Welker.

Zur gleichen Zeit bat Welker um die Zulassung zu einem Dozentenlager des NS-Dozentenbundes, in dem zukünftigen Dozenten und Professoren die nationalsozialistische Ideologie vermittelt werden sollte. Ohne Teilnahme an einem solchen Lager konnte Welker keine Lehrbefugnis bekommen. Somit war die von ihm angestrebte Hochschulkarriere nicht möglich.⁹⁸

Obwohl Anträge auf Erteilung der Lehrbefugnis noch im November gestellt wurden, änderte sich die Situation mit der Berufung von Wilhelm Müller als Sommerfelds Nachfolger zum 1. Dezember 1939 völlig. Welker hat danach weder an einem Dozentenlager teilgenommen noch die Lehrbefugnis erhalten, durfte sich aber als Dr. habil. bezeichnen.⁹⁹ Zum 1. April 1940 wechselte er daraufhin in die Kriegsforschung.¹⁰⁰ Auch Welkers Kollegen vom Sommerfeld-Institut hatten ihre Tätigkeitsfelder zum Teil schon früher gewechselt und das Institut verlassen, so daß von dem florierenden Betrieb der früheren Jahre nach der Übernahme von Müller nichts mehr übrig war.

Karl Seiler

Karl Seiler wurde im Mai 1910 als Sohn eines Kaufmanns in Schorndorf (Württemberg) geboren und war nach Abschluß der Realschule in Stuttgart ein Jahr als Mechanikerlehrling bei der *Robert Bosch AG* tätig, bevor er sich entschloß, das Abitur zu machen. 1929 nahm er das Studium der Physik und Mathematik für das höhere Lehramt an der Technischen Hochschule Stuttgart auf.

Dort studierte er unter anderem bei dem Sommerfeldschüler Peter Paul Ewald, der seit 1921 in Stuttgart lehrte und 1933 gewählter Rektor der Hochschule war. Nach dem Inkrafttreten des „Berufsbeamtengesetzes“ legte Ewald diese Position nieder, da es ihm, wie er seinem Freund Sommerfeld schrieb „nicht möglich ist, in der Rassenfrage den Standpunkt der nationalen Regierung zu teilen.“¹⁰¹ Ewald war zwar wie James Franck jüdischer Abstammung, aber ebenfalls durch Sonderregelungen geschützt. Er blieb noch einige Jahre in seinem Amt als Professor, bevor er 1937 nach England und nach dem Krieg in die USA emigrierte.¹⁰² In Stuttgart setzte sich mit der Ernennung eines nationalsozialistischen Rektors in Nachfolge Ewalds das „Führerprinzip“ und die „Arisierung“ der Studenten- und Professorenschaft zügig durch.¹⁰³

Da Staatsexamenskandidaten nicht alle ihre Veranstaltungen an der Technischen Hochschule Stuttgart belegen durften, sondern zwei Semester in Tübingen verbringen mußten, war Seiler 1932/33 in Tübingen und lernte dort Hans Bethe kennen, der gerade als Dozent in Tübingen war und eine Einführung in die Wellenmechanik gab, an die sich Seiler gut erinnerte. Insbesondere war er sehr beeindruckt von der Tatsache, daß Bethe sich mit ihm „als dummen Studenten“ eine derartige Mühe gemacht hatte und ihm „Nachmittage lang ... die ganze Wellenmechanik erklärte“.¹⁰⁴

Bethe hatte 1928 bei Sommerfeld in München mit einem Thema zur Elektronentheorie der Metalle promoviert und 1930 dort auch habilitiert. Danach hatte er sich mit immer schlecht bezahlten Dozentenstellen und Studienaufenthalten durchge-

⁹⁸ Welker an die Naturwissenschaftliche Fakultät, 19. Juli 1939, LMU E-II-N Welker. „Beriff: Teilnahme am Reichslager für Beamte in Bad Tölz
Ich bitte um Zulassung zum ersten Lehrgang im Jahre 1940 des Reichslagers für Beamte in Bad Tölz.
Heil Hitler!
Dr. Heinrich Welker“.

⁹⁹ Welker-Interview 1981, S. 23-24.

¹⁰⁰ Siehe dazu das Kapitel „Germaniumdetektoren“ ab S. 74.

¹⁰¹ Ewald an Sommerfeld u.a., 20. April 1933, nach der online Edition des Sommerfeld-Briefwechsels, hg. von Michael Eckert und Karl Märker (<http://www.lrz-muenchen.de/~Sommerfeld/>).

¹⁰² Eckert, *Atomphysiker*, 1993, S. 157; Wolff, *Vertreibung und Emigration*, 1993, S. 268.

¹⁰³ Brämer, *Heimliche Komplizen*, 1986, S. 16. Siehe ausführlicher Voigt, *Universität Stuttgart*, 1981, S. 33-50.

¹⁰⁴ Seiler-Interview 1982, Band 2, S. 1.

schlagen, so daß Sommerfeld ihm 1931 anbot, zusammen mit ihm einen Handbuchartikel zur quantenmechanischen Elektronentheorie der Metalle zu schreiben. Dabei sollte Bethe den Hauptteil des Artikels schreiben und dafür auch 90% des nicht unbeachtlichen Honorars erhalten, das Sommerfeld ihm auch als Vorschuß zur Aufstockung seines monatlichen Gehalts gewähren würde.¹⁰⁵ Seiler erinnerte sich, daß Bethe damals diesen Handbuchartikel völlig aus dem Kopf schrieb, indem er alles selbst rechnete. Er sei nur hin und wieder in die Bibliothek gegangen, um etwas nachzuschauen. Inhaltlich hatte Seiler aber damals noch nichts von der Bandtheorie mitbekommen und lernte sie erst später kennen, als er sich für diese Fragen zu interessieren begann.¹⁰⁶ Aufgrund des „Berufsbeamtengesetzes“ verlor Hans Bethe seine Stelle in Tübingen im April 1933 und emigrierte zunächst nach England und noch vor dem Zweiten Weltkrieg in die USA.¹⁰⁷ Seiler erinnert sich daran lapidar: „Plötzlich war er weg. Er hat wohl festgestellt, daß es besser ist zu verschwinden und dann war er weg.“¹⁰⁸

Seiler begann 1934 unter Ewalds Anleitung seine Staatsarbeit zu einem Problem der Dispersionstheorie, wechselte aber noch in der Examensphase zu einem weiteren Sommerfeldschüler, Erwin Fues, nach Hannover.¹⁰⁹ Nach Abschluß des Examens ging er noch im selben Jahr nach Breslau, wo Fues das theoretisch-physikalische Institut übernahm. Unter Fues promovierte er 1936 mit einer Arbeit „Zur atomaren Dispersion und Absorption von Röntgenstrahlen nach der relativistischen Wellenmechanik von Dirac“.¹¹⁰ 1937 wechselte er als Assistent an das Institut für physikalische Chemie der gleichen Hochschule, das von Rudolf Suhrmann geleitet wurde. Dort richtete er ein Tieftemperaturlaboratorium ein und nahm Forschungen zur „Erzeugung von Helium ohne Benützung von flüssigem Wasserstoff“ auf.¹¹¹

Nach Beginn des Krieges wurde er an die Westfront eingezogen, konnte aber bald wieder heimkehren und seine wissenschaftlichen Arbeiten fortsetzen.¹¹² Ende 1940 wurde er habilitiert und im Januar 1941 zum Oberingenieur und Dozent „für chemische Physik an der technischen Hochschule und Universität Breslau“ ernannt.¹¹³

Zwischenzeitlich war Seiler zum 1. Mai 1937 in die NSDAP und 1941 auch in den Nationalsozialistischen Dozentenbund eingetreten. Dennoch wurde sein Antrag auf Unabkömmlichkeit („U.K.-Stellung“) abgelehnt, und er wurde zum November 1941 erneut, diesmal an die Ostfront, einberufen.¹¹⁴ Im August kehrte er im Rahmen der sogenannten „Rü-Funk“-Aktion von der Front zurück, um bei *Telefunken* in der Kriegsforschung tätig zu werden.¹¹⁵

¹⁰⁵ Der Artikel erschien schließlich unter der Autorenschaft „A. Sommerfeld und H. Bethe“ (Sommerfeld/Bethe, *Elektronentheorie*, 1933), obwohl Bethe den gesamten quantenmechanischen Formalismus entwickelt hatte, während Sommerfeld lediglich die historische Einführung geschrieben hatte. Siehe dazu Eckert, *Anfänge der Festkörperphysik*, 1990, S. 61; Eckert, *Atomphysiker*, 1993, S. 133-134.

¹⁰⁶ Seiler-Interview 1982, Band 2, S. 1.

¹⁰⁷ Eckert, *Atomphysiker*, 1993, S. 153-156 und 190-192.

¹⁰⁸ Seiler-Interview 1982, Band 2, S. 1.

¹⁰⁹ Sautter, *Seiler*, 1992; „Lebenslauf und Bildungsgang“, Personalakte Seiler, Universitätsarchiv Stuttgart.

¹¹⁰ Seiler, *Dispersion und Absorption*, 1936.

¹¹¹ „Lebenslauf und Bildungsgang“, Personalakte Seiler, Universitätsarchiv Stuttgart.

¹¹² Seiler verbrachte die Zeit vom 25. Sept. 1939 bis zum 22. Jan. 1940 an der Westfront (Personalakte Seiler, Universitätsarchiv Stuttgart).

¹¹³ Personalkarteikarte „Seiler“ aus dem Reichserziehungsministerium, BA-BDC; Seiler-Interview 1982, Band 1, S. 1; Habilitation veröffentlicht als Seiler, *Heliumtemperaturen*, 1941.

¹¹⁴ „Spruchkammerbescheid“, Personalakte Seiler, Universitätsarchiv Stuttgart; Personalkarteikarte „Seiler“ aus dem Reichserziehungsministerium, BA-BDC.

¹¹⁵ Zu Seilers Kriegsforschungen siehe das Kapitel „Siliziumdetektoren von *Telefunken*“ ab S. 64. Zur „Rü-Funk“-Aktion siehe speziell das Kapitel „Rückrufaktionen“ ab S. 53.

Herbert Mataré

Herbert Mataré wurde im September 1912 in Aachen geboren. Anfang der 1930er Jahre unterbrach er seine Schulausbildung für ein Jahr, um bei seinem Onkel in Genf zu leben und zur Schule zu gehen. Nach dem Abitur in Aachen ging er noch einmal nach Genf, um dort einführende Kurse in die Naturwissenschaften an der Universität zu belegen, bevor er sich entschloß, nach Aachen zurückzugehen und dort an der Technischen Hochschule zu studieren.¹¹⁶

Inzwischen hatten die Nationalsozialisten in Deutschland die Macht übernommen und ein halbes Jahr Arbeitsdienst vor Aufnahme des Studiums für alle Studierenden zur Pflicht gemacht. Dies war einerseits als Mittel gedacht, „die soziale Zerklüftung, den Klassenhaß und den Klassenhochmut zu überwinden“¹¹⁷ und wurde andererseits als „unerhörte Charakterprüfung“¹¹⁸ dargestellt, die zur Auswahl der - vom Standpunkt des Nationalsozialismus betrachtet - geeigneten Studierenden führen sollte. In der Praxis erwies sich der Arbeitsdienst für fast alle Studierenden allerdings als kein ernsthaftes Hindernis, sondern lediglich als ein Ärgernis auf dem Weg zum Studium.¹¹⁹ Nachdem Mataré seinen Arbeitsdienst abgeleistet hatte, schrieb er sich an der Technischen Hochschule in Aachen zum Sommersemester 1935 für das Fach „Technische Physik“ ein.¹²⁰

„Das Studium der technischen Physik wurde ... mit besonderen Lehrplänen und mit abschließendem Diplom-Ingenieur- und Doktor-Examen“ erst in den 1920ern an den Technischen Hochschulen eingerichtet und sollte eine „den Bedürfnissen der Technik angepaßte Ausbildung“ bieten.¹²¹ Es umfaßte neben den physikalischen Vorlesungen und Praktika auch Einführungen in die anorganische Chemie, die Elektrotechnik, den Maschinenbau und die höhere Mathematik.¹²²

In Physik stand für Mataré in den ersten drei Semestern Experimentalphysik bei Prof. Hermann Starke auf dem Programm. Theoretische Physik gehörte ab dem vierten Semester zu den Pflichtveranstaltungen und wurde von Prof. Dr. Wilhelm Seitz und vom Dozenten und späteren Professor Dr. Wilhelm Fucks gelehrt. Seitz lehrte die Grundgebiete der theoretischen Physik in einem viersemestrigen Zyklus, der eine Einführung in die Festkörperphysik erhielt.¹²³ Fucks bot Spezialveranstaltungen zur Quantenmechanik und zur Atomtheorie an, die Mataré besucht hat.¹²⁴

Mataré berichtet, daß er wegen seiner Kontakte ins Ausland, dem Besuch der französischen Weltausstellung und der mitgebrachten französischsprachigen Literatur Schwierigkeiten mit der „Geheimen Staatspolizei“ (Gestapo) hatte, die nur damit beigelegt werden konnten, daß er in die Vernichtung der Literatur einwilligte.¹²⁵ An der Hochschule hat es nach Matarés Erinnerungen zwar auch Einschüchterungen gege-

¹¹⁶ Mataré-Interview 1998.

¹¹⁷ Arbeitsdienstführer Konstantin Hierl 1933 zitiert nach Grüttner, *Studenten*, 1995, S. 227.

¹¹⁸ Preußischer Kultusminister Rust 1933 zitiert nach Grüttner, *Studenten*, 1995, S. 227-228.

¹¹⁹ Zum Arbeitsdienst für Studierende siehe Grüttner, *Studenten*, 1995, S. 227-237.

¹²⁰ Mataré-Interview 1998; Studierendenkartei, Hochschularchiv der RWTH-Aachen.

¹²¹ Hoffmann/Swinne, *Technische Physik*, 1994, S. 17. Siehe auch Gehlhoff, *Ausbildung*, 1921 und Gehlhoff, *Zehn Jahre*, 1929.

¹²² Studienplan, Hochschularchiv der RWTH Aachen.

¹²³ Mataré-Interview 1998.

¹²⁴ Wilhelm Fucks [1902-1990] hatte an der TH München Elektrotechnik studiert und war danach an das Elektrotechnische Institut der TH Aachen gekommen, wo er sich habilitierte. Nachdem er ab 1935 zunächst als Dozent und dann ab 1938 als Extraordinarius theoretische Physik unterrichtet hatte, wurde er nach Gastsemestern in Berlin 1941 zum Ordinarius für Experimentalphysik und Direktor des physikalischen Instituts ernannt. Diese Stelle behielt er auch nach dem Krieg bei und hatte großen Anteil an der Gründung der Kernforschungsanlage Jülich, bevor er 1970 emeritiert wurde (Vorlesungsverzeichnisse und Nachruf, HA 160b, Hochschularchiv der RWTH Aachen).

¹²⁵ Mataré-Interview 1998.

ben, aber es war dennoch möglich weiter zu studieren.¹²⁶ Im ganzen war die „Gleichschaltung“ der TH Aachen 1933 wie an vielen anderen Orten mit nur vereinzelt Protestaktionen ohne große Widerstände erfolgt. Zwar waren unter den zum Wintersemester 1932/33 lehrenden Lehrkräften noch keine Mitglieder der NSDAP, aber schon 1935 gehörten „mehr als die Hälfte“¹²⁷ der NSDAP an. Der Lehr- und Forschungsbetrieb ging daher auch nach 1933 mit einer stärkeren Ausrichtung in Richtung Rüstungsforschung reibungslos weiter.¹²⁸

Mataré hatte nach dem Diplomingenieur-Examen Anfang 1939 mit einer Doktorarbeit bei Hermann Starke zur atmosphärischen Gasabsorption begonnen, sah aber, daß er sie nicht mehr in Aachen beenden konnte, da die Technische Hochschule Aachen mit Beginn des Krieges 1939 vorläufig geschlossen, geräumt und teilweise verlagert wurde.¹²⁹ In dieser Situation bewarb er sich bei den Forschungslaboratorien von *Telefunken*, um auf dem Gebiet der Radarforschung tätig zu werden. Im Spätsommer 1939 fing er im Laboratorium von Dr. Horst Rothe bei *Telefunken* in Berlin an, Rauschmessungen an Röhrendioden und Kristalldetektoren durchzuführen, die Rothe als kriegswichtig deklarierte, so daß Mataré vom Militärdienst freigestellt wurde.¹³⁰

Eberhard Spenke

Eberhard Spenke wurde im Dezember 1905 als Sohn eines Apothekers in Bautzen (Sachsen) geboren und besuchte später das Realgymnasium in Berlin-Lichterfelde. Nach dem Abitur studierte er zunächst Physik in Bonn, Göttingen und wechselte 1926 nach Königsberg zu Richard Gans; bei dem er 1928 über ein wellenoptisches Problem promovierte.¹³¹ Gans war 1925 von seiner argentinischen Professur auf die Königsberger Professur für Theoretische Physik berufen worden, da er sowohl in theoretischer als auch experimenteller Physik gleichwertige, bedeutende Arbeiten publiziert hatte. Gans war daher für den Posten in Königsberg prädestiniert, da er dort auch die Leitung des Zweiten Physikalischen Instituts übernehmen sollte.¹³² Als Spenke 1926 nach Königsberg ging, hatte Gans neben ihm noch drei weitere Doktoranden, die dem breiten Forschungsinteresse von Gans folgend sehr unterschiedliche Themen bearbeiteten.¹³³

Nach Abschluß seiner Doktorarbeit wechselte Spenke als mathematischer Assistent zu Walter Schottky in das *Siemens* Forschungslaboratorium nach Berlin und kam dort mit dessen Interessen und Forschungsgebieten in Berührung. In der Folgezeit arbeitete er auf dem Gebiet der Theorie der Gasentladungen, erweiterte Schottkys Theorie des Rauschens in Verstärkerröhren und arbeitete gemeinsam mit Schottky an Problemen der sogenannten „Heißleiter“. Schottky hatte den Ausdruck „Heißleiter“ geprägt und bezeichnete damit Halbleiter, deren wachsende Leitfähigkeit mit wachsender Temperatur technisch zur Temperaturmessung, Spannungsregelung und für andere Zwecke eingesetzt wurde.¹³⁴

¹²⁶ Mataré-Interview 1998.

¹²⁷ Ricking, *Geist bewegt Materie*, 1995, S. 150.

¹²⁸ Kalkmann, *TH Aachen*, 1997; Ricking, *Geist bewegt Materie*, 1995, S. 144-156.

¹²⁹ Mataré-Interview 1998; Ricking, *Geist bewegt Materie*, 1995, S. 155.

¹³⁰ Siehe dazu das Kapitel „Siliziumdetektoren von *Telefunken*“ ab S. 64.

¹³¹ Spenke, *Formbestimmung*, 1929.

¹³² Zu Richard Gans siehe Swinne, *Richard Gans*, 1992.

¹³³ Spenke an Swinne, 16. Mai 1991 nach Swinne, *Richard Gans*, 1992, S. 80.

¹³⁴ Spenke, *Wärmedurchschlag von Heißleitern*, 1936; Spenke, *Raumladungsschwächung des Schroteffektes II*, 1937; Spenke, *Frequenzabhängigkeit des Schroteffektes*, 1937.

Zur Forschung bei *Siemens* bis 1945 siehe Schubert, *Industrielaboratorien*, 1987; Trendelenburg, *Geschichte der Forschung*, 1975 und Pfisterer, *Siemens Research Laboratories*, 1987. Zu Walter Schottky siehe Schubert, *Walter Schottky*, 1986 und Feldtkeller/Goetzeler, *Pioniere*, 1994, S. 70-77.

Seit 1938 arbeitete er intensiv mit Schottky an der Ausgestaltung der Schottky-Randschicht-Theorie, die es erstmals ermöglichte, die Gleichrichtung am Metall-Halbleiter-Kontakt qualitativ und quantitativ im großen Ganzen zutreffend zu beschreiben.

Die Schottky-Theorie des Metall-Halbleiter-Kontakts

Vorgeschichte der Schottky-Theorie¹³⁵

Walter Schottky war nicht nur für Spenke, sondern auch viele andere eine Art „Vaterfigur der deutschen Halbleiterphysik“. Einzigartig für Deutschland pendelte er zwischen theoretischer Physik und Industrieforschung hin und her, bis er sich 1927 entschied, seine Professur für Theoretische Physik an der Universität Rostock zu verlassen und sich ganz der Industrieforschung zu widmen. Dafür bot ihm *Siemens* völlige Freiheit bei der Wahl seiner Forschungsgebiete und stellte ihm 1929 mit Eberhard Spenke einen promovierten Wissenschaftler als „mathematischen Assistenten“ an die Seite, dessen Aufgabe es in den folgenden Jahren und Jahrzehnten wurde, Schottky zu „übersetzen“ und für andere verständlich zu machen.

Schottky hatte nach seiner Promotion in theoretischer Physik 1912 bei Max Planck an den Universitäten in Jena und Würzburg sowie bei *Siemens & Halske* in Berlin gearbeitet, bevor er 1923 zum Professor für Theoretische Physik an der Universität Rostock ernannt worden war. Sein Hauptarbeitsgebiet war bis dahin die Glühelktronen-Physik der Elektronenröhren gewesen. Als er um 1920 begann, sich für den Gleichrichtereffekt am Metall-Halbleiter-Kontakt zu interessieren, übertrug er die in der Glühelktronen-Physik gängigen theoretischen Vorstellungen auf sein neues Arbeitsgebiet.¹³⁶

Die Gleichrichtung an einem Punktkontakt eines Metalls mit metallischen Schwefelverbindungen war erstmals von Ferdinand Braun 1874 entdeckt worden und hatte zunächst im wesentlichen Widerspruch erregt, da sie nicht zu den sonstigen experimentellen Beobachtung und den theoretischen Vorstellungen paßte.¹³⁷ Um die Jahrhundertwende erkannten Braun und andere die Möglichkeit des Einsatzes von sogenannten „Kristalldetektoren“ als Empfänger in der drahtlosen Telegraphie. Diese Kristalldetektoren bestanden aus einem natürlichen Kristall,¹³⁸ auf den eine Metallspitze aufgesetzt wurde. In der Regel mußte man, um den Empfang zu gewährleisten, nach einer gut gleichrichtenden Stelle auf dem Kristall suchen. Ab 1906 erlebten die Kristalldetektoren eine kurze Blütezeit in der drahtlosen Telegraphie und als Rundfunkempfänger, bis sie in den 1920er Jahren von den Elektronenröhren verdrängt wurden.¹³⁹

1923 schlug Schottky vor, die Gleichrichtervorgänge in diesen Kristalldetektoren analog zur Gleichrichtung in einer Elektronenröhre zu begreifen und anzunehmen, daß es sich beim Kristallmaterial um eine schlecht emittierende und beim Metall um

¹³⁵ Zur Geschichte der Schottky-Theorie siehe Schubert, *Walter Schottky*, 1986; Schubert, *Industrielaboratorien*, 1987, S. 261-273; Braun, *Semiconductor Physics*, 1992, S. 449-454; Serchinger, *Walter Schottky*, 1999 und Schottkys eigene „Historische Bemerkungen“ in Schottky, *Sperrschicht- und Spitzengleichrichter*, 1939, S. 407-413. Für eine physikalisch-technische Zusammenfassung siehe Spenke, *Elektronische Halbleiter*, 1956, S. 69-89 und 320-348.

¹³⁶ Schubert, *Walter Schottky*, 1986, S. 250.

¹³⁷ Siehe Hars, *Ferdinand Braun*, 1999, S. 41-54; Braun, *Stromleitung durch Schwefelmetalle*, 1874.

¹³⁸ Häufig Bleiglanz (PbS) oder Pyrit (FeS₂), in Einzelfällen natürliche Siliziumkristalle.

¹³⁹ Telefunken/Braun, *Wellenempfindliche Kontaktstelle*, 1906, Deutsches Patent 178871, Braun, *Wellenanzeiger*, 1906.

Wer zuerst Kristalldetektoren eingesetzt hat, ist eine umstrittene Frage. Siehe beispielsweise Pearson/Brattain, *Semiconductor Research*, 1955, S. 1794-1795, Welker, *Semiconductor Electronics*, 1979, S. 1-5 oder die Hervorhebung des Werks des indischen Physikers Jagadish Chandra Bose in den *Proceedings of the IEEE*, 88(1998), S. 218-285.

eine gut emittierende Kathode handele, die durch eine isolierende Schicht voneinander getrennt seien. Je nach Polung wäre die Größe des Stroms entweder durch die gut oder die schlecht emittierende Kathode bestimmt.¹⁴⁰ Nach dieser „Potentialbergtheorie“ hätte die isolierende Schicht kaum breiter als eine Atomlage sein dürfen. Schottky hatte aber Messungen an den durch L. O. Grohdahl 1926 erfundenen „Kupferoxydul“-Gleichrichtern¹⁴¹ durchführen lassen, die es zweifelhaft erscheinen ließen, daß die isolierende Schicht tatsächlich so dünn sein könnte.¹⁴²

Die neuen Gleichrichter bestanden aus einer dünnen Scheibe reinen Kupfers, auf die eine „Kupferoxydulschicht“ (Cu₂O) aufgebracht wurde. Der Kontakt zwischen beiden sperrte, wenn an dem Kupfer eine positive Spannung angelegt wurde und war in Durchlaßrichtung gepolt, wenn eine negative Spannung anlag. Weitere Messungen hatten bestätigt, „daß der Sperrwiderstand praktisch nur an der Grenze von Mutterkupfer und Oxydul liegen kann.“¹⁴³ Eine theoretische Erklärung dieses Effekts konnten Schottky und W. Deutschmann 1929 zwar noch nicht liefern, aber sie nahmen bereits an, daß eine durch die angelegte Spannung modifizierte Sperrschicht an der Grenze zwischen Kupfer und „Kupferoxydul“ existieren müsse. Der Gleichrichtungssinn brachte sie auf den Gedanken, daß sich durch das negative Potential am „Kupferoxydul“ im Fall der Sperrichtung dort Elektronen anstauen und sich quasi selbst blockieren würden. Sie schrieben:

„Man kann sich vielleicht die Vorstellung bilden, daß die Anwesenheit überschüssiger Elektronen in der Grenzschicht die Leitfähigkeit stark herabsetzt, indem gewissermaßen die für die Leitungselektronen verfügbaren Stellen durch statische Elektronenraumladungen besetzt werden und damit der Durchgang für die Leitungselektronen verstopft wird.“¹⁴⁴

In der Tat stellte sich später diese Interpretation als zutreffend heraus, als erkannt war, daß im „Kupferoxydul“ Löcherleitung vorlag und die Leitung darin als Wanderung von „für die Leitungselektronen verfügbaren Stellen“ angesehen werden konnte.¹⁴⁵

Das Konzept der Löcherleitung aus der quantenmechanischen Elektronentheorie der Metalle wurde aber erst zwei Jahre nach der Arbeit von Schottky und Deutschmann bekannt. Sofort wandte sich Schottky an Rudolf Peierls, um mit ihm die Probleme der Gleichrichtung am Metall-Halbleiter-Kontakt zu diskutieren. Peierls teilte Schottkys Ansicht, daß eine an Ladungsträgern verarmte Randschicht für die Gleichrichtung verantwortlich sein müsse, und erhielt gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen, solange er annahm, daß der Strom im „Kupferoxydul“ von Löchern getragen wurde. Halleffektmessungen, die unter anderem an Erlanger Institut bei Bernhard Gudden durchgeführt worden waren, schienen aber eindeutig zu zeigen, daß es sich bei „Kupferoxydul“ um einen Elektronenleiter handelte. Peierls führte weitere Rechnungen durch, um das Modell an die experimentellen Ergebnisse unter der Annahme der Elektronenleitung anzupassen, scheiterte aber stets. Frustriert schrieb er 1932 an Schottky:

¹⁴⁰ Schubert, *Walter Schottky*, 1986, S. 251; Schottky, *Elektronenentladungen*, 1923, insb. S. 87-100.

¹⁴¹ Zu „Kupferoxydulgleichrichtern“ siehe den zusammenfassenden Bericht Grohdahl, *Copper-Cuprous-Oxide Rectifier*, 1933.

¹⁴² Schottky/Deutschmann, *Mechanismus der Gleichrichtung*, 1929. Dort wird die Möglichkeit einer sehr dünnen gleichrichtenden Schicht zwar noch eingeräumt, aber als unwahrscheinlich charakterisiert. Schottky äußerte sich zehn Jahre später klarer über seine früheren Ergebnisse und schrieb, daß die Daten „bei einigermaßen ungekünstelter Auswertung auf wirksame Abstände von 10⁻⁵ bis 10⁻⁴ cm“ hinwiesen. Das entsprach einer Dicke von mindestens etwa 1000 Atomabständen. (Schottky, *Sperrschicht- und Spitzengleichrichter*, 1939, S. 369).

¹⁴³ Diskussionsbemerkung von Dr. Rudolf Strömer, der die Messungen für Schottky und Deutschmann ausführte (Schottky/Deutschmann, *Mechanismus der Gleichrichtung*, 1929, S. 846).

¹⁴⁴ Schottky/Deutschmann, *Mechanismus der Gleichrichtung*, 1929, S. 846.

¹⁴⁵ Schubert, *Walter Schottky*, 1986, S. 251.

„Ich stimme also ganz mit Ihrem letzten Brief darin überein, daß alles in bester Ordnung wäre, wenn man nicht durch den Halleffekt zu einer Annahme der Überschußleitung [Elektronenleitung] gezwungen wäre. Ich glaube aber nicht, daß man diesem Schluß entgehen kann, ..., zusammenfassend kann man sagen, daß, wenn die Voigtschen Messungen des Halleffekts richtig sind (und man hat wohl keinen Grund daran zu zweifeln), eine Erklärung des Detektoreffekts von Cu_2O auf dieser Basis nicht möglich ist.“¹⁴⁶

Obwohl Peierls mit diesem Ergebnis sehr unzufrieden war, schienen sich die Theoretiker Schottky und Peierls den experimentellen Daten beugen zu müssen. Peierls schrieb 1933 in einem abschließenden Ton: „Mir hätte es viel besser gepaßt, wenn vielleicht doch noch etwas an meinen alten Rechnungen wahr wäre, aber es sieht doch wohl nicht so aus.“¹⁴⁷ Doch Schottky gab nicht auf und regte neue Halleffektmessungen an, die bei *Siemens* durchgeführt wurden und zeigten, daß in „Kupferoxydul“ sowohl Elektronen- als auch Löcherleitung vorliegen konnte. Im Oktober 1934 wurde vom physikalischen Institut in Erlangen bestätigt, daß in schlecht leitendem „Kupferoxydul“ die Löcherleitung überwog.¹⁴⁸

Der Weg für die Ausformulierung der Schottky-Randschichttheorie war frei. Doch weitere Schwierigkeiten, die mit dem Einfluß der Vorbehandlung der „Kupferoxydulscheiben“ auf die Gleichrichtung zusammenhingen, verzögerten die Ausgestaltung der Theorie noch einmal um einige Jahre.¹⁴⁹ Zunächst formulierte Schottky 1935 in einer Diskussionsbemerkung eine allgemeine Regel den Gleichrichtungssinn betreffend:

„Die beweglichen Teilchen fließen lieber aus dem Halbleiter in das Metall als umgekehrt“¹⁵⁰

Ende 1938 reichte er eine „kurze Originalmitteilung“ bei der Zeitschrift *Die Naturwissenschaften* ein, die die Grundzüge der Randschichttheorie enthielt.¹⁵¹ Im Jahre 1939 folgte eine qualitative Arbeit Schottkys, in der diese Grundzüge durch anschauliche Erläuterungen plausibel gemacht wurden und erste Abschätzungen die richtige Größenordnung der Effekte lieferten. Ein kleiner historischer Überblick erläuterte die Verständnisschwierigkeiten bei der Genese der Theorie.¹⁵² Detaillierte Rechnungen zu einzelnen möglichen Fällen wurden von Spenke durchgeführt und teilweise gemeinsam mit Schottky veröffentlicht.¹⁵³

Schottkys Randschichttheorie

So lag Ende 1939 eine Theorie vor, mit der erstmals ein qualitatives und in Teilaspekten auch quantitatives Verständnis des gleichrichtenden Effekts am Metall-Halbleiter-Kontakt gelungen war. Zu gleichen Zeit waren unabhängig von Schottky und Spenke in der Sowjetunion und in England ähnlich geartete Theorien publiziert worden, die zwar in verschiedenen Punkten von der Schottky-Randschichttheorie abwichen, aber grundsätzlich den gleichen Mechanismus betrachteten.¹⁵⁴ Dieser bestand darin, daß sich durch Annahme einer unterschiedlichen Ladungsträgeraustrittsarbeit des Metalls und des Halbleiters an ihrer Grenze eine ladungsträgerverarmte Rand-

¹⁴⁶ Peierls an Schottky, 4. März 1932, WSD – zitiert nach Schubert, *Walter Schottky*, 1986, S. 252.

¹⁴⁷ Peierls an Schottky, 16. Feb. 1933, WSD – zitiert nach Schubert, *Industrielaboratorien*, 1987, S. 267.

¹⁴⁸ Schubert, *Industrielaboratorien*, 1987, S. 267-268.

¹⁴⁹ Auf diese Schwierigkeiten soll hier nicht eingegangen werden. Siehe dazu Schottky, *Sperrschicht- und Spitzengleichrichter*, 1939, S. 410-413.

¹⁵⁰ Vergleiche Schottkys Diskussionsbemerkung in Strömer, *Elektrolytische Oxydschichten*, 1935 hier zitiert nach Schottky, *Sperrschicht- und Spitzengleichrichter*, 1939, S. 384.

¹⁵¹ Schottky, *Halbleitertheorie der Sperrschichten*, 1938.

¹⁵² Schottky, *Sperrschicht- und Spitzengleichrichter*, 1939.

¹⁵³ Schottky/Spenke, *Quantitative Durchführung*, 1939; Spenke, *Randschichtkapazitäten*, 1941.

¹⁵⁴ Siehe Braun, *Semiconductor Physics*, 1992, S. 451-452.

Davydov, *Contact Resistance*, 1939; Davydov, *Transitional Resistances*, 1941, Mott, *Contact*, 1938.

schicht bilden würde, die dann für die Gleichrichtung verantwortlich wäre.¹⁵⁵ Die Bildung dieser Randschicht hing wesentlich von den entsprechenden Austrittsarbeiten ab. Für diese galt nach Schottky:

„Die für die Randdichte maßgebende Austrittsarbeit Metall-Halbleiter ist sowohl für Elektronen wie für Defektelektronen positiv und so groß, daß die Randdichte im allgemeinen unterhalb der in Störstellenhalbleitern sich einstellenden Innendichte liegt.“¹⁵⁶

Die Ausformulierung dieses Ansatzes bedurfte keiner weitergehenden Vorstellung aus der quantenmechanischen Elektronentheorie der Metalle als der Tatsache, daß in Halbleitern von „Löchern“ als Ladungsträgern genauso wie von Elektronen gesprochen werden konnte und daß die Ladungsträgerkonzentrationen im Halbleiter im Vergleich zu Metallen äußerst gering waren. Das weitere konnte durch klassische Diffusionstheorie und Thermodynamik berechnet werden. So argumentierten Schottky und Spenke 1939 noch vollständig im Bild der Ladungsträgerkonzentrationen, ohne auf die Existenz von unterschiedlichen Bändern im Halbleiter einzugehen.¹⁵⁷ Auch in seiner klarsten Darstellung der Theorie aus dem Jahre 1942 berücksichtigte Schottky die wesentlichen Grundzüge des Bändermodells des Festkörpers nicht.¹⁵⁸

Darin unterschied sich die Schottky-Randschichttheorie von einer Reihe von Versuchen, die Gleichrichtung am Metall-Halbleiter-Kontakt auf rein quantenmechanischer Basis durch den quantenmechanischen Tunneleffekt zu erklären. Zwar hätte dafür die Randschicht beziehungsweise Tunnelbarriere deutlich dünner sein müssen, doch stimmte Anfang der 1930er Jahre, als „Kupferoxydul“ noch als Elektronenleiter galt, wenigstens das Vorzeichen des Gleichrichtungssinns. Damals ergab sich aus der Theorie nämlich, „daß die Elektronen leichter vom Metall zum Halbleiter strömen, als vom Halbleiter ins Metall.“¹⁵⁹ Doch 1938 stellten diese Theorien keine ernsthafte Konkurrenz zur Randschichttheorie dar. Mit der semiklassischen Schottky-Theorie ließen sich die Beobachtungen viel besser beschreiben.

Funktionsprinzip der Randschichttheorie

Die Randschichttheorie beruht auf der Annahme, daß sich aufgrund unterschiedlicher Austrittsarbeiten eine ladungsträgerverarmte Randschicht bildet, die in Analogie zur Raumladungstheorie bei der Elektronenröhre betrachtet werden kann. Schottky argumentierte in etwa wie folgt.¹⁶⁰

¹⁵⁵ Schottky, *Halbleiterttheorie der Sperrschichten*, 1938.

¹⁵⁶ Ebenda.

¹⁵⁷ Schottky, *Sperrschicht- und Spitzengleichrichter*, 1939; Schottky/Spenke, *Quantitative Durchführung*, 1939.

¹⁵⁸ Schottky, *Vereinfachte Theorie*, 1942.

¹⁵⁹ Fröhlich, *Elektronentheorie*, 1936, S. 246-248 (Zitat auf S. 246) gibt eine Zusammenfassung der Theorie und Hinweise auf die Originalarbeiten aus dem Jahre 1932. Er bemerkte offenbar nicht, daß sich die experimentelle Situation zwischenzeitlich geändert hatte. Siehe auch Hoddeson, *Point-Contact Transistor*, 1981, S. 45; Schubert, *Industrielaboratorien*, 1987, S. 265; Braun, *Semiconductor Physics*, 1992, S. 452-453.

¹⁶⁰ Schottky, *Sperrschicht- und Spitzengleichrichter*, 1939; eine Lehrbuchdarstellung der ursprünglichen Schottky-Theorie gibt Spenke, *Elektronische Halbleiter*, 1956, S. 69-89 und 320-348; für die heutigen Vorstellungen vom Metall-Halbleiter-Kontakt siehe Mönch, *Semiconductor Surfaces*, 1995.

Im folgenden wird das Funktionsprinzip der Randschichttheorie in den Grundzügen dargestellt. Auf mathematische Details wurde zu Gunsten einer begrifflichen Klarheit verzichtet. Zur Vereinfachung wurde auch nur ein n-dotierter Halbleiter (Elektronenleiter) betrachtet. Schottky selbst hat seine Theorie hauptsächlich an p-leitendem „Kupferoxydul“ und später Selen erprobt, er war sich aber darüber im Klaren, daß sich damit das analoge Verhalten ergab. Zusätzlich zur Beschränkung auf n-Halbleiter wurde im folgenden angenommen, daß die Dissoziationsarbeit der Donatoren klein ist, so daß alle Donatoren ihr Elektron bei Zimmertemperatur abgegeben haben („Störstellenerschöpfung“).

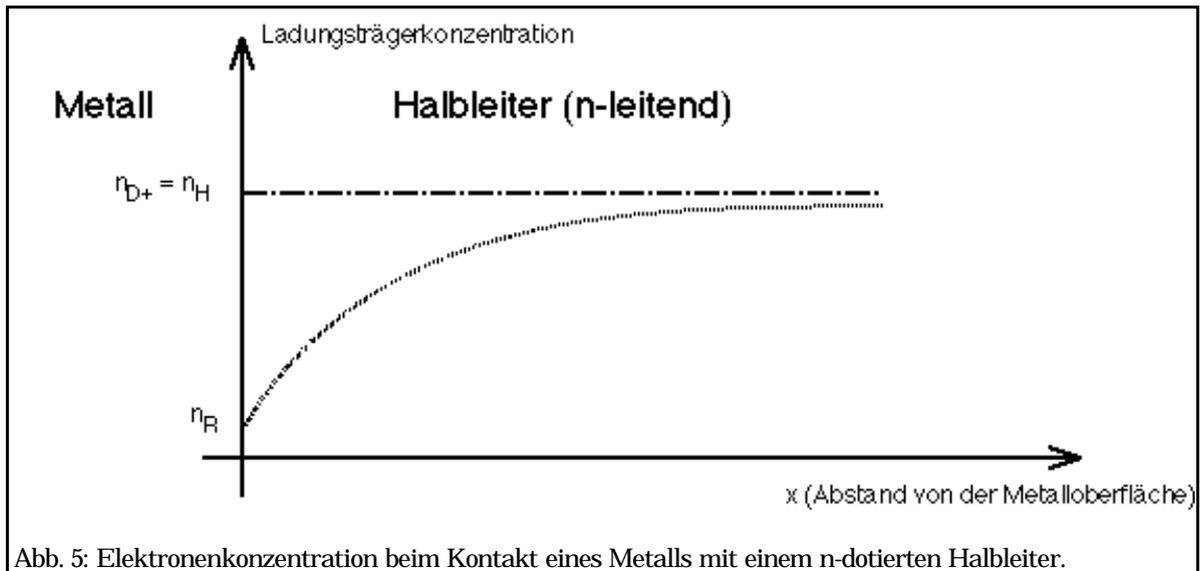


Abb. 5: Elektronenkonzentration beim Kontakt eines Metalls mit einem n-dotierten Halbleiter.

Im Inneren des Halbleiters gilt wegen der Neutralitätsbedingung, daß die Konzentration der Elektronen $n(x)$ einen konstanten Wert n_H annimmt, der im hier betrachteten Fall der „Störstellenerschöpfung“ so groß sein muß wie die Konzentration der Donatoren n_{D+} . An der Halbleiteroberfläche kommen zusätzliche Effekte hinzu, die dazu führen, daß die Elektronenkonzentration sich verändern kann. Am hier zu betrachtenden Metall-Halbleiterkontakt wird die Neutralitätsbedingung durch die Forderung des thermischen Gleichgewichts des Halbleiters mit dem Metall überlagert. Anschaulich dürfen im Gleichgewichtsfall nur genauso viele Elektronen vom Metall in den Halbleiter hinein wie heraus fließen oder diffundieren. Ist das aus bestimmten Gründen nicht der Fall, stellt sich am Halbleiterrand eine Elektronenkonzentration n_R ein, die sich von der Konzentration im Innern des Halbleiters n_H unterscheidet und bewirkt, daß sich eine Diffusionsspannung V_D aufbaut. In Abb. 5 wird angenommen, daß die Arbeit, die aufgewendet werden muß, um ein Elektron aus dem Halbleiter zu entfernen, kleiner ist als die Austrittsarbeit eines Elektrons aus dem Metall Ψ_M . Dann bildet sich eine Verarmungsschicht am Rande des Halbleiters, d.h. n_R wird kleiner als n_H , da mehr Elektronen aus dem Halbleiter heraustreten, als vom Metall her hinein diffundieren.¹⁶¹

In dieser Randschicht sind nun weniger Elektronen als Donatoren vorhanden, wodurch sich eine positive Raumladung bildet, die solange Elektronen an die angrenzende Metalloberfläche zieht, bis sich im Halbleiter eine Diffusionsspannung V_D aufgebaut hat, die den Unterschied der „Austrittsarbeiten“ gerade kompensiert. Dies ist nur bei geringen Ladungsträgerkonzentrationen möglich, wie sie in Halbleitern verwirklicht sind, da sich sonst gar keine Diffusionsspannung aufbauen könnte. Die Elektronenkonzentration $n(x)$ ergab sich nach der sogenannten Barometerformel als:

$$(1) \quad n(x) = n_H e^{\frac{eV(x)}{kT}}$$

Für den Spezialfall der Randkonzentration der Elektronen folgte daraus mit $n_R = n(0)$ und $V(0) = -V_D$:

¹⁶¹ Die Austrittsarbeit ist definiert als diejenige Energie, die einem Elektron auf Fermienergie innerhalb des Festkörpers zugeführt werden muß, um es gerade außerhalb des Festkörpers ins Vakuum zu befördern. Bei Metallen beschreibt die Fermienergie diejenige Energie, die die besetzten von den unbesetzten Energiezuständen trennt. Bei Halbleitern ist die Situation nicht so einfach. Um ein Elektron aus einem n-Halbleiter ins Vakuum zu befördern, muß man es nur vom Leitungsband bei der Energie E_L ($E_L > E_F$) aus ins Vakuum befördern. Diese Größe wird Elektronenaffinität genannt und üblicherweise mit χ bezeichnet.

$$(2) \quad n_R = n_H e^{-\frac{eV_D}{kT}}$$

Die Randdichte der Elektronen war dann nur durch die Diffusionsspannung V_D und die Elektronenkonzentration im Innern des Halbleiters n_H bestimmt. Für die Dicke der Randschicht ergab sich bei den betrachteten Selen- und „Kupferoxydulgleichrichtern“ die Größenordnung von 10^{-5} cm.

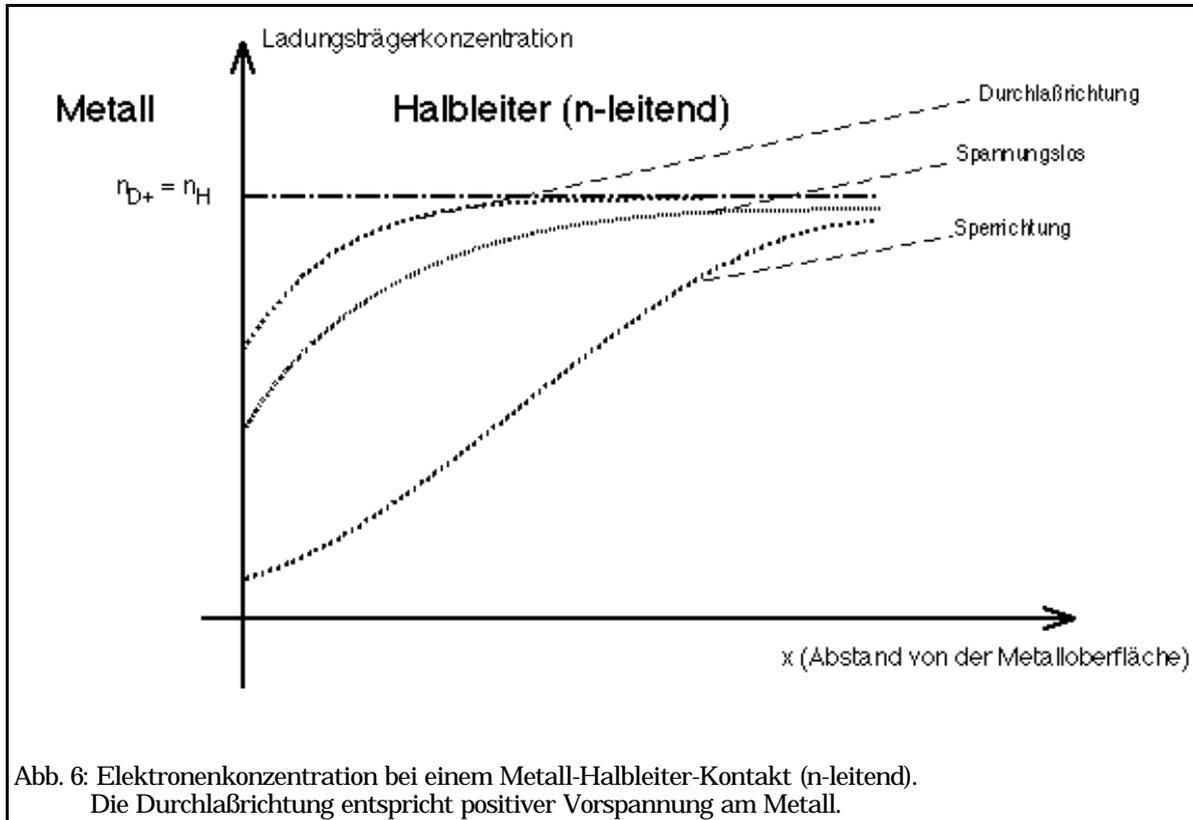


Abb. 6: Elektronenkonzentration bei einem Metall-Halbleiter-Kontakt (n-leitend). Die Durchlaßrichtung entspricht positiver Vorspannung am Metall.

Legte man nun beim beschriebenen Metall-Halbleiter-Kontakt an das Metall eine positive Spannung an, war der Kontakt in Durchlaßrichtung gepolt. Die Elektronenkonzentration in der Randschicht erhöhte sich. Die Diffusionsspannung V_D erniedrigte sich entsprechend und die Randschicht war für Elektronen besser zu überqueren. Ein Strom konnte fließen (siehe Abb. 6).

„Gewissermaßen als mnemotechnisches Hilfsmittel (Und nur als solches, nicht als physikalische Begründung!) kann man die Vorstellung entwickeln, daß die Elektronen, die ja aus dem Halbleiterinnern auf die positiv vorgespannte Elektrode zufließen, dabei ihre hohe Konzentration n_H ein Stück weit in die trägerverarmte Randzone hineinschleppen.“¹⁶²

Bei negativer Vorspannung passierte das Gegenteil. Die Elektronenkonzentration erniedrigte sich und sperrte den Stromfluß. Damit war die Schottky-Theorie in der Lage, die Gleichrichterwirkung des Metall-Halbleiter-Kontakts verständlich zu machen und Schottkys These von 1935 bestätigen, nach der die beweglichen Teilchen lieber aus dem Halbleiter in das Metall als umgekehrt flossen.¹⁶³

¹⁶² Spenke, *Elektronische Halbleiter*, 1965, S. 125.

¹⁶³ Vergleiche Schottkys Diskussionsbemerkung in Strömer, *Elektrolytische Oxydschichten*, 1935 und Hartmann/Schottky, *Sinn der Gleichrichterwirkung*, 1936.

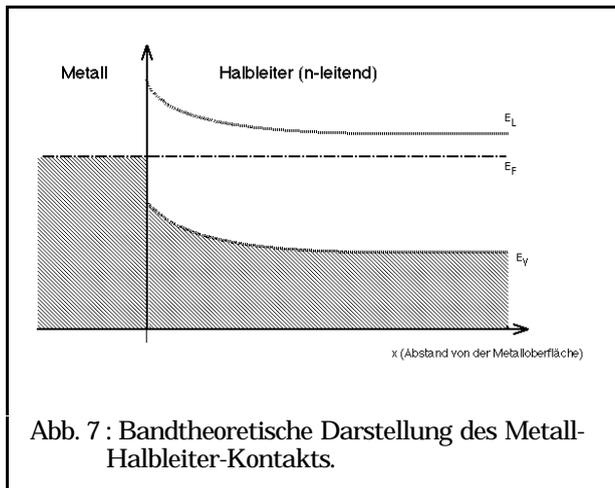


Abb. 7 : Bandtheoretische Darstellung des Metall-Halbleiter-Kontakts.

In moderner Anschauung ließe sich die Schottky-Theorie aber ungefähr so darstellen:

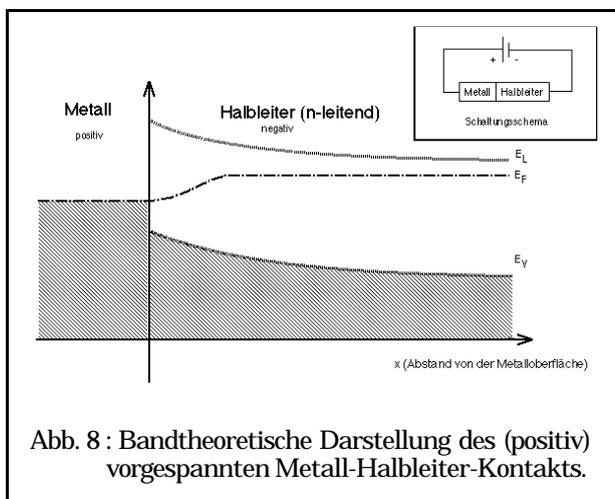


Abb. 8 : Bandtheoretische Darstellung des (positiv) vorgespannten Metall-Halbleiter-Kontakts.

Schottky hatte sich in seinen Arbeiten zum Thema Randschichttheorie im wesentlichen auf die dargestellte Argumentation im Bild der (Defekt-) Elektronenkonzentrationen beschränkt. Bandtheoretische Vorstellungen gingen auch in die späteren Arbeiten kaum ein. Schottky ging zwar von der Existenz einer Fermienergie im Metall aus, aber charakterisierte den Halbleiter nicht durch eine Unterscheidung von Valenz- und Leitungsband, die durch eine Bandlücke voneinander getrennt sind, sondern weiterhin lediglich durch ihre geringe Ladungsträgerkonzentration.¹⁶⁴

Durch die zum Rand hin aufgebaute Diffusionsspannung V_D erhöht sich die potentielle Energie der Elektronen, die Bänder verbiegen sich und eine ladungsträgerverarmte Sperrschicht wird zum Rand hin aufgebaut. Soll jetzt ein Strom fließen, müssen die Elektronen erst diese Potentialschwelle überwinden (Abb. 7).

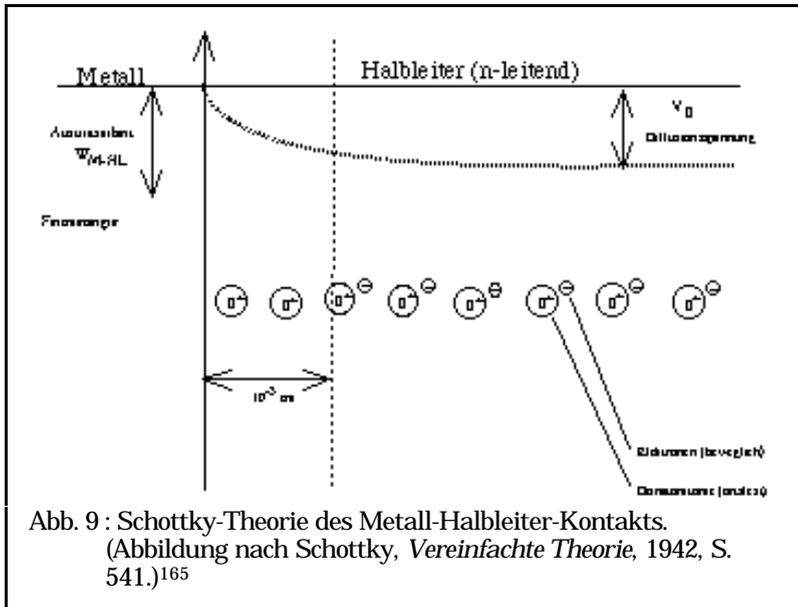
Durch Anlegen einer positiven Spannung am Metall wird das Fermi-niveau E_F der Metallelektronen relativ zum Fermi-niveau E_F des Halbleiters erniedrigt. Da sich dann das vorher stark gekrümmte Leitungsband zurückbiegt, müssen die

Elektronen nicht mehr eine so hohe Potentialschwelle überwinden wie vorher. Dadurch ist es für die Elektronen leichter, aus dem Halbleiter in das Metall überzutreten, ein Strom kann fließen (siehe Abb. 8). Somit entspricht die positive Spannung am Metall der Durchlaßrichtung und eine negative Spannung der Sperrichtung des Gleichrichters.

¹⁶⁴ Schottky, Vereinfachte Theorie, 1942.

Zusammenhang zwischen Austrittsarbeit und Diffusionsspannung

Entscheidend für die Schottky-Theorie war die Metall-Halbleiter-Austrittsarbeit, da sie die Eigenschaften des gleichrichtenden Kontakts bestimmte.



Wie aus der stark vereinfachten Darstellung in Abb. 9 ersichtlich wird, ist die Diffusionsspannung V_D nach der Schottky-Theorie direkt proportional zur Metall-Halbleiter-Austrittsarbeit Ψ_{M-HL} . Es ergibt sich je nach den speziellen Annahmen ein linearer Zusammenhang der Art:

$$(3) \quad V_D = \Psi_{M-HL} - k(T)$$

Dabei ist $k(T)$ eine temperaturabhängige Konstante, die von den

jeweiligen Annahmen über das Halbleitermaterial abhängt.

Schottky selbst hat sich mit dieser Gleichung aber nie richtig anfreunden können und sie wohl auch nie in dieser expliziten Form publiziert, denn er wollte die Diffusionsspannung V_D als von der Metall-Halbleiter-Austrittsarbeit Ψ_{M-HL} unabhängig ansehen.¹⁶⁶ Welker konnte aber unter bestimmten einschränkenden Annahmen in den Jahren 1940 und 1941 und in späteren Manuskripten den direkten Zusammenhang zwischen V_D und Ψ_{M-HL} gemäß Gleichung (3) herleiten und korrespondierte ausführlich mit Schottky darüber.¹⁶⁷

Der Metall-Halbleiter-Austrittsarbeit Ψ_{M-HL} kam zwar für die Gleichrichtung eine große Bedeutung zu, aber man konnte sie nicht direkt und unabhängig von der Schottky-Theorie messen. Meßbar waren lediglich die jeweiligen Vakuumaustrittsarbeiten Ψ_{vak} verschiedener Metalle. Nimmt man nun an, daß sich die Metall-Halbleiter-Austrittsarbeit Ψ_{M-HL} aus der Differenz der Vakuumaustrittsarbeit des Metalls und der entsprechenden Größe des Halbleiters ergibt, erhält man die heute als Schottky-Mott-Regel bekannte Gleichung:

¹⁶⁵ In dieser Zeichnung sind die Annahmen Schottkys auf einen n-Halbleiter übertragen. Schottky betrachtete im Original den p-Halbleiter Selen. Das ändert aber an der Argumentation nichts Grundsätzliches, lediglich die Vorzeichen vertauschen sich.

¹⁶⁶ Schottky, *Sperrschicht- und Spitzengleichrichter*, 1939, S. 409, siehe dort Fußnote 1; Spenke, *Elektronische Halbleiter*, 1955, S. 342; Schottky an Welker, 14. Dez. 1940, HWD 006.

¹⁶⁷ Siehe dazu den Briefwechsel zwischen Welker und Schottky, HWD 006 und ausführlicher Welker, *Germanium als Detektormaterial*, 1943, S. 16, HWD 002.

Aber auch Schottky formulierte in einem Brief an Welker 1940 explizit einen linearen Zusammenhang zwischen der Metall-Halbleiter-Austrittsarbeit und der Diffusionsspannung:

„Für V_D findet man theoretisch, unter Annahme der idealen Gasgesetze für die Elektronen und übrigen Störstellen, bei völliger Störstellendissoziation ...:

$$V_D = \Psi_{\oplus} + \left(\frac{kT}{e} \right) (18,7 - \frac{3}{2} \ln(T) + \ln(c_D))$$

(Ψ_{\oplus} Defektelektronen-Austrittsarbeit Metall-Halbleiter, c_D totale Störstellendichte Mol/cm³; die Konstante aus der Gasformel (32), S. 50, für das Elektronen - μ , Zs. Elek. 45, 1939)“.

(Schottky an Welker, 14. Dez. 1940, HWD 006, S. 7).

$$(4) \quad \Psi_{M-HL} = \Psi_{vak} - c_s \quad \text{wobei } \chi_s \text{ die Elektronenaffinität des Halbleiters bezeichnet.}^{168}$$

Für diese Annahme eines direkten Zusammenhangs der Vakuumaustrittsarbeit Ψ_{vak} und der Metall-Halbleiter-Austrittsarbeit Ψ_{MHL} gab es aber keinen theoretischen Beweis. Schottky war sich dessen auch immer sehr bewußt, formulierte stets sehr vorsichtig und kündigte häufiger eine selbständige Veröffentlichung „Zum Problem der Austrittsarbeit an der Grenze Metall-Störstellenhalbleiter“ an, die aber offenbar nie erschienen ist.¹⁶⁹ So wurde von Schottky selbst die Gleichung (4) nie publiziert. Der englische Physiker und spätere Nobelpreisträger Nevil F. Mott stellte die angegebene Beziehung zwar her, schrieb aber sofort im nächsten Absatz der entsprechenden Veröffentlichung, warum sie nicht gelte.¹⁷⁰ Dennoch haben beispielsweise Seiler und Welker diese Beziehung bei der Konstruktion von Kristalldetektoren im Zweiten Weltkrieg einfach angewandt, zum Teil sogar im Widerspruch mit den experimentellen Befunden.¹⁷¹

Kombiniert man nun Gleichung (3) und (4), so erhält man einen linearen Zusammenhang zwischen der Vakuumaustrittsarbeit Ψ_{vak} des Kontaktmetalls und der Diffusionsspannung V_D .

$$(5) \quad V_D = \Psi_{vak} - c_s - k(T)$$

Da sich die Diffusionsspannungen V_D und die Vakuumaustrittsarbeiten Ψ_{vak} von Metallen leicht messen lassen, war eine experimentelle Überprüfung möglich. Benutzte man nämlich Metalle mit unterschiedlichen Vakuumaustrittsarbeiten Ψ_{vak} in Kontakt mit demselben Halbleiter, sollte man unterschiedliche Diffusionsspannungen messen können. Nach Schottky war man geneigt, die Unterschiede der sich ergebenden Diffusionsspannungen V_D „annähernd gleich den Unterschieden Ψ_{vak} der betreffenden Metalle“ zu erwarten.¹⁷²

Die vorliegenden experimentellen Daten für Selengleichrichter, die neben den „Kupferoxydulgleichrichtern“ zu den technisch wichtigsten Gleichrichtern gehörten, bestätigten den postulierten und erwarteten direkten Zusammenhang zwischen dem Diffusionspotential und den Vakuumaustrittsarbeiten.

„Man sieht, daß in der Tat der gemessene Widerstand der betreffenden Metall-Halbleiterkombination mit der Vakuum-Austrittsarbeit des Deckmetalls in systematischer Weise variiert, und zwar über 4 Zehnerpotenzen, wenn die Austritts-

¹⁶⁸ Zur Elektronenaffinität χ siehe Fußnote 161, S. 35.

¹⁶⁹ Eine Ankündigung befindet sich z.B. in Schottky, *Ueber Sperrschichten*, 1941, S. 21, Fn. 1a: „Vgl. hierzu eine demnächst erscheinende Arbeit des Verfassers ‘Zum Problem der Austrittsarbeit an der Grenze Metall-Störstellenhalbleiter’, Ann. d. Phys. 1941.“; Im Schottky-Nachlaß im Deutschen Museum München befinden sich zwar die ersten beiden Seiten eines Manuskripts mit diesem Titel, die aber lediglich eine Einleitung enthalten. Dort wird der Zusammenhang der Austrittsarbeit mit der Glühelktrodenphysik hergestellt. Aber auch dort mußte die „einfache Vorstellung [des idealen Elektronengases, KH] ... aus verschiedenen Gründen verlassen werden.“ (Schottky, „Zum Problem der Austrittsarbeit an der Grenze Metall-Störstellenhalbleiter“, o.J., WSD 003, S. 2) In den *Annalen der Physik*, Bd. 39-42, der Jahre 1941 und 1942 ist kein Aufsatz über Austrittsarbeit von Schottky erschienen.

¹⁷⁰ Mott, *Contact*, 1938, S. 568.

¹⁷¹ Auf die Tatsache, daß die Schottky-Mott-Regel im Widerspruch zu den experimentellen Daten über den Metall-Halbleiter-Kontakt stand und steht, wird im Rahmen von Welkers Detektoruntersuchungen noch eingegangen. Siehe das Kapitel „Spitzenmetall und Austrittsarbeit“, ab S. 81.

Die Schottky-Mott-Regel dient unter diesem Namen häufig auch als Ausgangspunkt von Lehrbuchdarstellungen für die Physik des Metall-Halbleiter-Kontakt. Für eine moderne Darstellung siehe zum Beispiel Mönch, *Semiconductor Surfaces*, 1995. Wichtige Originalveröffentlichungen von 1874 bis 1989 zu diesem Thema sind wiederabgedruckt in Mönch, *Interfaces*, 1990.

¹⁷² Schottky, *Vereinfachte Theorie*, 1942, S. 558.

arbeit zwischen der des Kaliums mit etwa 2V bis zu der des Nickels mit etwa 5V variiert wird.“¹⁷³

Das stellte in den Augen der Fachleute einen wichtigen Hinweis für ihre allgemeine Gültigkeit dar.¹⁷⁴ So kam Schottky zu dem Schluß:

„Ein Unterschied von V_D bei Verwendung verschiedener Deckmetalle bedeutet also einen gleichen Unterschied der Halbleiteraustrittsarbeiten Ψ_{\oplus} zwischen beiden Deckmetallen.

Nimmt man nun mit Schweickert¹⁷⁵ die Unterschiede der Ψ_{\oplus} an der Grenze Metall/Halbleiter annähernd gleich den Unterschieden Ψ_{vak} der betreffenden Materialien an, so wird man, wegen $\Psi_{\text{vak}}(\text{Mg}) \approx 3,6$ Volt, $\Psi_{\text{vak}}(\text{Bi}) \approx 4,4$ Volt einen Unterschied von 0,8 Volt erwarten, und zwar wegen der Defektleitung des Selen in dem Sinne, daß die Austrittsarbeit Ψ_{\oplus} , und damit auch der V_D -Wert, beim Mg um 0,8 Volt *größer* ist als beim Bi.

Man kann also sagen, daß der Sinn und die Größenordnung des wichtigsten bei den Kapazitätsmessungen beobachteten Unterschieds zwischen Mg/Se- und Bi-Se-Gleichrichtern durch die hier entwickelte Theorie verständlich gemacht wird.“¹⁷⁶

Diese Übereinstimmung von Experiment und Theorie stellte einen großen Erfolg für die Schottky-Theorie dar.¹⁷⁷ Als einzige brauchbare Theorie prägte sie die Forschungen über Kristallgleichrichter während des Zweiten Weltkrieges dadurch ausschlaggebend. Nach dem Krieg sah sich Eberhard Spenke allerdings gezwungen zuzugeben, daß die Schottky-Theorie nicht so allgemeingültig war, wie man gedacht hatte und insbesondere für Germanium-Gleichrichter nicht mit den Meßwerten übereinstimmte:

„[Es] bedeutete ... eine schöne Bestätigung der Schottkyschen Theorie, als seinerzeit Schweickert einen Zusammenhang zwischen den Austrittsarbeiten verschiedener Metalle und ihrer Sperrwirkungen als Elektroden eines Selengleichrichters nachweisen konnte.

Bei den Ge[ermanium]-Gleichrichtern stellte sich aber nun umgekehrt eine weitgehende Unabhängigkeit der Sperrreigenschaften vom Metall der Kontaktspitze heraus, und dies war für Bardeen die Veranlassung, 1947 seine Theorie der Oberflächenzustände aufzustellen.“¹⁷⁸

„Chemische“ Sperrschicht

Mit der Schottky-Theorie war es gelungen, die Gleichrichtung am Metall-Halbleiter-Kontakt auf den rein physikalischen Effekt der Ladungsverschiebung von beweglichen Ladungsträgern (Elektronen oder Defektelektronen) zurückzuführen. Eventuell sich am Kontakt bildende „chemische“ Zwischenschichten wurden vernachlässigt beziehungsweise für den Gleichrichtungseffekt als nicht wichtig erklärt. Dadurch wurde die Schottky-Theorie mathematisch formulierbar und lieferte quantitative Aussagen, während die Annahme einer „chemischen“ Sperrschicht nur qualitative Aussagen erlaubt hätte. Nicht nur in Schottkys Augen stellte daher die Vernachlässigung der „chemischen Randschicht“ einen Erfolg dar.¹⁷⁹

¹⁷³ Schottky, *Abweichung*, 1940, S. 571-572.

Auch Walter Brattain stellte Anfang der 1940er Jahre gute Übereinstimmungen mit dieser Hypothese fest (Bardeen, *Surfaces States*, 1947, S. 718).

¹⁷⁴ Spenke, *Neuere Ergebnisse*, ca. 1950, ESD(a) 410.

¹⁷⁵ An dieser Stelle findet sich der Verweis auf eine Veröffentlichung Schottkys (Schottky, *Abweichung*, 1940), in der Schottky die Ergebnisse von Schweickerts Messungen präsentiert.

¹⁷⁶ Schottky, *Vereinfachte Theorie*, 1942, S. 558.

¹⁷⁷ Eine detaillierte Analyse der von Schweickert angegebenen Daten hätte jedoch gezeigt, daß diese Daten nicht exakt mit der Theorie übereinstimmten. Eine größere Vakuumaustrittsarbeit bedeutete zwar eine größere Diffusionsspannung, die beiden Größen waren auch zueinander proportional, aber der Proportionalitätsfaktor war im Widerspruch mit der Schottky-Theorie kleiner als eins. (Siehe dazu Mönch, *Interfaces*, 1990, S. 4-6).

¹⁷⁸ Spenke, *Neuere Ergebnisse*, ca. 1951, ESD(a) 410.

¹⁷⁹ Zwar widmet Walter Schottky 1939 in seiner ersten grundlegenden Veröffentlichung zur Randschichttheorie noch größere Abschnitte der „chemischen Sperrschicht“ (Schottky, *Sperrschicht*

Beinahe stolz schrieb er in einem nicht veröffentlichten Manuskript von ca. 1941/42:

„Die ... für die Gleichrichterwirkung verantwortlichen Sperrschichten ... sind, wie in verschiedenen Veröffentlichungen des Verf. gezeigt wurde, nicht so materieller Natur, wie man bisher meistens angenommen hat. ... Es hat sich ... gezeigt, dass der eigentliche Mechanismus der Gleichrichterwirkung an die Existenz einer solchen durch Störstellenverarmung gebildeten 'chemischen Sperrschicht' gar nicht gebunden ist und dass dieser 'chemische' Effekt bei dem ebenfalls technisch sehr wichtigen Selengleichrichter sogar stark in den Hintergrund tritt.“¹⁸⁰

Mit „chemisch“ bezeichnete Schottky Sperrschichten, die durch materielle Unterschiede im Halbleiter oder an der Kontaktfläche Halbleiter-Metall zustande kommen. Darunter fielen insbesondere die Schichten an der Grenze zwischen Metall und Halbleiter, die sich durch eine variierende Konzentration der Störstellen - also Donatoren oder Akzeptoren - ergaben.¹⁸¹

„Chemische“ Sperrschichten waren nach dieser Definition auch die bei Selengleichrichtern zwischen Selen und dem Kontaktmetall vermuteten Selenid-Schichten, deren Existenz und Wirkungsmechanismus noch nicht geklärt war.¹⁸²

Zusammenfassung der Schottky-Theorie

Die Schottky-Theorie war eine Theorie für die Gleichrichtung am Metall-Halbleiter-Kontakt, bei der die Größe der Metall-Halbleiter-Austrittsarbeit die wesentliche Rolle zur Bestimmung des Gleichrichtersinns und der Qualität des betrachteten Gleichrichters durch die Annahme des Zusammenhangs von Austrittsarbeit und Diffusionsspannung lieferte. Sie ermöglichte es, die Gleichrichtung ohne Annahme einer „chemischen Randschicht“, das heißt einer Materialveränderung an der Grenze Metall-Halbleiter, zu erklären.

Sie ließ sich als semiklassische Theorie charakterisieren, da sie zwar einige Aspekte der in den 1920er und frühen 1930er Jahren geschaffenen Quantentheorie der festen Körper benutzte, aber nicht vollständig auf quantenmechanischen Vorstellungen beruhte. Beispielsweise verwendete Schottky wenn nötig die Fermi-Statistik, blieb aber in der Festkörpertheorie den klassischen Vorstellungen verhaftet, in der Elektronenkonzentrationen und lokalisierte Elektronen betrachtet werden.¹⁸³

Andererseits war sich Schottky bei der Formulierung der Randschichttheorie völlig im klaren darüber, daß der Strom in einem Halbleiter von zwei unterschiedlichen Ladungsträgern, den Elektronen und den „Löchern“ getragen werden konnte. Der Formalismus der Schottky-Theorie ermöglichte es aber nicht, diese zwei bekannten Ladungsträgerarten im Halbleiter *gleichzeitig* zu beschreiben. Es konnte immer nur eine Ladungsträgerart - die Hauptladungsträger - betrachtet werden. Spenke erinnerte sich später:

gleichrichter, 1939). Die dortigen Bemerkungen bleiben aber qualitativ, wie die gesamte erste Veröffentlichung. In der im gleichen Jahr gemeinsam mit Eberhard Spenke veröffentlichten quantitativen Arbeit ist von „chemischen Sperrschichten“ keine Rede mehr (Schottky/Spenke, *Quantitative Durchführung*, 1939). In der am klarsten formulierten Arbeit Schottkys (Schottky, *Vereinigte Theorie*, 1942) wird die „chemische Sperrschicht“ ebenfalls nicht berücksichtigt.

¹⁸⁰ unvollständiges Manuskript: Schottky, „Zum Problem der Austrittsarbeit an der Grenze Metall-Störstellenhalbleiter“, o.J., S. 1, WSD 003.

¹⁸¹ Schottky, *Sperrschicht- und Spitzengleichrichter*, 1939, S. 367.

¹⁸² Schweickert, *Über Selengleichrichter*, 1939.

¹⁸³ Schottky nahm häufig expliziten Bezug auf die Fermi-Statistik, beispielsweise in einem Vortrag über die Statistik und Thermodynamik in Kristallen, den er 1938 auf der Tagung der Deutschen Bunsengesellschaft gehalten hat. (Schottky, *Statistik und Thermodynamik*, 1939, insb. S. 39-41). Für eine bildliche Darstellung von lokalisierten Elektronen am Metall-Halbleiter-Kontakt siehe Schottky, *Sperrschichtgleichrichter*, 1939, S. 380.

Grundsätzlich ähnelt die Situation in der Theorie des Metall-Halbleiter-Kontakt ca. 1940 der semiklassischen Phase der Elektronentheorie der Metalle, von 1926 bis 1928. Siehe dazu Hoddeson/Baym, *Development*, 1980.

„Bis zur Entdeckung des Transistors im Jahre 1948 betrachtete die Gleichrichtertheorie niemals das gleichzeitige Vorhandensein von negativen Überschusselektronen und positiven Defektelektronen in ein und demselben Halbleiter. Man hatte in dieser Beziehung gleichsam einen ‚blinden Fleck‘.“¹⁸⁴

Ende der 1930er Jahre stellte die semiklassische Theorie Schottkys aber einen großen Erfolg dar, da sie im Gegensatz zu den vollständig quantenmechanischen Theorien die Effekte am Metall-Halbleiter-Kontakt in Übereinstimmung mit den Beobachtungen beschrieb.

Was ist ein Halbleiter? (1939)

Zu Beginn des Jahrhunderts waren zahlreiche Abweichungen der Strom-Spannungsbeziehungen elektrisch leitender Stoffe vom Ohmschen Gesetz bekannt. 1911 wurde für eine bestimmte Klasse dieser Stoffe der Begriff „Halbleiter“ geprägt.¹⁸⁵ Halbleiter wurden zunächst im wesentlichen durch den negativen Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstandes (fallender Widerstand bei steigender Temperatur) charakterisiert.¹⁸⁶

Die experimentellen Untersuchungen von „Halbleitern“ waren geprägt von großen Schwierigkeiten, die eigentümlichen Eigenschaften der nicht metallischen Leitung zu klassifizieren. So bestand lange Zeit während der 1920er Jahre Unsicherheit darüber, bei welchen Stoffen Ionenleitung vorliegt, bei welchen Elektronenleitung und wo beide Arten gemischt auftreten. Häufig wurden sowohl Ionen- als auch Elektronenleiter als Halbleiter bezeichnet. Experimentelle Klarheit und eine getrennte Begrifflichkeit brachten erst die 1930er Jahre.¹⁸⁷

Aufbauend auf der quantenmechanischen Elektronentheorie der Metalle hatte Alan Wilson 1931 eine theoretische Unterscheidung von Metallen, Isolatoren und elektronischen Halbleitern eingeführt. Das Modell eröffnete die Möglichkeit der Existenz einerseits von elektronischen Halbleitern, die Halbleitereigenschaften auch in einem völlig reinen Zustand aufwiesen (Eigenhalbleitern), und andererseits von solchen, deren Halbleitereigenschaften ausschließlich auf das Vorhandensein von Störstellen zurückzuführen waren.¹⁸⁸ Die Existenz solcher Störstellenhalbleiter war Mitte der 1930er Jahre zwar völlig unbestritten, aber ob es Eigenhalbleiter wirklich gab, war eine offene Frage geblieben.¹⁸⁹ Von der Theorie her gab es aber auch keinen Grund, warum sie nicht existieren sollten.¹⁹⁰

Welche Materialien überhaupt halbleitende Eigenschaften aufwiesen und elektronische Halbleiter seien, ob nun Störstellen- oder Eigenhalbleiter, war eine weitere umstrittene und experimentell nicht sicher geklärte Frage.¹⁹¹ Im Laufe der 1930er Jahre setzte sich aber zum Beispiel die klare Erkenntnis durch, daß „Kupferoxydul“,

¹⁸⁴ Spenke, *Leistungsgleichrichter auf Halbleiterbasis*, 1958, S. 872.

¹⁸⁵ J. Königsberger und J. Weiss (Königsberger/Weiss, *Thermoelektrische Effekte*, 1911) sprachen 1911 über die „sogenannten Halbleiter“ und bezeichneten damit die „zwischen Metallen und Metalloiden stehenden Elemente“ (S. 22). Als Beispiele galten vor allem „Silicium, Eisenoxyd, Molybdänsulfid, Eisensulfid, Eisendisulfid, Manganoxyd, Eisenoxyduloxid, Graphit“ (S. 16-17). Gebräuchlicher war aber lange Zeit noch der Ausdruck „Variable Leiter“. Siehe zum Beispiel auch Königsberger, *Variable Leiter*, 1914 für eine umfassende Zusammenstellung des empirischen Materials.

¹⁸⁶ Einzelne Autoren hielten auch die Beobachtung, daß bei weiter steigender Temperatur der Widerstand wieder zunahm, die Widerstandskurve über der Temperatur also ein Minimum durchlief, für charakteristisch für einen Halbleiter (Grüneisen, *Metallische Leitfähigkeit*, 1928, S. 60-64).

¹⁸⁷ Gudden, *Elektrische Leitfähigkeit*, 1934, S. 225-227. Siehe auch Gudden, *Elektrizitätsleitung*, 1924.

¹⁸⁸ Wilson, *Electronic Semi-Conductors I*, 1931; Wilson, *Electronic Semi-Conductors II*, 1931.

¹⁸⁹ Gudden/Schottky, *Ionen- und Elektronenleitung*, 1935; Gudden, *Elektrische Leitfähigkeit*, 1934.

¹⁹⁰ Wilson, *Electronic Semi-Conductors I*, 1931.

¹⁹¹ Grüneisen, *Metallische Leitfähigkeit*, 1928; Gudden, *Elektrische Leitfähigkeit*, 1934.

das in den „Kupferoxydulgleichrichtern“ seit 1926 wirtschaftliche Bedeutung erlangt hatte, zu den halbleitenden Materialien zu zählen sei. Die ersten noch wenig erfolgreichen Theorien zur Erklärung des gleichrichtenden Effekts in „Kupferoxydulgleichrichtern“ betrachteten lediglich „Kupferoxydul“, ohne es explizit als Halbleiter zu benennen.¹⁹² Erst die Schottky-Theorie von 1938 war eine allgemeinere Theorie der Gleichrichtung am Metall-Halbleiter-Kontakt.

Zwischenzeitlich war es durch die Bandtheorie des Festkörpers möglich geworden, den Stromtransport in Halbleitern sowohl durch Elektronen- als auch Löcherleitung zu verstehen. Die Tatsache, daß es sich bei „Kupferoxydul“ um einen Löcherleiter handelte, und daß Halbleiter sich auch durch eine im Vergleich zu den Metallen ausgesprochen niedrige Ladungsträgerkonzentration auszeichnen, waren allerdings die beiden einzigen aus der Bandtheorie folgenden Tatsachen, die in die semiklassische Schottky-Theorie eingingen. Doch war es im Gegensatz zu den völlig quantenmechanischen Theorien des Gleichrichtereffekts möglich, die wesentlichen beobachteten Tatsachen qualitativ und zum Teil auch quantitativ zu verstehen. Messungen an Selen brachten 1939/40 weitere Bestätigungen für die Grundannahmen der Schottky-Theorie.

Um 1940 waren die Materialien „Kupferoxydul“ und Selen, die im Leistungsgleichrichterbereich eingesetzt wurden, und einige Detektormaterialien wie Bleiglanz (PbS) und Pyrit (FeS₂) als elektronische Halbleiter gut bekannt. Eine große Anzahl von Verbindungen (insb. Sulfide, Antimonide, Oxide) wurde trotz teilweise widersprüchlicher Meßergebnisse der Klasse der elektronischen Halbleiter zugeordnet. Über die Eigenschaften der Elemente Germanium und Silizium bestand aber so große experimentelle Unklarheit, daß sie je nach Autor unterschiedlich klassifiziert wurden.

¹⁹² Schottky/Deutschmann, *Mechanismus der Gleichrichtung*, 1929.

Kriegsforschungen

Mit dem Überfall der deutschen Wehrmacht auf Polen am 1. September 1939 begann nach einer Phase der mehr oder weniger versteckten Feindseligkeiten der offene Krieg.

Herbert Mataré, Karl Seiler, Eberhard Spenke und Heinrich Welker, die zu diesem Zeitpunkt zwischen 26 und 33 Jahre alt waren, mußten damit rechnen, zum aktiven Dienst beim Militär verpflichtet zu werden. Bis auf Karl Seiler konnten jedoch alle mit Hinweis auf ihre wissenschaftlich-technische Qualifikation dem Militärdienst entgehen und sich für Kriegsforschungen verpflichten. Auch Seiler wurde ab 1943 zu diesem Zweck freigestellt.

In dieser Tätigkeit kamen Mataré, Seiler und Welker während des Krieges erstmalig mit den Problemen der Halbleiterphysik und deren technischer Anwendung in Berührung und blieben ihr ganzes weiteres Leben in diesem Bereich tätig. Lediglich Spenke, der als einziger bereits Erfahrungen mit Halbleitern hatte, wurde „fachfremd“ eingesetzt. Er arbeitete zunächst als Meteorologe für die Luftwaffe und führte später Forschungen zur magnetischen und akustischen Minenabwehr für die Marine durch.¹

Mataré, Seiler und Welker forschten während des Zweiten Weltkrieges an Problemen des Radars. Es ging für sie dabei hauptsächlich um den Einsatz von Zentimeterwellen und die Konstruktion der dafür notwendigen Detektoren.

„Funkmeß“: Radarentwicklung in Deutschland

Der heute allgemein übliche Begriff „Radar“ wurde von den amerikanischen Marineoffizieren E. F. Furth und S. P. Tucker geprägt. Sie leiteten ihn aus „radio detection and ranging“ ab. In Deutschland hatte sich zunächst der aus der Funktechnik abgeleitete Begriff „Funkmeß“ eingebürgert und sich auch bis lange nach dem Zweiten Weltkrieg gehalten.²

Vorgeschichte

Nachdem schon Anfang dieses Jahrhunderts erste Vorschläge gemacht worden waren, elektromagnetische Wellen zur Beobachtung entfernter Gegenstände zu benutzen, wurden Anfang der 1930er Jahre in Deutschland die ersten Funkmeßbeziehungsweise Radarverfahren in die Praxis umgesetzt. Der entscheidende Anstoß kam von der Reichsmarine, wo bisher akustische Horchgeräte zur Frühwarnung vor herannahenden Flugzeugen eingesetzt worden waren.

¹ Zu Spenkes Kriegsforschungen siehe das Kapitel „Von der Kriegsforschung zum Selen - Eberhard Spenke“ ab S. 110.

² Zum Thema Radar in Deutschland bis 1945 liegen einige Darstellungen vor, so daß hier nur ein kurzer Überblick besonders im Hinblick auf die Entwicklung des Zentimeterwellenradars geben werden soll. Siehe Kern, *Radarverfahren*, 1984; Reuter, *Funkmeß*, 1971 und Trenkle, *Funkmeßverfahren*, 1979.

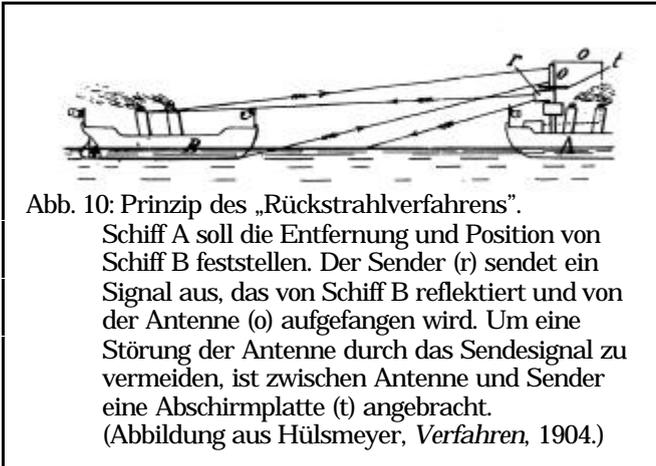


Abb. 10: Prinzip des „Rückstrahlverfahrens“.

Schiff A soll die Entfernung und Position von Schiff B feststellen. Der Sender (r) sendet ein Signal aus, das von Schiff B reflektiert und von der Antenne (o) aufgefangen wird. Um eine Störung der Antenne durch das Sendesignal zu vermeiden, ist zwischen Antenne und Sender eine Abschirmplatte (t) angebracht.
(Abbildung aus Hülsmeier, *Verfahren*, 1904.)

Ab 1932 wurden von der Nachrichtenmittel-Versuchsanstalt der Marine (NVA) unter der wissenschaftlichen Leitung von Dr. Rudolf Kühnhold erste Experimente mit Funkmeßverfahren im Kieler Hafen durchgeführt. Dabei erwies sich die prinzipielle Durchführbarkeit des schon 1904 von Christian Hülsmeier vorgeschlagenen „Rückstrahlverfahrens“ (siehe Abb. 10). Störungen des Empfängers durch den Sender wurden allerdings nicht, wie von Hülsmeier vorgeschlagen, durch eine Abschirmplatte, sondern durch

„Impulsbetrieb“ verhindert. Dabei wurden Sender und Empfänger so aufeinander abgestimmt, daß sie abwechselnd arbeiteten. Das verhinderte eine Störung des Empfängers durch den Sender und erlaubte gleichzeitig, durch Laufzeitmessungen Entfernungsbestimmungen durchzuführen.³

Für ein nach diesem Prinzip arbeitendes Radarsystem war es aus verschiedenen Gründen notwendig, hohe Frequenzen beziehungsweise kurze Wellenlängen zu verwenden. Nur mit kurzen Wellen war eine genaue Ortung des Objekts möglich, da die erreichbare Auflösung in der Größenordnung der benutzten Wellenlänge liegt. Handliche und somit transportable Richtantennen, die eine gute Bündelung der ausgestrahlten Wellen ermöglichten, ließen sich für mit kurze Wellenlängen realisieren. Daher wurde die Radartechnik während des Nationalsozialismus in Deutschland auch häufig als Teil der Hochfrequenztechnik bezeichnet.

Anfang 1933 bestellte die Nachrichtenmittel-Versuchsanstalt der Marine bei der Firma *Pintsch* in Berlin einen Sender und Empfänger für eine Wellenlänge von 13,5 cm (2200 MHz). Sende- sowie Empfangsröhre arbeiteten nach dem Barkhausenprinzip.⁴ Die Sendeleistung war aber so gering (ca. 100 mW), daß diese ersten Experimente mit sehr kurzen Wellen scheiterten. Die ersten erfolgreichen Versuche der Marine wurden kurz danach mit einem Sender durchgeführt, der mit einem Magnetron der niederländischen Firma *Philips* ausgestattet war, das bei einer Wellenlänge von 50 cm eine Sendeleistung von 40 Watt lieferte.⁵

³ Zu Christian Hülsmeier siehe Bosch, *Hülsmeier*, 1998 und Trenkle, *Funkmeßverfahren*, 1989, S. 14-17.

⁴ Trenkle, *Funkmeßverfahren*, 1979, S. 16-19.

Die Erzeugung von Schwingungen höchster Frequenz nach dem Barkhausenprinzip ging auf eine neuartige im Jahre 1920 von Wilhelm Barkhausen und K. Kurz veröffentlichte Schaltung zurück (Barkhausen/Kurz, *Die kürzesten*, 1920). Im Gegensatz zur gewöhnlichen Schaltung von Elektronenröhren (negatives Gitter, positive Anode), legten Barkhausen und Kurz an das Gitter eine hohe positive und an die Anode eine geringe negative Spannung an.

„Vereinfacht läßt sich die Schwingungserzeugung wie folgt erklären: die auf der Kathoden-Gitterstrecke beschleunigten Elektronen fliegen größtenteils durch das Gitter hindurch, werden von der negativen Anode zur Umkehr gezwungen und führen um das Gitter herum pendelnde Bewegungen aus, wo bei jedem Durchgang ein Teil im Gitter landet. Diese ungeordnete Bewegung der Elektronen läßt sich in eine gleichphasige Schwingung umwandeln, wenn die Elektronen Wechselspannung aufnehmen können. Die dabei entstehende, sehr hohe Frequenz wird im wesentlichen von den geometrischen Abmessungen und Spannungen der Elektrode bestimmt.“ (Kern, *Radarverfahren*, 1984, S. 94).

⁵ Kern, *Radarverfahren*, 1984, S. 106-122.

Zu den verschiedenen Funktionsweisen des Magnetrons siehe Callick, *Meters to Microwaves*, 1990, S. 55-77. Einen Überblick über die Entwicklung von Barkhausenröhren, Magnetrons und Klystrons in Deutschland bis 1945 gibt Döring, *Microwave tube development*, 1991.

Zum Zwecke der (Weiter-) Entwicklung leistungsfähiger Magnetrons und ganzer Ortungsgeräte wurde eine neue „Gesellschaft für elektro-akustische und mechanische Apparate“ (GEMA) gegründet. Eine Kooperation zwischen der Marine und der Firma *Telefunken* auf dem Hochfrequenzsektor war zuvor gescheitert, da es zu Meinungsverschiedenheiten über die technische Realisierbarkeit von Ortungsgeräten auf Basis von elektromagnetischen Wellen zwischen dem Laborchef von *Telefunken*, Dr. Wilhelm Runge, und Kühnhold gekommen war. Runge hatte zunächst kein Interesse an der Radartechnik geäußert, wenig später initiierte er aber trotzdem bei *Telefunken* Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf diesem Gebiet.

Die Neugründung der GEMA brachte erhebliche Schwierigkeiten mit sich, da von Grund auf neue Labor- und Entwicklungskapazitäten geschaffen werden mußten und nicht auf langjährige Erfahrung zurückgegriffen werden konnte. Die angeworbenen Ingenieure waren zudem keine Fachleute auf dem Gebiet der Hochfrequenztechnik. Das führte zu Verzögerungen und Fehlschlägen in der Geräteentwicklung für die Marine. Anfang 1939 legte sich die Marine jedoch auf das „Freya“-Gerät als Luftwarngerät und auf ein Seezielgerät fest. Beide waren bei der GEMA entwickelt worden und wurden auch dort produziert. „Freya“ arbeitete mit einer Wellenlänge von 2,4 Metern und das Seezielgerät mit einer Wellenlänge von 80 Zentimetern.⁶

Parallel zur GEMA wurden ab 1936 bei *Telefunken* nach Auftragserteilung durch das Reichsluftfahrtministerium (RLM) ebenfalls Funkmeßgeräte getestet, die für Zwecke der Luftwaffe eingesetzt werden sollten. Unter der Leitung von Wilhelm Runge entwickelte sein Mitarbeiter Wilhelm Stepp ein Radargerät, das dieser zunächst nach seiner Heimatstadt „Darmstadt“-Gerät nannte. In einer Weiterentwicklung erlangte es unter dem Namen „Würzburg“-Gerät wegen seiner hohen Genauigkeit bei Entfernungs-, Seiten- und Höhenmessungen für die Flakartillerie eine große Bedeutung. Nach Erinnerung Runges wählte er für die ersten Geräte „die nach dem damaligen Stand der Röhrentechnik kürzeste sich ergebende Wellenlänge von 53 cm.“ Neben *Telefunken* entwickelte auch noch die *C. Lorenz AG* Radargeräte für die Luftwaffe.⁷

Zwar machten die unterschiedlichen Anforderungen der Luftwaffe und der Marine getrennte Geräteentwicklungen erforderlich, doch hätten einige Doppel- und Parallelentwicklungen bei besserer Absprache untereinander vermieden werden können. Das weitgehende Fehlen einer Koordination behinderte die deutsche Funkmeßentwicklung bis weit in den Krieg hinein. Zur mangelnden Absprache kam auch noch die Geringschätzung des Radarprinzips durch das Militär hinzu, das Radargeräte lediglich als eine Ergänzung zu den optischen Entfernungsbestimmungen ansah. Die großen technischen Möglichkeiten und die militärische Bedeutung des Radars als technisches System wurden damit stark unterschätzt.⁸

So hatten sich zu Beginn des Krieges sowohl die deutsche Luftwaffe als auch die Marine auf Radargeräte festgelegt, die allen Anforderungen gerecht zu werden schienen und - gemessen am Stand der technischen Entwicklung bei den Alliierten - hervorragend funktionierten. Mit den relativ kurzen und somit hochauflösenden Wellen war ein befriedigender Kompromiß zwischen Reichweite und Auflösungsvermögen

⁶ Ebenda, S. 109-111; Reuter, *Funkmeß*, 1971, S. 23-31.

Für eine ausführliche Darstellung der „Freya“-Geräte und der Seezielgeräte siehe z.B. Trenkle, *Funkmeßverfahren*, 1989, S. 48-64.

⁷ Reuter, *Funkmeß*, 1971, S. 32.

Für eine Darstellung der „Würzburg“-Geräte siehe z.B. Trenkle, *Funkmeßverfahren*, 1989, S. 26-43.

⁸ Kern, *Radarverfahren*, 1984, S. 121; Reuter, *Funkmeß*, 1971, S. 25.

Lediglich erste Funkleitverfahren, die es deutschen Bombern ermöglichten während der Nacht über England ihre Ziele zu finden und bombardieren, deuten an, daß das deutsche Militär die Hochfrequenztechnik auch systematisch für den Angriff auf England nutzen wollte. Diese Bemühungen waren aber durch die englischen Gegenmaßnahmen von wenig Erfolg gekrönt und wurden nicht weiterentwickelt. Siehe dazu Johnson, *Streng Geheim*, 1983, S. 11-62.

gefunden, so daß der Übergang zu noch kürzeren und daher besser auflösenden Zentimeterwellen nicht notwendig schien beziehungsweise den Aufwand nicht rechtfertigte. Als einzige Maßnahme wurde zu Beginn des Krieges die Fabrikation der bereits entwickelten Geräte intensiviert, um diese in größerer Anzahl zur Verfügung stellen zu können.⁹

Im Gegensatz dazu hatte man in England den Systemcharakter der neuen Technologie erkannt und die Möglichkeit gesehen, daß den neuen Ortungsverfahren bei der Landesverteidigung eine entscheidende Rolle zufallen könnte. Während in Deutschland die Entwicklung ausgefeilter Einzelgeräte im Vordergrund stand, wurde schon ab Mitte der 1930er Jahre in Großbritannien ein praktikables Gesamtsystem zum Schutz der großen Küstenlinie vor den drohenden deutschen Luftangriffen entwickelt. Eine erste Version der Radarkette „Chain Home“, die die Ostküste Englands schützen sollte, konnte erst im Herbst 1939 fertiggestellt werden. Das hatte große Auswirkungen auf die britische Außenpolitik, da es davor praktisch keine Verteidigungsmöglichkeit vor deutschen Luftangriffen gegeben hatte.¹⁰

Die „Chain Home“ bestand aus 20 einfachen, riesigen, ortsfest aufgestellten Radaranlagen, die mit Wellen der relativ langen Wellenlänge von 10 bis 12 m arbeiteten und eine Vorwarnzeit vor herannahenden Flugzeugen von etwa 20 Minuten sicherten. Meßungenauigkeiten von einigen Kilometern mußten allerdings zunächst hingenommen werden.¹¹

Aber genau diese Ungenauigkeiten stellten die Motivation für eine intensive Radarforschung und den Übergang zu immer kürzeren Wellen dar. Im Laufe ihrer Untersuchungen entwickelten die britischen Physiker Henry A. Boot und John T. Randall 1939 an der Universität Birmingham ein Hohlraummagnetron, mit dem es Anfang 1940 möglich war, bei einer Wellenlänge von 9,8 cm die erstaunlich hohe Sendeleistung von 400 W zu erzeugen. In Zusammenarbeit von amerikanischen und britischen Physikern und Ingenieuren wurden daraufhin komplette Radargeräte zur Produktionsreife entwickelt und ab Ende 1942 produziert. Die wesentlichen Bauteile darin waren das Hohlraummagnetron zum Senden, der Kristalldetektor zum Empfangen der Zentimeterwellen und der Plan Position Indicator (PPI), auf dem direkt ein Radarbild der Umgebung ablesbar war.¹²

Diese Radargeräte waren klein genug, um in Flugzeuge eingebaut zu werden und ermöglichten es ihnen, auch im Dunkeln über Deutschland zu navigieren. Damit wurden gezielte offensive Maßnahmen gegen Deutschland wie zum Beispiel die Bombardierung deutscher Städte möglich und auch durchgeführt. Als Deutschland im Januar 1943 erstmals von englischen Bombern angegriffen wurde, die mit Zentimeterwellenradar ausgerüstet waren, traf dies die deutsche militärische Führung völlig unvorbereitet. Kurz zuvor war nämlich noch von hoher militärisch-politischer Seite angeordnet worden, sämtliche Entwicklungsarbeiten auf den Zentimeterwellengebiet einzustellen, da diese nicht zu Radarzwecken zu gebrauchen seien.

⁹ Ebenda, S. 133-135, Gießler, *Entwicklung der Funkmeßgeräte*, 1958, S. 114.

¹⁰ Siehe hierzu ausführlicher Kaiser, *Case Study*, 1996.

¹¹ Kaiser, *Case Study*, 1996, S. 36-37.

¹² Zur Entwicklung und Funktionsweise des Hohlraummagnetrons siehe Callick, *Meters to Microwaves*, 1990, S. 55-77, sowie Burns, *Cavity Magnetron*, 1988 und Kaiser, *Electron Tubes*, 1994.

Zum Plan Position Indicator siehe Callick, *Meters to Microwaves*, 1990, S. 108-118.

Das US amerikanische Radarprojekt des Zweiten Weltkrieges beschreibt ausführlichst Guerlac, *Radar*, 1987, spezielle Informationen zur Kristalldetektorentwicklung finden sich in Torrey/Whitmer, *Crystal Rectifiers*, 1948.

Forschungen an Zentimeterwellen

Zwar hatte es in den 1920er und 1930er in Deutschland Forschungen zur „Physik und Technik ultrakurzer Wellen“ gegeben, doch hatten diese nicht zur Entwicklung von funktionsfähigen Radarsystemen auf Zentimeterwellenbasis geführt. Bereits Anfang der 1930er Jahre konnte Hans E. Hollmann, der 1928 mit einer Arbeit über Elektronenschwingungen in Barkhausenröhren an der TH Darmstadt promoviert hatte, Wellenlängen von wenigen Zentimetern produzieren. In seinen weiteren Arbeiten setzte er sich vornehmlich mit der Erzeugung solcher ultrakurzer Wellen und den dabei auftretenden Problemen auseinander.¹³

In seinem ausführlichen zweibändigen Werk zur „Physik und Technik ultrakurzer Wellen“ widmete er der Erzeugung dieser Wellen dann auch einen ganzen Teilband, während der „Empfang und Nachweis“ in nur einem Kapitel abgehandelt wurde. Darin waren wiederum nur wenige Seiten für den Kristalldetektor reserviert. Den Hauptteil beanspruchte die Elektronenröhre, die nach seiner Einschätzung „dem Detektor auch im Ultrakurzwellengebiet als Strombahn mit nichtlinearer Charakteristik und mit einseitigem Leitvermögen überlegen [ist], nicht nur hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit, sondern auch wegen ihrer Beständigkeit und Betriebssicherheit.“¹⁴

Auch der Hochfrequenzexperte und spätere Präsident der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Abraham Esau, experimentierte schon 1937 mit nach dem Magnetronprinzip erzeugten Wellen bis in den Millimeterbereich (5 mm). Zwar waren die erzielbaren Leistungen noch äußerst klein, da „man bei 4 bis 5 cm Wellenlänge maximal etwa 3 Watt herstellen“ konnte.¹⁵ Dies erschien gegenüber den Leistungen im Dezimeterbereich von mehreren 100 Watt zwar ausgesprochen wenig, doch Esau war sich sicher, daß Zentimeterwellen bald für „technisch bedeutsame Probleme eingesetzt“ werden könnten. Besonders wies er auf die mögliche „Ortung [und] Höhenbestimmung von Flugzeugen“ hin.¹⁶

Dieser optimistischen Einschätzung zum praktischen Einsatz von Zentimeterwellen stand der Leiter der Hochfrequenzforschung von *Telefunken*, Wilhelm Runge, sehr zögerlich gegenüber. Den größten Nachteil sah er in den geringen Reichweiten, da „die zwischen zwei rundstrahlenden Antennen vom Sender zum Empfänger übertragene Leistung im freien Raum dem Quadrat der Wellenlänge proportional ist.“ Daher müßten vergleichsweise sehr viel höhere Leistungen für gleichbleibende Reichweiten aufgewendet werden. Allerdings könnten die Vorteile der leichteren Bündelung Richtfunkverbindungen einfacher machen.¹⁷

Eine Möglichkeit, die Reichweite auch bei kleineren Sendeleistungen und hohen Frequenzen (10^9 bis 10^{11} Hz, 30 - 0,3 cm) zu steigern, bestand darin, die Empfängerempfindlichkeit zu erhöhen. Das war bei den häufig eingesetzten Empfängerröhren nach dem Barkhausen- oder Magnetronprinzip in diesem Frequenzbereich ausgesprochen schwierig. Eine Alternative stellte der Kristalldetektor dar, der nach Einschätzung der Forscher vom Institut für Elektrophysik der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt in Berlin-Adlershof „für die Gleichrichtung von kleinen Wechsel-

¹³ Hollmann, *Elektronenschwingungen*, 1928 und *ultradynamische Schwingungsanfachung*, 1933.

¹⁴ Hollmann, *Physik und Technik*, 1936, Bd. 2, S. 5.

Hollmanns Buch erschien 1936 im Berliner Springer Verlag und fand wegen der angespannten politischen Situation und des hohen Preises international zunächst wenig Beachtung, wurde aber später im britischen Radarprojekt diskutiert. (Zu Hollmanns Einfluß auf das britische Radarprojekt siehe Seitz/Einspruch, *Electronic Genie*, 1998, S. 113-123).

¹⁵ Esau, *Elektrische Wellen*, 1940, S. 7.

¹⁶ Ebenda, S. 4. Zur Biographie Esaus siehe Kern, *Forschung und Präzisionsmessung*, 1994, S. 259-266.

¹⁷ Runge, *Praktische Bedeutung*, 1940, S. 15.

strömen ... infolge seiner Frequenzunabhängigkeit und Einfachheit besonders geeignet“ war.¹⁸

Allerdings mußte die geringe Empfindlichkeit der bis dahin eingesetzten Kristalldetektoren verbessert werden. Während Hollmann in seinem Buch von 1936 ausschließlich Pyrit-Detektoren beschrieb, wurden Ende der 1930er Jahre besonders am Institut für Elektrophysik in Berlin-Adlershof Untersuchungen an Silizium-Detektoren mit Wolfram-Kontakt durchgeführt. Bei Versuchen mit unterschiedlichen Kristall-Metall-Kombinationen hatte sich dort Silizium-Wolfram als die brauchbarste Kombination erwiesen.¹⁹ Jedoch blieb das Kernproblem der frühen Detektoren erhalten, denn gute Wirkungsgrade traten „nur an einer diskreten Zahl scharf lokalisierter Stellen auf, und zwar meist an Störstellen der Flächen (Erosionen, Ecken, Kanten und Bruchstellen).“²⁰ Mit steigender Frequenz ging auch die Häufigkeit der guten Stellen zurück, so „daß das Auffinden von Stellen brauchbarer Empfindlichkeit im Gebiet höchster Frequenzen sehr schwierig“²¹ wurde. Für die technische Anwendung in Radarsystemen eigneten sich diese Kristalldetektoren allerdings wenig, da mühsam mit der Metallnadel „gute Stellen“ auf dem Kristall manuell gesucht und auch bei möglichen Erschütterungen festgehalten werden mußten.²² Von rein wissenschaftlichem Interesse war daher ebenfalls, daß „im Wellenlängengebiet von 0,1 - 0,4 mm Wellenlänge der Gleichrichtereffekt der Wolfram-Silizium-Kombination praktisch verschwunden ist.“²³

Bei dem in Berlin-Adlershof benutzten Silizium handelte es sich offenbar um natürliches, polykristallines Material. Jedenfalls wurde über die Herstellung des Detektormaterials nichts berichtet. Auch Erklärungen für das Phänomen der Gleichrichtung wurden nicht diskutiert.²⁴

Eine erste erfolgversprechende theoretische Erklärung der Gleichrichtung am Metall-Halbleiter-Kontakt wurde etwa zur gleichen Zeit durch Walter Schottky formuliert und veröffentlicht. Das Haupterklärungsziel Schottkys waren aber die technisch wichtigen Flächengleichrichter auf „Kupferoxydul“- und Selenbasis gewesen, die hauptsächlich zur Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom eingesetzt wurden. Erst Heinrich Welker wandte 1941 die Schottky-Theorie explizit auf Kristalldetektoren zum Nachweis von Zentimeterwellen an.²⁵

Die Organisation der Hochfrequenz-Forschung im NS-Staat

Stop der Arbeiten auf dem Zentimeterwellengebiet

Mit Beginn des Krieges wurden die meisten der ohnehin spärlichen Forschungsarbeiten auf dem Zentimeterwellengebiet wegen Personalmangels eingestellt. Zwar arbeitete man zum Beispiel bei *Telefunken* in Berlin unter der Leitung von Dr. Waldemar Illberg noch an der Erforschung der technischen Möglichkeiten des Zentimeter- und Dezimeterwellenradars weiter, aber mit geringen Mitteln und wenig Erfolg.

Wilhelm Runge fand die Forschungsergebnisse sogar so entmutigend, daß er den Eindruck gewann, daß man bei Verwendung von Zentimeterwellen in nächster Zeit nur wenig erreichen würde, und daß „angesichts der dringenden Entwicklungsaufgaben

¹⁸ Klumb, *Beobachtungen*, 1939, S. 640.

¹⁹ Rottgardt, *Untersuchung an Detektoren*, 1938.

²⁰ Klumb, *Beobachtungen*, 1939.

²¹ Ebenda.

²² Ebenda.

²³ Klumb/Koch, *Verhalten von Kristalldetektoren*, 1939, S. 548.

²⁴ Rottgardt, *Untersuchung an Detektoren*, 1938; Klumb, *Beobachtungen*, 1939.

²⁵ Zur Schottky-Theorie siehe detaillierter das Kapitel „Die Schottky-Theorie des Metall-Halbleiter-Kontakts“ ab S. 31. Zu Welkers Anwendung der Schottky-Theorie auf Kristalldetektoren siehe Welker, *Spitzendetektor*, 1941 und das Kapitel „Germaniumdetektoren“ ab S. 74.

und dem beschränkten Personal solche Zukunftsgebiete schon seit Kriegsbeginn nicht mehr intensiv genug bearbeitet werden konnten.²⁶ In einer Demonstration der Möglichkeiten des „Würzburg“-Gerätes am 22. November 1942 gelang es ihm, die anwesenden Militärs davon zu überzeugen, daß die 50 cm-Welle dieses Gerätes immer noch die beste für Radarzwecke sei. Daraufhin beschlossen die militärischen Dienststellen, alle Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Zentimeterwellen einzustellen, das Laboratorium von Illberg zu schließen und die dort beschäftigten Fachleute mit der Verbesserung der bereits funktionsfähigen Radargeräte zu betrauen.²⁷

Bei dieser häufig zitierten Entscheidung, handelte es sich nicht ausschließlich um eine wissenschaftlich-technische Fehleinschätzung, wie dies von manchen Radarpionieren im Rückblick vertreten wurde.²⁸ Sie weist insbesondere auf die schwierige Situation von naturwissenschaftlich-technischen Forschungsprojekten im Dritten Reich hin.

Zwar war in den 1930er Jahren versucht worden, die Technokratiebewegung zu nutzen und die technische Intelligenz für die Ziele des Nationalsozialismus zu mobilisieren, technische Experten bekamen aber selten großen Einfluß auf die (rationale) Gestaltung der Gesellschaft. Selbst an den höchsten und einflußreichsten Positionen blieben sie stets Spielbälle der unterschiedlichen Machtblöcke des nationalsozialistischen Staates.²⁹

Machtblöcke, polykratische Struktur und der „Führerstaat“

Die Struktur der Machtbeziehungen im Dritten Reich war geprägt durch die ungeregelte Machtverteilung einander überschneidender Instanzen (Polykratie) einerseits und durch den absoluten Machtanspruch des „Führers“ (Monokratie) andererseits. Der Staatsapparat löste sich in einer Vielzahl von Instanzen auf, die miteinander zum Machterhalt und Machtgewinn um die Aufmerksamkeit des „Führers“ konkurrierten, von dem jede Macht ausging und jederzeit wieder entzogen werden konnte. Der Zustand der ständigen Unsicherheit über die eigene Machtposition bewirkte einen andauernden Wettlauf um die Gunst des „Führers“. Diese hing wesentlich davon ab, wie geschickt es den einzelnen Blöcken gelang, mit den anderen Machtblöcken zu kooperieren und auch zu konkurrieren, und die erreichten Erfolge beim Führer deutlich zu machen.³⁰ Darüber hinaus konnten die Vertreter des Regimes auch durch Propagierung besonders radikaler Maßnahmen im Ansehen des „Führers“ steigen und so zur Macht des von ihnen vertretenen Machtblocks beitragen.³¹

Das Miteinander, Nebeneinander und Gegeneinander der unterschiedlichen Machtblöcke wirkte sich auf die Technologie- und Forschungsförderung verheerend aus, da es dem 1937 im Reichserziehungsministerium (REM) gegründeten Reichsforschungsrat (RFR) wegen seiner schwachen Position zwischen den unterschiedlichen Machtblöcken und ohne direkte Unterstützung des Führers nie gelang, die ihm zugedachte

²⁶ Runge, *Ich und Telefunken*, 1971, S. 50.

In einem weiteren rückblickenden Bericht (Runge, *Reminiscence*, 1988) führte Runge diese Entscheidung auf das mangelnde Interesse seitens der Militärs zurück.

²⁷ Kern, *Radarverfahren*, 1984, S. 237-238; Reuter, *Funkmeß*, 1971, S. 197; Schubert, *Industrielaboratorien*, 1987, S. 278 und Trenkle, *Funkmeßverfahren*, 1979, S. 43-44.

²⁸ Brandt, *Rückblick*, 1950, S. 69; und *Zentimeterwellen-Technik*, 1953, S. 84-88.

²⁹ Renneberg/Walker, *Scientists and Engineers*, 1994, S. 1-11.

Zur Technokratiebewegung im Nationalsozialismus siehe Willeke, *Technokratiebewegung*, 1995, S. 211-263.

³⁰ Die Grundidee, das Wesen des nationalsozialistischen Staates durch Machtblöcke zu beschreiben, wurde schon 1942 von dem Sozialwissenschaftler Franz Neumann unter dem Namen *Behemoth* entwickelt und danach mehrfach transformiert. Im Bezug auf Wissenschaft und Technik siehe Renneberg/Walker, *Scientists and Engineers*, 1994.

³¹ Zu den Machtstrukturen im NS-Staat und die Stellung Hitlers siehe Mommsen, *Hitlers Stellung*, 1981 und ausführlich Broszat, *Staat Hitlers*, 1986, besonders S. 363-402 und Rebutisch, *Führerstaat*, 1989.

Aufgabe der Leitung und Koordinierung der wissenschaftlichen und technischen Forschung zu erfüllen. Der Reichsforschungsrat verfügte weder über geeignete Macht- oder Finanzmittel, um Planungen in die Tat umzusetzen, noch über die Unterstützung Hitlers selbst oder eines der mächtigen Machtblöcke, etwa des Reichsluftfahrtministeriums (RLM). Dieses stand sogar in unmittelbarer Konkurrenz zum Reichsforschungsrat, da weiterhin alle Forschungen auf dem Gebiet der Luftfahrt direkt dem Reichsluftfahrtministerium und somit Hermann Göring unterstellt waren.³²

Unterschiedliche Machtblöcke überlappten auch miteinander, das heißt, einzelne Personen konnten gleichzeitig unterschiedlichen Machtblöcken angehören. Das brachte diesen Personen teilweise gerade wegen ihrer gespaltenen Loyalität einen sehr großen Einfluß ein. Stets aber waren sie nur mächtig in Vertretung des „Führers“. So wurde beispielsweise Hermann Göring Mitte 1942 zum Präsidenten des Reichsforschungsrats und war somit für die Koordination der deutschen Forschung zuständig. Er blieb aber als Reichsminister für Luftfahrt und Oberbefehlshaber der Luftwaffe weiterhin auch für die Luftfahrtforschung zuständig. Dies führte nicht zu einer besseren Koordination der unterschiedlichen Forschungen, denn zeitgleich mit der Reform des Reichsforschungsrats wurde eine neue und unabhängige „Forschungsführung der Luftwaffe“ etabliert. Das Reichsluftfahrtministerium war nicht gewillt, „seine Ressortkompetenz an ein übergeordnetes Gremium abzugeben, auch wenn dies unter Vorsitz von Göring selbst stand.“³³

Radar- beziehungsweise Hochfrequenzforschung wurde daher zu Beginn des Krieges sowohl in den Forschungsinstituten des Reichsluftfahrtministeriums betrieben, als auch vom Reichsforschungsrat organisiert. Auch in der Industrie fanden Forschungen und Entwicklungen an Radargeräten für die jeweiligen Waffengattungen in der für das nationalsozialistische System typischen Konkurrenz untereinander statt. Die ohnehin geringen Entwicklungskapazitäten wurden nicht ausgenutzt, es kam zu Fehlentwicklungen, Reibungsverlusten und Eifersüchteleien zwischen Marine und Luftwaffe. Beispielsweise fühlte sich die Marine durch die auf die GEMA beschränkten Entwicklungskapazitäten benachteiligt.

„Der Schrei nach Funkmeßgeräten war stark. Deswegen mußte Stückwerk gemacht werden. ... Schon damals trat störend in Erscheinung, daß die der Marine zur Verfügung stehende Entwicklungskapazität viel zu knapp bemessen war. Die Marine hatte nur die Möglichkeit, bei der GEMA zu entwickeln. Die Firmen Telefunken und Lorenz waren mit Aufgaben für die Luftwaffe ausgelastet.“³⁴

Die „Entwicklungsstop-Befehle“

Zusätzlich zu der polykratischen Struktur der Forschungsförderung wurden zu Beginn des Krieges technische Weiterentwicklungen weder als notwendig noch als produktiv angesehen, da man von einem schnellen Ende des Krieges ausging. So ordnete Göring im Februar 1940 an, alle technischen Entwicklungsvorhaben, die sich nicht im Laufe eines Jahres auf den Kriegsverlauf auswirken können, einzustellen:

„Der Führer legt entscheidenden Wert darauf, daß die Rüstung im Jahre 1940 zur größtmöglichen Höhe gebracht wird. Es müssen daher mit allen Mitteln alle die Vorhaben gefördert werden, die im Jahre 1940 bzw. bis zum Frühjahr 1941 zur Auswirkung kommen können. Alle anderen Programme, die sich erst später aus-

³² Ludwig, *Technik*, 1974, S. 229-234; Walker, *German Science*, 1997, S. 800-808 und ausführlich Zierold, *Forschungsförderung*, 1968, S. 215-272.

³³ Trischler, *Luft- und Raumfahrtforschung*, 1992, S. 248-254; zu Görings Aufstieg und Fall im NS-Staat und dessen Abhängigkeit von der Gunst des „Führers“ siehe Kube, *Hermann Göring*, 1986, besonders S. 324-346.

³⁴ Giessler, *Ortungsgeräte*, 1944, S. 7.

wirken, müssen, falls es die Belegung der Wirtschaft erfordert, zu Gunsten der obigen Vorhaben zurückgestellt werden.“³⁵

Dieser Befehl wurde aber offenbar nicht sehr ernst genommen, so daß sich Albert Speer über zwei Jahre später genötigt sah, zu prüfen, „ob sich trotz ‘des bestehenden Verbotes, Friedensplanungen und Entwicklungen durchzuführen’, technische Fachkräfte noch mit Gegenständen befaßten, ‘die nicht unmittelbar kriegswichtigen Zwecken dienen’.“³⁶ Es bleibt zweifelhaft, ob diese Befehle eine große Wirkung entfalteten.³⁷

Unabhängig davon drückten sie aber die Erwartung aus, daß alle wichtigen technischen Entwicklungen innerhalb eines sehr kurzen Zeitraums in eine praktische, militärtechnische Anwendung überführt werden können. Das ist aber in der Regel kaum möglich und könnte nur mit hohem Kosten-, Material- und Personalaufwand realisiert werden., der aber gerade unter dem nationalsozialistischen Regime nicht zu leisten war.

Der Mangel an wissenschaftlich-technischem Personal

Denn seit Beginn des Krieges herrschte in den wissenschaftlich-technischen Forschungsinstituten großer Personalmangel., da Wissenschaftler, Ingenieure, Techniker und Studenten der natur- und ingenieurwissenschaftlichen Fächer wie alle anderen zum Kriegsdienst verpflichtet wurden, und ohne bevorzugte Behandlung als Feldsoldaten oder in der Produktion eingesetzt wurden.

„Die militärische Erfassung der Bevölkerung kannte überhaupt nur zwei Bereiche: den der Truppe und den der Produktion. ...

Für wissenschaftliche Forschungsinstitute gab es ebenfalls keine Ausnahmeregelung. Ohne erkennbares System wurden Forscher eingezogen oder, wie im Bereich der Luftfahrt, zu einem hohen Prozentsatz unmittelbar in den industriellen Produktionsprozeß überführt.“³⁸

Dadurch ging den Forschungsinstituten ein großer Teil ihres ohnehin nicht zahlreichen Personals verloren. Schon vor dem Krieg konnten die vorhandenen Kapazitäten in den Forschungs- und Entwicklungslaboratorien nicht ausgenutzt werden, da es an für die Funktechnik qualifiziertem Nachwuchs mangelte. Die Zahl der Studierenden der Ingenieurwissenschaften war nach der Machterübernahme der Nationalsozialisten bis 1937 um 50 % abgefallen. Im Fach Elektrotechnik sank die Zahl der Diplomabschlüsse bis 1939 ebenfalls drastisch.³⁹

Mit Kriegsbeginn hatte sich die ohnehin angespannte Nachwuchssituation durch die nahezu unterschiedslose Verpflichtung der jungen Männer für den Militärdienst noch einmal verschärft. Militärische Forschung und Entwicklung spielte in der Konzeption des Blitzkriegs zunächst keine Rolle. Erst zögerlich setzte sich um die Jahreswende 1941/42 die Erkenntnis durch, daß technische Experten im Entwicklungslabor wichtiger sein könnten als im Felde.

³⁵ Göring in einem Schreiben an den Reichswirtschaftsminister, 3. Feb. 1940, nach Schramm, *Kriegstagebuch OKW*, 1995, Bd. 1, S. 962.

³⁶ Ludwig, *Technik*, 1974, S. 297 (dieser zitiert dort aus einer Anordnung Speers vom 29. Juli 1942; Bundesarchiv-Militärarchiv, WiIF 5.1635).

³⁷ Sowohl der Bevollmächtigte für Hochfrequenzforschung, Hans Plendl, als auch Werner Osenberg lassen die „Entwicklungsstop-Befehle“ in ihren Analysen der wissenschaftlich-technischen Situation Deutschlands um 1942/43 unerwähnt. (Ludwig, *Technik*, 1974, S. 257-259). Auch die Flugzeugfirmen arbeiteten „ohne sich um die Verbote ... zu kümmern, ... häufig unter der Hand an ihren Projekten weiter.“ (Trischler, *Luft- und Raumfahrtforschung*, 1992, S. 243).

³⁸ Ludwig, *Technik*, 1974, S. 288-289.

³⁹ Ebenda, S. 271-283. Ähnliches gilt für die Studentenzahlen im Fach Physik. (Siehe dazu zum Beispiel Hentschel, *Physics*, 1996, S. xlvii-liv).

Rückrufaktionen

Leo Brandt, leitender Ingenieur bei *Telefunken* und neu ernannter Leiter der Entwicklungsgruppe Funkmeß⁴⁰, stellte zum Beispiel Ende 1941 fest, daß lediglich etwa 400 Ingenieure, Techniker und Mechaniker in der deutschen Funkmeßindustrie tätig waren. Zur Bewältigung der anstehenden Aufgaben waren seiner Meinung nach aber deutlich mehr nötig. So erstellte er in Abstimmung mit der Marine und der Luftwaffe eine Liste der notwendigen Funkmeßaufgaben und überzeugte den Sonderbeauftragten für Funkmeßgeräte, General Martini, eine Rückholaktion für 8000 Fachleute zu beantragen.⁴¹

Dieser Antrag scheint aber zunächst keinen großen Erfolg gehabt zu haben. Erste Rückrufaktionen starteten in der ersten Hälfte des Jahres 1943. Im Mai-Heft 1943 der Zeitschrift "Hochfrequenztechnik und Elektroakustik" findet sich beispielsweise ein Aufruf, in dem Hochfrequenzfachkräfte gesucht werden:

"Hochfrequenzfachkräfte für die Luftwaffe

Noch nicht ihrem fachlichen Können entsprechend eingesetzte Fachkräfte der HF-Technik sind unter Angabe von Anschrift oder Feldpostnummer, Beruf und Geburtstag zu melden an die Geschäftsstelle dieser Zeitschrift.

Die Bewerber werden zunächst für ihre Aufgabe gründlichst eingewiesen (falls erforderlich Teilnahme an einem umfassenden Hochfrequenzlehrgang). Sie erfahren somit nicht nur eine große Bereicherung ihres technischen Wissens, sondern sie dürfen auch die Genugtuung haben, einen besonderen Beitrag zum Endsieg leisten zu können."⁴²

Daraufhin kamen im Sommer 1943 die ersten 1500 Hochfrequenzfachkräfte von der Front zurück in die Labors.⁴³

Es ist das Verdienst von Werner Osenberg, Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen an der TH Hannover, daß diese als „Rü-Funk“ bezeichnete Aktion kein Einzelfall blieb. Dieser setzte sich zwar schon seit Ende 1941 unermüdlich für die Freistellung geeigneter Fachkräfte vom Militärdienst ein, aber erst Ende 1943 waren die Bemühungen Osenbergs, der zwischenzeitlich zum Leiter des Planungsamts im Reichsforschungsrat ernannt worden war, von Erfolg gekrönt. Das Oberkommando der Wehrmacht verfügte in einem Geheimerlaß, daß die Wehrmacht 5000 Wissenschaftler für die Forschung freistellen sollte. Die Durchführung stieß aber auf erhebliche Schwierigkeiten, so daß bis Juli 1944 erst ca. 2000 und bis November 1944 nur 3430 Fachleute wieder in Forschung und Entwicklung tätig werden konnten.⁴⁴

Technische Innovationen im nationalsozialistischen Staat

Das Technikbild des Nationalsozialismus beruhte auf einem Glauben an die „schöpferische Kraft und Fähigkeit der einzelnen Person“, der längst nicht mehr zeitgemäß war. „Dem technischen Niveau in einem Produktionsprozeß, der Formen angewandter Wissenschaft annahm, wären längst kooperative Forschungsweisen adäquat gewe-

⁴⁰ Ende 1941 wurden für die verschiedenen Zweige der Luftfahrttechnik Entwicklungsgruppen in der Industrie gebildet, die eine bessere Zusammenarbeit der Luftrüstungsproduktion mit Forschung und Entwicklung sicherstellen sollten. Leo Brandt übernahm die Leitung der Entwicklungsgruppe Funkmeß (Reuter, *Funkmeß*, 1971, S. 49).

⁴¹ Reuter, *Funkmeß*, 1971, S. 49.

⁴² Reichsluftfahrt-Ministerium, *Ausschreibung*, 1943, Hervorhebungen im Original.

⁴³ Ludwig, *Technik*, 1974, S. 259 und 298.

Reuter, *Funkmeß*, 1971, S. 49-50 und 196 führt zwar frühere Daten und höhere Zahlen an, beruft sich aber im wesentlichen auf Aussagen von Zeitzeugen, während sich Ludwig, *Technik*, 1974, S. 298 im wesentlichen auf den Rechenschaftsbericht des Ende 1943 zurückgetretenen Bevollmächtigten für die Hochfrequenzforschung, Hans Plendl, beruft.

⁴⁴ Grüttner, *Wissenschaft*, 1997, S. 150; Ludwig, *Technik*, 1974, S. 252 und Mehrrens, *Mathematics and War*, 1996, S. 107.

sen.“⁴⁵ Aber genau diese kooperativen Forschungsweisen wurden durch „die wesentlich anarchische politische Struktur und Dynamik“⁴⁶ des nationalsozialistischen Staates behindert und konnten sich nur in wenigen Einzelfällen entwickeln.

Der wohl bekannteste Einzelfall ist das V2-Raketenbauprogramm, das mit Gesamtkosten von etwa 2 Milliarden Reichsmark für die deutsche Kriegswirtschaft eine ähnlich große Belastung darstellte, wie das Manhattan Projekt für die amerikanische Wirtschaft.⁴⁷ Aus der immensen Förderung des V2-Raketenbauprogramms allein läßt sich aber wohl kaum allgemein schließen, daß „technische“ Forschungs- und Entwicklungsprojekte großzügig vom NS-Staat gefördert wurden, während es „wissenschaftliche“ sehr schwer hatten.⁴⁸

Beispielsweise hatte die in gewisser Weise als „technisch“ zu qualifizierende Luftfahrtforschung bis Mitte 1942 große Probleme mit der Förderung durch den NS-Staat, während „rein wissenschaftliche“ biologische Forschungen vergleichsweise großzügig unterstützt wurden. Techniker wurden aus den Entwicklungslaboratorien der Funkindustrie an die Front verpflichtet, während es vielen Wissenschaftlern gelang, ihre Forschungen als kriegswichtig darzustellen, und sie daher im Labor bleiben durften. Gleichzeitig gelang es dem V2-Raketenbauprogramm, zum größten Forschungs- und Entwicklungsprojekt Deutschlands aufzusteigen, während dem deutschen Uranprojekt wenig Bedeutung beigemessen wurde.⁴⁹

Die Entscheidungen zur Förderung oder Nicht-Förderung von einzelnen Projekten lassen sich also nicht an der ohnehin problematischen Unterscheidung zwischen „Technik“ und „Wissenschaft“ in den Forschungs- und Entwicklungsprojekten des Zweiten Weltkrieges festmachen. Vielmehr scheint neben den generellen bürokratischen Schwierigkeiten im NS-Staat unter anderem die fehlende wissenschaftlich-technische Kompetenz der Verantwortlichen im NS-Staat ausschlaggebend gewesen zu sein.

Beispielweise war Göring sowohl in seiner Funktion als Reichsluftfahrtminister als auch als Präsident des Reichsforschungsrats für die Förderung der Radartechnik zuständig. Sein mangelndes technisches Verständnis für die Radartechnik im speziellen und anderer technischer Entwicklungen im allgemeinen verhinderte aber zumindest eine bessere personelle und finanzielle Ausstattung der Hochfrequenzforschung. Auf einer Besprechung über die angespannte Personallage in der Funkindustrie äußerte er sich zum Beispiel über die Radargeräte:

„Wir haben nicht nur zu wenig Arbeiter ..., sondern zu wenig im Gehirnkasten, die Erfindungen zu machen, die notwendig sind. Ich habe mir die Apparate oft angesehen. So überwältigend sieht solch ein Ding doch gar nicht aus; es sind lauter Drähte und noch etwas, und der ganze Apparat ist sowieso merkwürdig primitiv.“⁵⁰

⁴⁵ Ludwig, *Technik*, 1974, S. 229; zum nationalsozialistischen Technikverständnis siehe auch Herf, *Reactionary Modernism*, 1984, S. 152-189.

⁴⁶ Mehrtens, *Kollaborationsverhältnisse*, 1994, S. 24.

⁴⁷ Neufeld, *Rakete und Reich*, 1997, S. 325-327.

⁴⁸ Dies behauptet z.B. Kristie Macrakis (Macrakis, *Surviving the Swastika*, 1993, S. 96): „In contrast to the sciences in general, the area of technology received large-scale support from the government early on, especially in weapons technology.“

⁴⁹ Von 1934 bis 1944 verfünffachten sich die Ausgaben der Deutschen Forschungsgemeinschaft für biologische Forschungen. (Deichmann/Müller-Hill, *Biological Research*, 1994, S. 167 und ausführlicher Deichmann, *Biologen unter Hitler*, 1991, S. 42-55). Zum Schicksal der Luftfahrtforschung im Dritten Reich siehe ausführlich Trischler, *Luft- und Raumfahrtforschung*, 1992, S. 173-283. Für Details zum V2-Raketenbauprogramm und zum Uranprojekt siehe Neufeld, *Rakete und Reich*, 1997 und Walker, *Uranmaschine*, 1990.

⁵⁰ Göring auf einer Besprechung mit Industriellen der Luftfahrt- und Funkmeßindustrie, Februar 1943, Militärgeschichtliches Forschungsamt/Dokumentenzentrale, Lw 103/30 und Lw 106/40 zitiert nach Reuter, *Funkmeß*, 1971, S. 196.

Sein generelles Unverständnis der Radartechnik kann möglicherweise auf seine Erfahrungen aus dem Luftkrieg des Ersten Weltkrieges zurückgeführt werden. Als einer der erfolgreichsten Jagdflieger des Ersten Weltkrieges glaubte er, daß man ohne Radar auskommen könne, da es das im Ersten Weltkrieg auch nicht gegeben habe. Dieses Unverständnis für die militärischen Möglichkeiten moderner Technik war charakteristisch für einige nationalsozialistische Führer wie Göring und Adolf Hitler. Die Notwendigkeit, modernste technische Systeme während des Krieges in großen Forschungsgruppen zu entwickeln und sofort in die Produktion umzusetzen, wurde von ihnen nicht erkannt. Daher hatten es geplante technische Innovationen durch wissenschaftlich-technische Forschungs- und Entwicklungsprojekte in der ersten Phase des Krieges sehr schwer.⁵¹

Das Verhältnis zwischen Nationalsozialismus und Technikentwicklung läßt sich als „instrumentalisiertes Ausbeutungsverhältnis“ charakterisieren, bei dem im wesentlichen solche technischen Innovationen Unterstützung fanden, die sich als Antwort auf eine vom nationalsozialistischen System selbst politisch verursachte Krise interpretieren lassen.⁵² Dies läßt sich auch in der Förderung der Hochfrequenztechnik während des Krieges erkennen. Während zu Kriegsbeginn keine Anstrengungen bei der Koordinierung und Förderung der Entwicklung in Hochfrequenzbereich unternommen wurden, setzten sie ein, als sich im Laufe des Jahres 1942 immer deutlicher und schmerzlicher die Schwächen in der Luftverteidigung abzeichneten. Der offensichtliche Vorsprung der Engländer in der Radartechnik ermöglichte es ihnen, bei Tag und Nacht deutsche Städte aus der Luft anzugreifen. Göring sah sich zum Handeln gezwungen und ernannte als eine seiner ersten Amtshandlungen als neu ernannter Präsident des Reichsforschungsrats einen „Bevollmächtigten für die Hochfrequenzforschung“, der die Forschung auf diesem Gebiet koordinieren und vorantreiben sollte.⁵³

⁵¹ Jeffrey Herf kommt zu dem Schluß, daß die nationalsozialistische Technikideologie sich zwar explizit gegen die Rationalität von großangelegten wissenschaftlich-technischen Forschungs- und Entwicklungsprojekten richtete, aber technische Erfindungen und Innovationen insbesondere während des Krieges grundsätzlich begrüßte (Herf, *Reactionary Modernism*, 1984, S. 189-216).

⁵² Ludwig, *Politische Lösungen*, 1995. Ludwig nennt als Beispiele die Herstellung von synthetischem Treibstoff, Kautschuk und den Abbau der Salzgitter-Erze. Auch die Entwicklung der V-2 sieht er zumindest teilweise auch als Antwort auf „den mißlichen Stand der deutschen Rüstungstechnik“.

⁵³ Trischler, *Luft- und Raumfahrtforschung*, 1992, S. 253.

Der „Bevollmächtigte für Hochfrequenzforschung“

Görings Göring Wahl fiel auf den Hochfrequenzexperten Dr. Hans Plendl, den er im November 1942 offiziell zum „Bevollmächtigten für Hochfrequenzforschung“ mit der Aufgabe ernannte, alle Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet durch Aufgabenverteilung an die Institute und rechtzeitige Schwerpunktbildung zu organisieren, zu intensivieren und den Kriegserfordernissen anzupassen.⁵⁴

Damit war zwar ein erster Schritt zu Koordination der unterschiedlichen Forschungen in den Hochfrequenzinstituten des Reiches und der Industrie getan. Doch möglicherweise war Hans Plendl trotz seiner unbestrittenen wissenschaftlichen Qualifikation auf dem Gebiet der Hochfrequenztechnik nicht der geeignete Mann für diese Aufgabe. Gründlich, aber langsam, arbeitete er zunächst an der Erfassung der unterschiedlichen deutschen Forschungstätigkeiten in der Hochfrequenztechnik, um dann mit der erst Mitte Juli 1943 neu eingerichteten „Reichsstelle für Hochfrequenzforschung“ der fehlenden Schwerpunktsetzung und der Zersplitterung entgegenzuwirken.⁵⁵



Abb. 11: Hans Plendl
(Abbildung aus Dieminger
u.a., *Hans Plendl*, 1965.)

Plendl beschrieb Ende 1943 in seinem Rechenschaftsbericht die Situation der deutschen Funktechnik folgendermaßen:

„Die deutsche Forschungskapazität auf dem Gebiet war der feindlichen etwa im Verhältnis 1:10 unterlegen und außerdem noch auf rund 100 verschiedene, meist kleine und kleinste Laboratorien aufgeteilt. Die an sich brauchbare Forschungskapazität des Auslandes (Holland, Frankreich) war praktisch nicht ausgenutzt. Infolge der Zersplitterung konnten die meisten Institute und Laboratorien die wirklich großen Probleme der Funktechnik in der Kriegsführung nicht, oder nur unvollkommen bearbeiten ... Ganz allgemein herrschte ein großer Mangel an Fachpersonal und Hilfsmitteln ... Eine einheitliche Ausrichtung der zahlenmäßig geringen, wirklich arbeitsfähigen Forschungskräfte auf die kriegswichtigen Schwerpunktaufgaben der Zukunft fehlte weitgehend. ... Die von den verschiedenen Bedarfsträgern stammenden Forschungsaufträge waren ohne hinreichende Abstimmung verteilt, eine gegenseitige Information der verschiedenen Institute erfolgte kaum, so daß häufig Doppelarbeit geleistet wurde.“⁵⁶

Um eine bessere Koordination zu gewährleisten, gründete Plendl 12 Arbeitskreise und zur Anregung der wissenschaftlichen Forschung 15 neue Institute. Deren Forschungen hatten zwar meistens einen Schwerpunkt auf dem Hochfrequenzsektor, aber sie deckten auch eine große Breite von anderen mathematischen, physikalischen und elektrotechnischen Fragen ab. Plendls Interessen reichten bis in die Astrophysik, so daß er seinen Einfluß geltend machte, um ab Mitte 1943 für den Astrophysiker Karl-

⁵⁴ Reuter, *Funkmeß*, 1971, S. 192 und Trischler, *Luft- und Raumfahrtforschung*, 1992, S. 253. Erste Kontakte zwischen Plendl und Göring hatte es zwar schon im Juni 1942 gegeben, offiziell zum Bevollmächtigten für Hochfrequenzforschung ernannt wurde er aber erst im November 1942.

⁵⁵ Hans Plendl "Rechenschaftsbericht über die Hochfrequenzforschung und die Betreuung der sog. 'Vertikalaufgaben' vom 16. 12. 1943." (Bundesarchiv NS 19/2057) nach Ludwig, *Technik*, 1974, S. 259.

⁵⁶ Hans Plendl "Rechenschaftsbericht über die Hochfrequenzforschung und die Betreuung der sog. 'Vertikalaufgaben' vom 16. 12. 1943." (Bundesarchiv NS 19/2057) zitiert nach Reuter, *Funkmeß*, 1971, S. 192-193.

Otto Kiepenheuer sechs neue Sonnenobservatorien und ein entsprechendes Zentralinstitut einzurichten.⁵⁷

Mit diesen Maßnahmen gelang es Plendl aber weder, die unter dem Druck des Krieges notwendigen raschen Erfolge in der Hochfrequenztechnik vorzuweisen, noch die Forschungen auf dem Hochfrequenzsektor effektiver zu organisieren, so daß er schon nach einem Jahr Dienstzeit von dem mittlerweile zum Präsident der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt aufgestiegenen Abraham Esau abgelöst wurde.⁵⁸

Was die angesprochene Entscheidung betrifft, alle Entwicklungsarbeiten auf dem Zentimetergebiet einzustellen, so liegt keine Evidenz vor, die darauf hinweist, daß Plendl einen Einfluß darauf hatte. Offiziell war er zu diesem Zeitpunkt erst zwei Tage im Amt. Es bleibt aber auch fraglich, ob er sich in der beschriebenen Gesamtsituation als „Bevollmächtigter für die Hochfrequenzforschung“ im komplexen Machtgefüge gegen das Militär oder die auf vorhandene Geräte konzentrierte Industrie hätte durchsetzen können.

Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß die im polykratischen NS-Staat chaotisch gewachsene Forschungsorganisation bis auf wenige Ausnahmen mit der Planung und Organisation des technisch-wissenschaftlichen Fortschritts überfordert war. Auf dem Hochfrequenzgebiet hatten sich Militär und Industrie zu Kriegsbeginn auf eine Gruppe gut funktionierender und technisch ausgereifter Radargeräte festgelegt, die allen Anforderungen gerecht zu werden schienen. Daher sahen sie keinen Handlungszwang zu Neuentwicklungen und beschränkten sich auf die Produktion und Perfektionierung dieser Geräte. Die in den 1930er Jahren rapide abnehmenden Studierendenzahlen in den naturwissenschaftlich-technischen Fächern hatten dazu geführt, daß es zu Beginn des Krieges an geeignetem Nachwuchs für die Hochfrequenzforschung und die Funkindustrie mangelte. Der dadurch in den Entwicklungslabors hervorgerufene Personalmangel erschwerte Weiterentwicklungen zusätzlich. Zudem war die Leistungsfähigkeit von Zentimeterwellen für Radarzwecke unter den führenden deutschen Experten umstritten.

Aus dieser Gesamtsituation wird es verständlich, daß in Deutschland keine intensiven Forschungsarbeiten auf dem Zentimeterwellengebiet durchgeführt wurden, bis sich Anfang 1943 die Überlegenheit der Engländer auf diesem Gebiet erwies. Danach kam es allerdings zu erfolgreichen „Zwangsinnovationen“⁵⁹, indem mit der „Arbeitsgemeinschaft Rotterdam“ die Forschungs- und Entwicklungskapazitäten auf ein einziges Ziel ausgerichtet wurden.

Die „Arbeitsgemeinschaft Rotterdam“

Anfang Februar 1943 wurde über Rotterdam ein englischer Bomber (vom Typ „Sterling“) abgeschossen. Teile des Radargeräts wurden geborgen, in den Forschungslabors der Firma *Telefunken* gründlich untersucht und teilweise wieder funktionsfähig gemacht. Es stellte sich rasch heraus, daß dieses Radargerät auf einer Wellenlänge von 9 cm arbeitete. Auch wenn der genaue Verwendungszweck nicht sofort klar war,

⁵⁷ „Institutes of the Bevollmächtigter fuer Hochfrequenzforschung“, CIOS-Report XXXI-37. Einen Überblick über die Breite der (geplanten) Forschungen gibt „Research Work undertaken by German Universities and technical High Schools for the Bevollmächtigter fuer Hochfrequenztechnik. Independent Research on Associated Subjects“ CIOS-Report XXXI-2. Zu den Sonnenobservatorien siehe Wolfschmidt, *Sonnenphysik*, 1994, S. 154 und *Kiepenheuer*, 1993, S. 297-301; Biographisches zu Plendl findet sich in Dieminger u.a., *Hans Plendl*, 1965.

⁵⁸ Esau hatte Ende 1943 seinen Rücktritt von „Bevollmächtigten für Kernphysik“ und Leiter der Sparte Physik im Reichsforschungsrat erklären müssen und war mit der neuen Aufgabe quasi entschädigt worden (Walker, *Uranmaschine*, 1990, S. 159).

⁵⁹ Ludwig, *Politische Lösungen*, 1995, S. 333.

so vermutete man doch einen Zusammenhang mit den in letzter Zeit immer erfolgreicher Bombenangriffen auf deutsche Städte und U-Boote.⁶⁰

Signale auf Wellenlängen von weniger als 10 cm konnten mit den deutschen Radargeräten praktisch nicht empfangen werden. In dieser Situation mußte schnell gehandelt werden. Auf Anregung Leo Brandts gründete Wolfgang Martini, General der Luftnachrichtentruppe und Chef des Nachrichtenverbindungswesens der Luftwaffe, noch im gleichen Monat ein weiteres Koordinationsgremium, die „Arbeitsgemeinschaft Rotterdam“. In der ersten Sitzung vom 23. Februar 1943 wurden deren Ziele folgendermaßen formuliert:

„Der Arbeitsgemeinschaft wurde die Aufgabe gestellt, durch Zusammenfassung aller Erfahrungen von Forschung und Industrie auf dem Zentimeterwellengebiet schnellstens die notwendigen Gegenmaßnahmen gegen das Verfahren 'Rotterdam' zu schaffen.“⁶¹

Martini beauftragte mit Leo Brandt von *Telefunken* einen Industrievertreter mit der Leitung der Arbeitsgemeinschaft. Brandt hatte wegen seiner ausgezeichneten organisatorischen und diplomatischen Fähigkeiten eine steile Karriere bei *Telefunken* gemacht und war dort im Juni 1942 zum Leiter der Geräteentwicklung aufgestiegen. Als Leiter der Entwicklungsgruppe Funkmeß hatte er auch schon Erfahrungen mit der Zusammenarbeit von staatlichen Stellen, der produzierenden Industrie und den Forschungs- und Entwicklungsinstitutionen sammeln können.⁶²



Der „Arbeitsgemeinschaft Rotterdam“ gehörten alle wichtigen Fachleute von Universitäten, Forschungseinrichtungen, nachrichtentechnischen Ämtern (der Wehrmacht) und der Industrie an. Auch der erst kurz zuvor von Göring ernannte „Bevollmächtigte für die Hochfrequenzforschung“, Hans Plendl, war ein einfaches Mitglied dieser Arbeitsgruppe. Sein Amt war zwar eigens zu dem Zweck geschaffen worden, die Forschungen auf dem Gebiet der Hochfrequenztechnik zu koordinieren, aber wegen Plendls Interesse an Grundlagenforschung wurde er nicht als der geeignete Kandidat für die Leitung der „Arbeitsgemeinschaft Rotterdam“ angesehen.

Die Bevorzugung eines Industrievertreters spiegelt die grundsätzliche Haltung vieler in der Industrie tätiger Ingenieure wieder, daß konkrete Entwicklungstätigkeit in den Industrielaboratorien besser aufgehoben sei als an Universitäten oder Forschungsinstitutionen. So notierte zum Beispiel Wilhelm Runge, ent-

täuscht von den Ergebnissen einer Tagung des Bevollmächtigten für Hochfrequenzforschung, in sein Notizbuch: „Forschung hat zum Ziel Erkenntnis, Entwicklung hat zum Ziel Geräte. Letzteres besser in Industrie.“⁶³

Tatsächlich gelang es der „Arbeitsgemeinschaft Rotterdam“ unter der Leitung Brandts in den folgenden knapp zwei Jahren, die Forschungen auf dem Zentimeterwellengebiet besser als bisher zu koordinieren und den Rückstand im Bereich der For-

⁶⁰ Reuter, *Funkmeß*, 1971, S. 113-116, Giessler, *Ortungsgeräte*, 1944, S. 9-11.

Zu den technischen Spezifikationen des englischen H₂S-Radargeräts, das von den Deutschen wegen des Abschußortes des britischen Bombers „Rotterdam“-Gerät genannt wurde, siehe Callick, *Meters to Microwaves*, 1990, S. 55-77 und 108-118.

⁶¹ AGR-Protokolle, 23. Februar 1943, S. 11.

⁶² Zur Entwicklungsgruppe Funkmeß siehe die Fußnote 40 auf S. 53.

⁶³ Notizbuch Runge (29. Sept. 1943 - 5. Mai 1944), Eintrag 17.-19. Nov. 1943, Telefunken-AEG-Archiv, DTM, GS 6895.

schung gegenüber den Alliierten zumindest teilweise aufzuholen. Das lag aber nicht ausschließlich an Brandts unzweifelhaft guten organisatorischen und diplomatischen, Fähigkeiten sondern auch an der Gesamtkonstellation von Kriegssituation, Militär, Politik und Industrie.

„Selbstmobilisierung“: von der Dogmatik zur Pragmatik

Die Jahreswende 1941/42 markiert eine generelle Trendwende im Zweiten Weltkrieg. Der „Blitzkrieg“ war zu Ende, die deutsche Offensive in Osteuropa war ins Stocken gekommen, die Vereinigten Staaten waren in den Krieg eingetreten, und die deutschen Truppen wurden an unterschiedlichen Fronten zurückgedrängt.

In der Wissenschafts- und Forschungsförderung wurde diese Trendwende dadurch deutlich, daß Wissenschaftler und Techniker sich beim Staat das Recht erkämpften, die Forschungsförderung (wieder) selbst in die Hand nehmen zu dürfen.

„Der katastrophale Verlauf des Zweiten Weltkrieges versetzte kritische Wissenschaftler ... in die Lage, statusbedingte Ressentiments ‚sachlich‘ vorzutragen und sich damit ein scheinbar unpolitisches Selbstverständnis der eigenen Arbeit zu bewahren. Beim Gegner verglichen sie nur den Stand der Technik, während es ihnen in der Regel nicht in den Sinn kam, auch die politische Ordnung zu berücksichtigen. Ganz ‚wertfrei‘ wurde 1942 die Meinung vertreten, die ‚Vernachlässigung‘ der Forschung habe mit zur Katastrophe beigetragen oder sei ein Symptom dafür gewesen.“⁶⁴

Diese Haltung ist mit „Selbstmobilisierung der Wissenschaft“⁶⁵ bezeichnet worden und war weit verbreitet. Bereits gegen Ende 1941 hatte Werner Osenberg begonnen, die Ausweitung der Marineforschung und eine stärkere Einbindung der Technikwissenschaftler in die Rüstungsentwicklung zu fordern.⁶⁶ Der Industriephysiker und Vorsitzende der *Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, Carl Ramsauer, sah es Anfang 1942 nach vorheriger Rücksprache mit Ludwig Prandtl an der Zeit, sich gegen die ideologische „Deutsche Physik“ auszusprechen und sich für die moderne Theoretische Physik einzusetzen, da diese „eine ganze Reihe größter positiver Leistungen aufzuweisen hat, welche auch für Wirtschaft und Wehrmacht von wesentlicher Bedeutung werden können“.⁶⁷ Auch die *Deutsche Mathematiker-Vereinigung* war nicht untätig und bot zur etwa gleichen Zeit durch ihren Vorsitzenden, Wilhelm Süss, verstärkt ihre Dienste für die Rüstungsforschung an.⁶⁸

Auf die Luftfahrtforschung hatte die „Selbstmobilisierung“ wahrscheinlich den größten Einfluß. Unter dem Eindruck der verlorenen Luftschlacht um England und des Selbstmordes des Generalluftzeugmeisters Ernst Udet im November 1941 zog die nationalsozialistische Führung die Konsequenzen und organisierte die Luftfahrt-

⁶⁴ Ludwig, *Technik*, 1974, S. 241-242. Herbert Mehrrens (Mehrrens, *Kollaborationsverhältnisse*, 1994, S. 27 und *Mathematics and War*, 1996, S. 114) hat mehrfach darauf hingewiesen, daß die beteiligten Forscher so unpolitisch gar nicht waren, sondern daß sie in der Mehrheit an die Notwendigkeit des Kampfes gegen den Bolschewismus glaubten.

⁶⁵ Der Begriff wurde von Ludwig, *Technik*, 1974, S. 241-245 eingeführt und daraufhin auf verschiedene Teilbereiche der Wissenschaft und Technik angewendet. Siehe z.B.: Trischler, *Selbstmobilization*, 1994 und *Luft- und Raumfahrtforschung*, 1992, S. 241-283, Mehrrens, *Kollaborationsverhältnisse*, 1994, S. 27-29 und *Mathematics and War*, 1996, S. 113-118.

⁶⁶ Ludwig, *Technik*, 1974, S. 237-245.

⁶⁷ Ramsauer an den Reichsminister für Wissenschaft, Erziehung und Volksbildung, Bernhard Rust, 20. Jan. 1942. Teilweise abgedruckt als Ramsauer, *Eingabe an Rust*, 1947 in den *Physikalischen Blättern*. In englischer Übersetzung und inklusive eines Teils der Anlagen abgedruckt in Hentschel, *Physics*, 1996, S. 278-292. Eine Zusammenfassung gibt Beyerchen, *Scientists under Hitler*, 1977, S. 184-188. Zur Auseinandersetzung um die „Deutsche Physik“ und zur Initiative von Carl Ramsauer siehe Eckert, *Atomphysiker*, 1993, S. 198-206 und Walker, *Uranmaschine*, 1990, S. 92-101.

⁶⁸ Mehrrens, *Mathematics and War*, 1996, insb. S. 113-118.

forschung neu. Mit der „Forschungsführung des Reichsministers der Luftfahrt und Oberbefehlshabers der Luftwaffe“ (FoFü) wurde im Juni 1942 eine mächtige Institution geschaffen und unter den Vorsitz eines Wissenschaftlers, des in Fachkreisen hoch anerkannten Aerodynamikers Ludwig Prandtl, gestellt. Erst unter dieser neuen Führung gelang es der deutschen Luftfahrtforschung bis zum Ende des Krieges, auf den meisten Gebieten, die Hochfrequenzforschung und die Meßtechnik einmal ausgenommen, an die „vorderste Front des wissenschaftlichen Erkenntnisstandes“ zu gelangen. Ohne die Übernahme der Forschungsführung durch Wissenschaftler hätte sich die Luftfahrtforschung nicht von der traditionellen Ideologie des Einzelerfinders trennen und zu moderner Gruppenforschungs- und -entwicklungsarbeit hin entwickeln können, denn das „NS-Regime verfügte nicht über das politische Instrumentarium, um die Luftfahrtforschung als Großforschung adäquat zu lenken.“⁶⁹

Mit dem „Bevollmächtigten für Hochfrequenzforschung“ war für den Bereich der Hochfrequenztechnik auch ein Versuch gestartet worden, die Forschungslenkung in die Hände eines Wissenschaftlers zu legen. Eine effektive Koordination eines Teils der Forschungen auf dem Hochfrequenzgebiet kam aber erst durch die „Arbeitsgemeinschaft Rotterdam“ zustande. Ab März 1943 bestand ein unmittelbares Interesse aller Beteiligten darin, das britische Zentimeterwellen-Radargerät zu kopieren und Gegenmaßnahmen zu entwickeln. Dieses konkrete Ziel ermöglichte es, die unterschiedlichsten Partner zur Kooperation und zu in einem regelmäßigen Austausch ihrer Erkenntnisse zu bewegen.

Aber selbst das stellte sich als ausgesprochen schwierig heraus, denn einerseits war auch nach Gründung der „Arbeitsgemeinschaft Rotterdam“ „die Zusammenarbeit zwischen Marine und Luftwaffe auf dem Funkmeßsektor durch das Streben beider Wehrmachtsteile, sich einen möglichst großen Anteil der Industriekapazität für die eigenen Entwicklungen zu sichern, gestört.“⁷⁰

Andererseits gab es „Forschungsgruppen“, die alleine schon wegen ihrer Struktur nicht in einen wissenschaftlichen Austausch eingebunden werden konnten. Im Konzentrationslager Dachau ließ im Laufe des Jahres 1943 der SS-Obergruppenführer und Chef des SS-Wirtschafts-Verwaltungshauptamtes, Oswald Pohl, ein „Hochfrequenz-Forschungsinstitut“ einrichten, das unter der wissenschaftlichen Leitung von Hans Maier stand. Maier war ein ehemaliger Direktor des Zentrallabors von *Siemens & Halske*, der wegen negativer Äußerungen über das NS-Regime inhaftiert worden war. Nachdem dieses „Institut“ im Anfang 1944 in das Konzentrationslager Groß-Rosen verlegt worden war, arbeiteten in vier eigens eingerichteten Baracken etwa 25 wissenschaftlich-technische Fachleute und 200 angelesene Häftlinge.⁷¹

Diese Maßnahme ist vor allem im Kontext der ständig mächtiger werdenden SS zu sehen, die ihren Kompetenzbereich ausweiten und sich in der wissenschaftlich-technischen Forschung etablieren wollte. So kam es neben der beschriebenen „Selbstmobilisierung“ auch zu einer „Zwangsmobilisierung“.⁷² Wegen seiner Struktur konnte das SS-„Institut“ nicht in den wissenschaftlichen Erfahrungsaustausch eingebunden wer-

⁶⁹ Trischler, *Luft- und Raumfahrtforschung*, 1992, S. 241-283. Zitate auf S. 277 und 281.

⁷⁰ Reuter, *Funkmeß*, 1971, S. 195.

⁷¹ Ludwig, *Technik*, 1974; S. 490, Eckert/Schubert, *Kristalle*, 1986, S. 170.

⁷² Tatsächlich haben noch viel mehr Zwangsarbeiter für die funktechnische Industrie an der „Fertigung von Nachrichtengeräten“ gearbeitet.

„Nach einer Liste vom 21. Februar 1944 über den Einsatz von Konzentrationslagerhäftlingen in der Rüstungsindustrie wurden 935 Lagerinsassen mit einer monatlichen Arbeitsleistung von 258742 Stunden für funktechnische Zwecke der Luftfahrtindustrie benutzt, der Großteil davon zur ‚Fertigung von Nachrichtengeräten‘ für die Firma Siemens & Halske im Zweigwerk beim Konzentrationslager Ravensbrück.“ Eckert/Schubert, *Kristalle*, 1986, S. 170; siehe auch Distel/Jakusch, *Konzentrationslager Dachau*, 1978, S. 112-113.

den, und so erlangte die SS auch keinen direkten Einfluß auf die von der „Arbeitsgemeinschaft Rotterdam“ koordinierten Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten.

Vorrangige Ziele der „Arbeitsgemeinschaft Rotterdam“

Zum Zeitpunkt der ersten Sitzung der „Arbeitsgemeinschaft Rotterdam“ im Februar 1943 waren weder der genaue Zweck noch die exakte Wellenlänge und Leistung des „Rotterdam“-Geräts bekannt. So wurde neben der Rekonstruktion auch ein Nachbau mehrerer Geräte beschlossen, um mehr über die von den Engländern benutzte Technik zu lernen.

„Der Nachbau von 6 Anlagen wird einstimmig, als schnellstmögliche Massnahme zur Erarbeitung der Verfahren und ihrer Anwendungsmöglichkeiten angesehen. Telefunken hat die Erstellung übernommen.“⁷³

In den nächsten Wochen stellte sich so nach und nach heraus, daß „die reguläre Welle des Magnetrons 9,15 cm beträgt und eine kürzere sich nicht mehr erzeugen läßt. Die ... Leistung des Magnetrons beträgt mit aller Wahrscheinlichkeit 20 30 kW.“ Aus Aussagen von Kriegsgefangenen ergab sich, daß es sich bei dem „Rotterdam“-Gerät um ein Navigationsgerät handelte, das den Leitflugzeugen ermöglichte, das gewünschte Ziel zu finden und Markierungsbomben für die folgenden Bomber zu setzen.⁷⁴

Im Juli 1943 fanden erste Versuchsflüge mit dem wieder instandgesetzten Exemplar des „Rotterdam“-Geräts statt.

„Man erkennt, dass das Gerät ‚Rotterdam‘ ein wertvolles Gerät zur Bildnavigation darstellt. Man erhält das Geländebild auf dem Braunschen Rohr allerdings sehr unvollkommen, erkennt aber verschiedene Navigationspunkte insbesondere größere Wasserflächen, so dass das Blindanfliegen einzelner Ziele unter Zuhilfenahme einer Karte bis auf die Genauigkeit von etwa 1-2 km ohne weiteres möglich ist.“⁷⁵

Ab September 1943 wurden die Nachbauten an die unterschiedlichen Stellen (BHF, Marine, Luftwaffe, ...) geliefert und dort getestet. Die ersten umfangreichen Versuche demonstrierten, daß er sehr schwierig sein würde, die englischen „Rotterdam“-Geräte effektiv zu stören (etwa durch „Düppel“-Streifen oder Störsender). Darüber hinaus waren die Seen mit Hilfe der „Rotterdam“-Geräte besonders gut erkennbar, so daß die Kenntnis der Seen in der Umgebung Berlins die Navigation für die britischen Flugzeuge sehr erleichterte. Im Auftrag der „Arbeitsgemeinschaft Rotterdam“ wurde daher mit Tarnvorrichtungen experimentiert. In dem man Spiegel auf Land und auf Flößen auf den Seen aufstellte, wollte man testen, ob es „mit einem gewissen technischen Aufwand möglich ist, ganze Seengebiete in ihrer Form auf dem Braunschen Rohr des ‚Rotterdam‘-Geräts so zu verändern, dass dem Feind seine Navigationshilfspunkte verloren gehen.“⁷⁶ Es zeigte sich allerdings, daß trotz Tarnmaßnahmen „der gesamte Verlauf der Havel noch deutlich zu erkennen ist“ und der „Müggelsee ... ebenfalls noch gut zu erkennen ist.“⁷⁷

Durch die Rekonstruktion und die Nachbauten gelang es zwar, Kenntnisse über die englische Radartechnik und die Funktionsweise des „Rotterdam“-Geräts zu gewinnen, aber von geeigneten Gegenmaßnahmen war man noch weit entfernt.

Noch zu Anfang des Krieges waren zumindest Teile der deutschen Radartechnik im Gefühl der Überlegenheit sehr offensiv ausgerichtet gewesen. So sollten Funkleitverfahren es deutschen Bombern ermöglichen, während der Nacht über England ihre

⁷³ AGR-Protokolle, 23. Februar 1943, S. 11.

⁷⁴ AGR-Protokolle, 17. März 1943 (Zitate), 8. April 1943 und 19. Mai 1943.

⁷⁵ AGR-Protokolle, 23. Juli 1943, S. 58.

⁷⁶ AGR-Protokolle, 2. Sept. 1943, S. 71-72.

⁷⁷ AGR-Protokolle, 15. März 1944, S. 109-110.

Ziele zu finden und zu bombardieren.⁷⁸ Die britische Radartechnik konzentrierte sich zu dieser Zeit zunächst auf die Verteidigungsaufgaben. Doch das Blatt hatte sich im Laufe des Krieges spätestens seit Anfang 1943 gewendet. Für die Geräteentwicklung galt das schon sehr viel früher, denn die britisch-amerikanischen „Rotterdam“-Geräte auf Zentimeterwellenbasis stellten klare Angriffsgeräte dar, die es den britischen und amerikanischen Bombern ermöglichten, deutsche Städte und Industrieanlagen während der Nacht zu orten, anzufliegen und zu bombardieren. Die „Arbeitsgemeinschaft Rotterdam“ mußte als Antwort darauf entsprechende Verteidigungsmaßnahmen entwickeln.

Als erste und wichtigste Gegenmaßnahme gegen das „Rotterdam“-Gerät hatte man bereits in der Gründungssitzung der „Arbeitsgemeinschaft Rotterdam“ beschlossen, einen passiven Warnempfänger zu entwickeln. Dafür war es lediglich notwendig, die vom „Rotterdam“-Gerät ausgestrahlten Wellen zu empfangen und eine ungefähre Richtung anzugeben. Die mit dem Kodennamen „Naxos“ bezeichneten Empfänger sollten mit den besten Empfangsdetektoren ausgestattet werden. Dazu wurde beschlossen, „dass die PTR einige Detektoren von Lorenz, Prof. Diekmann und eigener Herstellung vergleicht. Der für diesen Zweck optimale Detektor wird von der Fa. Lorenz in den benötigten Stückzahlen (einige 100 Stück) schnellstens hergestellt.“⁷⁹

„Naxos“-Geräte mit Kristalldetektoren wurden sehr schnell benötigt, um wenigstens die Signale der herannahenden englischen Bomber rechtzeitig empfangen zu können. Insbesondere für U-Boote war es lebenswichtig, bei herannahenden gegnerischen Flugzeugen noch genügend Zeit zum Abtauchen zu haben. Im Entwicklungslabor von *Telefunken* und anderswo setzten hektische Forschungsarbeiten ein, um möglichst schnell geeignete Detektoren in größerer Stückzahl liefern zu können.⁸⁰

Als zweite Gegenmaßnahme gegen das englische „Rotterdam“-Gerät wurde das sogenannte „Berlin“-Gerät als aktives Radargerät entworfen. Es sollte eine Verbesserung des „Rotterdam“-Gerätes darstellen und in den Abmessungen kleiner sein, da es sich sonst nicht in die deutschen Flugzeuge einbauen ließ. Wie sein Vorbild war es mit Kristalldetektoren, Magnetron und einer Braunschen Röhre als einem Sichtgerät ausgestattet.⁸¹

Erste Versuchsmuster des „Berlin A“-Geräts standen ab Januar 1944 zur Verfügung. Sie waren bei gleicher Leistung kleiner und leichter als das „Rotterdam“-Gerät. Wie das „Rotterdam“-Gerät war „Berlin A“ auch ein Bodenbeobachtungs- beziehungsweise Navigationsgerät für Bomber. Da deutsche Bomber aber für Fernflüge kaum noch eingesetzt wurden, hatte es praktisch keine Bedeutung mehr. Nach wenigen Exemplaren wurde die Produktion eingestellt. Kurz vor Ende des Krieges kam zwar noch das Nachtjagdgerät „Berlin N“ zum Einsatz, mit dem es Jagdfliegern möglich war, Bomber zu orten, anzufliegen und abzuschießen. Aber auch dieses hatte angesichts der großen Luftüberlegenheit der Alliierten keinen Einfluß mehr auf den Kriegsverlauf.⁸²

⁷⁸ Johnson, *Streng Geheim*, 1983, S. 11-62.

⁷⁹ AGR-Protokolle, 23. Februar 1943, S. 12.

⁸⁰ Auf die Debatte, ob nun das Zentimeterwellenradar, die Funkortung und -peilung der U-Boote oder das Entschlüsseln der mit der „Enigma“ verschlüsselten deutschen Geheimbefehle die Entscheidung im Seekrieg gebracht hat, soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden. (Siehe zu den unterschiedlichen Positionen z.B.: Buder, *Invention that Changed*, 1996 (Radar), Williams, *Secret Weapon*, 1996 (Funkortung und -peilung) und Hodges, *Turing - Enigma*, 1989).

⁸¹ Bei den Kristalldetektoren handelte es sich um den *Telefunken*-Mischdetektor ED 705 auf Siliziumbasis (siehe dazu das folgende Kapitel „Siliziumdetektoren von *Telefunken*“). Zur Magnetronentwicklung in Deutschland bis 1945 siehe Gundlach, *Laufzeitröhren*, 1948 und Döring, *Microwave tube development*, 1991.

⁸² AGR-Protokolle, 25. Februar 1944, S. 98-100 und 31. Mai 1945, Kap. VII; Brandt, *Deutsche Funkmeßtechnik*, 1944, S. 26-27; Brandt, *Rückblick*, 1950, S. 72-73; Reuter, *Funkmeß*, 1971, S. 147-148; Tenkle, *Funkmeßverfahren*, 1979, S. 117-118.

Sowohl für die „Naxos“ als auch später für die „Berlin“-Geräte wurden zuverlässige Detektoren benötigt, die auch im Bereich von Zentimeterwellen noch gut gleichrichteten und so das Signal von der Trägerwelle trennten.

In diesen Geräten kamen während des Krieges im wesentlichen die bei *Telefunken* entwickelten Silizium-Detektoren zum Einsatz. Herbert Mataré und Karl Seiler hatten wesentlichen Anteil an dieser Entwicklung. Bei ihrer Arbeit im *Telefunken*-Laboratorium für „Hochfrequenz-Spezialröhren und Halbleiter“, orientierten sie sich hauptsächlich an den technischen Anforderungen im Rahmen der gesamten Detektor-konstruktion.

Heinrich Welker, der im Rahmen der Luftfahrtforschung in der Nähe von München ebenfalls an der Erforschung und Entwicklung von Kristalldetektoren arbeitete, war stärker auf Grundlagen- und Materialfragen konzentriert und entschied sich für Germanium als das am besten geeignete Kristallmaterial. Erst sehr spät im Krieg gelang es der Firma *Siemens*, auf Welkers Ergebnissen aufbauend, eine Produktion von Germaniumdetektoren für Zentimeteranwendungen einzurichten.

Siliziumdetektoren von *Telefunken*

Herbert Mataré war im September 1939 nach Berlin zu *Telefunken* gekommen, da er den Eindruck hatte, seine Doktorarbeit in Aachen unter Kriegsbedingungen nicht fertigstellen zu können. Bei *Telefunken* bot sich die Möglichkeit, im Labor von Dr.-Ing. Horst Rothe an Radarproblemen zu arbeiten und mit dieser Arbeit an der TH Charlottenburg zu promovieren. Rothe war seit einigen Jahren Leiter der Entwicklung von Miniaturröhren für Empfänger gewesen, als er durch die Änderungen der Organisationsstruktur von *Telefunken* zu Beginn des Krieges Abteilungsleiter in der von Prof. Dr. Hans Rukop geleiteten Forschungsabteilung wurde. Dort war er nun unter anderem für Hochfrequenz-Spezialröhren und Halbleiter zuständig.⁸³

Während sich die Forschungsabteilung grundsätzlichen wissenschaftlich-technischen Fragen widmen sollte, war für die konkrete Geräteentwicklung die Entwicklungsabteilung vorgesehen, die zunächst Karl Rottgardt unterstand und ab April 1942 von Leo Brandt übernommen wurde. Die geplante Arbeitsteilung stieß aber auf erhebliche Widerstände, da „Rothe und seine Männer ... selbst Geräte entwickeln wollten, als sichtbare Demonstrationsergebnisse ihrer Tätigkeit.“⁸⁴ Daher richteten sich die Forschungsarbeiten in Rothes Labor bis mindestens Februar 1943 weiterhin vor allem auf die bekannten Hochfrequenz-Empfängerröhren, auch wenn Kristalldetektoren nun offiziell auch zum Aufgabenbereich gehörten.



Abb. 13: Horst Rothe
(Abbildung aus Rukop, *H. Rothe*, 1952.)

⁸³ Rukop, *H. Rothe*, 1952; „Telefunken G.m.b.H.“ CIOS-Report XXXI-52; „Organization of Telefunken“ CIOS-Report XXI-1.

⁸⁴ Runge, *Ich und Telefunken*, 1971, S. 54.

Detektoren wurden zwar von *Telefunken* ab ca. „1940/41 schon als zweite Wahl“ in Radargeräten eingesetzt, aber eine vertiefte Forschung auf diesem Gebiet fand nicht statt. Herbert Mataré beschäftigte sich in Rothes Hochfrequenz-Laboratorium mit Untersuchungen zum Rauschverhalten von Superheterodyn-Empfängern, betrachtete aber hauptsächlich Röhren. In einer ersten Veröffentlichung aus dem Jahre 1942 spielen Detektoren kaum eine Rolle. Mataré schien eher, wie viele Ingenieure der Zeit, der Meinung gewesen zu sein, daß Detektoren nur übergangshalber benutzt werden sollten.

"An Stelle von Dioden werden auch heute bisweilen Detektoren verwendet. Insbesondere im Gebiet kürzerer Wellen scheint ihre Anwendung *noch* von Bedeutung zu sein. Deshalb ist es notwendig das rauschmäßige Verhalten eines Detektor zu untersuchen."⁸⁵



Abb. 14: Herbert Mataré
(Abbildung: Privatbesitz Mataré.)

Dieser Einschätzung lagen Untersuchungen an den Detektor-Materialien Pyrit (FeS_2) und Karborund (Siliziumkarbid, SiC) zugrunde, die keine gleichmäßigen Eigenschaften hatten.

"Kleinste mechanische Einflüsse, Temperatur-Schwankungen und plötzliche Stromstöße verursachen erhebliche Änderungen der Kennlinie, oft auch gänzliche Umkehr des Gleichrichtungssinnes."⁸⁶

Obwohl Mataré zu dem Schluß kam, daß Detektoren bei kleinen Amplituden Vorteile besaßen,⁸⁷ beschäftigte er sich in seinen nächsten veröffentlichten Arbeiten nicht mehr mit Dioden und Detektoren, sondern nun ausschließlich mit (Röhren-) Dioden für eine Wellenlänge von 50 cm.⁸⁸ Darüber hinaus fand er in Rothes Laboratorium auch für eher theoretisch orientierte Arbeiten Zeit.⁸⁹ Erst im Laufe des Jahres 1943 wandte er sich verstärkt dem Rauschen von Kristalldetektoren zu.

Überlagerungsempfang

Um ein sehr hochfrequenten elektromagnetischen Signal empfangen und eventuell auch verstärken zu können verwendete man das sogenannte Überlagerungs- oder „Superheterodyn“-Prinzip. Dabei wird das hereinkommende, amplitudenmodulierte Signal der hochfrequenten Trägerfrequenz f_0 zunächst mit einem vom Empfänger produzierten Signal der einstellbaren Frequenz f_M überlagert (multipliziert). Liegen die beiden Frequenzen dicht beieinander ergibt sich ein Signal der niedrigeren Zwischenfrequenz $f_{ZF} = |f_0 - f_M|$, das nun mittels eines Bandfilters von den Hochfrequenzen getrennt und verstärkt werden kann. Danach erst erfolgt die Demodulation durch Gleichrichtung und Glättung durch Anwendung eines Tiefpasses.⁹⁰

⁸⁵ Mataré, *Rauschen von Dioden*, 1942, S. 122 [Hervorhebung KH].

⁸⁶ Ebenda, S. 122-123.

⁸⁷ "Bei kleinen Amplituden kann der Detektor der Diode also rauschmäßig überlegen sein." (Mataré, *Rauschen von Dioden*, 1942, S. 125.)

⁸⁸ Mataré, *Eingangs- und Ausgangswiderstand*, 1943 (eingegangen am 23. Dez. 1942). Mataré, *Mischwirkungsgrad*, 1943 (eingegangen 17. September 1943). Darin diskutiert Mataré den Überlagerungsempfang im Dezimeterbereich.

⁸⁹ Mataré, *Kurven*, 1943 ist eine theoretische Betrachtung über Kurvenscharen, das konkrete Beispiel sind hier Kennlinienfelder von Röhren (eingegangen 23. Januar 1943). Mataré, *Brownsche Bewegung*, 1943 bietet eine Herleitung der Nyquistschen Formel für das Widerstandsrauschen aus der statistischen Mechanik (eingegangen 26. Juni 1943).

⁹⁰ Lücke, *Signalübertragung*, 1985, S. 217-221.

Matarés Aufgabe war es, die Ursachen des bei der Überlagerung beziehungsweise Mischung auftretenden Rauschens näher zu untersuchen - zunächst theoretisch und dann meßtechnisch. Dabei stellte sich heraus, daß das Oszillator-Rauschen des Empfängers bei Benutzung einer Duodiode als Oszillator eliminiert werden konnte. In einer Duodiode befanden sich zwei statt einer Anode und nur eine Kathode. Wenn beide Diodencharakteristiken gleich waren, war es durch eine geeignete (Gegentakt-) Schaltung möglich, das Oszillatorrauschen zu kompensieren. Als störender Einfluß blieb lediglich das Signalrauschen (siehe Abb. 15).⁹¹

Bei *Telefunken* wurden etwa fingernagelgroße Duodioden von Dr. Kleen in der Röhrenforschung (Abteilung Dr. Karl Steimel) hergestellt. Aber auch diese waren wegen der „Laufzeiteffekte“ zu groß, um im Zentimeterwellenbereich zu arbeiten. „Laufzeiteffekte“ treten auf, da in einer Elektronenröhre die Elektronen eine endliche Zeit von der Kathode zur Anode brauchen. Selbst bei einem Abstand von nur 1 cm und 1000 Volt angelegter Spannung beträgt die Laufzeit von Kathode zu Anode mehr als $5 \cdot 10^{-10}$ Sekunden. Eine Schwingung schneller als 0,2 Gigahertz, das entspricht einer Wellenlänge von ca. 1,5 Meter, wäre somit nicht nachweisbar. Selbst nach einigen technischen Kniffen ließen sich mit Röhren keine Wellenlängen von unter 10 cm empfangen. Als dies aber nach dem Abschluß des „Rotterdam“-Bombers nötig wurde, mußte auf Kristalldetektoren übergegangen werden.⁹²

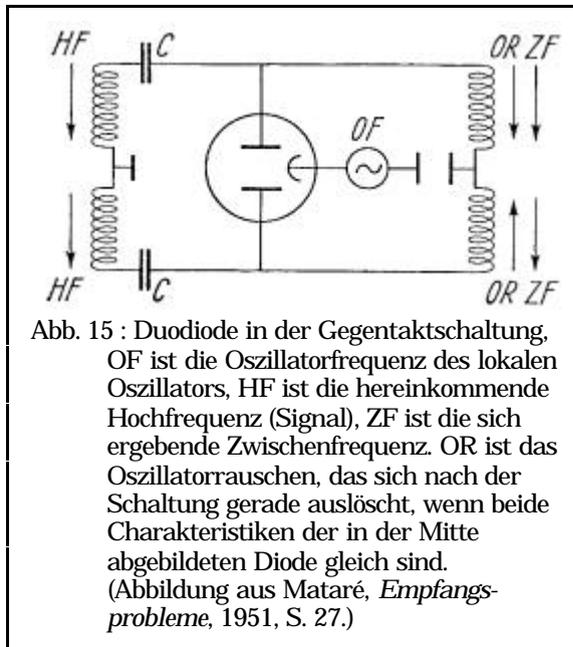


Abb. 15 : Duodiode in der Gegentaktschaltung, OF ist die Oszillatorfrequenz des lokalen Oszillators, HF ist die hereinkommende Hochfrequenz (Signal), ZF ist die sich ergebende Zwischenfrequenz. OR ist das Oszillatorrauschen, das sich nach der Schaltung gerade auslöscht, wenn beide Charakteristiken der in der Mitte abgebildeten Diode gleich sind. (Abbildung aus Mataré, *Empfangsprobleme*, 1951, S. 27.)

Direktempfang

Im Vordergrund der im Februar 1943 einsetzenden Arbeiten stand allerdings zunächst die Entwicklung eines Detektors für einen einfachen Direkt-Empfänger von Zentimeterwellen - das von der „Arbeitsgemeinschaft Rotterdam“ geforderte „Naxos“-Gerät. Beim Direktempfang wird das hereinkommende hochfrequente Signal direkt gleichgerichtet, kann aber nicht verstärkt, sondern nur hörbar gemacht werden.

Als Materialien für Kristalldetektoren waren in den 1930er Jahren lediglich Pyrit (FeS_2), Bleiglanz (PbS), Karborund (SiC) und ungereinigtes Silizium erprobt worden. Stellen guter Leitfähigkeit mußten individuell gesucht und fixiert werden. Die Schüttelfestigkeit dieser Detektoren war für den Einsatz in Flugzeugen oder U-Booten viel zu gering. So stand im April 1943 „ein Teil der 100-Stück-Serie 'Naxos' fertig geprüft zur Verfügung, ohne dass die notwendigen Detektoren vorhanden“ waren. Entsprechende Bemühungen der Firmen *Lorenz*, *Blaupunkt* und *Telefunken*, sowie der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt und des *Flugfunk-Forschungsinstituts Oberpfaffenhofen* hatten nur zu sehr instabilen Detektoren geführt, die nicht in gleichbleibender Qualität in großer Stückzahl gefertigt werden konnten.⁹³

Wegen der andauernden Bombenangriffe auf Berlin wurde im Frühjahr 1943 das Labor für Hochfrequenz-Spezialröhren und Halbleiter von Berlin nach Leubus (Lüben beziehungsweise Lubitz) an der Oder (Schlesien) ausgelagert. Erst dort setzten inten-

⁹¹ Mataré, *Rauschen von Dioden*, 1942, S. 117-122.

⁹² Eckert/Schubert, *Kristalle*, 1989, S. 157.

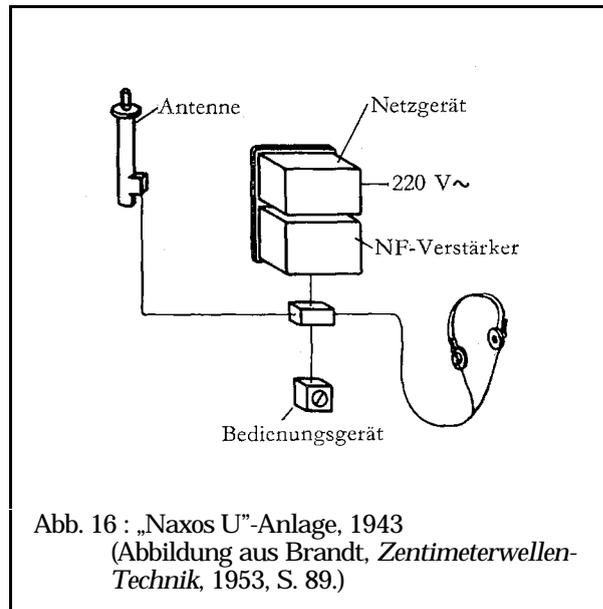
⁹³ AGR-Protokolle, 17. März 1943 und 8. April 1943 (Zitat).

sive Forschungsarbeiten an Kristalldetektoren ein. Diese Untersuchungen wurden dadurch begünstigt, daß nun die Bemühungen zur Rückführung wissenschaftlich-technischer Experten zu wirken begannen. So wurde beispielsweise Karl Seiler im Rahmen der „Rü-Funk“-Aktion von der Ostfront abberufen und in Rothes Labor dienstverpflichtet.

Seiler hatte Ende der 1930er Jahre als Assistent von Prof. Dr. Rudolf Suhrmann am Institut für physikalische Chemie der technischen Hochschule und Universität Breslau ein Kältelabor mit Wasserstoff- und Heliumverflüssigungsanlagen eingerichtet. Bei Kriegsbeginn wurde er zunächst an die Westfront verpflichtet, kam aber zurück und konnte 1940 seine Habilitation beenden. Bald darauf wurde er zwar Dozent für „chemische Physik“ in Breslau, aber auch erneut eingezogen und an die Ostfront beordert, von wo er im Sommer 1943 zu *Telefunken* kam. Kurz nach seinem dortigen Arbeitsbeginn forderte Horst Rothe ihn auf, ein Objekt zu untersuchen, das aus einem britischen Bomber ausgebaut worden war. Seiler stellte nach Messungen der Kennlinie fest, daß es sich um einen Hochfrequenz-Detektor handelte.⁹⁴

Sofort wurde er in die Arbeiten zur Herstellung von ersten Kristalldetektoren eingebunden. Mitte Mai hatte Rothe auf einer Besprechung der „Arbeitsgemeinschaft Rotterdam“ schon berichten können, daß die Produktion von Detektoren angelaufen sei. Erste Muster für ein Warngerät für U-Boote „Naxos U“ waren ebenfalls im Bau. Jedoch bereitete die mangelnde Schüttelfestigkeit der Detektoren noch größere Schwierigkeiten. An Verbesserungen wurde noch gearbeitet, als die ersten „100 Anlagen ‚Naxos I‘ mit jeweils nur einem einzigen HF-Teil [Hochfrequenz-Teil]“ bereits ausgeliefert wurden. Diese ersten Anlagen mußten wegen ihrer mangelnden Schüttelfestigkeit noch ortsfest installiert werden, und konnten so nur zu Testzwecken und zur Warnung von Städten vor den alliierten Bomberangriffen genutzt werden.⁹⁵

Doch die ersten einigermaßen schüttelfesten „Naxos U“-Anlagen zum Einsatz in U-Booten konnten wenig später geliefert werden und wurden unter dem Namen „Naxos-Finger“ bekannt, da die Antenne von einem Funker vom U-Boot-Turm aus hochgehalten werden mußte und wie ein Finger aussah (siehe Abb. 16). Über den Kopfhörer konnte dieser das Radarsignal eines herannahenden Flugzeugs bei einer Entfernung von ca. 5-8 km hören. Durch Intensitätsunterschiede bei Ausrichtung der Antenne auf die unterschiedlichen Himmelsrichtungen war es dem Funker möglich die Richtung zu bestimmen, aus der das herannahende Flugzeug kam. Die danach zur Verfügung stehende Zeit reichte bei den ersten Modellen gerade aus, um vor dem Einschlagen der Bomben einige Meter unter Wasser zu gehen. Da der in der Antenne untergebrachte Detektor feuchtigkeitsempfindlich war, mußte die gesamte Antenne beim Abtauchen im Inneren des U-Bootes in Sicherheit gebracht werden.⁹⁶



⁹⁴ Seiler-Interview 1982. Später stellte es sich heraus, daß es sich dabei um einen britischen wärmebehandelten Silizium-Detektor („red dot“) gehandelt hatte. (Zu deren Herstellungsweise siehe Torrey/Whitmer, *Crystal Rectifiers*, 1948, S. 90-92).

⁹⁵ AGR-Protokolle, 19. Mai 1943 und 1. Juni 1943 (Zitat).

⁹⁶ Brandt, *Zentimeterwellen-Technik*, 1953, S. 87-90 und Reuter, *Funkmeß*, 1971, S. 165-167. Mit besseren Antennen war es später möglich, die Reichweite auf ca. 50 km zu erhöhen.

Der Kristalldetektor war direkt in der Antenne untergebracht und bestand zunächst aus ungereinigten Siliziumbruchstücken. Seiler erinnert sich:

„Die ersten Geräte für die U-Boote, mit denen die den ‚Rotterdam‘ hören konnten, wenn der sie sah ... da waren noch ganz gewöhnliche Siliziumkristalle drin, aus Siliziumschmelzen, die man zerkloppt hat und gesucht hat, bis man gerade eine empfindliche Stelle hatte. Die hat man dann versucht zu fixieren.“⁹⁷

Vorrangiges Ziel der Arbeiten war nun die Verbesserung des Kristallmaterials, um zuverlässige und gleichmäßige Detektoren bauen zu können.

Synthetische Siliziumschichten

Seiler kam diesem Ziel bei einem Besuch im nahegelegenen Breslau sehr viel näher. Dort kam er mit dem Chemiker Prof. Dr. Paul Ludwig Günther ins Gespräch, der im Auftrag des Reichsluftfahrtministeriums ebenfalls an Detektoren arbeitete. Dabei unterrichtete ihn Günther von seinen Arbeiten:

„Sie verstehen doch was von dem Zeug, Sie sind doch jetzt bei Telefunken, ..., ich hab' da einen Auftrag, ein Forschungsprojekt, ich soll da gleichmäßig empfindliche Schichten machen.“⁹⁸

Sofort erkannte Seiler, daß sie beide an dem gleichen Thema arbeiteten und vertiefte sich in Günthers erste Ergebnisse.

Günther hatte sich zunächst auf das traditionell für Kristalldetektoren verwendete Pyrit (FeS_2) konzentriert und ein Verfahren entwickelt, Pyrit-Kristalle künstlich herzustellen. Aus einer Mischung aus Eisen (Fe) oder Eisensulfid (FeS) mit Schwefel (S) bildete sich bei Schmelzen immer Pyrit. War die Temperatur zu hoch, zerfiel es wieder in seine Bestandteile. Als optimal hatte sich eine Temperatur von ca. $720\text{ }^\circ\text{C}$ herausgestellt. Das dabei entstehende Pyrit war polykristallin. Für Experimente zur Gleichrichtung waren aber zumindest kleine Einkristalle nötig, so daß die Pyrit-Kristalle aus einer Schmelze von FeS_2 und FeCl_2 wachsen mußten. Dabei gelang es aber nie, stöchiometrisch reine Pyrit-Kristalle herzustellen, die aus genau zwei Teilen Schwefel und einem Teil Eisen bestanden. Immer war freier Schwefel in geringen Konzentrationen vorhanden, der die Art der elektrischen Leitung - Überschuß- oder Defektleitung - sowie den Gleichrichtungssinn bestimmte. Die Konzentration des freien Schwefels ließ sich aber so schlecht beeinflussen oder kontrollieren, daß Günther zu dem Schluß kam, Pyrit eigne sich nicht für grundsätzliche Forschungen zur elektrischen Leitfähigkeit. Er setzte daraufhin seine Arbeiten mit Silizium fort, da er wußte, daß auch Silizium gleichrichtende Eigenschaften hat.⁹⁹

Um die hohe Schmelztemperatur von Silizium (ca. $1440\text{ }^\circ\text{C}$) zu umgehen, reduzierte Günther Siliziumchlorid bei $800\text{ }^\circ\text{C}$ mit Aluminium zu reinem Silizium.¹⁰⁰ Das Silizium schlug sich bei dieser Reaktion in dünnen Schichten auf Trägerkörpern nieder. Günther hatte als Trägerkörper zunächst Keramik verwendet, worauf sich sehr feste und gleichmäßige Schichten bildeten. Mit den ersten so hergestellten Detektoren konnte Günther zwar Rundfunkwellen, aber keine Zentimeterwellen nachweisen.

Konfrontiert mit diesem Problem, wandte sich Seiler zunächst den theoretischen Überlegungen zum Gleichrichtereffekt zu, um die Größenordnung der zu erwarteten Effekte abschätzen zu können. Bald kam er zu der ihm noch unbekanntem Schottky-Theorie des Metall-Halbleiter-Kontakts. Nach ersten Experimenten zweifelte Seiler nicht daran, daß Silizium als Halbleiter anzusehen war und er daher die Schottky-Theorie auf Siliziumdetektoren anwenden konnte. Allerdings fand er sie zunächst

⁹⁷ Seiler-Interview 1982.

⁹⁸ Ebenda.

⁹⁹ „German Research on Semi-Conductors, Metal Rectifiers, Detectors and Photocells“, BIOS-Report 1751, S. 28-29.

¹⁰⁰ Die entsprechende Gleichung lautet: $3\text{ SiCl}_4 + 4\text{ Al} \rightarrow 3\text{ Si} + 4\text{ AlCl}_3$.

schwer verständlich. Aber in Horst Rothe, der in den zwanziger Jahren Mitarbeiter bei Walter Schottky in Rostock gewesen war, und in Herbert Mataré, der die Schottky-Theorie noch in seinen letzten Studentagen in Aachen kennengelernt hat, fand er geeignete Gesprächspartner, um sich mit der Gedankenwelt Schottkys vertraut zu machen.¹⁰¹

So ließ die Lösung des Problems nicht lange auf sich warten. Seiler erinnert sich:

„Dann hatte ich mir, gerade nachdem ich die Schottkysche Theorie mit Ersatzschaltbildern etc. gelernt hatte, überlegt, wie kann das kommen. Das Silizium ist hochohmig, war auf Keramik aufgedampft, ... damit der Bahnwiderstand geringer wird, muß die Unterlage leitender sein ... dann haben wir es erst auf Molybdän versucht, das ging schon, da haben wir schon was gemerkt, ... aber die Schichten blättern ab, die hielten nicht. ... Kohle, auf Reinheit muß man achten, ... das war dann die Methode, wie wir bis zum Ende des Krieges unsere U-Boote mit Siliziumgleichrichtern ausrüsteten.“¹⁰²

Seiler hatte erkannt, daß bei einem Kristalldetektor der Schottky-Theorie folgend, die Gleichrichtung nur in einer sehr dünnen Randschicht von nur etwa 10^{-5} cm am Metall-Halbleiter-Kontakt stattfindet. Damit der stromrichtungsabhängige Widerstand $R^{(z)}$ dieser Randschicht einen großen Anteil am Gesamtwiderstand R_G hat, muß der Bahnwiderstand R_b sehr klein sein. Der Bahnwiderstand hängt von der Leitfähigkeit des Materials und der Geometrie der Anordnung ab. Da der Strom nach der Randschicht, auf der die Spitze auf sitzt, sich auf eine große Fläche verteilen kann, ist der Bahnwiderstand R_b im Vergleich zum Sperrschichtwiderstand $R^{(z)}$ in einem gut leitenden Material fast vernachlässigbar klein (siehe Abb. 17).

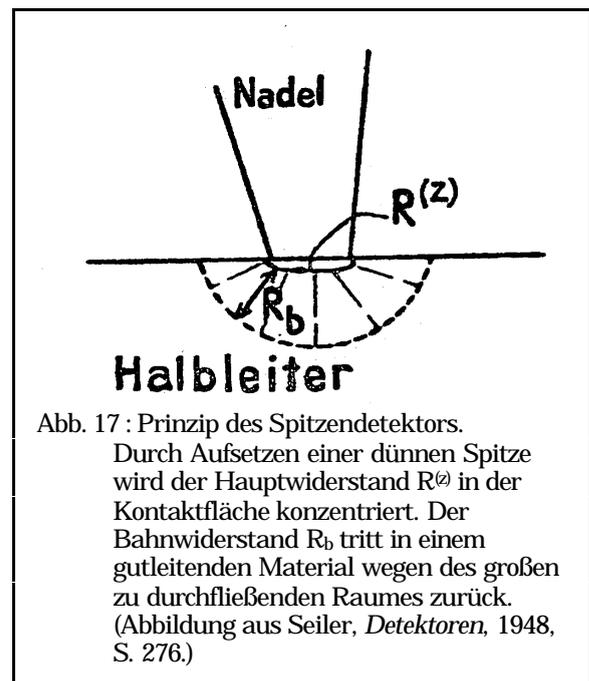


Abb. 17 : Prinzip des Spitzendetektors. Durch Aufsetzen einer dünnen Spitze wird der Hauptwiderstand $R^{(z)}$ in der Kontaktfläche konzentriert. Der Bahnwiderstand R_b tritt in einem gutleitenden Material wegen des großen zu durchfließenden Raumes zurück. (Abbildung aus Seiler, *Detektoren*, 1948, S. 276.)

Günther hatte aber das Silizium zunächst auf Keramik aufgedampft und das Silizium seitlich kontaktiert. Durch das hochohmige Silizium war der Bahnwiderstand R_b von der Metallspitze bis zur seitlichen Kontaktstelle zu groß. Seiler schlug nun vor, das Silizium direkt auf Molybdän aufzubringen und das Molybdän zu kontaktieren. Dadurch wurde der Bahnwiderstand geringer, Zentimeterwellen ließen sich schon empfangen, aber die Siliziumschichten blättern vom Molybdän leicht ab. Weitere Versuche ergaben, daß sich hochreiner Graphit (Kohlenstoff) sehr gut eignet, weil er gut leitend ist und sich feste Siliziumschichten darauf bildeten.¹⁰³

Aber auch beim oben angegebenen „Güntherschen Reduktionsverfahren“ erhielt man nie völlig reines Silizium. Etwas blieb immer im Silizium und bestimmte dessen Leitfähigkeit. Der Aluminiumgehalt konnte spektroskopisch bestimmt werden.

“Rectification was obtained only within a definite range of Al content; with an impurity of less than 0.1 % the Si had a very high resistance in both directions, with more than 2% it acted as a good metallic conductor. Rectification was confined within these limits but the best results were obtained between 0.2% and 1.0% of

¹⁰¹ Seiler-Interview 1982. Seiler gibt sogar an, daß er 1943 an kleinen Siliziumnadeln die Störleitung und Eigenleitung von Silizium nachgewiesen habe, sich aber nicht traute, das zu veröffentlichen, da Gudden gesagt hatte, daß Silizium nicht als Halbleiter anzusehen sei.

¹⁰² Seiler-Interview 1982.

¹⁰³ Seiler, *Detektoren*, 1948, S. 276- 280; BIOS-Report 1751, S. 29; Seiler-Interview 1982.

Al. This rather contradicts Schottky's theory whereby an impurity amounting to $1:10^5$ should produce best rectification."¹⁰⁴

Aus diesen Experimenten schlossen Seiler und Günther, daß „Si nur dann Detektoreigenschaften hat, wenn es 0.1 bis 1 % Aluminium enthält.“¹⁰⁵ Die konkreten physikalischen Gründe dafür kannten Seiler und seine Kollegen noch nicht, insbesondere waren sie sich über den Unterschied von „Donatoren“ und „Akzeptoren“ noch nicht klar. Während „Donatoren“ der V. Hauptgruppe der chemischen Elemente angehören und daher bei Einbau in das Siliziumgitter (IV. Hauptgruppe) ein Elektron abgeben, entstammen Akzeptoren der III. Hauptgruppe und nehmen ein Elektron auf. Dotierung mit „Donatoren“ führt zur Elektronenleitung (n-Leitung), „Akzeptoren“ erzeugen Löcher- beziehungsweise Defektelektronenleitung (p-Leitung). Für Seiler waren aber nach Kriegsende, als er einen Bericht über die deutschen Detektorarbeiten schrieb, „Donatoren“ immer noch lediglich Beimengungen, ohne geklärte mikrophysikalische Funktion. Beispielsweise bezeichnete er in seinem Bericht Aluminium als „Donator“, obwohl es der III. Hauptgruppe angehört und es somit ein Akzeptor ist.¹⁰⁶

Wichtig war, daß mit dem Güntherschen Verfahren feste und weitgehend gleichmäßige Siliziumschichten erzeugt werden konnten, so daß das manuelle Aufsuchen besonders empfindlicher Stellen entfiel. Seiler erinnerte sich daran:

„Das hat bei Telefunken sehr schnell die Runde gemacht, also innerhalb von 4-6 Wochen haben wir dann synthetische Schichten gehabt, wir haben geschafft wie die verrückten, naja ... die U-Boote sofften ja am laufenden Band ab. Das war teilweise so, daß die Schichten, die ich da im Labor in Breslau machte, geprüft wurden und dann von dort direkt mit irgend einem Matrosen ... auf das U-Boot gebracht wurden.“¹⁰⁷

So konnte noch im Dezember des Jahres 1943 auf einer Besprechung der „Arbeitsgemeinschaft Rotterdam“ verkündet werden: „Die ersten synthetischen Detektoren stehen bei Telefunken zur Verfügung und werden in Kürze der P.T.R. zur Prüfung eingesandt.“¹⁰⁸ Ab Frühjahr 1944 sollten dann nur noch synthetische Detektoren geliefert werden.

„Herr Dr. Rothe berichtet über Fortschritte auf dem Gebiet der synthetischen Detektoren. Die Frage der Schüttelfestigkeit ist jetzt geprüft sowie die Frage der Transportfestigkeit. Ebenso haben die Untersuchungen ergeben, dass die Empfindlichkeit des synthetischen Detektoren sehr gut ist. ... Ab April 1944 beabsichtigt Telefunken nur noch synthetische Detektoren auszuliefern.“¹⁰⁹

Ersatzschaltbilder und Konstruktion eines Detektors

Zur Herstellung auch noch bei hohen Frequenzen gleichrichtender Siliziumschichten war lediglich ein grobes Verständnis der *physikalischen* Eigenschaften der Sperrschicht nötig. Es genügte, mit Schottky anzunehmen, daß die eigentlich gleichrichtende Schicht sehr dünn ist, wahrscheinlich in der Größenordnung von 10^{-5} cm. Die Produktion ganzer Detektoren (Abb. 19), die direkt in den Radargeräten von U-Booten und Flugzeugen eingesetzt werden konnten, erforderte jedoch ein genaueres Wissen über die *elektrischen* Eigenschaften des Gesamtdetektors, da diese auf die unterschiedlichen Komponenten (Antenne, Ausgabegerät, Verstärker...) der Radargeräte abgestimmt werden mußten.

Seiler und Kollegen entwickelten daher ein Ersatzschaltbild für den Detektor bei hohen Frequenzen, in das naturwissenschaftliche Kenntnisse, experimentelle und

¹⁰⁴ BIOS-Report 1751, S. 29.

¹⁰⁵ Seiler, *Detektoren*, 1948, S. 279.

¹⁰⁶ Ebenda, S. 279; Seiler-Interview 1982.

¹⁰⁷ Seiler-Interview 1982.

¹⁰⁸ AGR-Protokolle, 14. Dezember 1943, S. 92.

¹⁰⁹ AGR-Protokolle, 25. Februar 1944.

praktische Erfahrungen einfließen. Insbesondere hatten dafür ausführliche Messungen des Hochfrequenzwiderstands der Detektoren angestellt werden müssen. Diese ergaben eine hohe elektrische Kapazität C_0 der Nadel beziehungsweise Ringschleife, die verständlich wurde, „wenn man bedenkt, daß eine Detektorspitze, besonders mit einem polykristallinen Material[,] nicht an allen Stellen galvanischen Kontakt haben wird. Die schädliche Kapazität rührt also in erster Linie von den nicht am Kontakt beteiligten Flächen her, die sich oft sehr nahe gegenüberstehen können.“¹¹⁰

Aus den Meßergebnissen konnten sie ableiten, daß es sinnvoll war, die elektrischen Eigenschaften der Sperrschicht durch einen Widerstand $R^{(2)}$ und eine Kapazität $C^{(2)}$ zu beschreiben, diejenigen der Nadel durch ihre Kapazität C_0 gegenüber der Sperrschicht und ihre Induktivität L . Die Kapazität der Fassung des Detektors konnte mit C_F beschrieben werden (siehe Abb. 18). Ausgestattet mit einem solchen „technikwissenschaftlichen Modell von hoher Abbildungsqualität“, konnten sie Schlußfolgerungen über das konkrete Detektordesign ziehen.¹¹¹

¹¹⁰ Seiler, *Detektoren*, 1948, S. 287.

Die Ergebnisse der Messungen sind ausführlich mit den entsprechenden Rechnungen in Mataré, *Empfangsprobleme*, 1951, S. 152-161 angegeben.

¹¹¹ Die Methode der Ersatzschaltbilder beziehungsweise des äquivalenten Kreises wurde von Charles P. Steinmetz Ende des 19. Jahrhunderts zunächst zur Berechnung von Transformatoren eingeführt und zu Beginn des 20. Jahrhunderts auf Drehstrommaschinen angewandt (siehe dazu Kline, *Science and Engineering*, 1987, S. 305-309 und Kline, *Steinmetz*, 1992, S. 112-113). Neben anderen Modellbildungen hatte sich nach dem Ersten Weltkrieg das Erstellen von Ersatzschaltbildern für Elektronenröhren eingebürgert. Damit war es möglich, diese nicht idealen und nicht linearen Bauteile durch einen Schaltkreis aus idealen Bauteilen zu beschreiben und zu berechnen. Diese Methode wurde unter anderem von Heinrich Barkhausen angewandt, der feststellte, daß die „Frequenzabhängigkeit oft nicht durch einfache Ersatzschaltungen dargestellt werden kann.“ (Barkhausen, *Elektronenröhren*, 1960, S. 202.) Daher bürgerte es sich bald ein, zwischen dem Hochfrequenz-Schaltbild und den Schaltbildern bei niedriger Frequenz zu unterscheiden. Es galt dabei: „Das komplizierte Schaltbild für hohe Meßfrequenz muß dann die vereinfachten Schaltbilder bei niedriger Frequenz enthalten bzw. durch sein Frequenzverhalten zu einem einfachen Schaltbild degenerieren.“ (Mataré, *Empfangsprobleme*, 1951, S. 152.)

Unterschiedliche Ersatzschaltbilder für Halbleitergleichrichter wurden schon von Schottky und Deutschmann 1929 angegeben, die damit ihre Meßergebnisse an „Kupferoxydulgleichrichtern“ deuteten, ohne sich aber dabei eindeutig auf eins der beiden diskutierten Schaltbilder festzulegen. (Schottky/Deutschmann, *Richtwirkung*, 1929.)

Interessanterweise ist Schottky in seinen späteren Veröffentlichungen zur Gleichrichtung am Metall-Halbleiter-Kontakt auf die Diskussion der Ersatzschaltbildern nicht mehr (explizit) zurückgekommen, obwohl die Methode der Bestimmung der Dicke der Sperrschicht über Kapazitätsmessungen ein konkretes Ersatzschaltbild implizit erforderte. Allerdings galt bei beiden 1929 vorgeschlagenen Ersatzschaltbildern, daß sich „die gefundene Kapazität ... von gleicher Größenordnung ergibt.“ (Schottky/Deutschmann, *Richtwirkung*, 1929, S. 845; zur weiteren Verwendung von Ersatzschaltbildern in Selen- und „Kupferoxydulgleichrichtern“ siehe Meyeren, *Halbleiter-Gleichrichter*, 1948 und Sachse, *Hochfrequenz-Oxydulgleichrichter*, 1948.)

Die unterschiedlichen, unter anderem bei *Telefunken* während des Krieges entwickelten Ersatzschaltbilder für Hochfrequenz-Kristalldetektoren sind in Mataré, *Empfangsprobleme*, 1951, S. 152-161 wiedergegeben.

Zu Modellvorstellungen und Wissenschaftlichkeit in der Elektrotechnik siehe König, *Technikwissenschaften*, 1995, insb. S. 297-323 (Zitat auf S. 322), Buchhaupt, *Technik und Wissenschaft*, 1998 und Kaiser, *Fakultät für Elektrotechnik*, 1995.

Es ergab sich für die Gleichrichtung von hohen Frequenzen, daß der komplexe Widerstand der Parallelschaltung von Sperrschichtwiderstand $R^{(z)}$ und Kapazität $C^{(z)}$ groß gegen den Bahnwiderstand R_b sein mußte. Eine zu große Kapazität $C^{(z)}$ würde das verhindern. Obwohl eine direkte Messung der Grenzschichtkapazität $C^{(z)}$ bis Ende des Krieges nicht gelungen war, konnte aus anderen Messungen geschätzt werden, daß die mit dem Güntherschen Verfahren hergestellten Siliziumschichten die für den Zentimeterwellenempfang nötige, äußerst geringe Kapazität $C^{(z)}$ hatten. In Übereinstimmung mit der Schottky-Theorie konnte damit auch auf eine geringe Ausdehnung der Sperrschicht geschlossen werden, „ob sie allerdings die theoretische Dicke von nur wenigen Atomlagen hat, ist damit nicht erwiesen.“¹¹²

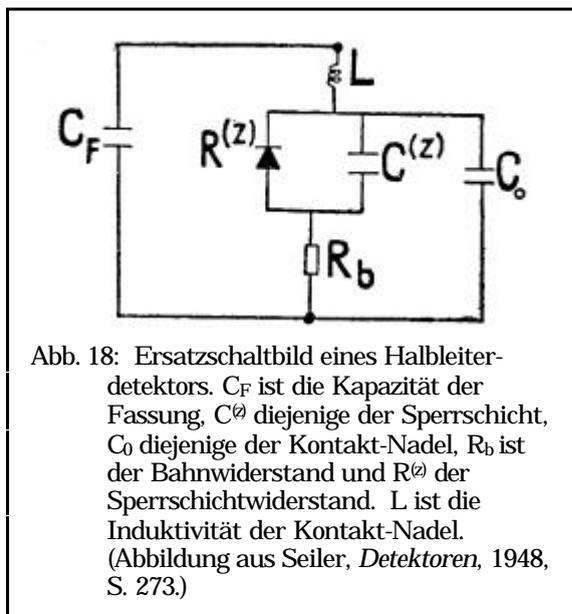


Abb. 18: Ersatzschaltbild eines Halbleiterdetektors. C_F ist die Kapazität der Fassung, $C^{(z)}$ diejenige der Sperrschicht, C_0 diejenige der Kontakt-Nadel, R_b ist der Bahnwiderstand und $R^{(z)}$ der Sperrschichtwiderstand. L ist die Induktivität der Kontakt-Nadel. (Abbildung aus Seiler, *Detektoren*, 1948, S. 273.)

Während Seiler gemeinsam mit Günther im Materiallabor der Universität Breslau die ersten Kleinserien der Siliziumschichten produzierte, untersuchte Mataré in Leubus unterschiedliche Detektortypen. Ihre Erkenntnisse führten dann Anfang 1944 zum grundsätzlichen Design der *Telefunken*-Detektoren der Serie ED 700 bis 705, die ab Frühjahr 1944 produziert werden konnten.

Detektorserie ED 700 bis ED 705

Die Detektoren der Serie ED 700 bis ED 705 von *Telefunken* waren Mitte 1944 die einzigen Detektoren von gleichbleibender Qualität, mit denen Zentimeterwellen nachgewiesen werden konnten. Daher rüstete *Telefunken* die bei ihnen hergestellten „Naxos“- und „Berlin“-Geräte ausschließlich mit eigenen Detektoren aus.¹¹³

Anfangs war das keineswegs so gewesen. Die Detektoren der *Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (PTR)* und von anderen Institutionen erschienen durchaus konkurrenzfähig. Der Präsident der PTR, Abraham Esau, hatte sich im April 1943 noch bei Runge beschwert, daß Leo Brandt als Vorsitzender der Arbeitsgemeinschaft Rotterdam seine Machtposition ausnütze und in bezug auf Detektoren „die Leistungen anderer verschweige.“¹¹⁴ Doch seit Anfang 1944 waren die nach dem Güntherschen Verfahren hergestellten synthetischen Siliziumschichten für den Zentimeterwellenempfang allen anderen Materialien überlegen.

¹¹² Seiler, *Detektoren*, 1948, S. 287.

¹¹³ Die von Heinrich Welker in Zusammenarbeit mit dem Flugfunk-Forschungsinstitut Oberpfaffenhofen und *Siemens* hergestellten Germaniumdetektoren eigneten sich für Zentimeterwellen zunächst nicht. Siehe dazu das folgende Kapitel „Germaniumdetektoren“ ab S. 74.

¹¹⁴ Notizbuch Runge (2. März 1943 – 23. Sept. 1943), Eintrag 20. April 1943, *Telefunken-AEG-Archiv*, DTM, GS 6895.

Deshalb richtete Seiler in Kooperation mit dem Röhrenwerk von *Telefunken* eine Serien-Fertigung ein. „So 20 bis 30 Öfen wurden da gemacht ... und dann haben wir Dutzende von Frauen gehabt, die nichts anderes gemacht haben, ..., als festzustellen ob die Gleichrichtung gleichmäßig ordentlich war.“¹¹⁵

In diesen Öfen wurden kleine Graphitstäbchen von einigen Millimetern Länge mittels des Güntherschen Verfahrens mit einer Siliziumschicht überzogen. Diese Stäbchen wurden dann einfach durchgebrochen und an der Bruchstelle in das Detektorgehäuse gelötet. Für den gleichrichtenden Kontakt wurde eine Ringschleife aus Molybdän-Draht auf die silizierte Seite des Graphit-Stäbchens gedrückt und nach Einstellung fest verschraubt. Dieser Gesamtaufbau wurde während der Entwicklung der Serie nicht geändert. Lediglich die Abmessungen der Modelle ED 704 und ED 705 waren kleiner als diejenigen ihrer Vorgänger, so daß vor dem Einbau eine neue Halterung eingeschraubt werden mußte (Abb. 19).¹¹⁶

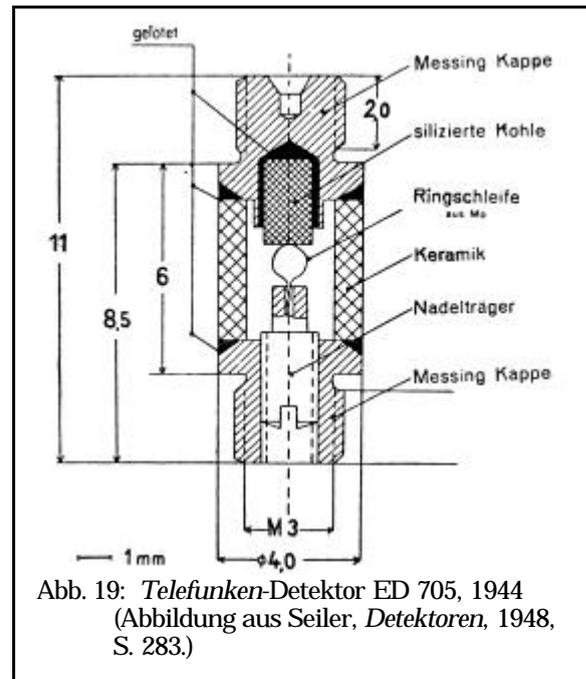


Abb. 19: *Telefunken*-Detektor ED 705, 1944
(Abbildung aus Seiler, *Detektoren*, 1948, S. 283.)

Wegen der guten Leitfähigkeit der hergestellten Siliziumschichten reichte eine Ringschleife mit ihrer im Vergleich zu einer dünnen Drahtspitze großen Berührungsfläche aus. Allein die Aufdruckkraft des Drahtes sorgte für die für den Einsatz in Flugzeugen, Schiffen und U-Booten nötige Schüttel- und Stoßfestigkeit des Detektors. Der abgebildete Mischdetektor ED 705 stellte das Spitzenprodukt von *Telefunken* dar und kam ab Oktober 1944 in den „Berlin“-Geräten zu Einsatz. Doch trotz der speziellen Alterungsbehandlung, mit der eine gute Konstanz der Detektoren erreicht werden sollte, fielen sie offenbar so häufig aus, daß mit jeder Anlage ein Reservekästchen ausgeliefert wurde, das zwei weitere ED 705 Detektoren enthielt. Über die Gründe der teilweise geringen Lebensdauer lagen erst wenige Erkenntnisse vor.

Um ein Bild über die Lebensdauer der ED 705 zu bekommen bzw. aus welchen Gründen diese unbrauchbar werden, ist es unbedingt notwendig, dass ausgefallene Detektoren mit einer kurzen Bemerkung, nach welcher Betriebszeit und aus welchen vermutlichen Grunde sie ausgefallen sind, ... umgehend eingesandt werden.“¹¹⁷

Bis zum Ende des Krieges konnte dieses Problem allerdings nicht mehr gelöst werden.

Weitere Forschungen im *Telefunken* Laboratorium

Parallel zur Produktion dieser Detektoren liefen in Rothes Labor in Leubus weitere Forschungen, die auf eine Verbesserung der Detektoreigenschaften abzielten. Ein Schwachpunkt der Detektoren ED 700 bis ED 705 bestand in der Kontaktierung der Siliziumschicht durch die Ringschleife. Die Ringschleife ließ sich zwar stabiler als eine Nadel montieren, Erschütterungen konnten aber weiterhin die Gleichrichterwirkung beeinflussen. Auch führte der oft unsaubere Kontakt zu starkem Rauschen und trug zur unerwünschten Kapazität C_0 bei. Zusätzlich hatte die Ringschleife insbesondere bei sehr hohen Frequenzen eine störende Induktivität L (siehe Abb. 18).

¹¹⁵ Seiler-Interview 1982.

¹¹⁶ Werksvorschrift für „Naxos ZM 1b“, AEG-Telefunken-Archiv, DTM, GS 6746.

¹¹⁷ „Radarmessgerät Berlin“, AEG-Telefunken-Archiv, DTM, GS 4263.

Mataré und Seiler experimentierten daher gemeinsam damit, die Siliziumschicht zunächst mit einer isolierenden Schicht zu versehen und dann „mit Hilfe eines elektrischen Durchschlags oder dergleichen feine Löcher zu erzeugen“. In diesen Löchern konnte man danach elektrolytisch kleine Kupfer- oder Silberpilze wachsen lassen und diese kontaktieren. Dadurch waren die Kontakte zwar sehr stabil, zum Empfang von Zentimeterwellen ergaben sich aber zunächst zu große Kapazitäten, so daß dieses Verfahren nicht in die Produktion überführt werden konnte.¹¹⁸

Parallel wurde weiter an der Verbesserung der existierenden Detektoren gearbeitet. Da diese Detektoren insbesondere in den „Berlin“-Geräten auch im Mischbetrieb als Überlagerungsempfänger eingesetzt werden sollten, ergaben sich ähnliche Probleme mit dem Empfänger-Oszillatorrauschen wie bei den Elektronenröhren-Dioden. Daher stellte Mataré nun auch Versuche zur Rauschkompensation mit Detektoren an. Rauschkompensation war mit Duodioden schon schwierig genug, aber noch schlechter gelang es mit den Kristallduodioden. Das besondere Problem war dabei wiederum, eine möglichst identische Charakteristik der beiden Detektoren zu erzeugen. Das gelang um so besser, je näher die beiden Spitzkontakte beieinander lagen. Mataré experimentierte mit zwei Nadeln auf dem Kristall als Anoden und dem Kristall selbst als Kathode (siehe Abb. 20). Mataré erinnert sich, daß er im Zusammenhang mit dieser Schaltung auch schon Versuche angestellt hatte, die Schottky-Sperrschicht der einen Spitze mit der anderen Spitze zu steuern, er also einen Drei-Elektroden-Verstärkungs-Kristall im Sinn hatte. Er konnte auch vereinzelt Effekte messen, aber keine klaren Ergebnisse erzielen.¹¹⁹

Diese Experimente mußten abgebrochen werden, als die Sowjetarmee 1944 gegen Leubus vorrückte, so daß das Labor erneut geräumt und verlagert werden mußte. Mataré erinnert sich an die Räumung:

„Ich war in Berlin zufällig auf Dienstreise, da stehe ich im Labor von Herrn Brandt und er sagt: ‚Wir müssen das ganze Labor in Leubus schließen. Das hat keinen Zweck, daß Sie zurückfahren‘. Ich hörte noch, wie er am Telephon sagt: ‚Alles lähmen!‘ Das hieß zerstören. Ja ich sagte: ‚Um Gottes Willen, wir haben dort die ganzen Berichte und die ganzen Arbeiten. Alles liegt ja da.‘ ...
 ‚Die russische Armee ist vor den Toren, da können Sie gar nicht mehr hin.‘“¹²⁰

Das Labor wurde dann im Thüringer Wald in Böhlen bei Großbreitenbach in der ehemaligen Thermometerfabrik „Goelitz“ wieder aufgebaut.¹²¹ Doch ein richtiger Forschungsbetrieb kam nicht mehr zustande. Technisch verwertbare Ergebnisse mit Kristallduodioden wurden während des Krieges nicht mehr erzielt. Bald schon rückten die amerikanischen Truppen nach Thüringen vor und schlossen das Labor.¹²²

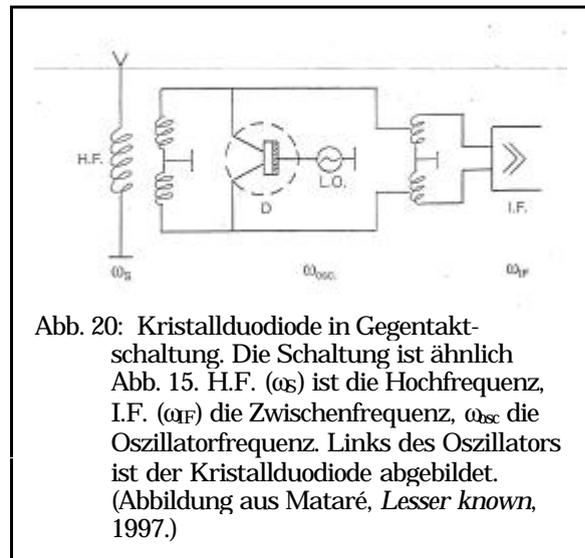


Abb. 20: Kristallduodiode in Gegentakt-schaltung. Die Schaltung ist ähnlich Abb. 15. H.F. (ω_s) ist die Hochfrequenz, I.F. (ω_{IF}) die Zwischenfrequenz, ω_{osc} die Oszillatorfrequenz. Links des Oszillators ist der Kristallduodiode abgebildet. (Abbildung aus Mataré, *Lesser known*, 1997.)

¹¹⁸ Mataré-Interview 1998; Seiler, *Detektoren*, 1948, S. 284 (Zitat); Seiler-Interview 1982; Telefonen/Mataré, *Kristalldetektor*, 1944, Schweizer Patent 243490.

¹¹⁹ Ebenda; Mataré an Handel (pers. Mitteilung), 16. Juli 1998. Mataré konnte diese Versuche erst ab 1947 in Paris weiterführen, siehe dazu das Kapitel „Transistorentwicklung in Frankreich - Mataré und Welker“ ab S. 117.

¹²⁰ Ebenda.

¹²¹ Nach dem Krieg wurde die Einrichtung unter dem Namen "Heinze und Raum" weitergeführt. Auch *Siemens* hatte sich während des Krieges in Großbreitenbach angesiedelt und dort die Rundfunkgeräte "Siemens W14" hergestellt. Ich danke Wolfgang Erdtmann aus Großbreitenbach für diese Informationen.

¹²² CIOS-Report XXI-1; Mataré-Interview 1998; Seiler-Interview 1982.

Für Mataré, Seiler und die anderen begann damit die Nachkriegszeit. Wie die meisten versuchten sie zunächst, zu ihren Familien zu gelangen.

Germaniumdetektoren

Heinrich Welker arbeitete während des Krieges im Rahmen der Luftfahrtforschung an der Entwicklung von Germaniumdetektoren.

Seit Ende 1939 hatte er sich nach einem neuen Betätigungsfeld umgesehen, da er dem Nachfolger Sommerfelds auf dem Lehrstuhl für Theoretische Physik der Universität München, an dem Welkers Assistentenstelle gerade noch einmal verlängert worden war, „keine Assistentendienste leisten wollte“.¹²³

Die Nachfolge Sommerfelds war zwischen 1935 und 1939 zu einer politischen Angelegenheit geworden und hatte schließlich dazu geführt, daß der Sommerfeld-Lehrstuhl mit dem auf dem Gebiet der modernen Theoretischen Physik völlig unbewanderten Aerodynamiker Wilhelm Müller besetzt wurde. Als Nazi-Ideologe und Vertreter der nationalsozialistisch geprägten „Deutschen Physik“ war Müller im politischen Streit zwischen dem nationalsozialistischen Dozentenbund, der SS und der Reichsleitung der NSDAP gegen den von der Fakultät favorisierten Werner Heisenberg durchgesetzt worden.¹²⁴ Müller hatte Welker zunächst als Assistenten behalten wollen, sich aber sehr schnell von ihm abgewandt, als dieser sich anders orientierte.¹²⁵



Abb. 21: Heinrich Welker
(Abbildung aus Feldtkeller/Goetzeler, *Pioniere*, 1994, S. 176.)

Welker ließ sich zum 1. April 1940 an die „*Drahtlostelegraphische und luftelektrische Versuchsanstalt Gräfelfing*“ (DVG) in der Nähe von München verpflichten, um an Fragen des Zentimeterwellenradars zu arbeiten, und trat somit in den Dienst der Deutschen Luftfahrtforschung ein. An seine weiteren Beweggründe für seinen Wechsel von der Universität in die angewandte Forschung erinnert sich Welker folgendermaßen:

„Und bei mir kam als treibende Idee einfach dazu, daß ich einmal an einem großen Projekt arbeiten wollte, was für die Menschheit bedeutungsvoll ist. Und das war damals das Radarprojekt. Von der Idee, Mittel, Geräte zu erfinden, mit denen man durch die Wolken hindurch sehen kann, so daß eine der Hauptgefahren für unsere ganze Luftfahrt beseitigt wird, von der war ich eigentlich doch sehr besessen. Also wenn Sie es genau wissen wollen, ich hatte das ewige Theoretisieren satt und wollte mich mal an einem solchen Thema versuchen.“¹²⁶

Als Heinrich Welker an die DVG kam, sollte er sich mit dem Problem des Empfangs von Zentimeterwellen auseinandersetzen.¹²⁷

Wie bereits erwähnt, wurde während der 1930er Jahre in unterschiedlichen Institutionen in Deutschland am Empfang von Zentimeterwellen gearbeitet. Die meisten dieser Arbeiten wurden allerdings bereits zu Anfang des Krieges eingestellt. Eine der Ausnahmen stellte die „*Drahtlostelegraphische und luftelektrische Versuchsanstalt*

¹²³ Welker-Interview 1981, S. 25.

¹²⁴ Zur Debatte um die „deutsche Physik“ und die Diskussion um die Nachfolge Sommerfelds siehe Cassidy, *Heisenberg*, 1995, S. 426-485; Eckert, *Atomphysiker*, 1993, S. 196-205 und Walker, *Uranmaschine*, 1990, S. 79-101.

¹²⁵ Welker-Interview 1981, S. 25; Müller an den Rektor, 18. Jan. und 12. Nov. 1941, HWD 005.

¹²⁶ Ebenda, S. 24.

¹²⁷ Ebenda, S. 28.

„Gräfelting“ (DVG) und das daraus hervorgegangene und nahegelegene „*Flugfunk-Forschungsinstitut Oberpfaffenhofen*“ (FFO) dar. Dort wurde weiter an Problemen des Zentimeterwellenradars auf Grund der Erkenntnis geforscht, „daß viele Probleme des Flugfunks und der Funknavigation sich nur durch die Anwendung sehr kurzer Wellen lösen lassen würden.“¹²⁸

Die „*Drahtlostelegraphische und luftelektrische Versuchsanstalt Gräfelting*“ (DVG) war als privates Forschungsgelände von Max Dieckmann gegründet worden, der dort schon 1912 die Arbeiten zu seiner Habilitation „*Experimentelle Untersuchungen auf dem Grenzgebiet zwischen drahtloser Telegraphie und Luftelektrizität*“ durchgeführt hatte. Als 1935 der Ausbau der Flugfunkforschung im Rahmen der *Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt* (DVL) gescheitert war, wurde Dieckmann vom Reichsluftfahrtministerium (RLM) aufgefordert, einen Kostenvoranschlag für ein erweitertes Forschungszentrum vorzulegen. Zu Dieckmanns Überraschung wurde der größere von beiden eingereichten Entwürfen genehmigt und sofort in die Tat umgesetzt. An der Westseite des Oberpfaffenhofener Flughafens entstand so das materiell gut ausgestattete „*Flugfunk-Forschungsinstitut Oberpfaffenhofen*“ (FFO), in dem die DVG nach einer Übergangphase schließlich aufging.¹²⁹

An beiden Instituten wurden schon 1937 die verschiedenartigsten Geräte erprobt, die auf 10 cm und 5 cm Wellenlänge arbeiteten.

„Darunter war im Jahre 1937 ein Dauerstrich-Funkmeßgerät ($\lambda = 10$ cm), welches gegen Ammerseedampfer eine Reichweite von 1 km aufwies und unter Ausnutzung des Doppler-Effekts auch dessen Geschwindigkeit messen konnte.“¹³⁰

Neben der niedrigen Leistungsfähigkeit des Senders war auch hier das Hauptproblem die geringe Empfindlichkeit des Empfängers. Auf diesem Gebiet setzte Dieckmann große Erwartungen in den Sommerfeldschüler Heinrich Welker. Welker erinnerte sich:

„[D]er Dieckmann, der wollte von mir schon immer wissen, ob mir nicht zum Thema Empfang von Zentimeterwellen etwas einfällt. Denn mit dem Empfang von Zentimeterwellen, mit dem Nachweis von Zentimeterwellen war's ja beliebig schlecht bestellt. ... und der Dieckmann dachte eben, ja ich hätte bei Sommerfeld so alle möglichen Effekte kennengelernt: Paarerzeugung, weiß Gott was, Photoeffekt, daß mir da eben was einfallen könnte.“¹³¹

Welker dachte auch zunächst in dieser Richtung nach und kam sehr bald zu seinem Lieblingsthema Supraleitung zurück. Er untersuchte theoretisch zunächst die Möglichkeit, Millimeterwellen durch das Verschwinden der Supraleitung nachzuweisen. Bestrahlt man eine dünne supraleitende Schicht, so wäre es nach Welkers Theorie denkbar, daß durch die dadurch erzeugten Bahnnumkehrprozesse die Supraleitung verschwindet. Technisch ergab sich für die Dicke der Schicht allerdings „ein unausführbar kleiner Wert“, so daß Welker weiter nach anderen Effekten und Theorien suchen mußte.¹³² Schließlich fiel ihm die Schottky-Randschichttheorie ein.

„Und da fiel mir die Randschichttheorie ein. Ich rechnete dann durch, ob es möglich wäre, sagen wir mal, mit Detektoren Zentimeterwellen vernünftig nachzuweisen, ob das diese Theorie ermöglichte. Die bot ja die Grundlage, sowas auszurechnen. Und ich kam zu einem positiven Ergebnis.“¹³³

¹²⁸ Zetzmann, *Flugfunkforschung*, 1963, S. 5.

¹²⁹ Trischler, *Luft- und Raumfahrtforschung*, 1992, S. 227-228; Zetzmann, *Flugfunkforschung*, 1963, S. 1-10.

¹³⁰ Trenkle, *Funkmeßverfahren*, 1979, S. 21.

¹³¹ Welker-Interview 1981, S. 28-29.

¹³² Welker, *dünne supraleitende Schichten*, 1940, HWD 004 und Welker, *Supraleiter mit mm-Wellen*, 1940, HWD 004.

¹³³ Welker-Interview 1981, S. 29.

Welker wandte sich daraufhin direkt an Walter Schottky, um mit ihm die Möglichkeit von Halbleiterdetektoren im Zentimeterwellenbereich zu diskutieren und Sonderdrucke zu erbitten. Dieser versorgte ihn mit ausführlichen Literaturhinweisen, Sonderdrucken und direkten Hinweisen auf die noch ungeklärten Fragen.¹³⁴ Es entspann sich eine ausführliche Diskussion zu den theoretischen Grundlagen der Schottky-Theorie, in der Welker insbesondere den von Schottky festgestellten Zusammenhang von Austrittsarbeit und Diffusionsspannung problematisierte.¹³⁵

Die Machbarkeit von Zentimeterwellendetektoren

Obwohl Welker und Schottky in verschiedenen Punkten keine Einigung erzielen konnten, machte sich Welker ab Anfang 1941 daran, ganz pragmatisch konkrete Berechnungen zur Machbarkeit von Zentimeterwellendetektoren auf Halbleiterbasis anzustellen. Er konnte zeigen, daß nach der Schottky-Theorie Spitzendetektoren auf Halbleiterbasis zum Nachweis von Zentimeterwellen geeignet sind, ohne auf den strittigen Punkt des Zusammenhangs von Diffusionsspannung und Austrittsarbeit einzugehen.¹³⁶

Im Detail kam er zu dem Schluß, daß für den Zentimeterwellenempfang eine große Kristalleitfähigkeit vonnöten sei, wodurch die „Absolutwiderstände der Sperrschichten sehr klein“ werden und daher nur sehr feine Spitzen - nicht aber Flächenkontakte - genutzt werden könnten. Dies war bedauerlich, da „die Herstellung eines unveränderlichen Spitzenkontaktes zwar keine unüberwindliche, aber immerhin erhebliche Schwierigkeiten bietet. Die mit dem Detektor im cm-Gebiet erreichbare Empfindlichkeit läßt jedoch den Kampf mit diesen Schwierigkeiten als lohnend erscheinen.“ Zusätzlich regte er an, „eine Oberflächenstörstellen beseitigende Oberflächenbehandlung“ am Halbleiter durchzuführen, um den ungewünschten Übergang von Elektronen zu positiv geladenen Oberflächenstörstellen nahe der aufgesetzten Spitze zu vermeiden.¹³⁷

Nach Welkers Einschätzung eröffnete die Schottky-Theorie prinzipiell die Möglichkeit, Zentimeterwellendetektoren auf Halbleiterbasis zu konstruieren, aber es waren weitere (und) detaillierte Forschungen nötig. Diese Forschungen auch durchzuführen, erwies sich für ihn dann aber schwieriger als erwartet.

Welker und die U.K.-Stellung

Obwohl Prof. Dieckmann als Leiter der DVG Welkers Forschungen an Halbleiterdetektoren unterstützte, wurden seine Arbeiten von den in Gräfelfing tätigen Ingenieuren nicht ernst genommen. Es herrschte dort die Meinung vor, daß in der Frühzeit der Radiotechnik zwar viel mit Detektoren gemacht worden sei, diese aber nun durch die Elektronenröhre ersetzt worden seien. Daher arbeite man jetzt nur solange an Detektoren, bis „die entsprechenden leistungsfähigen Röhren für den Zentimeterwellenempfang gefunden“ seien.¹³⁸

Aus diesem Grunde fühlte sich Welker in Gräfelfing nicht wohl und mußte wohl auch fürchten, daß seine Arbeiten nicht mehr als kriegswichtig eingestuft würden und er zur Wehrmacht eingezogen würde. Offiziell war Welker 1941 immer noch am Institut für Theoretische Physik angestellt und lediglich beurlaubt. Noch 1939 hatte sich

¹³⁴ Schottky an Welker, 20. April 1940 und 14. Dez. 1940, HWD 006.
Welker und Walter Schottky hatten sich schon 1938 kennengelernt, als sich Schottky für Welkers Supraleitungsarbeiten interessierte.

¹³⁵ Briefwechsel zwischen Schottky und Welker, 1940-1943, HWD 006.

¹³⁶ Welker, *Spitzendetektor*, 1941.

Dafür verwies auch er auf die nie erschienene Arbeit Schottkys zum Thema „Austrittsarbeit und Diffusionsspannung“. Siehe dazu Fußnote 169, S. 39.

¹³⁷ Welker, *Spitzendetektor*, 1941. S. 68.

¹³⁸ Welker-Interview 1981, S. 33

Arnold Sommerfeld erfolgreich für seine Zurückstellung eingesetzt.¹³⁹ Doch der neue Institutsdirektor Wilhelm Müller erklärte Anfang 1941 offiziell, „daß eine Weiterverwendung [Welkers] im Dienste des Instituts für theoretische Physik nicht ins Auge gefaßt werden wird.“¹⁴⁰

Zwar wurde noch im Juni 1941 dem Königsberger Professor für Theoretische Physik, Fritz Sauter, der Welker als seinen Assistenten gewinnen wollte, „von einem Herrn aus dem Luftfahrtministerium bestätigt“, daß Welker „in seiner jetzigen Stellung unabhkömmlich ist.“¹⁴¹ Doch schon im Juli 1941 sah die Situation ganz anders aus, da Max Dieckmann die DVG an das Deutsche Reich verkauft hatte und Welker damit automatisch als Angestellter an das *Flugfunk-Forschungsinstitut Oberpfaffenhofen* übernommen worden war. Die Versuchsstation Gräfelfing wurde zwar als Außenstelle weitergeführt, doch wurden Welkers Arbeitsbedingungen offenbar schlechter und seine Unabhkömmlichkeits-Stellung (U.K.) geriet in Gefahr. Als jung verheirateter Mann wollte Welker aber nicht an die Front und mußte daher seine Detektorarbeiten als „kriegswichtig“ anerkennen lassen oder sich nach einem neuen, anerkannt „kriegswichtigen“ Tätigkeitsbereich umsehen.¹⁴²

Auf der Suche nach anderen Tätigkeitsfeldern erkundigte er sich Mitte 1941 auch bei Werner Heisenberg nach einer „Assistentenstelle mit Kernphysik und einer U.K.-Stellung“ in dem später als „Uranverein“ bekannt gewordenen Projekt. Heisenberg konnte ihm aber keine Hoffnung machen, da er schon „zu viele Theoretiker“ habe. Darüber hinaus war er der Meinung, daß „in der nächsten Zeit alle jüngeren Leute rücksichtslos eingezogen“ würden und „ob neue U.K. Stellungen durchgesetzt werden können“, sei „etwas zweifelhaft.“¹⁴³

Welker gelang es aber auch nicht, eine andere, „kriegswichtige“ Anstellung zu bekommen. So traf es ihn hart, als Wilhelm Müller im November 1941 erneut erklärte:

„Zu meinem Erstaunen sehe ich im Verzeichnis des Personalstandes, daß der seinerseits von Sommerfeld angestellte Dr. Welker noch immer als planmäßiger Assistent meines Instituts geführt wird. Ich habe bereits mehrfach erklärt, daß Welker, der übrigens bereits seit April 1940 in der Industrie beschäftigt ist, als Assistent für mich überhaupt nicht mehr in Frage kommt und daher sinngemäß von einer Beurlaubung keine Rede sein kann. Ich will mit Sommerfeldschülern nichts zu tun haben und muß verlangen, daß auch äußerlich der Absage jeder Verbindung mit dieser Schule Rechnung getragen wird.“¹⁴⁴

Daraufhin wurde Welker aus dem Vorlesungs- und Personalverzeichnis der Universität München gestrichen und seine Einberufung stand Anfang 1942 unmittelbar bevor.¹⁴⁵

Doch mit Unterstützung von Dieckmann, der die Arbeiten an Zentimeterwellendetektoren nach wie vor für wichtig hielt, konnte Welker im Frühjahr 1942 doch noch am Physikalisch-Chemischen Institut der Universität München bei Prof. Dr. Klaus Clusius „unterschlupfen“. Zuvor hatte er Dieckmann erklären können, daß man die

¹³⁹ Sommerfeld an Welker, 23. Aug. 1939, HWD 006.

Siehe auch Arnold Sommerfeld an Universität München, nach dem 7. März 1939, DM ASD, 004 zitiert nach der online Edition des Sommerfeld-Briefwechsels, hg. von Michael Eckert und Karl Märker (<http://www.lrz-muenchen.de/~Sommerfeld/>).

¹⁴⁰ Müller an den Rektor, 18. Jan. 1941, HWD 005; Müller an der Rektor, 12. Nov. 1941, HWD 005.

¹⁴¹ Sauter an Sommerfeld, 15. Juni 1941, und Sauter an Welker, 26. Mai 1941, HWD 006.

¹⁴² Bescheinigung des Flugfunk-Forschungsinstitut Oberpfaffenhofen, Dr. A. Rendla, 9. April 1946, HWD 005; Zetzmann, *Flugfunkforschung*, 1963, S. 1-10.

¹⁴³ Heisenberg an Welker, 17. Juli 1941, HWD 006.

Wie Recht Heisenberg mit dieser Einschätzung hatte, wird klar, wenn man bedenkt, daß er wenig später nur mit Mühe eine Verlängerung der U.K.-Stellung für Paul Harteck und Carl Friedrich von Weizsäcker erreichen konnte, die beide schon zum „Uranverein“ gehörten (Walker, *Uranmaschine*, 1990, S. 63-64).

¹⁴⁴ Müller an den Rektor, 12. Nov. 1941, HWD 005.

¹⁴⁵ Schottky an Welker, 22. Jan. 1942, HWD 006.

anstehenden Arbeiten „nicht in Gräfelfing, in seiner Holzbude draußen machen [könne], sondern dazu ... ein ordentliches Institut [brauche]. Das Physikalisch-Chemische Institut der Universität München.“¹⁴⁶

Experimente am Institut von Klaus Clusius

Das Physikalisch-Chemische Institut der Universität München wurde von Klaus Clusius geleitet, der seit 1939 für das Heereswaffenamt unterschiedliche Forschungen durchführte. Unter anderem untersuchte er für den „Uranverein“ schweres Wasser und stellte Experimente zur Isotopentrennung mit Uranhexafluorid an.¹⁴⁷ Welker urteilte über ihn:

„Und der Clusius war einfach nach meinem Geschmack, insofern, weil der Clusius ja an sich ein konsequenter Nazigegner war. Er konnte das gut überspielen. Der Clusius war ja auch ein großer Schauspieler und hat die größten Kunststücke fertiggebracht, wenn er in Berlin aufgetreten ist, wie er da mit den Leuten vom Heereswaffenamt fertig geworden ist. Aber er hat halt das Schauspielertalent gehabt, und konnte unglaublich auftreten.“¹⁴⁸

Materialfragen - Germanium als Detektormaterial

Welker hatte schon im Gräfelfing erste Experimente zum Detektormaterial durchgeführt und war dabei zu dem Ergebnis gelangt, daß sich die üblicherweise verwendeten Materialien für haltbare Zentimeterwellen-Detektoren nicht eigneten.

Wegen der kleinen Wellenlänge mußten die Detektoren als Spitzenkontakt-Detektoren gebaut werden, bei denen eine dünne Metallspitze fest auf dem halbleitenden Material aufsaß. An diesem Spitzenkontakt fand die Gleichrichtung statt, danach erst konnte der gleichgerichtete Strom nachgewiesen werden. Während des Betriebs entstand dabei an der Spitze eine sehr große Wärme, die dazu führte, daß die früher üblichen zusammengesetzten Materialien, Bleiglanz (PbS) und Pyrit (FeS₂), in ihre Bestandteile zerfielen. Daher schlug Welker vor, beständigere Materialien, insbesondere Elementhalbleiter, zu verwenden.

Welker verglich daher nach der Literatur die Eigenschaften der seiner Meinung nach in Frage kommenden „halbleitenden Elemente“ (Bor, Silizium, Germanium, Zinn, schwarzer Phosphor, Selen, Tellur) und zweifelte offenbar zu keinem Zeitpunkt daran, daß auch Silizium und Germanium zu den Elementhalbleitern gezählt werden konnten.¹⁴⁹ Daher hatte er noch am *Flugfunk-Forschungsinstitut Oberpfaffenhofen* Anfang 1941 begonnen, mit aufgedampften Siliziumschichten zu experimentieren. Er hatte dabei zwar auch Gleichrichtereffekte gemessen, doch waren sie nicht gut reproduzierbar gewesen, so daß er diese Experimente wegen der geringen Erfolge wenig später wieder aufgegeben hatte.¹⁵⁰ Generell befand Welker: „Das Arbeiten mit Silicium im Labor ist wegen des hohen Schmelzpunktes des Siliciums von 1450° und der Reaktionsfreudigkeit bei diesen Temperaturen schwierig, aber mit größtem Aufwand möglich.“ Dieser Aufwand schien aber nicht nötig, da Germanium sich durch „günstige technologische Eigenschaften“ auszeichnete.

¹⁴⁶ Welker-Interview 1981, S. 27-32.

¹⁴⁷ Zu Clusius siehe die Akte ‚Clusius‘ im Universitätsarchiv München, OC-N-14, und Walker, *Uranmaschine*, 1990, insb. S. 38-79.

¹⁴⁸ Welker-Interview 1981, S. 27.

¹⁴⁹ Welker, *Germanium als Detektormaterial*, 1943, HWD 002.

Etwa zur gleichen Zeit arbeitete Josep Stuke in Göttingen an seiner Doktorarbeit, in der er die Leitfähigkeit von Germanium in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmte und dabei die Eigenleitung von Germanium feststellte. Aber sein Doktorvater Robert Wichrad Pohl wollte davon nichts wissen. Erst nach der Veröffentlichung von amerikanischen Arbeiten, die diese Ergebnisse bestätigten, konnte Stuke 1947 promovieren. (Braun, *Semiconductor Physics*, 1992, S. 458; siehe auch Stuke, *Eigenleitung*, 1947).

¹⁵⁰ Welker an Schottky, 13. Jan. 1941 und Feb. 1941 (unleserlich, nach dem 13. Feb.), HWD 006.

„Sein Schmelzpunkt liegt bei etwa 960°. Das ist einerseits so hoch, dass bei den im Betrieb auftretenden Temperaturen keinerlei Veränderungen eintreten können, andererseits noch so niedrig, dass man ihn mit einfachen Mitteln gut beherrschen kann. Aus diesen Gründen ist bei Germanium die äussere Formgebung, ..., durch Giessen möglich. ... Deshalb haben wir unter allen halbleitenden Elementen das Germanium bevorzugt ins Auge gefaßt und zum Gegenstand genauerer Untersuchungen über den Detektoreffekt gemacht.“¹⁵¹

Welkers Bevorzugung von Germanium mag auch etwas damit zu tun gehabt zu haben, daß sein neuer Chef Clusius Germanium für untersuchenswert hielt.¹⁵²

Germanium fiel unter anderem als Nebenprodukt bei der Kupfergewinnung an, wurde aber bis zum Zweiten Weltkrieg nur in Einzelfällen nachgefragt und verkauft. Die „*Otavi-Minen*“-Gesellschaft in Berlin hatte vor dem Ersten Weltkrieg im damaligen Deutsch-Südwestafrika (heute Namibia) Kupfer abgebaut und für das in dieser Mine reichhaltig im Kupfererz enthaltene Germanium keine Verwendung gefunden, so daß sich ein Vorrat ansammelte. Clusius und Welker erhielten ihr Germanium gereinigt und mit einer Spektralanalyse begleitet von Dr. Franke, der schon vor dem Krieg Germaniumerz bei den „*Otavi-Minen*“ gekauft und in seinem Labor gereinigt hatte. Die Spektralanalyse zeigte, daß neben Sauerstoff (ca. 0.1 % Gewichtsanteil) nur noch Spuren (weniger als 1:10⁶) von Aluminium, Calcium und Kupfer vorhanden waren. Als während des Zweiten Weltkrieges die Nachfrage von Forschungslaboratorien nach Germanium für Detektorexperimente und später Detektorproduktion stieg, reinigte die Gesellschaft das Germanium in ihren Laboratorien selbst und verkaufte es in Stücken zu 5-6 Gramm.¹⁵³

Aber selbst das von Dr. Franke gelieferte, vorgereinigte Germanium konnte nicht sofort und unbehandelt in Detektoren eingesetzt werden, sondern es mußte möglichst monokristallin und hochgereinigt vorliegen. Kleine Polykristalle guter Qualität mit winzigen einkristallinen Bereichen konnten durch Schmelzen und anschließendes „Hochziehen ... in einer Kapillare aus ... Quarz“ im Hochvakuum gewonnen werden.¹⁵⁴ Dabei dauerte der Abkühlprozeß von der Schmelztemperatur 1000°C bis 600°C ungefähr 5 Stunden, um ein langsames Auskristallisieren zu ermöglichen. „Die nach diesem Verfahren hergestellten Reingermaniumpräparate hatten, wie röntgenographische Untersuchungen zeigten, durchweg Einkristallcharakter“ und lagen typischerweise als „dünne Platten von nur 1 mm² Querschnitt und 150 mm Länge“ vor.¹⁵⁵

Oberflächenbehandlung und „chemische“ Sperrschicht

Welker hatte schon früh erkannt, daß man bei verschiedenen Materialien eine spezielle „Oberflächenbehandlung“ durchführen mußte, bevor diese eine gute Gleichrichterwirkung zeigten. Schon in Gräfelfing hatte er entsprechende Experimente durchgeführt und schrieb an Schottky:

¹⁵¹ Welker, *Germanium als Detektormaterial*, 1943, HWD 002, S. 8-9.

¹⁵² Welker schrieb 1943: „Im Zusammenhang mit den vorliegenden Problemen hat zuerst Herr Professor Clusius auf das Germanium hingewiesen.“ (Welker, *Germanium als Detektormaterial*, 1943, HWD 002, S. 8).

Nach Joachim Dosse war es allerdings der Institutsmechaniker Erich Holz, der die Anregung zu Germaniumuntersuchungen gab. „H. Welker begann dagegen 1942 auf Anregung von E. Holz Untersuchungen an Germanium, das in verschiedener Hinsicht günstigere Eigenschaften bot.“ (Dosse, *Transistor*, 1955, S. 12).

Alle drei zusammen (Clusius, Holz und Welker) meldeten im Oktober 1942 ein Patent auf einen Germaniumdetektor an. (Clusius/Holz/Welker, *Gleichrichterordnung*, 1942, Patent DBP 966 387).

¹⁵³ BIOS-Report 725, S. 21-24; Gaudlitz, *Historischer Rückblick I*, 1962, SAA 35-78 Lc403, S. 2-3; Welker, *Germanium als*, HWD 002, 1943, S. 11.

¹⁵⁴ Clusius/Holz/Welker, *Gleichrichterordnung*, 1942, DBP 966387 (Zitat); Welker, *Germanium als Detektormaterial*, 1943, HWD 002, S. 12-14.

¹⁵⁵ Für eine detaillierte Darstellung der Schmelzapparatur siehe Ringer/Welker, *Leitfähigkeit und Hall-Effekt*, 1948, S. 21-22.

„Ich glaube aber, daß man durch eine geeignete Oberflächenbehandlung auch die sehr gut leitenden Kristallmaterialien für Gleichrichtung brauchbar machen kann. Mir ist es z.B. schon seit langem gelungen[,] Pyrit und Bleiglanzkristalle durch oberflächliches Ätzen mit Salpetersäure zu verbessern. Besonders eindrucksvoll war die Ätzung von Bleiglanz aus Westphalen welcher vor der Ätzung überhaupt keine Gleichrichtung zeigte, nach der Ätzung jedoch eine sehr gute. ... Ich beabsichtigte durch die Ätzung überschüssige Metallatome herauszulösen und so eine chemische Sperrschicht zu erzeugen. Wenn es richtig ist, daß durch Säure Metallstörstellen bevorzugt aus dem Gitter herausgelöst werden, so wäre die Ätzung auch die gegebene Methode und [sic!] die Oberflächenstörstellen zu entfernen. Auf den Gedanken zu ätzen bin ich dadurch gekommen, daß man auch in der Optik aus Bleigläsern oberflächlich Blei herausholen kann durch Behandlung mit Flußsäure. Das ist für die Herstellung von unsichtbarem Glas von Wichtigkeit.“¹⁵⁶

Eine große Anzahl von Oberflächenstörstellen wirkte sich nach Welker negativ auf die Gleichrichterwirkung aus, da sie „durch eine Art Feldemission den Übergang eines Elektrons aus der Metallspitze in den Halbleiter“ entgegen dem Gleichrichtungssinn ermöglichten.¹⁵⁷ Daher experimentierte Welker in der folgenden Zeit mit verschiedenen Methoden der Oberflächenbehandlung beim Germanium, um die Oberflächenstörstellen zu entfernen und so die gleichrichtenden Eigenschaften zu verbessern.

Er behandelte Oberflächen mit unterschiedlichen Säuren und Laugen in variierender Stärke; behandelte sie elektrolytisch, das heißt unter Einfluß von elektrischem Strom unterschiedlicher Stärke, und behandelte sie mechanisch durch Abschleifen (fein und grob). Darüber hinaus kombinierte er alle diese Verfahren.¹⁵⁸ Welker variierte also systematisch eine große Zahl verschiedener experimenteller Parameter und suchte nach stabilen empirischen Regeln. Dabei gelang es ihm, einige „experimentelle Regeln“ klar und widerspruchsfrei zu formulieren.

„Durch Schleifen oder Polieren wird die Gleichrichterwirkung zerstört und zwar um so mehr, je feiner der Schliff bzw. die Politur ausgeführt wird.“¹⁵⁹ Oder: „Die Lage der kristallographischen Achsen ist ... ohne Einfluss auf die Gleichrichtung.“¹⁶⁰

Bei anderen Effekten hatte sich allerdings noch keine Stabilität der Regeln eingestellt. So behauptete er einerseits:

„Elektrolyse mit Säuren und Laugen bringt die Gleichrichtung nicht wieder. Elektrolyse mit Königswasser, Germanium Kathode, bringt die Gleichrichtung wieder.“¹⁶¹ Andererseits schrieb er: „Erfolgreich erwies sich eine elektrolytische Ätzung mit Natron- oder Kalilauge, bei geringen Stromstärken, wobei Germanium Anode ist.“¹⁶²

Als unerlässlich für Gleichrichtung erwies sich aber eine saubere und glatte Oberfläche, da der Effekt, „wenn die Bedingungen für das Entstehen einer sehr feinen Mosaikstruktur vorliegen, wie z.B. beim Aufdampfen und beim Schleifen“, immer verschwand.¹⁶³

¹⁵⁶ Welker an Schottky, 13. Jan. 1941 und Feb. 1941 (unleserlich, nach dem 13. Feb.), HWD 006. Zur Oberflächenbearbeitung von Tafel- und Hohlglas wird Flußsäure verwendet. So sind Oberflächen wie „seidenmatt“, „glänzend“, „matt“ etc. zu erzielen (Lueger, *Lexikon der Technik*, 1967, Bd. 8, S. 375).

¹⁵⁷ Welker, *Spitzendetektor*, 1941, S. 68.

¹⁵⁸ Die entsprechenden Details finden sich in Welker, *Detektor*, 1942, HWD 001; Clusius/Holz/Welker, *Gleichrichterordnung*, 1942, Patent DBP 966 387; Welker, *Ergebnisse der Detektorforschung*, 1943, HWD 002 und Welker, *Germanium als Detektormaterial*, 1943, HWD 002.

¹⁵⁹ Welker, *Germanium als Detektormaterial*, 1943, HWD 002, S. 10.

¹⁶⁰ Welker, *Ergebnisse der Detektorforschung*, 1943, HWD 002, S. 5.

¹⁶¹ Ebenda, HWD 002, S. 4.

¹⁶² Welker, *Germanium als Detektormaterial*, 1943, HWD 002, S. 10-11.

¹⁶³ Welker, *Ergebnisse der Detektorforschung*, 1943, HWD 002, S. 5.

Die Mosaikstruktur erläutert Graf, *Aufbau der Metallkristalle*, 1942.

Welkers Arbeitsweise bei der Untersuchung des Effekts der Oberflächenbehandlung auf die Gleichrichtung läßt sich als „Exploratives Experimentieren“ bezeichnen. Ausgehend von der systematischen Variation „einer großen Zahl verschiedener experimenteller Parameter“ gelangte Welker zum „Aufstellen stabiler empirischer Regeln“, die er als Wenn-dann-Beziehungen angab. Weiter ermittelte er, „welche der experimentellen Bedingungen unerlässlich für das Auftreten [oder Nichtauftreten] des zur Rede stehenden Effekts sind“. Für das „Entwickeln von angemessenen Darstellungssystemen“ und speziellen „experimentellen Anordnungen“ blieb ihm allerdings keine Zeit, da seine Arbeiten frühzeitig zum Abschluß kommen mußten, damit die Detektoren in Produktion gehen konnten.¹⁶⁴

Spitzenmetall und Austrittsarbeit

Nach Welkers Interpretation der Schottky-Theorie war die Metall-Halbleiter-Austrittsarbeit Ψ_{M-HL} die entscheidende Größe, daraus erst folgte die Größe des Diffusionspotentials V_D und somit die Größe des gleichrichtenden Effekts. Da die Metall-Halbleiter-Austrittsarbeit Ψ_{M-HL} aber nicht direkt gemessen werden konnte, war man auf indirekte Überlegungen angewiesen. Einzelne Meßergebnisse legten nahe, daß sich die Metall-Halbleiter-Austrittsarbeit Ψ_{M-HL} als Differenz der beiden Vakuumaustrittsarbeiten von Metall und Halbleiter ergab. Diese Aussage sah Schottky zwar als naheliegend an, hat sie aber wohl nie so explizit getroffen. Welker hingegen nahm ihre Richtigkeit für die praktische Arbeit einfach an. Ganz konkret formulierte er beispielsweise in einem Vortrag über die Schottky-Theorie:

$$(6) \quad \Psi = \Psi_{MH} = \Psi_{M,V} - \Psi_{H,V}^{165}$$

mit Ψ_{MH} als die Metall-Halbleiter-Austrittsarbeit und $\Psi_{M,V}$, $\Psi_{H,V}$ als die jeweiligen Vakuumaustrittsarbeiten des Halbleiters und des Metalls. In dieser Einfachheit und auch Falschheit ist dieser Zusammenhang später als Schottky-Mott-Regel bekannt geworden, obwohl weder Schottky noch Mott diese Regel selbst so explizit formuliert haben.¹⁶⁶

Aus Gleichung (6) folgt unmittelbar, daß es bei einem elektronenleitenden Halbleitermaterial günstig ist, ein Spitzenmetall mit einer möglichst großen Vakuumaustrittsarbeit zu benutzen. Dadurch wird die Metall-Halbleiter-Austrittsarbeit Ψ_{M-HL} größer und somit das damit verknüpfte Diffusionspotential V_D (siehe Gleichung (3) auf S. 38). Welker war sich dieses Zusammenhangs so sicher, daß er schon im Oktober 1942 die Verwendung von Platin als Spitzenmetall für Germaniumdetektoren wegen seiner großen Austrittsarbeit empfohlen hatte.¹⁶⁷

Bis Mai 1943 stellte er umfangreiche Untersuchungen mit unterschiedlichen Spitzenmaterialien an. Da die Diffusionsspannung V_D im Gegensatz zur Metall-Halbleiter-Austrittsarbeit Ψ_{M-HL} experimentell einfach zu bestimmen ist, maß er sie in Abhängigkeit von verschiedenen Spitzenmetallen.¹⁶⁸ Nach Welkers Annahmen über die Schottky-Theorie dürften sich die Diffusionsspannungen von den jeweiligen Vakuumaustrittsarbeiten nur um eine Konstante unterscheiden, d.h. die Differenz müßte immer gleich sein. Tatsächlich schwankten die Werte aber stark (siehe Tabelle 1).¹⁶⁹

¹⁶⁴ Der Begriff „Exploratives Experimentieren“ wurde von Friedrich Steinle geprägt. Zu näheren Erläuterung siehe ausführlich Steinle, *New Fields*, 1997 und Steinle, *Exploratives Experimentieren*, 1998. Alle Zitate des Absatz sind aus Steinle, *Exploratives Experimentieren*, 1998.

¹⁶⁵ Welker, Vortrag über die Schottky-Theorie, Manuskript, undatiert, ca. 1942, HWD 002.

¹⁶⁶ Zur Schottky-Mott-Regel siehe das Kapitel „Zusammenhang zwischen Austrittsarbeit und“ ab S. 38.

¹⁶⁷ Clusius/Holz/Welker, *Gleichrichteranordnung*, 1942, Patent DBP 966 387.

¹⁶⁸ Zur Meßmethode siehe zum Beispiel Welker, *Spitzendetektor*, 1941.

¹⁶⁹ Welkers Meßdaten lassen sich auch nicht mit moderneren Vorstellungen verstehen und stehen im Widerspruch mit heutigen Daten, aus denen folgt, daß zwar ein linearer Zusammenhang zwischen

	Diffusionsspannung V_D (V)	Vakuumaustrittsarbeit ψ (eV)	Differenz
Ag	0,380	4,60	4,220
W	0,535	4,54	4,005
Fe	0,360	4,72	4,360
Ta	0,375	4,10	3,725
Mo	0,330	4,40	4,070
Ni	0,350	5,02	4,670
Cu	0,415	4,40	3,985
Pt	0,355	6	5,645

Tabelle 1: Die von Welker gemessenen Diffusionspotentiale V_D sind hier den (damals) bekannten Vakuumaustrittsarbeiten ψ gegenübergestellt.¹⁷⁰

Welker selbst hat den hier abgebildeten Vergleich zwar so gar nicht angestellt, der offensichtliche Widerspruch zur Schottky-Theorie wird ihm aber klar gewesen sein. Dennoch empfahl Welker weiterhin, Platin-Nickel-Legierungen wegen ihrer hohen Austrittsarbeit für den Detektorbau zu verwenden, obwohl sich bei Verwendung von Wolfram als Spitzenmaterial eine deutlich höhere Diffusionsspannung einstellte. Damit akzeptierte er die grundsätzliche Richtigkeit der Schottky-Theorie, obwohl seine Meßergebnisse im klaren Widerspruch dazu standen.¹⁷¹

Da sich, wie man der Tabelle entnehmen kann, die Diffusionsspannung ohnehin nur in schwacher Abhängigkeit zur Austrittsarbeit verändert, bedeutete das Plädoyer für Platin-Nickel für die Konstruktion von Detektoren keinen großen Nachteil.

Ende der experimentellen Arbeiten mit Germanium

Mitte 1943 mußten Welkers experimentelle Arbeiten zu einem Ende geführt und letztlich abgebrochen werden. Die versprochenen „Detektoren für Ultra-Kurzwellen“ mußten endlich zur Serienproduktion der Firma *Siemens* übergeben werden. Erste Kontakte mit *Siemens* hatte es Mitte 1942 gegeben, und schon seit Dezember 1942 war man sich mit *Siemens* einig, doch erst im Mai 1943 konnten die Detektoren „zur Fertigung übergeben“ werden.¹⁷² Seit Abschluß des Rotterdam-Bombers war die Produktion von Detektoren für Zentimeterwellen noch dringender geworden. Stolz schrieb Welker im Mai 1943 an Schottky:

„Im Zusammenhang mit diesen Gleichrichtertheorien möchte ich Sie darauf aufmerksam machen, dass jetzt unsere Arbeiten über Detektoren im Physikalisch-Chemischen Institut eine praktische Bedeutung bekommen haben. Unsere Detek-

V_D und Ψ_{MHL} existiert, der Proportionalitätsfaktor aber deutlich kleiner als eins ist. Bei Silizium ergibt sich ca. 0.15. Siehe dazu Mönch, *Present Understanding*, 1986.

¹⁷⁰ Die Meßdaten sind aus Welker *Germanium als Detektormaterial*, 1943, HWD 002. Zum Prinzip der Messung von V_D siehe Welker, *Spitzendetektor*, 1941.

Die Daten für die Vakuumaustrittsarbeiten Ψ_{Vak} entstammen Van Arkel, *Reine Metalle*, 1939. Dieses Buch wurde auch von Welker zitiert (z.B. in Welker, *Germanium als Detektormaterial*, 1943, HWD 002, S. 6), man kann daher davon ausgehen, das die entsprechenden Daten ihm zur Verfügung standen und bekannt waren, auch wenn er sie nicht anführt.

An anderer Stelle behauptet er, daß die Austrittsarbeit von Germanium 6 eVolt sei (Clusius/Holz/Welker, *Gleichrichterordnung*, 1942, Patent DBP 966 387, S. 3), daher ist hier dieser Wert und nicht 4,97 eVolt nach Van Arkel, *Reine Metalle*, 1939 angegeben.

Zur Meßgenauigkeit seiner Messungen machte Welker keine Angaben.

¹⁷¹ Welker, *Germanium als Detektormaterial*, 1943, HWD 002, S. 14.

¹⁷² Thirring an Welker, 6. Juli 1942 und 9. Dezember 1942, HWD 006.

toren sind jetzt der Firma Siemens, Funk-Röhrenlabor, Dr. Jacobi zur Fertigung übergeben worden. Ich denke, dass Sie das interessieren wird.“¹⁷³

Welker verfaßte zu diesem Zeitpunkt einen Abschlußbericht zum Thema „Germanium als Detektormaterial“ in dem er mehrfach darauf hinwies, daß sich seine experimentellen Daten nicht völlig reproduzieren ließen und die Ergebnisse nur vorläufig seien.¹⁷⁴ Dennoch faßte er seine Untersuchungen zusammen und zog eindeutige Schlußfolgerungen; die Zeit drängte und klare Anweisungen zur Produktion von Germanium als Detektormaterial waren notwendig.

Welker gab dabei zwar zu, daß „die physikalischen Wirkungen der Oberflächenbehandlung ... nicht völlig geklärt“¹⁷⁵ seien, und daß es auch Grund zu der Annahme gebe, daß sich durch die Oberflächenbehandlung eine chemische Sperrschicht bilde.¹⁷⁶ Im Widerspruch dazu zog er aber den klaren Schluß, daß Oberflächenbehandlungen lediglich reinigenden Charakter haben,¹⁷⁷ und daß die Gleichrichtung „weitgehendst eine Eigenschaft des massiven Materials“¹⁷⁸ sei, und damit gerade nicht eine Eigenschaft der Oberfläche oder einer „chemischen“ Sperrschicht.

Dieser Schluß, der durch das experimentelle Material nicht unbedingt nahegelegt wurde, wird nur verständlich, wenn man sich daran erinnert, daß nach der Schottky-Theorie materielle Veränderungen am Metall-Halbleiter-Kontakt, das heißt „chemische Sperrschichten“, nicht wichtig sind.¹⁷⁹ Da es Welker nicht gelungen war, seine Verfahren zur Oberflächenbehandlung in der verfügbaren Zeit zu widerspruchsfreien empirischen Regeln zusammenzufassen, zog er sich in der Interpretation seiner Daten auf die vorherrschende Halbleitertheorie Schottkys zurück.

Bei seiner experimentellen Arbeit auf dem Gebiet der Austrittsarbeiten bezweifelte Welker zu keinem Zeitpunkt die grundsätzliche Richtigkeit der Schottky-Theorie, obwohl seine Meßergebnisse im klaren Widerspruch dazu standen. Den theoretischen Vorgaben folgend, plädierte er weiterhin für ein Spitzenmetall mit einer hohen Austrittsarbeit, obwohl diese nach seinen Meßergebnissen nur einen geringen Einfluß auf die Diffusionsspannung V_D und somit auf die gleichrichtenden Eigenschaften hatte.

Welker stütze sich bei der Interpretation seiner Daten auf die trotz aller Schwierigkeiten wohl etablierte Schottky-Theorie und interpretierte seine experimentellen Ergebnisse in deren Lichte. Wegen der angespannten Situation im Krieg konnte Welker nicht seinen prinzipiellen Zweifeln an der Schottky-Theorie nachgehen. Für die Detektorproduktion waren klare Anweisungen nötig. Welkers theoretische Vorstellungen und Experimente lieferten solche zumindest in der Materialfrage. Oberflächenbehandeltes Germanium als Halbleitermaterial kombiniert mit einer Platinspitze war demnach die günstigste Kombination.

¹⁷³ Welker an Schottky, 27. Mai 1943, HWD 006.

¹⁷⁴ Welker, *Germanium als Detektormaterial*, 1943, HWD 002, S. 17 und 22.

¹⁷⁵ Welker, *Germanium als Detektormaterial*, 1943, HWD 002, S. 11.

„Die physikalischen Wirkungen der Oberflächenbehandlung sind nicht völlig geklärt. Speziell beim Germanium dürfte die Hauptwirkung darin bestehen, dass die durch das Schleifen zerstörte Kristallstruktur - es entsteht dabei oberflächlich eine Struktur, die sich der amorphen nähert - durch Abtragung der obersten Schicht wiederhergestellt wird.“

¹⁷⁶ Ebenda, 1943, HWD 002, S. 11.

„Es besteht jedoch auch Grund zu der Annahme, dass eine geringfügige oberflächliche Oxydation stattfindet, die elektrisch gesehen die Entstehung einer chemischen Sperrschicht bedeutet.“

¹⁷⁷ Welker, *Ergebnisse der Detektorforschung*, 1943, HWD 002, S. 5.

¹⁷⁸ Ebenda, S. 5.

„Die Gleichrichtung ist weitgehendst eine Eigenschaft des massiven Materials (Leitfähigkeit, Beweglichkeit), wie man aus der Gleichrichtung an natürlichen Bruchflächen sieht. Die Wirksamkeit der Aetzung oder Elektrolyse besteht im wesentlichen in der Abtragung der, durch das Schleifen oberflächlich erzeugten Mosaikstruktur. Blosser Reinigungsmittel stellen die Gleichrichtung nicht wieder her.“

¹⁷⁹ Siehe das Kapitel „„Chemische“ Sperrschicht“ ab S. 40.

Technische Detektorkonstruktion

Aber auch die technische Detektorkonstruktion ließ noch Fragen offen. Welker entwickelte noch in Gräfelfing eine Spitzendetektor-Anordnung, bei der eine gefederte Spitze auf das Halbleitermaterial aufgedrückt wird. Die Kontaklast sollte dabei um das 1000fache größer sein als das Federgewicht, um so die Rutsch- und Rüttelsicherheit der Feder zu gewährleisten. Die ganze Anordnung wurde in eine keramische Hülse eingelötet oder eingeschmolzen.¹⁸⁰

Als Welker Anfang 1942 Gräfelfing verließ, um Materialuntersuchungen am Physikalisch-Chemischen Institut in München durchzuführen, wurden die Entwicklungsarbeiten an Zentimeterwellendetektoren in der „Außenstelle Gräfelfing“ des *Flugfunk-Forschungsinstituts Oberpfaffenhofen* offenbar fortgesetzt. Wolfgang Büll, Ingenieur in Gräfelfing, führte in der Abteilung von Dr. Ottmar Stützer umfangreiche Untersuchungen an Detektoren durch. Welker hatte in Gräfelfing auch mit Stützer zusammengearbeitet und erinnerte sich an ihn:

„Dr. Stützer, der hielt offenbar furchtbar wenig von dieser Detektorgeschichte. ... der begrüßte mich jeden Morgen so ungefähr mit der Rede, also Sie wissen, wir beschäftigen uns mit Detektoren nur solange, bis wir die entsprechenden leistungsfähigen Röhren für den Zentimeterwellenempfang gefunden haben. ... Also wir waren am Schluß völlig miteinander verkracht.“¹⁸¹

Wolfgang Büll muß besser mit ihm ausgekommen sein. Bei seinen Untersuchungen ging es aber auch hauptsächlich um die *elektrischen* Eigenschaften einer Gesamtdetektoranordnung. Dabei war zum Beispiel die Forderung nach einem Spitzenmetall mit hoher Austrittsarbeit mit der Forderung einer harten und dünnen Spitze zu vereinbaren.

„Zunächst wurde als Material wegen der höheren Austrittsarbeit Platin gewählt, das jedoch wegen unbefriedigender Härte verlassen wurde. Als endgültiges Spitzenmaterial wird nunmehr Platin-Iridium verwendet, bei dem auch die zweite Forderung - möglichst dünne Spitzen - weitgehend erfüllt werden kann, ..., ohne dass man befürchten muß, dass bei der Kontaktgabe mit dem Kristall, die unter bestimmtem Druck geschehen muß, ein ‚Plattwerden‘ der Spitze auftritt.“¹⁸²

Als Detektormaterial wurde anfangs meistens Pyrit benutzt, doch nach Welkers ersten Ergebnissen ging man zu Germanium über, das die Geheimbezeichnung „Pyrit D“ erhielt und „sich durch besondere Homogenität und ausgezeichnete Gleichrichterwirkung verbunden mit fast absoluter Konstanz hervorhebt.“¹⁸³

Weitere Experimente ergaben, daß auf Einlöten beziehungsweise Einschmelzen der Feder und des Halbleitermaterials in das Gehäuse wegen der dabei entstehenden Erwärmung verzichtet werden müsse. Daher wurde die Halterung der Federspitze mit einem Spezialkitt im Gehäuse befestigt. Diese bestand aus Quarzglas, da mit diesem Gehäusematerial die erzielte Empfangsempfindlichkeit deutlich größer war als mit einfachem Glas oder Calit¹⁸⁴. So kam Büll zu dem Schluß, daß die Quarzglasdetektoren bei „jeweils gleichen Materialien (Platiniridiumfedern und Pyrit ‚D‘), bezüglich ihrer Energieempfindlichkeit bei 5 cm Wellenlänge“ überlegen waren und auch noch „für Wellenlängen bis zu 1,8 cm brauchbar“ seien.¹⁸⁵

¹⁸⁰ Welker, *Spitzendetektor-Anordnung*, 1942, HWD 001.

¹⁸¹ Welker-Interview 1981, S. 33.

¹⁸² Büll, *Kristallgleichrichter*, 1943, S. 3.

¹⁸³ Ebenda, S. 2.

¹⁸⁴ Calit ist eine Mischung aus bis zu 85% Speckstein (Steatit, bestehend aus 3 MgO 4 SiO₂ H₂O bis 4 MgO 5 SiO₂ H₂O), Ton und Feldspat (Alkali-Tonerde-Silicat) und kann geformt und gebrannt werden. Danach ist es wegen seiner geringen dielektrischen Verluste für Hochfrequenzanwendungen geeignet.

¹⁸⁵ Büll, *Kristallgleichrichter*, 1943, S. 7-8.

Bei der Detektorproduktion bei *Siemens & Halske* in Berlin, die auf den Forschungen von Welker in München und Büll am *Flugfunk-Forschungsinstitut Oberpfaffenhofen* aufbaute, stellte sich jedoch das Detektieren solch kleiner Wellenlängen als weit schwieriger als erwartet dar.

Detektoren bei *Siemens*

Bei *Siemens & Halske AG* in Berlin wurde Ende 1942/Anfang 1943 begonnen, Kristalldetektoren auf Germaniumbasis zu entwickeln. Die ersten Detektoren wurden von *Siemens* unter der Bezeichnung „Richtleiter“ (RL) im Frühjahr 1943 eingeführt. Die ersten drei Modelle RL 1 bis RL 3 unterschieden sich voneinander nur in den elektrischen Anschlüssen; der Grundaufbau und die Größe waren gleich und dem Modell des *Flugfunk-Forschungsinstituts Oberpfaffenhofen* sehr ähnlich.¹⁸⁶

Eines der wesentlichen Unterscheidungsmerkmale war, daß entgegen der Empfehlung von Welker und Büll (wahrscheinlich aus Kostengründen) ein Molybdändraht statt einer Platiniridiumlegierung als Spitze verwendete wurde.

„Der Federträger aus Neusilber trug eine angeschweisste, gewendelte Feder aus Molybdändraht (0,08 mm Durchmesser) mit angeschliffener Spitze (90°). In einer Einstellvorrichtung wurde die Kristalloberfläche mit der Federspitze nach einem Punkt günstiger Gleichrichtung bei ± 1 V abgesucht und dann der Federträger in das Gehäuse gelötet.“¹⁸⁷

Darüber hinaus wurden Federspitze und Germaniumkristall ebenfalls aus Kostengründen in die von Welker bevorzugte Keramikfassung eingelötet und nicht in das von Büll empfohlene Quarzglasgehäuse gekittet. „Vorteile dieser Halterung sind ihre Kapazitätsarmut, Verlustfreiheit, mechanische Stabilität und Billigkeit (100 mal billiger als eine entsprechende Halterung aus Glas) gegenüber anderen Halterungen.“¹⁸⁸ Schwierigkeiten mit der Kristallerwärmung beim Lötten gab es bei *Siemens* nicht.

Wie Welker erhielt auch *Siemens* das benötigte Germanium zunächst von Dr. Franke aus Frankfurt. Später wurde es direkt von den *Otavi-Minen* geliefert.

„Die angelieferten Brocken wurden pulverisiert und im Vakuum bei 970° in einem Quarztiegel 10 Minuten lang einer Reinigungsschmelze unterzogen und erneut pulverisiert. Aus diesem Pulver wurden dann in einem Quarzbehälter, der aus 60 traubenförmig angeordneten, einseitig geschlossene Röhren mit je 30 mg Fassungsvermögen bestand, tropfenförmige Kristalle geschmolzen (2 mm Durchmesser). Dadurch, dass die Kügelchen so klein waren, konnten sie verhältnismäßig rasch abkühlen und ungestört auskristallisieren, so dass ein hoher Prozentsatz von ihnen Einkristalle wurden oder sich höchstens aus 2 bis 3 Kristalliten zusammensetzten. Zuerst erstarrte die Rinde des Kügelchens. Da sich Germanium beim Festwerden ausdehnt, sprengte der später erstarrte Kern die Rinde noch plastischer und bildete eine spitze Protuberanz. So kam die Tropfenform zustande.“¹⁸⁹

Obwohl Germanium ein seltenes Element war und die entsprechenden Erze in Europa nicht abgebaut wurden, stellten die Materiallieferungen zunächst kein großes Problem dar, da pro Detektor lediglich 30 mg Germanium verbraucht wurden und in der Berliner Versuchsfertigung nur wenige hundert Stück pro Monat produziert werden konnten. Jedoch wurde die Fertigung durch die Luftangriffe auf Berlin bedroht,

¹⁸⁶ Gaudlitz, *Historischer Rückblick I*, 1962, SAA 35-78 Lc403, S. 2.

„Der erste Richtleiter, RL 1, war der im FFO entwickelten Form sehr ähnlich. Der RL 2 stellte eine nur in wenigen Mustern hergestellte Zwischenform dar. In Zusammenarbeit mit den Geräte-Entwicklern wurde dann die für den Einbau in konzentrische Leitungen geeignete Bauform RL 3 geschaffen.“

¹⁸⁷ Ebenda, S. 3.

¹⁸⁸ Welker, *Spitzendetektor-Anordnung*, 1942, HWD 001.

¹⁸⁹ Gaudlitz, *Historischer Rückblick I*, 1962, SAA 35-78 Lc403, S. 2-3 (Zitat); BIOS-Report 725, S. 21-24.

die im September 1943 auch zur teilweisen Zerstörung des Röhrenwerks geführt hatten. Daher wurde neben der Berliner Versuchsfertigung, die von vier Angestellten, acht Hilfsarbeiterinnen und einem Mechaniker betrieben wurde, ab April 1944 in Wien eine Serienfertigung aufgebaut, da Wien nicht durch Luftangriffe bedroht wurde. „Die Wiener Fertigung lieferte im August 1944 1.000 Stück pro Monat und sollte bis zum April 1945 auf 5.000 Stück ansteigen.“ Aber auch damit konnte der rapide ansteigende Bedarf nicht gedeckt werden.¹⁹⁰

Mitte 1944 wurde bei *Siemens* geschätzt, „dass der zukünftige monatliche Bedarf an RL 3 auf mehr als 20.000 Stück ansteigen würde (allein für das Gerät ‚Marabu‘ des WW Funk wurden monatlich 11000 Stück gebraucht)“.¹⁹¹ Die „Marabu“-Radargeräte wurden in ferngelenkten Waffen als automatische Richtungszünder eingesetzt. Auch gut funktionierende ferngelenkte Waffen trafen das gesuchte Objekt, z. B. ein Flugzeug, nicht immer direkt. Es war daher sinnvoll, automatische Annäherungszünder zu konstruieren, die die Bombe bei Annäherung an das Ziel detonieren ließen. Die sogenannten Richtungszünder waren Annäherungszünder, die nur dann auslösten, wenn sich das Zielobjekt in einem bestimmten Winkel außerhalb der Flugbahn der Bombe befand, das heißt nur dann, wenn ein direkter Treffer nicht erzielt werden konnte. Dazu waren kleine Radargeräte nötig, die automatisch Entfernungs- und Richtungsmessungen zum Zielobjekt durchführen konnten. Ein solches Gerät war das „Marabu“-Gerät (FuG 381) der Firma *Siemens & Halske*. Es arbeitete mit einer Wellenlänge von 80 cm und war zunächst mit einfachen Empfangsröhren ausgestattet gewesen, die 1944 durch Germaniumdetektoren ersetzt werden sollten.¹⁹²

Daher konnten in den „Marabu“-Geräten auch die ersten Germaniumdetektoren aus der Serienproduktion eingesetzt werden, obwohl sie sich entgegen Welkers und Bülls Erwartungen nicht für den Zentimeterwellenbereich eigneten. Die Detektoren RL 1 und RL 3 zeigten zwar noch „im Wellenlängenbereich zwischen 10 und 20 cm einen brauchbaren Gleichrichterwirkungsgrad. Unter 10 cm waren [jedoch] nur noch 10% verwendbar.“¹⁹³ An der Verbesserung der Detektoren mußte aber gearbeitet werden, um die Genauigkeit der „Marabu“-Geräte zu erhöhen und die Detektoren auch in anderen Bereichen einsetzen zu können. Zur Lösung dieses Problems wurde im Frühjahr 1944 versucht, Welker nach Wien zu verpflichten.

Welker war schon 1942 mit Prof. Dr. Hans Thirring in Kontakt gekommen, der für das „Wernerwerk für Funkgerät“ von *Siemens & Halske* in Wien arbeitete. Thirring hatte damals sein Interesse an Kristalldetektoren geäußert und schließlich Welker an *Siemens & Halske* in Berlin vermittelt.¹⁹⁴ Als nun bei der Detektorfertigung in Wien unerwartete Probleme auftraten, brachte Thirring Welker für eine Dozentur an der Wiener Universität ins Gespräch und hoffte, sowohl für Welker „persönlich als auch im Interesse der Zusammenarbeit mit Siemens“, daß Welkers Bemühungen um Versetzung nach Wien erfolgreich sein würden.¹⁹⁵

Welker hatte ca. Anfang 1944 bei Ministerialrat Adolf Baeumker, der seit Juni 1942 Mitglied der Leitung der „Forschungsführung der Luftwaffe“ war, um Versetzung nach Wien nachgefragt, war aber offenbar zwischen die bürokratischen Mühlen geraten. Im März 1944 sah es so aus, als ob die „Hauptschwierigkeiten ... nunmehr überwunden seien.“ Im April und Mai 1944 liefen konkrete Vorbereitungen einschließlich von Umbaumaßnahmen in Wien an, und noch im August war von einer „Übersied-

¹⁹⁰ Ebenda, S. 4.

¹⁹¹ Ebenda, S. 4.

¹⁹² Trenkle, *Funklenkverfahren*, 1987, 180-188.

¹⁹³ Gaudlitz, *Historischer Rückblick I*, 1962, SAA 35-78 Lc403, S. 4.

¹⁹⁴ Thirring an Welker, 6. und 25. Juli, 17. August und 9. Dezember 1942, HWD 006.

¹⁹⁵ Thirring an Welker, 5. Mai 1944, HWD 006.

lung ... im Herbst“ die Rede, die jedoch vom Reichsluftfahrtministerium verzögert wurde.¹⁹⁶

So mußte Welker im November 1944 an Schottky berichten:

„Wie Sie ... ersehen ist aus meinen ursprünglichen Plan, nach Wien zu gehen und dort eine Dozentur anzutreten nichts geworden. Am Anfang ist die Erledigung der Wiener Angelegenheit durch vorgesetzte RLM Dienststellen sehr lange hinausgezogen worden und im Augenblick halte ich es selbst nicht mehr für sinnvoll dahin zu gehen.“¹⁹⁷

Welker ist später nicht mehr nach Wien gegangen und erlangte so auch keinen Einfluß auf die dortige Detektorproduktion. Aber auch in München konnte er seine Arbeiten nicht fortsetzen, da das Physikalisch-Chemische Institut durch mehrere Bombenangriffe teilweise zerstört wurde und schließlich im Oktober 1944 geräumt werden mußte.

„Wir hatten im letzten 3/4 Jahr im Phys. Chem. Inst. laufend Fliegerschäden. Im Oktober ordnete Herr Prof. Clusius die Räumung des Institutes an. Bei dieser Gelegenheit haben wir unser Labor nach Gauting b. München, in eine Aussenstelle des Flugfunk-Forschungs-Instituts Oberpfaffenhofen verlegt und sind somit wieder in den Bereich des FFO zurückgekehrt. ... Infolge der Fliegerschäden konnten wir wenig Neues experimentell finden. Nur die Legierungsversuche mit Germanium sind jetzt einigermaßen zum Abschluss gebracht.“¹⁹⁸

Bei *Siemens* ist es dann aber auch ohne Welker noch im Herbst 1944 gelungen, einen Zentimeterwellendetektor zu konstruieren. Der neue RL 4 war in den Abmessungen und damit in der Kapazität und Induktivität deutlich kleiner als der RL 3 und lieferte bei 9 und 3 cm Wellenlänge noch befriedigende Ergebnisse. Von der neuen Richtleiterserie RL 4 kamen bis zum Ende des Krieges aber nur noch wenige zum Einsatz. Noch im März 1945 wurden in einem technischen Informationsblatt der Firma *Siemens & Halske* lediglich die Kristallgleichrichter RL 1 und RL 3 angeboten. Dort wurde jedoch behauptet: „Die Richtleiter haben sich bis zu Wellenlängen von wenigen Zentimetern als brauchbar erwiesen.“¹⁹⁹

Die Bauform des Richtleiters RL 4 war durch konkrete Spezifikation (insb. die Geräteabmessungen betreffend) vom Militär bestimmt worden, da die Detektoren in die bereits existierenden und im Einsatz befindlichen Geräte passen sollten. Dort herrschte das Design der *Telefunken*-Detektoren der ED 700er-Serie vor, die bereits seit Herbst 1943 in „Naxos“- und „Berlin“-Geräte eingebaut wurden.²⁰⁰

Welker selbst mußte seine experimentellen Arbeiten an Germanium spätestens mit dem Umzug nach Gauting einstellen und widmete sich seither wieder verstärkt theoretischen Fragen.²⁰¹ So entwarf er in den letzten Monaten von 1944 eine Drei-Elektroden-Anordnung zur Steuerung von Strömen auf Halbleiterbasis (später Transistor genannt) und führte dazu ab Anfang 1945 Experimente in den Laboratorien der Firma *Steinheil* in München durch.

¹⁹⁶ Thirring an Welker, 13. und 27. März, 12. April, 5. Mai und 8. Aug. 1944, HWD 006.

¹⁹⁷ Welker an Schottky, 14. Nov. 1944, HWD 006.

¹⁹⁸ Ebenda.

¹⁹⁹ Technischen Informationsblatt der Firma *Siemens & Halske* „Kristallrichtleiter RL 1 bis RL 3 (vorläufige technische Angaben)“, März 1945, SAA 35-78.Lc 282 (Ordner „bis 1955“).

²⁰⁰ Gaudlitz, *Historischer Rückblick I*, 1962, SAA 35-78 Lc403, S. 4-5, Eckert/Schuber, *Kristalle*, 1986, S. 170; Schubert, *Industrielaboratorien*, 1987, S. 284.

²⁰¹ Die Ergebnisse der experimentellen Arbeiten wurden veröffentlicht in Ringer/Welker, *Leitfähigkeit und Hall-Effekt*, 1948.

Welkers Arbeiten am „Dreielektrodenkristall“

In den letzten Kriegsmonaten hatte Welker sowohl theoretisch als auch experimentell an der „Beeinflussung und Steuerung von elektrischen Strömen in Halbleitern“ gearbeitet und noch im April 1945 per Boten einen Patentantrag für einen Halbleiterverstärker an das Berliner Patentamt gesandt.²⁰² Nach einem Halbleiterverstärker als Ersatz der verstärkenden Elektronenröhre (Triode) wurde schon seit Ende der 1920er Jahre gesucht, und seit dieser Zeit wurden auch erste Patente eingereicht. Doch die Funktionsweise der elektrischen Leitung in Halbleitern war noch so unklar, daß die vorgeschlagenen Halbleiterverstärker keine Anwendung fanden.²⁰³

Erst Welkers Überlegungen fußten auf detaillierten Vorstellungen über die Leitungsvorgänge im Halbleiter nach der Bandtheorie und einem Verständnis der Gleichrichtung am Metall-Halbleiter-Kontakt nach der Schottky-Randschichttheorie. Da er davon ausging, daß es sehr schwierig sein würde, in einen elektronischen Halbleiter ein Steuergitter analog zur Elektronenröhre einzubringen, wie das noch Rudolf Hilsch und Robert Wichard Pohl aus Göttingen im Falle eines Alkalihalogenidkristalls getan hatten, kam Welker zu dem Schluß, daß die Steuerelektrode parallel zum Stromfluß angeordnet werden müsse. Dies war zwar schon 1935 von Oskar Heil vorgeschlagen worden, aber Heil hatte keine theoretische Erklärung des Effekts angeben können.²⁰⁴

Welker hatte zwischenzeitlich von den Arbeiten Peter Brauers aus Dresden gehört, dem es gelungen war, die Leitfähigkeit von „Kupferoxydul“ durch Variation des Wasserdampfdrucks darauf zu beeinflussen. Brauer nahm zur Erklärung des Effekts an, daß sich als Folge des Wasserdampfs eine elektronische Oberflächenschicht auf dem „Kupferoxydul“ bilde, die die Leitfähigkeit des Kupferoxyduls beeinflusse, und sprach unter Hinweis auf die Arbeiten Igor Tamms davon, die „Zahl der möglichen Elektronenzustände an der Oberfläche“ durch den Wasserdampf zu verändern.²⁰⁵

Wenn das der Fall wäre, schloß Welker, müßte es auch möglich sein, die Leitfähigkeit durch Anlegen eines äußeren Feldes zu steuern.²⁰⁶ Begrifflich unterschied er zunächst zwischen den schon bekannten Sperrschichten und den „Leitschichten“, die sich durch eine „heraufgesetzte Elektronenkonzentration und elektrische Leitfähigkeit“ auszeichnen. In einem auf Januar 1945 datiertem Manuskript schrieb er:

„Zunächst stellen wir fest, daß Leitschichten bisher als uninteressant gegolten haben, weil sie sich nach der üblichen Betrachtungsmethode, bei welcher der Strom die Randschicht senkrecht durchsetzt, dem Nachweis entziehen. Aus diesen Gründen treten Leitschichten experimentell nur dann deutlich in Erscheinung, wenn der Strom parallel zur Leitschicht fließt.“²⁰⁷

²⁰² Das erste Exemplar des Patentantrags ging zwar verloren, aber neun Jahre später wurde das Patentverfahren wieder aufgenommen, und 1973 wurde ein Patent mit dem Titel „Halbleiteranordnung zur kapazitiven Steuerung von Elektronenströmen in einer Halbleiterkristall“ erteilt. (Welker, *Beeinflussung*, 1945, HWD 003; Welker, *Halbleiteranordnung*, 1945, DBP 980 084. Siehe auch Weiß, *Steuerung*, 1975, S. 161-162.)

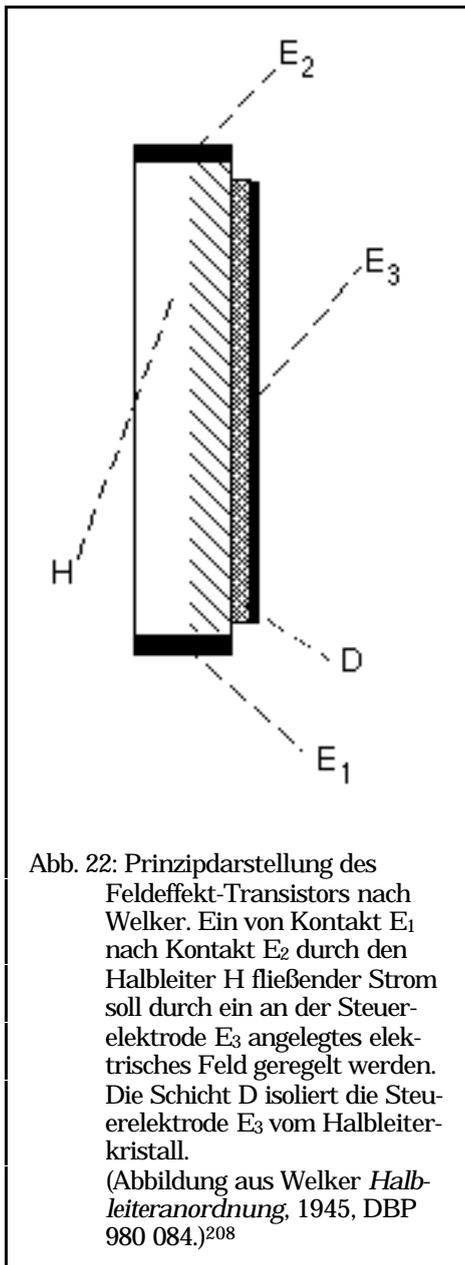
²⁰³ Einen Überblick über die ersten Transistorideen geben Goetzeler, *Halbleiter-Bausteine*, 1972 und Hofmeister, *50 Jahre*, 1976.

²⁰⁴ Zu den Versuchen von Hilsch und Pohl siehe Teichmann, *Farbzentren*, 1988, S. 92-96 und Hilsch, *Elektronenleitung in Kristallen*, 1939. Zu Heil siehe Hofmeister, *50 Jahre*, 1976 und Heil, *Non-contact-making relays*, 1934, Britisches Patent Nr. 439,457.

²⁰⁵ Brauer, *Elektronisches Verhalten*, 1936, S. 621. (Siehe auch Tamm, *Elektronenbindung an Kristalloberflächen*, 1932).

²⁰⁶ Welker, *Solid State Research*, 1979, S. 14-15.

²⁰⁷ Welker, *Steuerung von Elektronenströmen*, 1945, HWD 003, S. 2.



Konkret schlug Welker die in Abb. 22 dargestellte, prinzipielle Anordnung vor. „Die Leitschicht, die sich an der Oberfläche des Kristalls befinden soll, ist schraffiert gezeichnet.“²⁰⁹ Durch Variation eines elektrischen (Steuer-)Feldes wird die Ausdehnung der Leitschicht im Halbleiter verändert und so sein Widerstand geregelt.

„Unter dem Einfluß einer veränderlichen Steuerfeldstärke verändern sich die Eigenschaften der Randschicht, z.B. ihr elektrisches Leitvermögen und ihre Dicke. Wird daher ein Strom durch den Kristall geschickt, so wird dieser einen mit der Steuerfeldstärke variierenden Widerstand vorfinden und er wird seine Größe in demselben Maße verändern.“²¹⁰

Welker beschrieb damit das Prinzip eines Feldeffekt-Transistors.

Er bemerkte aber auch, daß der Effekt nur dann merklich sei, „wenn die Anzahl der durch die Steuerspannung angereicherten Elektronen vergleichbar oder größer ist, als die Anzahl der im Kristall ohne Anreicherung vorhandenen Elektronen.“ Eine Rechnung mit konkreten Werten für Schichtdicke, angelegte Spannung und Dielektrizitätskonstante des Materials zeigte, „daß man für den Dreielektrodenkristall nicht einen beliebigen Elektronenleiter verwenden darf, sondern einen Halbleiter, und zwar mit einer Elektronenkonzentration, die noch unter der Elektronenkonzentration 10^{16} cm^{-3} der für Gleichrichter in Frage kommenden Halbleiter liegt. Natürlich stellt das Zahlenbeispiel nicht die Grenze des technisch Erreichbaren dar.“ Als theoretisch günstig ergab sich ein Wert von etwa 10^{13} cm^{-3} für die Elektronenkonzentration.²¹¹

Erste Experimente zum Test dieser Theorie konnte Welker im Frühjahr 1945 bei der Firma *Steinheil* in

München durchführen. *Steinheil* hatte eine lange Tradition in der Herstellung von optischen Instrumenten und hatte während des Krieges unter anderem an Infrarotdetektoren und optischen Schichten für U-Boot-Seerohre gearbeitet. Walter Rollwagen, der zu Kriegsbeginn als Physiker von der Münchner Universität zu *Steinheil* gekommen war, erinnerte sich: „Wir waren am Schluß 8 Physiker und wir haben ein prima ausgestattetes Labor gehabt, jeder Wunsch wurde erfüllt. Es war ja damals gleich, was es kostet.“²¹²

In diesem Labor konnte Heinrich Welker „[u]nmittelbar vor Kriegsende ... in Zusammenarbeit mit Professor Rollwagen die ersten Versuche zur Steuerung von elektrischen Strömen in Dreielektroden-Kristallen“ beginnen.²¹³ Aufgrund seiner Vorüber-

²⁰⁸ Die Abbildung ist identisch ebenfalls in den in den Manuskripten Welker, *Beeinflussung*, 1945, HWD 003 und Welker, *Steuerung von Elektronenströmen*, 1945, HWD 003 angegeben.

²⁰⁹ Ebenda.

²¹⁰ Welker, *Beeinflussung*, 1945, HWD 003 und Welker, *Halbleiteranordnung*, 1945, DBP 980 084.

²¹¹ Welker, *Steuerung von Elektronenströmen*, 1945, HWD 003, S. 3-4, [Hervorhebung im Original].

²¹² Rollwagen-Interview, 1982.

²¹³ Lebenslauf von Heinrich Welker in LMU E-II-N Welker (Zitat); Rollwagen-Interview, 1981.

legungen wählte er „Kupferoxydul“ als Halbleitermaterial aus, da „in der Literatur auch Kupferoxydpulpräparate beschrieben werden, die die erforderliche geringe Elektronenkonzentration von 10^{13} cm^{-3} besitzen, im Gegensatz zu anderen Halbleitern wie Selen oder Germanium, wo derart geringe Elektronenkonzentrationen bis jetzt nicht beobachtet werden konnten.“²¹⁴

In einer Besprechung im März 1945 bei *Steinheil* gab Welker eine konkrete Herstellungsvorschrift für die praktische Realisierung eines „Dreielektrodenkristalls aus Kupferoxydul“ nach dem beschriebenen Feldeffekt-Prinzip an (siehe dazu Abb. 23, rechts). Aus den theoretischen Überlegungen hatte er vorher schon abgeleitet, daß es für eine praktische Realisierung notwendig war, sehr dünne Halbleiterschichten zu verwenden, da nur dann der Einfluß des Feldeffekts auf den gesamten Halbleiter groß genug war. Die Schottky-Randschicht sollte sich daher über einen wesentlichen Teil des Halbleiters ausdehnen. Als halbleitendes Material wurde „Kupferoxydul“ gewählt und in einer dünnen Schicht (H) von nur ca. 10 μ Dicke auf eine Quarz- oder Keramikplatte (G) aufgebracht. Die Kontakte (E_1 und E_2) wurden aus Silber oder Platin hergestellt, und auf der isolierenden Quarz- oder Glasplatte (D) von 0,2 bis 0,5 mm Dicke wurde die Steuerelektrode (E_3) aus Silber aufgedampft.²¹⁵

Daß diese Versuche nur unbefriedigende Ergebnisse erzielt haben, kann nur vermutet werden. In Welkers Patentanmeldung von 7. April 1945, nur drei Wochen nach den Versuchen, hieß es dazu:

„Die im Geschilderten bekannte Anordnung zeigte jedoch nur geringe Effekte, da infolge der vorhandenen Isolierschicht die Abmessungen größer waren als sie ... sein dürften.“²¹⁶

Exkurs: Shockleys Feldeffekttransistor-Versuche

Etwa zu dieser Zeit nahm William Shockley bei den Bell-Laboratorien in den USA seine Anfang 1940 aufgegebenen Versuche zur Herstellung eines Feldeffekttransistors mit isolierendem Dielektrikum wieder auf.

Shockley hatte Anfang der 1930er Jahre am *California Institute of Technology* Physik studiert und war danach an das *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) gewechselt, um bei John Slater über ein Thema der theoretischen Festkörperphysik zu promovieren. Nach Abschluß der Promotion nahm er im Jahre 1936 eine Forschungsstelle bei den Bell Laboratorien an und half dort, das neue Wissen über die Quantentheorie des festen Körpers zu etablieren.²¹⁷

Angeregt durch die neuesten Arbeiten zu Sperrschichten an Metall-Halbleiter-Kontakten, setzte sich Shockley kurz vor dem Krieg mit der Möglichkeit auseinander, einen verstärkenden Halbleiterkristall zu konstruieren. In direkter Analogie zur Elektronenröhre versuchte er, ein Metallgitter in einen Halbleiter einzubauen, um den senkrecht zum Gitter fließenden Strom zu steuern. Konkret experimentierte er mit einem von „Kupferoxydul“ umgebenen Gitter, das zwischen zwei Kupferelektroden plaziert worden war. Diesen Versuchen war aber wie vielen ähnlichen Versuchen kein Erfolg beschieden.²¹⁸

²¹⁴ Aktennotiz, „Besprechung am 14. 3. 45 über die ‚Herstellung eines Dreielektrodenkristalls aus Kupferoxydul‘“, HWD 003.

²¹⁵ Ebenda; Welker, *Steuerung von Elektronenströmen*, 1945, HWD 003.

²¹⁶ Welker, *Beeinflussung*, 1945, HWD 003 und sinngemäß auch in Welker, *Halbleiteranordnung*, 1945, DBP 980 084. Herbert Weiß, ein früherer Mitarbeiter Welkers, berichtete darüber: „Ein Steuereffekt konnte beobachtet werden.“ (Weiß, *Steuerung*, 1975, S. 162).

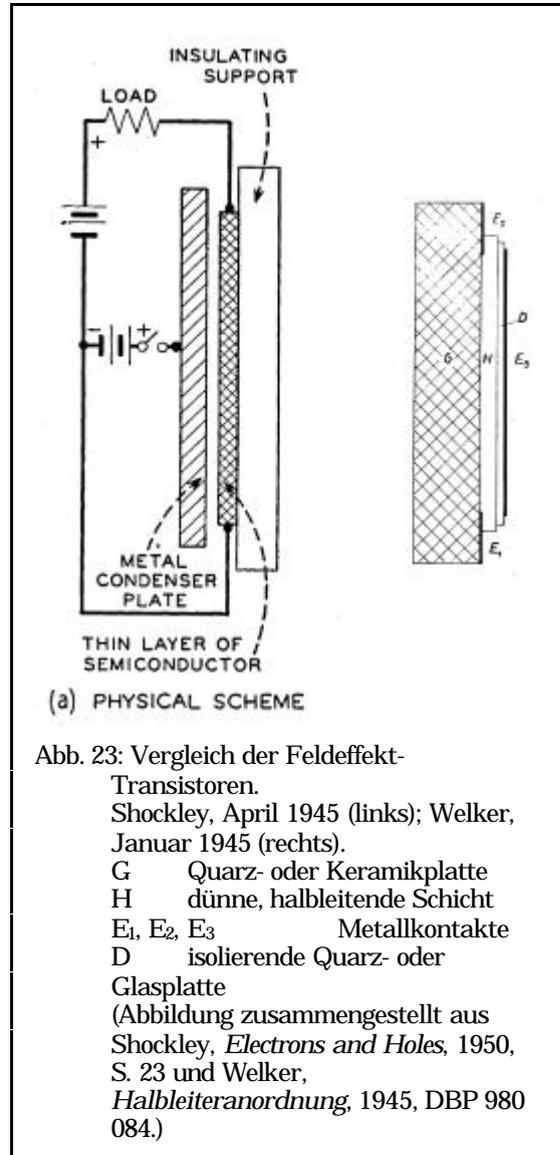
²¹⁷ Zu Shockleys Biographie siehe insb. Riordan/Hoddeson, *Crystal Fire*, 1997 und Hoddeson, *Entry*, 1980.

²¹⁸ Hoddeson, *Point-Contact Transistor*, 1981, S. 60-62.

Zu Beginn des Krieges war Shockley zunächst in der Radarforschung tätig, wechselte jedoch 1942 zur *Operations Research Group* der US-amerikanischen Marine, wo Techniken der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik auf den U-Boot-Krieg anwandte. Anfang 1945 kehrte er nach New Jersey zurück, begann gemeinsam mit Mervin die Nachkriegsforschung der Bell Laboratorien zu planen, und nahm seine Transistorforschungen wieder auf.

Statt des 1939/1940 verwendeten Kupferoxyduls stand nun als Halbleitermaterial das physikalisch besser verstandene und technisch besser beherrschte Silizium zu Verfügung, so daß die Versuche nun aussichtsreicher erschienen. Genau wie Welker kam auch Shockley auf die Idee, daß eine Steuerelektrode parallel zum fließenden Strom angebracht werden müsse. Doch obwohl der Versuchsaufbau recht einfach war und die Berechnungen einen beobachtbaren Effekt erwarten ließen, schlugen seine erneuten Versuche wieder alle fehl. Wenn es einen Steuerungseffekt gab, lag dieser unter der Meßgenauigkeit der Apparatur und war somit nach Shockleys Berechnungen mindestens um den Faktor 1500 kleiner als erwartet.²¹⁹

Zu diesem Zeitpunkt waren Welkers und Shockleys Überlegungen und Versuchsanordnungen zu einem Feldeffekt-Transistor zwar unabhängig voneinander, aber nahezu identisch (siehe dazu Abb. 23). Im Sommer 1945 wandte sich William Shockley aber frustriert über das unerklärliche Scheitern seiner Experimente anderen Aufgaben zu. Er faßte erst wieder neues Interesse an Transistorfragen, als mit John Bardeens Theorie der Oberflächenzustände eine Klärung für das Scheitern der vorangegangenen Experimente gefunden war und Bardeen zusammen mit Walter Brattain den Punktkontakt-Transistor erfunden hatte. Daraufhin entwickelte Shockley eine Theorie der flächenhaften pn-Übergänge, für die er zusammen mit Bardeen und Brattain 1956 den Nobelpreis erhielt.²²⁰



Welkers Sperrschicht-Feldeffekt-Transistor von 1945

Im Gegensatz zu Shockley suchte Welker weiter nach einer Erklärung für seinen Mißerfolg. Er schloß aus den Meßergebnissen, daß die isolierende Schicht zu dick gewesen sei und schlug daher vor, das Dielektrikum wegzulassen und es durch die „bekannte Gleichrichtersperrschicht“ zu ersetzen. Das heißt, er schlug vor, die Steuerelektrode selbst als Kristall auszubilden. Wenn nun ein Kristall Elektronen-

²¹⁹ Riordan/Hoddeson, *Crystal Fire*, 1997, S. 84-87 und 110-114, Hoddeson, *Point-Contact Transistor*, 1981, S. 60-64.

²²⁰ Siehe ausführlicher dazu das Kapitel „Exkurs: Erfindung des Punktkontakt-Transistors in den Bell Laboratorien“ ab S. 127.

leiter und der andere Defektelektronenleiter ist, bildet sich zwischen ihnen eine Sperrschicht aus, die den longitudinalen Widerstand des Kristalls bestimmt. Welker kam zu dem Schluß, daß bei dieser Anordnung die Sperrschicht zwei Funktionen übernimmt, die „Steuerung des Stromes und die Rolle der Isolierschicht D.“²²¹

Als Kristallmaterial kamen wegen der geringen Ladungsträgerkonzentration nur die „unter dem Namen Halbleiter zusammengefaßten Elektrizitätsleiter“ in Frage. Welker betonte ausdrücklich, „daß auch Stoffe wie Silicium und Germanium usw., die vielfach zu den Metallen gerechnet werden, im Sinne des Erfindungsgedankens zu den Halbleitern zählen.“²²²

Es ist fraglich, ob vor der Patentanmeldung mit der beschriebenen Anordnung (Steuerelektrode aus einem Halbleitermaterial, kein Dielektrikum) überhaupt noch Versuche durchgeführt worden sind. Zwischen der Aktennotiz, in der die „bekannte Anordnung“ mit Dielektrikum beschrieben wird, und der Patentanmeldung ohne Dielektrikum liegen nur drei Wochen. Auf konkrete Versuchsergebnisse wird im Patent nicht Bezug genommen, die Formulierungen sind allgemein gehalten und zielen darauf, die Idee zu schützen.²²³

Welkers hatte nach moderner Terminologie schon im Frühjahr 1945 einen durch einen pn-Übergang gesteuerten Feldeffekt-Transistor vorgeschlagen, der heute als Sperrschicht-Feldeffekt-Transistor oder „Junction-Field-Effect-Transistor“ bekannt ist.²²⁴ Allerdings hatte Welker zu diesem Zeitpunkt keineswegs die heutigen Vorstellungen von einem pn-Übergang, denn er sah in einem Übergang von einem n-leitenden zu einem p-leitenden Material lediglich einen bequemen Weg, eine sehr dünne isolierende Schicht herzustellen. Dieses Verständnis ist völlig in Übereinstimmung mit der Schottky-Theorie und betrachtet auch nur eine Ladungsträgerart - die Majoritätsladungsträger. Die Möglichkeit, durch einen flächenhaften pn-Übergang Minoritätsladungsträger in einen Halbleiter zu injizieren, wurde in aller Klarheit erst 1948 durch William Shockley erkannt.²²⁵

Mit dem Ende des Krieges mußte Welker alle weiteren Arbeiten auf diesem Gebiet einstellen, da die Institute und Forschungslabors zunächst geschlossen wurden. Erst im Laufe des Jahres 1947 eröffnete sich ihm die Möglichkeit zu weiteren Experimenten und Überlegungen zu diesem Thema.²²⁶

Welchem Halbleitermaterial gehört die Zukunft ? (1945)

Die in der Frühzeit der Radios für Kristalldetektoren benutzen Materialien (Pyrit, Bleiglanz etc.) hatten sich nach ersten Versuchen für die praktische Anwendung zum Nachweis von Zentimeterwellen unter Kriegsbedingungen als ungeeignet erwiesen, da sie zu unbeständig waren. Insbesondere zerfielen sie bei den hohen an der Metallspitze auftretenden Temperaturen in ihre chemischen Bestandteile.

²²¹ Welker, *Beeinflussung*, 1945, HWD 003 und Welker, *Halbleiteranordnung*, 1945, DBP 980 084.

²²² Welker, *Halbleiteranordnung*, 1945, DBP 980 084.

²²³ Ebenda.

²²⁴ Manchmal wird behauptet, daß dieser erst durch Shockley, *Unipolar Transistor*, 1952 erstmals vorgeschlagen worden ist (siehe z.B. Hofmeister, *50 Jahre*, 1976, S. 858). Aber auch wenn Welkers Patent von 1945 nicht rechtzeitig veröffentlicht worden ist, so stellen doch auch die weiteren Patente, die Welker gemeinsam mit Mataré Ende der 1940er Jahre erwirkt hat, Sperrschicht-Feldeffekt-Transistoren dar. Siehe dazu ausführlicher das Kapitel „Transistorentwicklung in Frankreich - Mataré und Welker“ ab S. 117.

²²⁵ Siehe Shockley, *Circuit Element*, 1948, US Patent 2,569,347 und Shockley, *Theory of p-n Junctions*, 1949. Die ersten auf diesem Prinzip basierenden Flächentransistoren konnten ab April 1950 im Labor hergestellt werden. Siehe dazu Riordan/Hoddeson, *Crystal Fire*, 1997, insb. S. 142-194 und Riordan/Hoddeson, *Minority Carrier*, 1997, S. 14-22.

²²⁶ Siehe das Kapitel „Transistorentwicklung in Frankreich - Mataré und Welker“ ab S. 117.

Einen Ausweg boten die Elementhalbleiter, zu denen aufgrund der praktischen Erfahrungen, insbesondere des nachgewiesenen Gleichrichtereffekts, auch Silizium und Germanium gezählt wurden. Für Detektoren eigneten sich auch nur diese beiden Elementhalbleiter, da insbesondere das in Leistungsgleichrichtern erfolgreich eingesetzte und einfach zu verarbeitende Selen eine bei weitem zu geringe Ladungsträgerbeweglichkeit aufwies und sich schlecht reinigen ließ.

Germanium zeichnete sich gegenüber Silizium und Selen dadurch aus, daß es sich sowohl leicht verarbeiten als auch gut reinigen ließ. Während aus Germanium kleine Kristalle hoher Reinheit herstellbar waren, die direkt in Detektoren eingebaut werden konnten, ließ sich Silizium nur mit Hilfe von chemischen Verfahren in dünnen Schichten auf Trägermaterial aufbringen und dann einsetzen. Wegen der höheren Ladungsträgerbeweglichkeit war *theoretisch* das Germanium das bessere Halbleitermaterial für Kristalldetektoren. Doch überraschenderweise erwiesen sich die Siliziumschichten der Firma *Telefunken praktisch* den Germaniumkristallen der Firma *Siemens* beim Zentimeterwellenempfang weit überlegen.

Als Anforderung an das Halbleitermaterial hatte sich aus dem Hochfrequenz-Ersatzschaltbild unter Anwendung der Schottky-Theorie einerseits begründen lassen, daß für Zentimeterwellenempfang „eine möglichst hohe Leitfähigkeit des Halbleitermaterials und ein niedriges Diffusionspotential nötig“ ist. Andererseits wirkte sich eine zu hohe Störstellendichte wegen der dabei entstehenden Kurzschlüsse negativ aus.²²⁷ Da die Leitfähigkeit im wesentlichen durch die Konzentration (= Störstellendichte bei vollständiger Ionisation aller Störstellen im Halbleiter) und die Beweglichkeit der Ladungsträger im Halbleiter bestimmt ist, kam theoretisch nur noch eine höhere Ladungsträgerbeweglichkeit zur Verbesserung des Zentimeterwellenempfangs in Frage.²²⁸

In diesem Punkt kamen sowohl Karl Seiler als auch Heinrich Welker zu ähnlichen Schlußfolgerungen. Welker schrieb:

„The inertia of the rectifier depends in a high degree of the electron mobility, wherefore Ge gives rectifiers with extremely small inertia. So we see that the size of the electronic mobility of a detector crystal is a physical measure for the usefulness of a material on cm - waves.“²²⁹

Nach dieser Argumentation hätte Germanium mit seiner dreifach größeren Ladungsträgerbeweglichkeit dem Silizium als Detektormaterial überlegen sein müssen.

Welker stützte seine Entscheidung für Germanium auf dieses Argument und auf Messungen, die er 1943/44 gemeinsam mit Walter Ringer an unterschiedlich dotiertem Germanium durchgeführt hatte. Diese hatten erwiesen, daß Germanium im Einklang mit der Schottky-Theorie eine Detektorwirkung nur bei Ladungsträgerkonzentrationen von 0,5 bis $5 \cdot 10^{16}$ Teilchen/cm³ aufwies. Messungen an gleichrichtendem Selen hatten eine ähnliche Konzentration von Ladungsträgern ergeben. Auch für „Kupferoxydul“ lagen die Werte für gute Gleichrichtung in derselben Größenordnung. Daraus schloß Welker, daß „die Existenz eines Gleichrichtereffekts bei homogenen Substanzen an eine Elektronenkonzentration von 10^{16} cm⁻³ gebunden zu sein“ schien.²³⁰

Bei höheren Ladungsträgerkonzentrationen n_H verringerte sich nach Welkers Argumentation die Dicke der Randschicht, und damit stieg die Wahrscheinlichkeit eines

²²⁷ Seiler, *Detektoren*, 1948, S. 277-279.

Aber auch: „... ein zu niedriges Diffusionspotential bringt ... eine Verschlechterung der Richtkonstante mit sich.“

²²⁸ Seiler, *Detektoren*, 1948, S. 281-282.

²²⁹ Welker/Ringer, *Investigations*, 1946, HWD 002.

²³⁰ Ringer/Welker, *Leitfähigkeit und Hall-Effekt*, 1948, S. 28. Siehe auch Welker/Ringer, *Investigations*, 1946, HWD 002: „... the electronic concentration of 10^{16} is a physical supposal for the realisation of a detector effect.“

„Durchschlags“ beziehungsweise Kurzschlusses an. Gleichzeitig stieg bei Erhöhung von n_H und fester Randdichte n_R auch die Diffusionsspannung V_D , die sich negativ auf die Zeitkonstante auswirkte. Daher konnte der Sperrschichtwiderstand $R^{(z)}$ und mit ihm die Zeitkonstante der Sperrschicht nicht durch höhere Dotierung erniedrigt werden, ohne gleichzeitig negative Effekte nach sich zu ziehen.²³¹

In bezug auf die Detektorwirkung schien die Beweglichkeit der Ladungsträger im Germanium der einzige wesentliche Unterschied zum Selen zu sein. Die hohen Werte von Germanium schienen es zu gestatten, eine geringe Dotierung mit einer hohen Leitfähigkeit zu kombinieren und damit gute Gleichrichtereigenschaften im Zentimeterwellenbereich zu liefern.²³²

Die von Welker angegebene empirisch bestimmte sinnvollste Größenordnung der Dotierung (10^{16} cm^{-3}) von Germanium (und Selen) stand im krassen Widerspruch zu den Ergebnissen von Günther und Seiler in Breslau, die gefunden hatten, daß Silizium „nur Detektoreigenschaften hat, wenn es ... eine Störstellenkonzentration von mindestens 10^{19} Teilchen/cm³“ hat. Für gute Zentimeterwellendetektoren wählten Günther und Seiler, da die elektrischen Eigenschaften der Schichten in weiten Grenzen variabel waren, möglichst niederohmige, also hochdotierte Schichten, weil dann „die schädlichen Elemente ... bei cm-Wellen am wenigsten wirksam sind.“²³³ Welkers Detektoren hatten zwar die „schönere“ Charakteristik, waren aber „im allgemeinen höherohmiger“²³⁴ und ließen sich zunächst nicht im Zentimeterwellenbereich einsetzen.

So hatten sich in der *Telefunken*-Fertigung die hoch dotierten Siliziumschichten zur Detektion von Zentimeterwellen als besser geeignet erwiesen, ohne daß dafür eine theoretische Erklärung angegeben werden konnte. Das war sowohl für Welker als auch für Seiler und Mataré erstaunlich.²³⁵ Mataré erinnert sich:

„Ja, das war sehr erstaunlich für die Ingenieure, da waren die Charakteristiken der Siliziumdetektoren, die waren auf dem Oszilloskop praktisch eine Linie mit einem kleinen Dip, d.h. sie hatten fast keine Sperrspannung. Die arbeiteten wesentlich besser als die Germanium-Detektoren mit einer wunderbaren negativen Charakteristik und mit wunderbarem Sperrstrom - parallel zur X-Achse. Dazu ein sauberer Zener-Durchbruch. Das nützte gar nichts.“²³⁶

Exkurs: Siliziumdetektoren im britisch-amerikanischen Radarprojekt

Ähnliche Erfahrungen wurden auch im ungleich größeren britisch-amerikanischen Radarprojekt gemacht, wo sich ebenfalls überraschend Silizium als das bessere Detektormaterial für Zentimeterwellen erwies.

Die alliierten Radarforschungen wurden ab November 1940 vom *Radiation Laboratory* am *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) mit großem finanziellen und personellen Aufwand koordiniert. Die Probleme des Zentimeterwellenradars wurden auf sechs unterschiedliche Arbeitsgruppen aufgeteilt, wovon eine sich ausschließlich mit Empfängern beschäftigte. Obwohl die meisten Forschungen nicht am *Radiation Laboratory*, sondern in den unterschiedlichsten Laboratorien an den Universitäten und in der Industrie stattfanden, etablierte es sich schnell als das Zentrum der alliierten Radarforschung und sorgte insbesondere für die Koordination der Akti-

²³¹ Welker/Ringer, *Investigations*, 1946, HWD 002.

²³² Ebenda.

²³³ Seiler, *Detektoren*, 1948, S. 279-280. V_D lag bei 0,1 bis 0,2 Volt. Von Schwierigkeiten mit Kurzschlüssen berichtete Seiler nicht.

²³⁴ Ebenda, S. 281.

²³⁵ Ebenda, S. 276-280; BIOS-Report 1751, S. 29; Seiler-Interview 1982.

²³⁶ Mataré-Interview 1998

vitäten und einen regen Informationsaustausch der unterschiedlichen Gruppen untereinander.²³⁷

Obwohl sich daher das britisch-amerikanische Radarprojekt in vielen Punkten, insbesondere in der Koordination der Aktivitäten, der Zusammenarbeit von unterschiedlichen Institutionen, der Anzahl der beteiligten Forscher und Techniker und der Qualität und Menge des zur Verfügung stehenden Materials von den deutschen Bemühungen grundlegend unterschied, wurden dort trotzdem im Prinzip die gleichen Vorstellungen zum Funktionsmechanismus von Kristalldetektoren entwickelt.²³⁸

Ausgehend von den Grundvorstellungen der Schottky-Theorie und der ihr sehr ähnlichen Mott-Theorie, formulierte Hans Bethe 1942 eine leicht veränderte und besser den speziellen Umständen des Spitzenkontakts angepaßte Theorie, die im alliierten Radarprojekt im wesentlichen akzeptiert wurde.²³⁹

In der Frage nach dem am besten geeigneten Halbleitermaterial bot aber auch diese Theorie keine entscheidenden Hinweise. Wie auch in Deutschland wurden die Elementhalbleiter Silizium und Germanium aufgrund praktischer Erfahrungen favorisiert. Die größten Schwierigkeiten bestanden aber auch dort darin, hochreines homogenes Kristallmaterial herzustellen.

Frederick Seitz von der University of Pennsylvania beschäftigte sich im Auftrag des *Radiation Laboratory* mit Reinigungsverfahren von Silizium und zur gleichen Zeit im Auftrag von der Chemiefirma *DuPont* mit der Verbesserung von weißen Pigmenten für Wandfarbe. Noch in den 1930er Jahren wurden giftige Bleiverbindungen als Pigmente benutzt, die zu schweren Gesundheitsschäden und auch zum Tode der Maler führten. Diese Pigmente wurden daraufhin durch ungiftiges Titandioxid ersetzt, und *DuPont* suchte nach verbesserten Herstellungsverfahren für Titandioxid oder nach einem billigeren Pigmentstoff. Der einzige mögliche Ersatzstoff schien damals exakt stöchiometrisches Siliziumkarbid (SiC) zu sein.

Beide Forschungsprojekte entwickelten gemeinsam ein Verfahren, reines Silizium zu vergleichsweise geringen Kosten herzustellen. In diesem später als *DuPont*-Prozeß bekannt gewordenen Verfahren wurde Reinstsilizium durch Reduktion von Siliziumtetrachlorid mittels Zink gewonnen. Ab Mitte 1941 standen damit den Forschern des britisch-amerikanischen Radarprojekts kleine Siliziumkristalle von hoher Qualität zur Verfügung.²⁴⁰

Germanium wurde als Detektormaterial im Auftrag des Militärs eher zufällig an der *Purdue University* erforscht - einer „unbedeutenden Provinz-Universität im amerikanischen Bundesstaat Indiana“.²⁴¹ Dort hatten zunächst die konventionellen Detektormaterialien wie Bleisulfid und die Herstellung eines optimalen Kontakts zwischen Halbleiter und Spitzenmetall im Vordergrund gestanden. Doch schon bald konzentrierte sich die Gruppe um Karl Lark-Horowitz vollständig auf das neue und wenig bekannte Element Germanium. Nach einigen Literaturrecherchen war klar, daß reines Germanium sich wie Silizium zur Gleichrichtung in Detektoren hervorragend eignen sollte.²⁴²

Bald konzentrierte man sich auf die Reinstdarstellung und führte Messungen der Materialeigenschaften an dem gereinigten Germanium durch. Es ergab sich, daß die

²³⁷ Eckert/Schubert, *Kristalle*, 1987, S. 158-168; Seitz/Einspruch, *Electronic Genie*, 1998, S. 133; Wildes/Lindgren, *Century*, 1985, S. 190-209.

²³⁸ Zu den Arbeiten an Kristalldetektoren im britisch-amerikanischen Radarprojekt siehe Torrey/Whitmer, *Crystal Rectifiers*, 1948, Henriksen, *Physics at Purdue*, 1987; Hoddeson, *Crystal Rectifiers*, 1994; Seitz, *Research*, 1995; Seitz/Einspruch, *Electronic Genie*, 1998, S. 124-148.

²³⁹ Torrey/Whitmer, *Crystal Rectifiers*, 1948, S. 68-90.

²⁴⁰ Seitz, *Research*, 1995, S. 23-25; Seitz/Einspruch, *Electronic Genie*, 1998, S. 126-130. Zur Reinstdarstellung von Silizium siehe auch das Kapitel „Reinstdarstellung von Silizium“ ab S. 171.

²⁴¹ Eckert/Schubert, *Kristalle*, 1987, S. 164.

²⁴² Ebenda, S. 160-164; Henriksen, *Physics at Purdue*, 1987.

Ladungsträgerbeweglichkeit diejenige von Silizium bei weitem übertraf.²⁴³ Aus diesem Grunde hätte sich Germanium auch als das bessere Detektormaterial erweisen müssen.

„As has already been mentioned, excellence of a rectifier depends strongly on magnitude of mobility. For this reason alone germanium might be expected to be preferable to silicon.“²⁴⁴

In der Praxis erwies sich jedoch Silizium für Hochfrequenzanwendungen als geeigneter. Dies konnte zunächst auch von Bethes Theorie nicht erklärt werden. Bethe erweiterte seinen Ansatz daraufhin um eine „natural dielectric barrier“, eine „chemische“ Sperrschicht, deren Existenz in Deutschland durch die Schottky-Theorie abgelehnt wurde.²⁴⁵

Aus Experimenten war bekannt, daß sich die Gleichrichtung eines Silizium-Metall-Kontakts deutlich durch eine Wärmebehandlung erhöhen ließ. Erhitzte man Siliziumkristalle bei ca. 1000°C etwa eine Stunde in Luft und entfernte danach die sich bildende Oxidschicht, verhielt sich der Siliziumkristall besonders bei hohen Frequenzen viel besser. Diese Technik wurde zuerst in England zur Produktion der britischen „red dot“-Detektoren verwendet und dann in den USA übernommen. Viele weitere Untersuchungen an wärmebehandeltem Silizium wurden durchgeführt, bevor die Schlußfolgerungen gezogen werden konnten.²⁴⁶

„The conclusion appears inescapable that a thin layer is formed on heat-treated surface and that this layer differs only in impurity content from the interior.“²⁴⁷

Man kam zu der Überzeugung, daß sich an der Oberfläche des Siliziums eine Schicht bildete, in der die Konzentration an Störstellen geringer war als im Innern des Materials. Diese Schicht wurde zunächst „depletion layer“²⁴⁸ genannt und sollte dazu führen, daß sich bei gleicher Störstellendichte im Innern des Halbleiters die Dicke der Sperrschicht erhöhte und damit sich ihre Kapazität erniedrigte. Die Kleinheit der Sperrschichtkapazität war ausschlaggebend für die Hochfrequenzeigenschaften des Detektors. Anders formuliert konnte man bei Existenz eines „depletion layer“ auch die Leitfähigkeit des Kristalls durch Dotierung erhöhen, ohne eine gleichzeitige Verringerung der Dicke der Sperrschicht befürchten zu müssen.²⁴⁹

Germanium hätte sich wegen der höheren Ladungsträgerbeweglichkeit zwar bei kürzeren Wellen besser eignen müssen, es bildete aber nach einer Wärmebehandlung keine gleich gute Zwischenschicht („depletion layer“) wie im Silizium aus. Die Germaniumdetektoren blieben im Wirkungsgrad im Bereich der Zentimeterwellen hinter

²⁴³ Der von Henry C. Torrey und Charles A. Whitmer im Jahre 1946 sorgfältig zusammengestellte Bericht „Crystal Rectifier“ gibt detaillierte Einblicke in die wesentlichen Forschungen und technischen Entwicklungen bei Kristallgleichrichtern für Radardetektoren. Zu den Reinigungsverfahren siehe Torrey/Whitmer, *Crystal Rectifiers*, 1948, S. 301-306. Ein Vergleich der verschiedenen charakteristischen Konstanten von Germanium und Silizium findet sich darin auf S. 61-64.

²⁴⁴ Torrey/Whitmer, *Crystal Rectifiers*, 1948, S. 63.

²⁴⁵ Hoddeson, *Crystal Rectifiers*, 1994, S. 125; Torrey/Whitmer, *Crystal Rectifiers*, 1948, S. 90-97.

²⁴⁶ Torrey/Whitmer, *Crystal Rectifiers*, 1948, S. 90-92.

²⁴⁷ Ebenda, S. 91-92.

²⁴⁸ Unter „depletion layer“ wird bei Torrey/Whitmer, *Crystal Rectifiers*, 1948, S. 90-97 in der Tat eine „chemische Sperrschicht“ im Sinne Schottkys mit einer verringerten Störstellenkonzentration verstanden, während in der modernen Literatur „depletion layer“ synonym mit der Raumladungszone verwendet wird (siehe dazu z.B. Hummel, *Electronic Properties*, 1992, S. 113-117).

²⁴⁹ Torrey/Whitmer, *Crystal Rectifiers*, 1948, S. 99.

„The real value of this formation of a depletion layer is a consequence of the fact that it makes possible an increase in the value of σ by an impurity content of the semiconductor without a simultaneous decrease in D.“

Die von Hans Bethe mit formulierte „depletion layer“ Theorie ist im modernen Sinn als eine Kombination der Schottkyschen Vorstellungen mit der heute als MIS (Metal Insulator Semiconductor) bekannten Situation zu verstehen.

den Siliziumdetektoren zurück. Der Effekt der Zwischenschicht schien den Effekt der Beweglichkeit bei weitem zu überwiegen.²⁵⁰

Als weitere, aber weniger wahrscheinliche Möglichkeit wurde in einer Theorie von A. W. Lawson vorgeschlagen, sogenannte Relaxationseffekte in die Berechnung des Hochfrequenzverhaltens von Detektoren mit einzubeziehen. Bei den Berechnungen der Kapazität der Sperrschicht waren bisher die Elektronen der Sperrschicht als völlig „frei“ angenommen worden, so daß sie auf plötzliche Spannungsänderungen ohne Zeitverzögerung hätte reagieren können. Tatsächlich mußte sich man aber nach Lawson einige Elektronen als an die Donatoren gebunden vorstellen. Nahm man nun die mittlere Verweildauer eines Elektrons im gebundenen Zustand größer als die Periode der Schwingung an, sank die für die Hochfrequenzeigenschaften verantwortliche effektive Sperrschichtkapazität, da nicht mehr so viele Elektronen zu ihr beitrugen. Dies war vornehmlich bei Silizium der Fall, da dort im Gegensatz zu Germanium bei Raumtemperatur nicht alle Störstellen ionisiert waren.

„The magnitude of these effects clearly depends on the ratio of free-to-bound electrons at equilibrium. If this ratio is large, the relaxation effects will be relatively unimportant. ... We have seen ... that ionization of impurities is 20 to 40 per cent complete in the case of silicon and nearly 100 per cent complete for germanium at thermal equilibrium (room temperature) in the bulk semiconductor. Thus ... we should expect no relaxation effects in germanium rectifiers but possible relaxation ... in silicon rectifiers.“²⁵¹

Mit möglichen Relaxationseffekten und der Annahme einer „chemischen“ Zwischenschicht war es innerhalb des US-amerikanischen Radarprojekts gelungen, sich die empirisch erwiesene Überlegenheit von Silizium plausibel zu machen. Dadurch konnte auch geklärt werden, warum man Silizium deutlich höher dotieren konnte als Germanium, ohne die Gleichrichtereigenschaften zu verlieren. Silizium konnte etwa tausendmal höher dotiert werden als Germanium und dadurch den Effekt der um dreimal niedrigeren Ladungsträgerbeweglichkeit mehr als ausgleichen.

Kriegsforschungen und die Zukunft der Halbleitermaterialien

Den deutschen Wissenschaftlern waren diese Ergebnisse der alliierten Detektorforschung zum Kriegsende natürlich nicht bekannt. Sie bildeten sich ihre Meinung über die zukünftigen Halbleitermaterialien und deren wichtigste Eigenschaften aufgrund ihrer eigenen Erfahrungen und kamen zu unterschiedlichen Schlußfolgerungen.

Karl Seiler hatte sich nach eigenen Erinnerungen schon 1943/44 dafür entschieden, daß Silizium das Material der Zukunft sei, weil die Germaniumdetektoren von Welker sich für Kurzwellenanwendungen nicht geeignet hatten. Dies galt insbesondere, da Seiler ansonsten von Welkers Arbeiten eine hohe Meinung hatte. Beispielsweise hatte Welker nach Seilers Einschätzung „sehr sorgfältige Spitzen gemacht“ und „sehr viel gründlicher“ als er selbst gearbeitet. Darüber hinaus war Welker „mehr Wissenschaftler“ als Seiler, der sich bei *Telefunken* bedingt durch die laufende Serienproduktion mehr auf fertigungsbedingte Probleme konzentrieren mußte..²⁵²

So war Seiler sowohl aufgrund seiner *praktischen* Erfolge mit den *Telefunken*-Silizium-Detektoren von der Leistungsfähigkeit von Silizium für Gleichrichter völlig überzeugt, als auch durch Welkers Mißerfolge mit dessen Germaniumdetektoren von allen anderen Materialien abgeschreckt. Im Gegensatz dazu glaubte Heinrich Welker aufgrund von Laborexperimenten an die Überlegenheit der *physikalischen* Eigenschaften von Germanium für Halbleiterbauelemente. Besonders die hohe Ladungs-

²⁵⁰ Torrey/Whitmer, *Crystal Rectifiers*, 1948, S. 99.

²⁵¹ Ebenda, siehe S. 100-107, Zitat auf S. 101.

²⁵² Seiler-Interview 1982.

trägerbeweglichkeit schien es zu einem perfekten Halbleitermaterial zu machen. Während sich Seiler in der Nachkriegszeit fast ausschließlich auf die Siliziumentwicklung konzentrierte, blieb Welker zunächst bei Germanium und suchte später nach Materialien mit immer höherer Ladungsträgerbeweglichkeit.

Herbert Mataré, während des Krieges weniger mit Materialfragen als mit Fragen der konkreten Detektorkonstruktion und der *elektrischen* Eigenschaften von Detektoren befaßt, blieb in der Frage des bevorzugten Halbleitermaterials offen. Eberhard Spenke, der im Krieg gar nicht mit Halbleiterfragen befaßt war, erhielt sich ebenfalls seine Unvoreingenommenheit, startete aber seine Nachkriegsforschungen charakteristischerweise mit dem aus der Vorkriegszeit gut bekannten Selen.

Zwischenlösungen und Provisorien

Allgemeine wirtschaftliche Lage in (West-)Deutschland

Auf den ersten Blick schien Deutschland am Ende des Zweiten Weltkrieges völlig zerstört. Die Zerstörung der Bauwerke erreichte in den Zentren der größeren Städte nicht selten 75% und mehr. Die große Wohnungsnot, der Hunger und der Brennstoffmangel im kalten Winter 1946/47 haben sich fest ins allgemeine Gedächtnis eingebrannt. Doch im Gegensatz zur existenzbedrohenden sozialen Lage war die technisch-wirtschaftliche Situation keineswegs katastrophal.

Schon während des Krieges war den Alliierten klar geworden, daß die wirtschaftliche Wirkung der strategischen Bombardements auf Rüstungsbetriebe ausgesprochen furchtbar war, zumal dabei hohe eigene Verluste mit einkalkuliert werden mußten.

„Tatsächlich aber hatte der Bombenkrieg auf die Industrie - selbst auf die Rüstungsindustrie - die geringste Wirkung hinterlassen. Der Schwerpunkt der Bombenangriffe lag, neben den Flächenbombardierungen von Wohngebieten, auf Zielen im Transportsystem. Auf die Zivilbevölkerung und auf Verkehrseinrichtungen fielen jeweils siebenmal mehr Bomben als auf die Rüstungsindustrie.“¹

So stellte die US-Luftwaffe schon im Oktober 1945 in einer ausführlichen Studie die „katastrophalen Mißerfolge des strategischen Bombardements“ fest. Selbst auf dem Höhepunkt der alliierten Luftoffensive im Jahre 1944 „wurden nicht mehr als 6,5 % aller Werkzeugmaschinen beschädigt, wobei wiederum nur 10 % hiervon völlig unbrauchbar wurden.“² Dementsprechend war im Mai 1945 die deutsche Wirtschaft nicht entscheidend geschwächt. In der Tat sorgte die Expansion ab Mitte der 1930er Jahre dafür, daß erst ab 1944 die Bombenschäden den Wert der laufenden Investitionen übertrafen. Das Brutto-Anlagevermögen wuchs bis 1945 auf 120% des Niveaus von 1936 an. Zu dieser quantitativ günstigen Bilanz kommt die qualitativ gute Anlagestruktur hinzu, die ebenfalls auf die rege Investitionstätigkeit zurückzuführen ist. Die größtenteils erhaltenen Produktionsanlagen waren vergleichsweise modern.³

Auch die unmittelbaren Demontageschäden hielten sich in Grenzen. Eine exakte Berechnung ist zwar nicht möglich, doch werden nach unterschiedlichen Berechnungen 3,1% bis 5,3% des Gesamtanlagevermögens angegeben. Diese Demontagen hatten aber keinen zerstörenden Effekt auf die deutsche Wirtschaft, da sie mehrheitlich in den Bereichen erfolgten, die während des Krieges am weitesten ausgebaut worden waren.⁴

Ähnlich, aber an charakteristischer Stelle doch verschieden, sah die Situation in der deutschen Elektroindustrie aus. Zwar lagen auch hier die Produktionskapazitäten bei Kriegsende deutlich höher als 1936, doch die regionale Struktur der deutschen Elektroindustrie unterschied sich gewaltig von der gesamten Industrie.⁵ Auf Berlin allein entfielen 1936 ca. 50% der Inlandsbeschäftigten der Branche, da die Branchenführer *Siemens* und *AEG*, ihre Tochterfirmen *Osram* und *Telefunken* sowie andere Großunternehmen ihren Sitz dort hatten. Insgesamt befanden sich 1936 nur ca. 36% aller Arbeitsplätze in Westdeutschland, branchenübergreifend waren es dagegen 58%. So wurde die Elektroindustrie von den Demontagen und der Teilung Deutschlands

¹ Abelshausen, *Wirtschaftsgeschichte*, 1983, S. 21.

² Abelshausen, *Neuanfang oder Wiederaufbau*, 1986, S. 263.

³ Abelshausen, *Wirtschaftsgeschichte*, 1983, S. 20-24.

⁴ Ebenda, S. 24-27.

⁵ Bähr, *Substanzverluste*, 1997, S. 62.

besonders betroffen.⁶ Allein die Firma *Siemens* soll „durch Kriegsschäden, Kriegsfolgeschäden und Enteignungen ... 2,1 Mrd. RM - das waren rund 75% des Konzernvermögens“ verloren haben.⁷ Bei sowjetischen Demontagen in Berlin-Siemensstadt wurden beispielsweise 98% der arbeitsfähigen Maschinen abtransportiert.⁸

Die Ausgangslage der Elektroindustrie war entsprechend nicht ganz so günstig wie diejenige der westdeutschen Industrie allgemein. Diese brachte ausgesprochen gute materielle Voraussetzungen mit, um in der Nachkriegszeit wirtschaftlich Erfolg zu haben. Dennoch kam es im Winter 1946/47 zu einer Wirtschaftskrise, die ganz Europa erschütterte, und die USA bewog, „den Wiederaufbau Deutschlands als Kern und Instrument des westeuropäischen Aufbaus aktiv zu unterstützen.“⁹ Dabei war die materielle Komponente beispielsweise der Marshallplan-Lieferungen nicht von entscheidender Bedeutung. Vielmehr setzte der Aufschwung im Herbst 1947 ohne materielle Hilfe von außen ein und läßt sich auf organisatorische Verbesserungen und Zusammenführung der knappen Ressourcen auf die neuralgischen Punkte (insb. Infrastruktur, Kohlebergbau und die Ernährungslage) der deutschen Industrie zurückführen. Dies geschah auch unter Vernachlässigung anderer Industrien, insbesondere der Konsumgüterindustrien. Der Erfolg dieser Maßnahmen schlug sich ab Herbst 1947 in steigenden Produktionszahlen nieder. Für die Bevölkerung verbesserte sich die Versorgungslage an Konsumgütern aber nur sehr zögerlich. Die produzierten Konsumgüter wurden in Erwartung einer Währungsreform zunächst fürs Lager produziert und standen so unmittelbar nach der erwarteten Währungsreform zur Verfügung.¹⁰

Im Anschluß an die Währungsreform vom 21. Juni 1948 folgte eine Phase des rasanten Wiederaufbaus, die von außergewöhnlich hohen Wachstumsraten begleitet war und mit steigendem materiellen Wohlstand und sozialer Sicherheit der Bevölkerung einherging, und die daher häufig das deutsche „Wirtschaftswunder“ genannt wird.¹¹

Verdrängung und Verleugnung

Nicht nur im wirtschaftlichen Bereich mußte sich in der unmittelbaren Nachkriegszeit vieles neu einspielen. Das Erbe des Nationalsozialismus war zu bewältigen.

Zwar betrieben die Alliierten zumindest in der britischen und in der amerikanischen Zone eine klare Entnazifizierungspolitik, doch trug dies nicht unmittelbar zu einer den Nationalsozialismus aufarbeitenden Haltung in der deutschen Bevölkerung bei. Vielmehr hat es schon sehr früh Kritik an dieser Art der Entnazifizierung gegeben.

⁶ Johannes Bähr (Bähr, *Substanzverluste*, 1997, S. 64-65) gibt an, „daß die Elektroindustrie im Westteil Berlins durch die sowjetischen Demontagen mindestens 75% ihrer Ausrüstungen verloren hatte.“ Inwieweit vorher ausgelagertes Ausrüstungsmaterial berücksichtigt wurde, geht aus den Angaben aber nicht hervor.

⁷ Ebenda, S. 67.

Wilfried Feldenkirchen (Feldenkirchen, *Wiederaufbau*, 1997, S. 177) gibt sogar an: „Die Gesamtschäden des Hauses Siemens beliefen sich auf insgesamt auf 2,58 Mrd. RM - das waren vier Fünftel seiner Substanz.“

⁸ Feldenkirchen, *Wiederaufbau*, 1997, S. 178.

⁹ Abelshauser, *Neuanfang oder Wiederaufbau*, 1986, S. 267.

¹⁰ Abelshauser, *Wirtschaftsgeschichte*, 1983, S. 40-63; Abelshauser, *Neuanfang oder Wiederaufbau*, 1986, S. 267-268.

¹¹ Für dieses „Wirtschaftswunder“ sind unterschiedliche Erklärungen vorgeschlagen worden. Während der Historiker Werner Abelshauser die wesentlichen Gründe in dem umfangreichen und modernen Produktionsmittelbestand und dem großen Reservoir gut ausgebildeter Arbeitskräfte sieht, werden neuerdings verstärkt Fragen nach der sektoralen Verteilung des Aufschwungs, den technologischen Grundlagen und der Funktion von Innovationen für das „Wirtschaftswunder“ laut. Siehe dazu Abelshauser, *Wirtschaftsgeschichte*, 1983; Abelshauser, *Neuanfang oder Wiederaufbau*, 1986; Stokes, *Wirtschaftswunder*, 1991; Wellhöner, *Wirtschaftswunder*, 1996 und Radkau, *Technik in Deutschland*, 1989.

Beispielsweise verhinderte sie, daß ehemalige Mitglieder von nationalsozialistischen Organisationen oder durch intensive Zusammenarbeit mit dem nationalsozialistischen System belastete Wissenschaftler, an die wiedereröffneten Universitäten zurückzukehren.

Indem sich die Aufmerksamkeit auf die vermeintlich neues Unrecht schaffende Entnazifizierung richtete, war es möglich, die eigene nationalsozialistische Vergangenheit mehrheitlich zu verdrängen oder sogar zu verleugnen. Jedenfalls kam es nicht zu einer öffentlichen kritischen Diskussion über das individuelle Verhalten während des Nationalsozialismus. Darin unterscheiden sich auch Mataré, Seiler, Spenke und Welker nicht vom Rest der Bevölkerung und namentlich den meisten ihrer Fachkollegen.¹²

Andererseits hatte es bereits 1945

„privatim geäußerten Unmut und halblaute Forderungen nach einer prinzipiellen Korrektur des besonders von den Amerikanern und Briten verfolgten Kurses der Säuberung, ‚Reeducation‘ und ‚Reorientation‘ ... gegeben, und sehr bald ... auch explizite Kritik an der Entnazifizierung. Etwa seit 1947, spätestens aber seit 1948, gewann diese Kritik die Oberhand. Parallel dazu schwand die Bereitschaft zu der anfangs nachdrücklich verlangten und geförderten Einkehr ... Die von außen auferlegte - und zunächst auch von nicht wenigen Deutschen für notwendig gehaltene - Beschäftigung mit der nationalen Vergangenheit wurde jetzt zunehmend durch das Engagement für eine postnationale Zukunft abgelöst.“¹³

In diesem Sinne zeigten zum Beispiel die ersten Nachkriegsausgaben der Zeitschrift des *Vereins Deutscher Ingenieure* „kaum Trauer und Scham, sondern wiesen den Weg in rückwärtsgewandte, kulturphilosophische Betrachtungen.“ In den folgenden Jahren wurde „nur äußerst selten über Schuld, über die Verarbeitung des Geschehens, über Wiedergutmachung gesprochen.“¹⁴

Ähnlich orientierten sich auch die *Physikalischen Blätter*, die Zeitschrift der *Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, in den Jahren 1946-1947. Dort wurde beispielsweise eine Reihe von rückblickenden Berichten über die Zeit des Nationalsozialismus abgedruckt, die zeigen sollten, „wie und mit welchem Erfolg sich die Wissenschaftler gegen Bevormundung und politischen Zwang zur Wehr setzten.“¹⁵ In diesen Berichten fand ebenfalls weder eine Verarbeitung des Geschehenen noch eine Auseinandersetzung mit Schuld statt.

Beispielsweise ist der berühmte Bericht Max Plancks über seinen Besuch bei Hitler vom Frühjahr 1933 in den *Physikalischen Blättern* von 1947 abgedruckt. Vom Herausgeber, Ernst Brüche, war der alte Max Planck zu dieser Veröffentlichung quasi gedrängt worden.¹⁶ Der Bericht wurde in der Literatur „als eines der bemerkens-

¹² Im folgenden wird dem biographischen, an den vier Hauptakteuren orientierten Ansatz folgend, hauptsächlich das Gebiet Westdeutschlands beziehungsweise der späteren Bundesrepublik Deutschland betrachtet.

¹³ Frei, *Vergangenheitspolitik*, 1996, S. 14-15.

¹⁴ Kaiser, *Wissenschaft und Technik*, 1997, S. 243-244.

¹⁵ Brüche, *Deutsche Physik*, 1946, S. 232.

Brüche hatte 1944 die *Physikalischen Blätter* gegründet, um „aufklärend über Physik und Forschung zu wirken und deren Wichtigkeit für Deutschlands Zukunft zu unterstreichen.“ („Zur Einführung“, Heft 1, Band 1, 1944). Im Jahre 1944 wurde dies durch die Botschaft „Forschung tut not!“ (Deckblatt Heft 1, Band 1, 1944) vermittelt. Dementsprechend trugen die meisten Beiträge der ersten Hefte des ersten Jahrgangs Titel wie „Die Bedeutung der Forschung“ (S. 6), „Die Schlüsselstellung der Physik“ (S. 30), „Der Nachwuchs der Physiker“ (S. 55), „Forschung tut Not auch im Kriege“ (S. 110) und „Der Einfluß der Physik auf das Wehrwesen im Wandel der Zeiten“ (S. 119).

Im Jahre 1946 war gemäß der Gründungsintention das Bild der reinen, durch den Nationalsozialismus nicht berührten, unpolitischen Physik zu entwerfen.

¹⁶ Planck, *Besuch bei Hitler*, 1947. Siehe Albrecht, *Max Planck*, 1993 zur Entstehung des Planck-Berichts.

werten Zeugnisse der Opposition eines deutschen Gelehrten gegen das NS-Regime herausgehoben und hat in diesem Sinne bis heute nachhaltig das Bild von der Rolle Max Plancks im Dritten Reich beeinflusst“, obwohl Zweifel an seiner Authentizität mehr als angebracht sind.¹⁷ Dennoch schien der Planck-Bericht zu bestätigen, daß die „Physik bzw. die Wissenschaft insgesamt ... sich den Nationalsozialisten nicht unterworfen“ hatte, und daß die Physiker „bis auf wenige *schwarze Schafe*, weder begeistert noch willig mitgemacht [hatten], sondern ... allenfalls *mißbraucht*“ worden waren.¹⁸

Damit diente dieser Bericht dem Ziel nicht nur, „die deutsche Physikerschaft vom Vorwurf einer bewußten und gewollten Zusammenarbeit mit den Nationalsozialisten freizusprechen, sondern - ganz im Gegenteil - deren Tätigkeit in eine Widerstandslegende gegen das NS-Regime umzudeuten.“¹⁹

In einem weiteren „authentischen“ Bericht „Zur Geschichte der *Deutschen Physikalischen Gesellschaft* in der Hitlerzeit“ schrieb deren langjähriger Vorsitzende, Carl Ramsauer, hauptsächlich vom „Widerstand“ der deutschen Physiker gegen die nationalsozialistisch geprägte „Deutsche Physik“. Ramsauer betonte dabei den „Kampf gegen die unverantwortliche antiwissenschaftliche Politik des Ministeriums“ und stellte heraus, daß es dabei um das „allgemeine Wohl der deutschen Wissenschaft“ gegangen sei. Der „Widerstand“ der *Deutschen Physikalischen Gesellschaft* gegen das nationalsozialistische Regime beschränkte sich auf den Einsatz für die „richtige“ Physik, und führte 1944 zum bekannten „Programm der Deutschen Physikalischen Gesellschaft“.²⁰ Im Hinblick darauf schloß Ramsauer seinen Bericht mit der Bemerkung:

„Die Notzeit des Nationalsozialismus hat also auch sein gutes für die Deutsche Physikalische Gesellschaft gehabt. Wir haben uns auf uns selbst besonnen und die Grundlage gefunden, auf der wir die deutsche Physik wieder aufbauen können und wollen.“²¹

Damit implizierte Ramsauer, daß die *Deutsche Physikalische Gesellschaft* unter seinem Vorsitz auf der Seite der Wissenschaft, und somit auf der Seite des Guten gestanden habe. Doch diese „Entlastungsformel ... gilt nicht. In der und für die Wissenschaft hat man die unmenschliche Ausgrenzung und Vertreibung hingenommen und damit einen entscheidenden Schritt in das NS-System und seine destruktive Dynamik hinein getan.“²²

Ernst Brüche verfolgte mit Ramsauers Bericht aber noch ein weiteres Ziel und schrieb 1947 in der Einleitung:

„Prof. Ramsauers Bericht ... zeigt, daß die Übernahme und die Führung des Vorsitzes einer wissenschaftlichen Gesellschaft während der Hitlerzeit an sich nicht die äußere und innere Zugehörigkeit zur Partei als selbstverständliche Voraus-

¹⁷ Albrecht, *Max Planck*, 1993, S. 42.

Helmuth Albrecht hat unter anderem darauf hingewiesen, daß beispielsweise die 14 Jahre nach dem Besuch Plancks bei Hitler angegebenen wörtlichen Zitate mehrfach korrigiert wurden, daß der bereits 89 Jahre alte und ein halbes Jahr später verstorbene Planck diesen Bericht nur mit Hilfe seiner Frau verfassen konnte, die auch die Korrespondenz mit den *Physikalischen Blättern* erledigte, und daß „wohl der Planck-Bericht auch eher als ein Gemeinschaftswerk des Ehepaares anzusehen ist.“ (Albrecht, *Max Planck*, 1993, Zitat auf S. 57.)

¹⁸ Ebenda, S. 61-62 [Hervorhebungen im Original].

Zum Terminus Mißbrauch schreibt Herbert Mehrtens: „Das häufig benutzte Wort von ‚Mißbrauch‘ der Wissenschaft mit seinem Anklang an sexuellen Mißbrauch und vergewaltigter Unschuld ist fehl am Platz. Im Gesamtsystem drängte die Wissenschaft zum politisch-technischen Gebrauch, in einem bornierten Eigeninteresse. Die Kollaboration fand statt, und zwar immer dort, wo die Experten gebraucht wurden.“ (Mehrtens, *Kollaborationsverhältnisse*, 1994, S. 24.)

¹⁹ Ebenda, S. 60.

²⁰ Abgedruckt in den *Physikalischen Blättern* von 1944, S. 1-6.

²¹ Ramsauer, *Geschichte*, 1947, S. 114.

²² Mehrtens, *Kollaborationsverhältnisse*, 1994, S. 21.

setzung bedeutet hat, und widerlegt damit die auch heute noch gelegentlich geäußerte entgegengesetzte Annahme.“²³

Wenig später stellte er in einem eigenen Bericht noch klarer heraus, daß „es auch leitende Parteianhänger mit erfreulicher Einstellung“ gegeben habe, und beispielsweise zum „Schutz der heranwachsenden naturwissenschaftlichen Intelligenz so weit ging[en], die Privilegien der Hitlerjugend über die Befreiung vom Wehrdienst ... für die Schüler der Begabtschule auszunutzen.“²⁴ Damit bereitete er schon 1947 die Wiedereingliederung nationalsozialistisch belasteter Führungspersönlichkeiten in die Nachkriegsgesellschaft vor und sorgte für einen nahtlosen Übergang der *Deutschen Physikalischen Gesellschaft* in die Nachkriegszeit.

Mit Gründung der Bundesrepublik Deutschland ging auch, nach Einschätzung des Historikers Norbert Frei, ein Umdenken in der Entnazifizierungspolitik einher, denn die neue Bundesregierung setzte sich nun „pauschal gesagt“ „nicht für die Opfer des Nationalsozialismus“ sondern für „die ‚Opfer‘ seiner Bewältigung“ ein und machte viele Entscheidungen der Entnazifizierungsverfahren wieder rückgängig.²⁵

Zum Beispiel etablierte die Bundesregierung noch im Herbst 1949 ein „Straffreiheitsgesetz“, als eines der ersten Gesetze des neuen Bundestages, und amnestierte damit alle vor dem 15. September 1949 begangenen Straftaten, die mit bis zu sechs Monate Gefängnis bestraft worden wären. Dies sicherte zwar insbesondere den Schwarzhändlern aus der Phase 1945-48 Straffreiheit, galt aber auch für die NS-Zeit. Darüber hinaus befreite es insbesondere auch diejenigen von Strafe, die sich 1945 durch Annahme einer falschen Identität den Internierungen und Entnazifizierungen entzogen hatten. Sie entgingen so nicht nur einer Strafe für ihr Untertauchen, sondern mußten auch nur mit einer zur Formsache gewordenen Entnazifizierung rechnen.

Die Revisionen der Entnazifizierung gingen sogar so weit, daß 1954 sogar jene amnestiert wurden, die während der Phase des Zusammenbruchs (definiert auf 1. Oktober 1944 bis 31. Juli 1945) „in der Annahme einer Amt-, Dienst- oder Rechtspflicht, insbesondere eines Befehls“ zum Teil schweres Unrecht begangen hatten und sich durch eine Anklage für Straftaten, die mit Strafen bis zu 3 Jahren Gefängnis geahndet wurden, bedroht sahen. So mußte „Mitte der fünfziger Jahre ... fast niemand mehr fürchten, ob seiner NS-Vergangenheit von Staat oder Justiz behelligt zu werden.“²⁶

„Mitte der fünfziger Jahre, so wird man resümieren können, hatte sich ein öffentliches Bewußtsein durchgesetzt, das die Verantwortung für die Schandtaten des ‚Dritten Reichs‘ allein Hitler und einer kleinen Gruppe von ‚Hauptkriegsverbrechern‘ zuschrieb, während es den Deutschen in ihrer Gesamtheit den Status von politisch Verführten zubilligte, die der Krieg und seine Folgen schließlich selbst zu ‚Opfern‘ gemacht hatte.“²⁷

Dieser Trend zeigte sich auch an einer Reihe von Hochschulwissenschaftlern. Zum Teil stark mit dem Nationalsozialismus assoziierte Professoren wurden 1945 zwar aus dem Staatsdienst entlassen, aber zur Mitte der 1950er Jahre wieder in ihre alten Rechte eingesetzt und wenige Jahre später ordnungsgemäß emeritiert. „Ganz allge-

²³ Ernst Brüche im Vorwort zu Ramsauer, *Geschichte*, 1947.

²⁴ Brüche, *Arbeit der Informationsstelle*, 1947, S. 226.

Die angesprochene Begabtschule für künftige Naturwissenschaftler war ein wichtiges Beispiel für Ernst Brüche, wie die *Deutsche Physikalische Gesellschaft* dazu beigetragen hatte, „angehende Wissenschaftler ... vor dem Kriegseinsatz“ zu schützen und „eigentliche Jugendführer, Nationalsozialisten und Militaristen an die Front“ zu schicken. (Brüche, *Arbeit der Informationsstelle*, 1947, S. 226).

Weitere Beiträge Brüches über diese Schule finden sich in den *Physikalischen Blättern*, Bd. 3 (1947), S. 28-32 und 56-59.

²⁵ Frei, *Vergangenheitspolitik*, 1996, S. 13.

²⁶ Ebenda, S. 18-20.

²⁷ Ebenda, S. 405.

mein ist an den Hochschulen ein tiefreichender Wandlungs- und Selbstreinigungsprozeß unterblieben.“²⁸

Auch Mataré, Seiler, Spenke noch Welker mußten sich in diesem Klima zurechtfinden und arrangieren. Während Seiler und Spenke in Deutschland blieben und ihre Forschungs- und Entwicklungstätigkeit auf Gleichrichter und Detektoren konzentrierten, gingen Mataré und Welker bald nach Frankreich, um dort ihre Forschungen fortzusetzen. Diese führten zeitgleich mit der amerikanischen Erfindung des Punktkontakt-Transistors zu ähnlichen Resultaten und resultierten in der Produktion der ersten europäischen Transistoren.²⁹

²⁸ Kaiser, *Wissenschaft und Technik*, 1997, S. 245.

²⁹ Siehe das Kapitel „Transistorentwicklung in Frankreich - Mataré und Welker“ ab S. 117.

Gleichrichterentwicklung in Deutschland - Seiler und Spenke

Vom „Garagenbetrieb“ zum Laborleiter - Karl Seiler



Abb. 24: Karl Seiler
(Abbildung aus *radio
mentor* 29(1960)581.)

Nach Ende des Krieges und der Schließung des *Telefunken*-Laboratoriums hatte Karl Seiler Thüringen verlassen, um seine Frau in Stuttgart zu treffen. Sie erhielt bald eine Lehrerinnen-Stelle in Mönchberg bei Böblingen in Schwaben, zu der eine Wohnung gehörte. „Das war für uns sehr wichtig, wir hatten drei Kinder, so sind wir nach Mönchberg gegangen.“³⁰

Für Karl Seiler selbst gab es in der unmittelbaren Nachkriegszeit kaum Möglichkeiten im Staatsdienst, da er von 1937 bis 1945 NSDAP-Mitglied gewesen war und auch von 1941 bis 1943 dem Nationalsozialistischen Dozentenbund angehört hatte. Aufgrund dieser Mitgliedschaften und der Tatsache, daß keine weiteren nationalsozialistischen Tätigkeiten nachzuweisen waren, wurde er zwar lediglich als „Mitläufer“ eingestuft und mit einer Geldstrafe belegt, doch eine Anstellung an einer Universität war zunächst nicht möglich.³¹

Da auch *Telefunken* „praktisch aufgelöst“ war und ihn daher nicht weiterbeschäftigen konnte, begann er 1945 ohne großes eigenes Kapital, sich mit einer Siliziumdetektor-Produktion in Mönchberg selbständig zu machen. Dort ist er auch von Vertretern der *Field Information Agencies Technical* (FIAT) befragt worden und hat daraufhin einen umfangreichen Bericht über „Detektoren“ für den Band „Elektronik“ des *FIAT Review of German Science 1939-1946* verfaßt.³²

Seilers „Garagenbetrieb“

Seilers Labor und Produktionsstätte für Siliziumdetektoren war 1945 ein „Garagenbetrieb“ im wahrsten Sinne des Wortes, da er in einer alten Garage in Mönchberg mit ca. 16 qm Grundfläche untergebracht war. Dort stellte er mit einem Gehilfen sogenannte „Ringmodulatoren“ auf Siliziumbasis her, die in der Telephontechnik verwendet wurden. Ein Ringmodulator ist eine Brückenschaltung aus vier Gleichrichtern, die es beispielsweise ermöglicht, eine Sprachfrequenz mit einer Trägerfrequenz zu koppeln und wieder zu trennen. Mit mehreren Ringmodulatoren wurde es möglich, mehrere Telefongespräche auf unterschiedlichen Trägerfrequenzen über ein Breitbandkabel gleichzeitig zu führen. Bei immer höheren Trägerfrequenzen reichten die in der Vorkriegszeit verwendeten „Kupferoxydulgleichrichter“ wegen ihrer hohen Kapazität nicht mehr aus. Silizium-Spitzendetektoren waren dafür viel geeigneter.³³

Zur Herstellung dieser Detektoren reinigte Seiler das Silizium in Anlehnung an das Günthersche Verfahren. Dabei reduzierte er Siliziumtetrachlorid mit Aluminium, das

³⁰ Seiler-Interview 1982.

³¹ NSDAP-Mitgliederkarteikarte „Seiler“, BA-BDC; „Spruchkammerbescheid“, Personalakte Seiler, Universitätsarchiv Stuttgart; Seiler-Interview 1982.

³² Seiler, *Detektoren*, 1948. (Die deutsche Ausgabe der Reihe ist als *Naturforschung und Medizin in Deutschland 1939-1946* bekannt.)

³³ Seiler an Teichmann, 10. Dez. 1982, Korrespondenz Teichmann, DM-Archiv; Seiler-Interview 1982.

er „noch irgendwie aufgetrieben - irgendwie getauscht“ hatte, und Wasserstoff, um definiert dotierte Siliziumschichten zu erhalten. Aus diesen Schichten stellte er dann wie während des Krieges durch Aufsetzen einer Metallspitze Silizium-Spitzendetektoren her, die er hauptsächlich an die Telefongesellschaft *Mix & Genest* verkaufte.³⁴

Flächengleichrichter aus Silizium

Die Probleme von Spitzendetektoren waren bekannt, doch bisher war es nicht gelungen, Flächendetektoren aus Silizium oder Germanium herzustellen. In Analogie zu dem für Spitzendetektoren gültigen Ersatzschaltbild (siehe Abb. 18, S. 71) forderte Seiler, daß die Störstellenkonzentration direkt am gleichrichtenden Metallkontakt gering sein sollte, um Kurzschlüsse zu vermeiden, im restlichen Halbleiter aber hoch sein sollte, um dort eine ausreichend hohe Leitfähigkeit zu erhalten, so daß der Sperrwiderstand im Vergleich zum Bahnwiderstand sehr groß würde. Um dieses Ziel zu erreichen entwickelte Seiler ein Verfahren, bei dem gleichzeitig mit dem Halbleitermaterial ein Dotierstoff aus der Gasphase auf einem Trägerkörper niedergeschlagen wurde. Durch kleine Veränderungen der Einstellungen war es möglich, als Resultat dünne Halbleiterschichten zu erhalten, die eine stark unterschiedliche Störstellenkonzentration aufwiesen. An der Seite der hohen Dotierung entstand ein sperrfreier Kontakt, während die Seite der niedrigen Dotierung gute Sperreigenschaften aufwies.³⁵

Nach diesem Verfahren konnte Seiler schon 1948 in Mönchberg technisch brauchbare und funktionsfähige Silizium-Flächengleichrichter herstellen, die zwar noch sehr schnell heiß wurden, aber ohne die problematischen Spitzenkontakte auskamen. Rückblickend beschrieb Seiler sie als „das Beste, was ich ... in Mönchberg gemacht habe“³⁶ Das Herstellungsverfahren war aber noch nicht sehr ausgereift, so daß er zwar ein Patent einreichte und die Ergebnisse auf dem Physikertag in Bad Nauheim 1950 vorstellte, aber nicht über dieses Thema publizierte.³⁷

Wie aus dem Patent hervorgeht, hat Seiler bei diesen Flächengleichrichtern nicht bewußt einen pn-Übergang erzeugt, sondern p-leitendes Silizium unterschiedlicher Leitfähigkeit erzeugt. Das physikalische Verständnis dieses Vorgangs basierte noch völlig auf der Schottky-Theorie. Seiler sah zwar die Möglichkeit der Erzeugung von pn-Übergängen mittels seines Verfahrens, hielt sie aber nur zur Herstellung der bei Punktkontakt-Transistoren wichtigen Oberflächenschicht für notwendig. Die Möglichkeit der Gleichrichtung durch flächenhafte pn-Übergänge hatte er zum Zeitpunkt der Patenteinreichung noch nicht erkannt.³⁸

Zur gleichen Zeit hatte Seiler wieder Kontakt zur Technischen Hochschule in Stuttgart bekommen, an der sein ehemaliger Chef aus Hannover und Breslau, Prof. Dr. Erwin Fues, die Leitung des Instituts für Theoretische und Angewandte Physik übernommen hatte. In dessen Auftrag baute er ab Februar 1948 als „Verwalter der Dienstgeschäfte eines wissenschaftlichen Assistenten“ ein Laboratorium für experimentelle Arbeiten an Elementhalbleitern auf. Bis Ende November war Seiler in dieser Position zunächst ganztags, später halbtags tätig. Bei seinem Arbeitsbeginn hatte er

³⁴ Seiler-Interview 1982; Lorenz: Laudatio zu Seilers 70. Geburtstag, Korrespondenz Teichmann, DM-Archiv.

³⁵ Seiler, *Herstellung von Flächengleichrichtern*, 1949, Patent DBP 883 784.

³⁶ Seiler-Interview 1982; Seiler an Teichmann, 10. Dez. 1982, Korrespondenz Teichmann, DM-Archiv.

Dr. Lorenz schrieb dazu in seiner Laudatio zu Seilers 70. Geburtstag: „Er konnte ... schon 1948 als erster in der Welt technisch brauchbare Flächengleichrichter aus Silizium herstellen, wobei er eine geeignet dotierte polykristalline Siliziumschicht auf einen Kohlegrundkörper abschied und mit einem flächenhaften Metallkontakt versah.“ (Korrespondenz Teichmann, DM-Archiv)

³⁷ Ebenda. Siehe auch Seiler, *Flächengleichrichter aus Silizium*, 1950. (Eine ausführliche Veröffentlichung ist nie erschienen).

³⁸ Seiler, *Herstellung von Flächengleichrichtern*, 1949, Patent DBP 883 784.

aber - vermutlich wegen seiner Nazivergangenheit - bestätigen müssen, daß er „vorläufig nicht die Lehrberechtigung an der Technischen Hochschule“ Stuttgart erwerben wolle. Doch schon ein Jahr später wurde er zum Lehrbeauftragten und 1953 zum Honorarprofessor an der TH Stuttgart ernannt.³⁹

Laborleiter

Nebenbei hatte Seiler weiter Silizium-Spitzendetektoren für den Einsatz in den Ringmodulatoren der Langstreckentelephonie produziert und an *Mix & Genest* verkauft, denen die gelieferten Stückzahlen aus der Seilerschen Kleinserienproduktion aber nicht ausreichten. Daher wurde Seiler angeboten, bei der *Süddeutschen Apparate-Fabrik* (SAF) die Leitung eines Labors zur Entwicklung von Detektoren zu übernehmen, da sowohl *Mix & Genest* als auch die *Süddeutsche Apparate-Fabrik* der *International Telephone & Telegraph Corporation* (ITT) angehörten. Seiler nahm das Angebot an. Er wechselte Ende 1948 als Leiter des neueingerichteten Detektorlaboratoriums zur *Süddeutschen Apparate-Fabrik* nach Nürnberg und brachte dort seine Kenntnisse der modernen Halbleiterwerkstoffe ein.⁴⁰

Etwa zu gleichen Zeit war durch die Erfindung des Germanium-Punktkontakt-Transistors das Hauptaugenmerk der Halbleiterforscher- und -entwickler auf Germanium gelenkt worden. Auch Seiler begann bei der SAF zunächst, an Germaniumdioden zu arbeiten, da deren Produktion sehr einfach war und bald Germaniumflächendioden mit pn-Übergängen aufkamen. Er erinnerte sich, daß man die Germaniumkristalle lediglich ziehen und umdotieren mußte. Dann konnte man sie einfach zerschneiden, an beiden Enden die Kontakte anlöten, einpacken und verschicken.⁴¹

Das Germanium hatte Ende der 1940er Jahre Silizium als Werkstoff zunächst völlig verdrängt, so daß auch an Seilers Silizium-Flächengleichrichter nicht weitergearbeitet wurde und er in der patentierten Form nie serienmäßig hergestellt wurde. Seiler blieb zwar auch in dieser Zeit von der grundsätzlichen Überlegenheit des Siliziums überzeugt,⁴² mußte aber nach seinem Wechsel zur SAF in Nürnberg im Dezember 1948 wegen der technologischen Vorteile des Germaniums auch auf diesem Gebiet arbeiten. Als Laborleiter von SAF war er dafür verantwortlich, daß kommerziell verwertbare Produkte entwickelt wurden, und Germaniumdioden waren im Vergleich zu Siliziumdioden ausgesprochen einfach herzustellen.⁴³

Anfang der 1950er Jahre begann er aber wieder, sich mit Silizium auseinanderzusetzen, und dazu Arbeiten in Nürnberg und Stuttgart durchzuführen und durchführen zu lassen.⁴⁴ Darüber hinaus regte er Eberhard Spenke im Oktober 1950 an, sich näher mit Silizium zu beschäftigen.⁴⁵

³⁹ Personalakte Seiler, Universitätsarchiv Stuttgart.

⁴⁰ Seiler an Teichmann, 10. Dez. 1982, Korrespondenz Teichmann, DM-Archiv; Seiler-Interview 1982.

⁴¹ Seiler-Interview 1982.

⁴² Seiler, *Neuere Entwicklung*, 1949, S. 299.

⁴³ Seiler-Interview 1982.

⁴⁴ Zu Seilers weiteren Arbeiten siehe das Kapitel „*Süddeutsche Apparate-Fabrik* (SAF) in Nürnberg“ ab S. 185.

⁴⁵ Siehe Spenke, „Zur Frage eines Silizium-Flächengleichrichters“, Atenvermerk, 7. Oktober 1950, WSD 039. Siehe zu Spenkes Reaktion ausführlicher das Kapitel „Umorientierung der Arbeiten“ ab S. 167.

Von der Kriegsforschung zum Selen - Eberhard Spenke

Eberhard Spenke war vor dem Zweiten Weltkrieg noch bis zum 31. Juli 1939 bei *Siemens & Halske* in Berlin als Mitarbeiter Walter Schottkys tätig gewesen und wurde zu Kriegsbeginn zunächst als Meteorologe zum Wetterdienst der Luftwaffe einberufen. Doch schon ab Anfang April 1940 war Spenke wieder bei *Siemens* in der Abteilung KS 5 tätig, die für „spezielle Probleme auf dem Gebiet und der Abwehr von Unterwasserwaffen“ zuständig war. Dort war Spenkes Hauptbeschäftigung von 1940 bis 1944 die Minenabwehr. Es ging dabei um die Weiterentwicklung von sogenannten „Sperrbrecher“-Schiffen. Mit großen Magnetspulen ausgestattet fuhren sie einem Konvoi vorweg und versuchten durch ihr großes Magnetfeld, feindliche Magnetminen zur Detonation zu bringen, bevor sie selbst in gefährliche Nähe der Minen kamen. Spenke versuchte dabei sowohl durch theoretische Berechnungen als auch durch Experimente in der Nordsee, die optimale Anordnung der Spulen zu bestimmen.⁴⁶

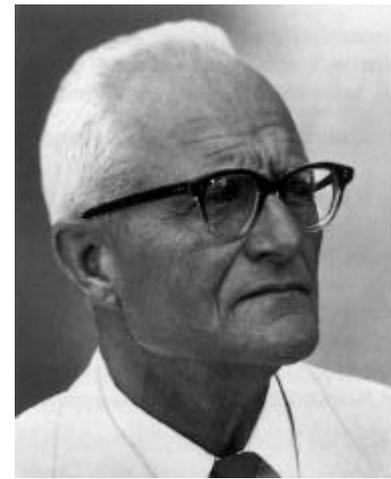


Abb. 25: Eberhard Spenke
(Abbildung nach Feldtkeller/Goetzeler, *Pioniere der Wissenschaft*, 1994, S. 147.)

1944 wurde Spenke der Arbeitsgruppe „Akustik“ unter Leitung von Dr. Friedrich Spandöck zugeordnet, da Mitte 1943 große Teile dieser Gruppe zur Radartechnik abgeordnet worden waren und daher dort Personalmangel herrschte. Kurz zuvor war die Akustikgruppe aufs Land in den „Heinehof“ verlagert worden, „dem Besitz des 1941 verstorbenen Chef des Hauses Carl Friedrich v. Siemens, einem Schloß mit etwa 50 Zimmern in einem Park von ca. 50 Morgen, das etwa 5 km westlich von Potsdam lag und an den Kampritz- und Nedlitzsee grenzte.“⁴⁷

Spenke war für die neuen Aufgaben an akustischen Minen gut geeignet, da er in den frühen 1930er Jahren an akustischen Problemen gearbeitet hatte. Das Ziel seiner Arbeit war die Entwicklung einer akustischen Mine „die nur dann detoniert, wenn sich ein Schiff in einem bestimmten Kegel oberhalb der Mine befindet“. Doch auch dieses neue Arbeitsgebiet brachte ihm keine Sicherheit, denn auf einer Besprechung im September 1944 wurde über die Weiterentwicklung auf diesem Gebiet negativ entschieden. Im Protokoll hieß es:

„Da aufgrund eines Führererlasses alle Entwicklungen abzustoppen sind, die nicht in allernächster Zeit kriegsentscheidende Ergebnisse erzielen, sollte durch die Besprechung eine Entscheidung über die Abstopfung oder die Weiterführung unserer Arbeiten gefällt werden.“⁴⁸

Man kam zu dem Urteil, daß in den Spenkeschen Arbeiten „keine umstürzende Neuheit gesehen werden kann“ und daher Spenke sofort neue Aufgaben erhalten sollte, die sowohl auf dem akustischen wie auch auf dem magnetischen Gebiet der Minenabwehr liegen konnten.⁴⁹ Daraufhin schrieb Spenke zunächst seine Ergebnisse zusammen, verfaßte gemeinsam mit Spandöck noch eine Arbeit zur Abstrahlung tieffrequenten Schalles, schrieb Aktenvermerke zu Arbeiten anderer und beschäftigte sich mit theoretischen Arbeiten zur Tieftonerzeugung, mit deren Hilfe akustische

⁴⁶ Eberhard Spenke, Tätigkeitsbericht über die Kriegsjahre 1940 bis 1944, ESD(a) 186 und Eberhard Spenke, Bekämpfung von stumpfen Minen durch Zusatzwicklungen, 11. Jan 1945, ESD(a) 186.

⁴⁷ Spandöck, *akustische Laboratorien*, 1962, SAA 12 / Lg 833.

⁴⁸ Aktenvermerk, Arbeit an acustischen Minen, Heinehof am 14. Sept. 1944, ESD(a) 186.

⁴⁹ Ebenda; von Bertele an Spenke, 22. Sept. 1944, ESD(a) 186.

Minen geräumt werden sollten. Neue Probleme wurden ihm aber bis zum Kriegsende nicht mehr angetragen.⁵⁰

Spandöck erinnert sich, daß „als im Winter 1944/45 die Russen an der Oder bei Küstrin standen“, die Idee aufkam, da die Straßen verstopft waren, mit Schiffen in Richtung Mölln in Schleswig Holstein zu fliehen. Am 1. April 1945 machte sich Spenke als Stellvertreter Spandöcks mit 6 kleinen Schiffen, die mit den modernen Geräten beladen waren, und einer „Spreezille“ für die alten Geräte und Einzelteile von Behelfsheimen auf den Weg.

Wenig später traf Spenke zusammen mit seiner Frau und den beiden Kindern „in jeder Beziehung heil und unversehrt ... und zwar sehr komfortabel in einem Wohnschiff“ in Mölln ein.⁵¹ Dort lebten zunächst „etwa 15 Personen, von denen ein Teil auf den Schiffen, ein Teil in den beiden Eisenbahnwaggons wohnte.“⁵² Spenke erinnerte sich:

„Der Sommer 1945 war für uns insofern sehr schwer, als wir unter primitivsten Verhältnissen auf einem Schiff gewohnt haben, das nur noch als Wrack zu bezeichnen war. Das ist eine ziemlich scheußliche Erinnerung, aber wenn man bedenkt, daß das der ganze Tribut ist, den wir bisher ungerufen an das Schicksal zu zahlen hatten, so muß man sich dankbar bewußt sein, daß meine Leute und auch ich sehr glimpflich davon gekommen sind.“⁵³

Während Spandöck noch im Laufe 1945 für die *Deutsche Grammophon* in Hannover an einer neuen Plattenaufnahmeapparatur arbeitete, orientierte Spenke sich zur nahegelegenen „Verlagerungsstätte“ des *Siemens*-Konzerns in Sielbeck (Holstein) hin. Dort konnte er schon bald nach Kriegende an seine früheren Halbleiterforschungen anknüpfen. Sein spezielles Interesse galt jetzt den Selengleichrichtern.⁵⁴

Aufbau des Laboratoriums „Pretzfeld“

Auf Spenkes Anregung richteten die *Siemens-Schuckertwerke* der sogenannten „Selengruppe Sielbeck“ im Schloß Pretzfeld (Oberfranken) ab Sommer 1946 ein zunächst primitives Labor für grundlegende Forschungsarbeiten an Selengleichrichtern ein. Spenke siedelte dorthin mit seiner Familie über und begann seine Nachkriegsforschungen.

Vorausgegangen war die allgemeine Einschätzung im Siemensvorstand, daß sich die Selengleichrichter „schon weitgehend als Trockengleichrichter



Abb. 26: Das Schloß Pretzfeld
(Abbildung aus Feldtkeller/Goetzeler, *Pioniere der Wissenschaft*, 1994, S. 148.)

⁵⁰ „Weshalb sind zur Abstrahlung tieffrequenten Schalles grossflächige Membranen erforderlich?“, Dr. F. Spandöck (ZL 12) u. Dr. E. Spenke (KS5), Siemensstadt, den 30. 11. 1944, ESD(a) 140; Eberhard Spenke, „Aktenvermerk über blindleistungsfreie Erregung eines Tieftonsenders“, Heinehof, 24. 11. 1944, ESD(a) 140; Eberhard Spenke, Die energetischen Verhältnisse beim Tonpils, Siemensstadt, 18. Jan 1945, ESD(a) 186.

⁵¹ Spenke an Pfaffenberger, 16. April 1947, ESD(n) 169.

⁵² Spandöck, *Akustische Laboratorien*, 1962, SAA 12 / Lg 833.

⁵³ Spenke an Pfaffenberger, 16. April 1947, ESD(n) 169.

⁵⁴ Oszietski, *Frühe Halbleiterforschung*, 1989, S. 146; Trendelenburg, *Geschichte der Forschung*, 1975, S. 258. Zwischenzeitlich hatte sich Spenke im September 1945 auch für einen besoldeten Lehrauftrag in angewandter Mathematik an der wiedereröffneten Universität in Hamburg beworben, aus dem aber offenbar nichts geworden ist. (Spenke an die Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät der Hansischen Universität Hamburg, 11. Sept. 1945, ESD(a) 199.)

für höhere Leistungen durchgesetzt“ hatten, der Marktanteil von *Siemens* aber gering war. Diese Situation sollte durch Grundlagenforschung und Entwicklungsarbeiten auf dem Selengebiet verändert werden.

In der Frage der Unterbringung kam eine vorbereitende Kommission im Mai 1946 zum Schluß:

„Im Schloß Pretzfeld sind noch verschiedene Räume frei, die für die Unterbringung der sogenannten Selengruppe Sielbeck in Frage kommen. Es handelt sich um drei Räume je etwa 35 m² im Schloßgebäude selber, ... und um 3 Räume einschließlich Meisterbude mit insgesamt ca. 200 m² in einem durch S&H während des Krieges renovierten Stallgebäude. ... Unterzubringen sind 3 Physiker, 1 Laborantin, 1 Hilfskraft (nach Bedarf).“⁵⁵

In der frühen Nachkriegszeit war eine apparative Neuausstattung des Labors kaum möglich, so daß die chemischen und ein großer Teil der elektrischen Arbeiten der neuen Gruppe zunächst mit in dem ebenfalls im Schloß Pretzfeld untergebrachten Labor des Trafo-Werks von Dr. Prinz durchgeführt werden sollten. In den drei zur Verfügung gestellten Räumen sollten „die drei Herren Dr. Spenke, Dr. Rose und Dr. Hoffmann und eine Elektro-Assistentin, für die Fräulein Beuschel vorgesehen ist,“ arbeiten. Im renovierten Stallgebäude könnten zunächst die Familien untergebracht werden.⁵⁶

Das Schloß Pretzfeld stellte für die Halbleiterforschung der *Siemens-Schuckertwerke* einen Glücksfall dar, da zu dieser Zeit eigentlich der Wiederaufbau der Produktionsstätten Vorrang hatte und Forschungen bis auf wenige Ausnahmen zunächst nicht finanziert werden sollten. Im Geschäftsbericht hieß es Ende 1946 daher :

„Nur auf einigen Gebieten, die für Forschungsarbeiten einen vergleichsweise nicht allzu großen Aufwand erforderten, wurde die Arbeit auf breiterer Basis wieder aufgenommen. Insbesondere auf dem Halbleitergebiet ergaben sich günstige personelle und räumliche Konstellationen. Im Schloß Pretzfeld wurden die Vorarbeiten zum Aufbau eines Halbleiterlaboratoriums in Angriff genommen. In einer zum Schloß gehörigen ehemaligen Stallung konnten für die wissenschaftlichen Mitarbeiter Wohnungen gebaut werden. Mit Herrn Professor Schottky wurde ein Mitarbeitervertrag abgeschlossen, der sich durch die enge Zusammenarbeit zwischen ihm und der nach Pretzfeld aus Sielbeck verlagerten Halbleitergruppe bereits günstig auswirkte. In Hannover bei der Deutschen Grammophongesellschaft wurden die beabsichtigten Arbeiten auf dem Gebiet der Vakuumbedampfung in Angriff genommen und führten bereits zu ersten Ergebnissen.“⁵⁷

Im Sinne der Zentralen Werksverwaltung der *Siemens-Schuckertwerke* handelte es sich bei der Einrichtung des Selen- beziehungsweise Halbleiter-Labors in Pretzfeld allerdings um ein Provisorium. Längerfristig sollten die Forschungsaktivitäten der *Siemens-Schuckertwerke* in Erlangen zusammengefaßt werden. So hieß es in einem entsprechenden Aktenvermerk:

„Als Ergebnis der verschiedenen Besprechungen wurde folgendes festgelegt: Das Endziel ist, die Laborgruppe Spenke endgültig in Erlangen unterzubringen. Geeignete Räume hierfür sollen gesucht werden.“⁵⁸

Im November 1946 bezogen die Physiker Dr. Eberhard Spenke und Dr. Arnulf Hoffmann sowie der Mechaniker Adolf Müller die drei leeren, lediglich mit Lampenanschluß, Schaltern und Steckdosen, aber ohne Ofen ausgerüsteten Laborräume. Die

⁵⁵ Aktenvermerk 14071, Erlangen, den 24. Mai 1946, SAA 68 / Li 385 A.

⁵⁶ Ebenda.

⁵⁷ Geschäftsberichte Zentral-Werksverwaltung, 1.1.1946 - 30. 9. 1946, SAA 15 / Lk 961.

⁵⁸ Aktenvermerk 14074, Erlangen, den 25. Juni 1946, SAA 68 / Li 385 A.

Elektro-Assistentin Yvonne Beuschel und der Physiker Dr. Frank Rose kamen in der ersten Hälfte des Jahres 1947 dazu.⁵⁹

Der Aufbau eines Laboratoriums in der direkten Nachkriegszeit brachte viele praktische Probleme mit sich, beispielsweise bei der Beschaffung von Material und Geräten, bei der Zulassung eines Dienstwagens und beim Einstellen von geeigneten Mitarbeitern mit sich. So kam es etwa zu Auseinandersetzungen zwischen den *Siemens-Schuckertwerken* und *Siemens & Halske* in Berlin-Siemensstadt „über die Aufteilung der Laboratoriumsmaterialien, die im Oktober 1943 aus dem früheren Forschungslaboratorium über Hof in Bayern nach Erlangen verlagert wurden.“ Aus diesem Material hatte Spenke im Mai 1947 insgesamt „zwei Spiegelgalvanometer samt Ablesevorrichtung, 1 Lindemann-Elektrometer und insgesamt 6 Schiebewiderstände“ beantragt. Das war offenbar über die Hälfte des Materials und stand nach den Abmachungen den *Siemens-Schuckertwerken* nicht zu.⁶⁰

Als weiteres Beispiel mag die Anschaffung eines Dienstwagens für das Pretzfelder Laboratorium dienen. In einem längeren Schriftwechsel mit dem Landratsamt Ebermannstadt wurde schließlich das Formular „Antrag auf Erwerb eines Kraftfahrzeugs“ richtig und erfolgreich ausgefüllt. Daraus wird klar, daß das Laboratorium Pretzfeld bis April 1948 keinen PKW besaß, aber schon lange einen benötigte.

„Die Dienststelle Pretzfeld hat als Laboratorium einen ausserordentlich vielseitigen und wechselnden Bedarf an elektrischen Messgeräten, elektrischem Schaltmaterial, Rohmaterial für mechanische Werkstattarbeiten, Chemikalien, flüssiger Luft, Pressluft, Sauerstoff in Flaschen, Laborglas und - Porzellan und ähnlichem. Wegen der Vielseitigkeit des Bedarfs einerseits, der Geringfügigkeit der jeweiligen Mengen andererseits ist an eine Lagerhaltung nur in sehr beschränkter Masse zu denken.

Vielmehr ist laufender Neubezug bei Fremdfirmen bzw. ein dauernder Rückgriff auf die Lager unserer grossen Werke in Nürnberg und Erlangen erforderlich. Die Erledigung der anfallenden Transporte durch die örtlichen Fuhrunternehmer ist erfahrungsgemäß äusserst unbefriedigend, da diese hauptsächlich auf den Transport von Massengütern eingestellt sind.

Weiter werden die Mitarbeiter der Dienststelle Pretzfeld häufig zu Besprechungen in unseren Werken in Erlangen und Nürnberg benötigt. Für den geschilderten Verkehr mit unseren Werken in Nürnberg, Erlangen usw. ist auf Dauer der Einsatz eines PKW unbedingt erforderlich.“⁶¹

Der ausführliche Antrag wurde schließlich genehmigt. Ein PKW konnte jetzt zwar angeschafft werden, jedoch stand Benzin nur in geringer Menge zur Verfügung. Das Monatskontingent belief sich auf nur 40 Liter Benzin.⁶²

Um solche und ähnlich Aufgaben mußte sich Spenke vielfach kümmern, obwohl er die Grundlagenforschung als seine eigentliche Berufung ansah. Entsprechend war er mit den eingeschränkten Möglichkeiten unzufrieden, eigene Forschungen in Deutschland und bei *Siemens* zu betreiben. Darüber hinaus äusserte er sich sehr skeptisch im Hinblick auf die politische Zukunft Deutschlands in Freiheit und Menschlichkeit und kam

⁵⁹ Mietvertrag, 25. Nov. 1946 (für die Räume 206, 207, 208) und „Liste aller Mitarbeiter des Labors“, SAA 68 / Li 385 A.

⁶⁰ Flir (S & H) an Alfred Siemens (SSW), 13. 6 1947, und weitere Unterlagen in ESD(n) 168.

⁶¹ „Antrag auf Erwerb eines Kraftfahrzeugs“ an das Landratsamt Ebermannstadt, April 1948, und weiterer Schriftwechsel in ESD(a) 043.

⁶² Im Mai 1949 wurde das Kontingent noch weiter gesenkt, da „die Erdölfelder der Welt ... kaum noch aus [reichen], um den in den letzten Jahrzehnten rapide in die Höhe geschnellten Bedarf durch die fortschreitende Motorisierung decken zu können.“ (Landratsamt Ebermannstadt, „An alle Kraftfahrzeugbesitzer“, 30. Mai 1949, ESD(n) 169.)

Über den Benzinverbrauch hinaus war es auch schwierig, Motoröl zu bekommen. Spenke versuchte Mitte 1948 von der Firma Leybold, die der Dienststelle Pretzfeld durch den Verkauf von Hochvakuumanlagen geschäftlich verbunden war, Öl zu bekommen. (Spenke an Oetgen (Leybold), 30. Aug. 1948, ESD(n) 169.)

zu dem Schluß, daß seine Kinder besser in den USA aufwachsen sollten. Eine Bewerbung um eine Forschungsstelle in den Bell Laboratorien im Oktober 1948 brachte ihm aber nur eine Absage ein.⁶³

Deshalb blieb er in Deutschland und widmete sich weiterhin mit großem Erfolg dem Aufbau des Pretzfelder Laboratoriums. Das stetige Größenwachstum des Labors und die feste Etablierung in den *Siemens-Schuckertwerken* als eigenständige Einrichtung sprechen für sein administratives und diplomatisches Talent. Von 1946 bis 1965 wuchs die vom Pretzfelder Labor belegte Fläche von ca. 120 m² auf das über Zwanzigfache an.⁶⁴ Die Personalentwicklung verlief ähnlich.⁶⁵ Zu seinem sechzigsten Geburtstag wurde ihm von seinen Mitarbeitern auch eine exzellente Personalführung bescheinigt, bei der er „nicht nur die Aufgaben steuerte, sondern auch die oft auseinander strebenden Köpfe zu einem Arbeitsteam zusammenführte.“⁶⁶

Ziel der Forschungen in Pretzfeld

Nach der Gründung des Laboratoriums 1946 konzentrierten sich die Arbeiten in Pretzfeld zunächst einerseits auf „die Schaffung von Grundlagen für eine wirkliche physikalische Erforschung des Selengleichrichters“⁶⁷ und andererseits auf „eine intensive technische Entwicklungsarbeit“.⁶⁸ In diesen Fragen wurde die Arbeitsgruppe um Spenke durch den bereits seit 1943 in Pretzfeld lebenden Walter Schottky beraten.⁶⁹

Ziel der Forschungen war es dabei „hier in Pretzfeld die Gleichrichterfragen ohne jede Rücksicht auf technische Erfolge zu untersuchen“. Das hieß, Spenke und seine Mitarbeiter wollten „keine guten Gleichrichter bauen ..., sondern rauskriegen, ... wie die Dinger funktionieren.“ Als Begründung erklärte Spenke:

„Ich habe es anlässlich von Besprechungen zwischen Herrn Waldkötter, Herrn Schweickert und Herrn Nitsche immer wieder feststellen müssen, daß es nicht möglich ist, daß 3 Selenfachleute mit langjähriger Praxis zusammenkommen, ohne daß über irgend einen Tatbestand 3 wenn nicht noch mehr verschiedene Aussagen aufgestellt werden. Das bezieht sich wohlgerne nicht etwa auf eine Deutung und Erklärung an und für sich festliegender Tatsachen, sondern eine und dieselbe konkrete Frage wird von den Herren verschieden beantwortet.“⁷⁰

Daher standen in der Einschätzung Spenkes Grundlagenfragen im Vordergrund. Es ging dabei zum Beispiel um die Frage nach dem Leitungsmechanismus im Selen, die Hans Schweickert im Detail untersuchte. Er versuchte, den Einfluß der Zahl der Ladungsträger von demjenigen der Beweglichkeit der Ladungsträger im Selen zu trennen. Als weiteres Grundlagenproblem wurde beispielsweise auch die Änderung

⁶³ „At the present I am in charge of the Semiconductor Laboratories of the Siemens-Schuckert-Works. This activity as well as the teamwork with Prof. Schottky profer [sic!] a good deal of satisfaction, however I am convinced that basic research which I believe in [sic!] my vocation, for the long run will be only possible in the U.S.

Besides I have the wish that my children shall grow up in freedom and humanity.“ Spenke an die Bell-Laboratorien, 12. Okt. 1948, ESD(a) 045. Die Absage erfolgte durch Deller (Bell Laboratorien) an Spenke, 22. Nov. 1948, ESD(a) 045.

⁶⁴ „Anstieg der vom Labor belegten Fläche (1946-1965)“, SAA 68 / Li 385 A. (1. Sept. 1946: ca. 120 m², 1949/50: ca. 800 m², 1955: ca. 1000 m², 1960: ca. 1200 m², 1962: ca. 2000 m², 1965: ca. 2700 m²).

⁶⁵ Personallisten in SAA 68 / Li 385 A, ESD(a) 002, ESD(a) 003.

⁶⁶ „Labor Pretzfeld (1946-1965)“. Das Original wurde Spenke anlässlich seines 60. Geburtstags am 5.12.1965 überreicht, SAA 68 / Li 385 A

⁶⁷ Im einzelnen: a) Analyseverfahren, b) Leitfähigkeits- und Thermospannungsmessungen am Selen c) Meßverfahren zur Ermittlung der Störstellenverteilung d) Scheinwiderstandsmessungen e) Kennlinienmessungen f) Schlifttechnik zur Untersuchung der Kristallstruktur. (Siehe „Bericht über Arbeiten im Laboratorium Pretzfeld (1947-1951)“, SAA 35-46 / Ld 954).

⁶⁸ Im einzelnen: a) Aufdampfverfahren b) der Kühlkanalgleichrichter c) der Stabgleichrichter. (Siehe „Bericht über Arbeiten im Laboratorium Pretzfeld (1947-1951)“, SAA 35-46 / Ld 954).

⁶⁹ Oszietski, *Frühe Halbleiterforschung*, 1989, S. 146-147.

⁷⁰ Spenke an Tuczek, 8. Jan. 1948, ESD(a) 043.

der Leitfähigkeit des massiven Selens bei alleinigem Halogenzusatz untersucht. Die Frage barg, „derartig viele vorläufig ungeklärte Rätsel, daß es m.E. für unsere forschungsmäßig eingestellte Arbeitsgruppe nicht angebracht ist, das Problem durch Hinzufügung von Metallzusätzen weiter zu komplizieren.“⁷¹

Obwohl Spenke zu seiner eigenen Überraschung bei einer Bilanzbesprechung im Oktober 1947 für diese Orientierung des Labors auf Grundlagenforschung Rücken- deckung von Herrn Scharowsky (aus dem Vorstand) erhalten hatte⁷², lag sie doch nicht ganz auf der Gesamtfirmenlinie. Scharowsky fand zwar, daß sich die „Dienst- stelle Pretzfeld ... als Forschungslaboratorium betrachten und unabhängige Grund- lagenforschung auf breiter Basis betreiben“ sollte.⁷³ Aber der Gesamtfirmenleitung nach „bestand die vordringlichste Aufgabe [darin], zunächst die Fertigungsstätten so wieder herzurichten, dass die Arbeiten in der gewünschten Qualität und in dem gewünschten Umfange durchgeführt werden konnten. ... Für diese Aufgabe waren alle verfügbaren Kräfte einschliesslich der Entwicklungsingenieure angesetzt.“⁷⁴

So zwangen nicht nur „die für das Halbleitergebiet charakteristische, besonders enge Kopplung zwischen Werkstoffentwicklung, Bauelemente-Entwicklung und theoretischen Grundlagen dazu, die Arbeiten des Labors immer stärker auf angewandte For- schung und Entwicklung auszurichten“⁷⁵, sondern von Spenkes Labor wurden auch Entwicklungsarbeiten zur Verbesserung der Selengleichrichter erwartet.

Selengleichrichter

Bezüglich der Selengleichrichter versuchte man daher zunächst, eine Bestands- aufnahme der bekannten Verfahren zu erstellen. Rückblickend faßten einige Mitar- beiter des Labors die Ausgangssituation folgendermaßen zusammen:

„Der Selengleichrichter war ein mehr alchemistisches als ein technisches Erzeugnis: Selen mit einem Küchenmesser auf eine heiße Eisenplatte aufgeschmiert – ein gewisser ‚grauer Schimmer‘ spielte dabei eine besondere Rolle – nach dem Auf- spritzen der oberen Lotschicht (Deckelektrode) im Ofen gebacken bzw. ‚umgewan- delt‘ und schließlich nach überlieferten Regeln ‚elektrisch formiert‘. In der Decklot- schicht aus Zinn-Cadmium war außerdem spurenweise zugesetztes Thallium als wirksames Agens zur Erhöhung der Sperrspannung notwendig. Diese Rezeptur lieferte ein robustes Produkt, das allerdings erhebliche Alterungs- erscheinungen aufwies und gegen Quecksilberdämpfe allergisch war.“⁷⁶

Dieses Schmierverfahren war die „klassische Siemens-technik“ bis zur Einrichtung des Pretzfelder Laboratoriums, während bei der AEG Selengleichrichter schon durch die Bedampfung großer Trägerbleche im Vakuum hergestellt wurden. In dieser Richtung sollten nun auch die Entwicklungen bei *Siemens* gehen.

Der Entwicklungsingenieur Erich Waldkötter hatte für *Siemens* bereits während des Krieges in der nach Sörnowitz (in der Nähe von Dresden) ausgelagerten Selengleich- richterfertigung gearbeitet und war nach dem Krieg zur *Deutschen Grammophon* nach Hannover gekommen. Dort hatte er mit deren Apparaten erste Versuche zur Entwicklung eines Aufdampfverfahrens für Selengleichrichter durchgeführt. Erst im Herbst 1947 kam er nach Pretzfeld, wo er die erste Vakuumbedampfungsanlage für Selengleichrichter von *Siemens* entwickelte. Die darin hergestellten Selengleichrichter

71 Ebenda.

72 Ebenda.

73 Bericht von Scharowsky, 1947, zitiert nach Tschermak, *Leistungshalbleiterelemente*, 1976, ESD(a) 017, S. 3.

74 Geschäftsbericht 1950/51. Zentral-Werksverwaltung, Erlangen, Nov. 1951, S. 13 b, SAA 15 / Lk 961.

75 Tschermak, *Leistungshalbleiterelemente*, 1976, ESD(a) 017, S. 3.

76 „Selengleichrichter“ in „Die Arbeiten des Labors“, bearbeitet von H. Benda, R. Emeis, A. Herlet, A. Hoffmann, H. Patalong, W. Keller, K. Reuschel, N. Schink, K. Wartenberg, SAA 68 / Li 385 A.

zeigten zwar gute Sperrspannungen, aber sehr schlechte Durchlaßeigenschaften und blieben somit hinter den mit dem Schmiervfahren hergestellten zurück.⁷⁷

Der Grund für die schlechteren Durchlaßeigenschaften der bedampften Selengleichrichter wurde durch den Physiker Dr. Hans Schweickert geklärt, der zunächst vermutete, „daß ja auch auf der Rückseite zwischen Selen und Trägerplatte eine gleichrichtende Sperrschicht entstehen könne, deren Richtungssinn aber dem der normalen Randschicht an der Deckelektrode entgegengesetzt ist“. Bei näherer Untersuchung stellte sich heraus, daß es sich bei dem bekannten „grauen Schimmer“ des *Siemens*-Schmiervfahrens um eine Nickelselenid-Schicht handelte, die sich auf der als Grundlage dienenden vernickelten Eisenscheibe bildete. Diese Zwischenschicht sorgte beim „Schmiervfahren“ für eine sperrfreie Kontaktierung an der Rückseite, fehlte aber beim Aufdampfverfahren. Entsprechend wurden nun beim Aufdampfverfahren die vernickelten Eisenscheiben vor dem Bedampfen „selenidiert“, das heißt, eine hauchdünne Nickelselenid-Schicht wurde gebildet. Dadurch konnten die Durchlaßeigenschaften stark verbessert werden.⁷⁸

Die charakteristische Eigenschaft eines Gleichrichters, die eigentliche Sperrwirkung, sollte zwischen der Deckelektrode aus Zinn-Cadmium und dem Selen nach der Schottky-Theorie durch eine „physikalische Sperrschicht“ stattfinden. Experimente mit unterschiedlichem Deckelektrodenmaterial führten bei der AEG noch während des Krieges zu der Erkenntnis, daß Cadmium das für Sperreigenschaften entscheidende Material sei. Darüber hinaus vermochten gezielte Zusätze von Thallium die Sperreigenschaften zwar noch zu verbessern, bei Zugabe von zuviel Thallium verschlechterten sich die Durchlaßeigenschaften aber extrem. 1942 hatte der Wechsel zu einem Cadmium mit zu hohem Thalliumanteil dazu geführt, daß die Versorgung der Luftwaffe mit Selengleichrichtern stark gefährdet war, da diese Selengleichrichter zur Stromversorgung ihrer Radargeräte benötigte. Diese manchmal als „Thalliumkatastrophe“ bezeichnete Situation konnte aber binnen weniger Monate auf empirischem Wege geklärt werden und ein zu hoher Thalliumanteil vermieden werden.⁷⁹

Sowohl die starke Abhängigkeit von der Thalliumkonzentration als auch die einseitige Bevorzugung von Cadmium als Deckelektrodenmaterial war nach der Schottky-Theorie nicht zu verstehen. Auf einem geheimen Kolloquium im November 1944 in Prag trugen die AEG-Mitarbeiter W. Koch und S. Poganski ihre Hypothese vor, daß die Sperreigenschaften der Selengleichrichter durch chemische Zwischenschichten beeinflusst würden. Der anwesende Walter Schottky zeigte sich sehr interessiert, „weil diese offensichtlich die Ursache für die Ungültigkeit seiner Randschichttheorie bei Selengleichrichtern sind.“⁸⁰

Während des Krieges kam es aber zu keiner endgültigen Klärung dieser Frage mehr, so daß die Zwischenschichten nach dem Krieg sowohl in Pretzfeld bei *Siemens* als auch bei der AEG weiter untersucht wurden. Unter Berücksichtigung der Vorkriegsergebnisse war man sich in Pretzfeld schnell darüber einig, daß sich bei der Herstellung von Selengleichrichtern eine Cadmiumselenid-Zwischenschicht zwischen dem Decklot und dem Selen bildet.⁸¹ Im Jahresbericht 1951/1952 konnte Dr. Arnulf Hoffmann aus seiner Arbeitsgruppe berichten:

„Die Wirkungsweise der CdSe-Zwischenschicht konnte etwas geklärt werden. Sie wirkt sicher nicht als hochohmige Isolierschicht mit Löchern (Vielfachspitzen-

⁷⁷ Tschermak, *Leistungshalbleiterelemente*, 1976, ESD(a) 017, S. 2-4.

⁷⁸ Spenke, *Frühgeschichte der Halbleiter-Elektronik*, 1982, ESD(a) 064, S. 25.

⁷⁹ Ebenda, S. 18-21.

⁸⁰ Poganski, *Geschichtlicher Überblick*, 1984, S. 2-3, ESD(a) 272.

⁸¹ Daß die Sperrschicht auf die Bildung eines Selenids zurück zu führen sei, war schon vor dem Krieg unter anderem von Hans Schweickert vorgeschlagen worden (Schweickert, *Über Selengleichrichter*, 1939). Für die Ergebnisse während des Krieges siehe Meyeren, *Halbleitergleichrichter*, 1948.

gleichrichterwirkung). Vielmehr leitet sie quer über den ganzen Querschnitt gleichmäßig und zwar mit Elektronen als Stromträgern (n-Leitung). Die gleichrichtenden Prozesse finden sicher nicht an der Grenze Decklotmetall-CdSe-Zwischenschicht statt und wahrscheinlich auch nicht innerhalb der CdSe-Schicht, sondern höchstwahrscheinlich an der Grenze CdSe gegen Se.“⁸²

Damit war der Selengleichrichter als ein pn-Gleichrichter aus dem p-leitenden Selen und dem n-leitenden Cadmiumselenid erkannt. Spenke ging wenig später noch etwas weiter und zog den allgemeinen Schluß, daß „es sich schon immer bei allen technisch wichtigen Gleichrichtern um mehr oder weniger verkappte pn-Wirkungen“ gehandelt habe.⁸³

Parallel zu dieser Erkenntnis waren die Selengleichrichter serienreif geworden, so daß die Firmenleitung beschloß, im Berliner Schaltwerk eine Großserienproduktion aufzubauen. Dort ist in weiteren Serienuntersuchungen das Herstellungsverfahren für die Selen-Einheitsplatte (im Format 200 x 400 mm) noch optimiert, die Spannung in Durchlaßrichtung verringert und die Sperrfähigkeit verbessert worden. Die bei *Siemens* gefertigten Selengleichrichter wurden ein großer wirtschaftlicher Erfolg. Sie konnten sich am Markt ab Mitte der 1950er Jahre gegen die zunächst führenden AEG-Produkte durchsetzen und eine Führungsposition einnehmen, die sie bis in die Mitte der 1960er Jahre nicht abgeben mußten.⁸⁴

Mit der erfolgreichen Klärung des Funktionsmechanismus der Selengleichrichter und der Einrichtung einer Fertigung im Berliner Schaltwerk hatte das Pretzfelder Labor ein Stück seiner Existenzberechtigung verloren, da auf diesem Gebiet weitere intensive Forschungen in einem eigenen Forschungslaboratorium nicht nötig schienen. Daher wollte auch das Berliner Schaltwerk die weitere Entwicklungsarbeit nach *Siemens*-Tradition in das entsprechende Werkslaboratorium verlagern, in dem die konkreten Fertigungsprobleme in unmittelbarem Kontakt mit der Produktion geklärt werden sollten.

In dieser Situation gelang es Spenke, den Fortbestand des Pretzfelder Laboratoriums zu retten, indem er die dortigen Forschungen auf die 1951 modernen Halbleitermaterialien Germanium und Silizium umorientierte.⁸⁵

Transistorentwicklung in Frankreich - Mataré und Welker

Im Laufe des Jahres 1946 waren sowohl Herbert Mataré als auch Heinrich Welker unabhängig voneinander von Vertretern des *British Intelligence Objectives Sub-Committee* (BIOS) und den *Field Information Agencies Technical* (FIAT) zu ihren Kriegsforschungen befragt worden. Beide gaben bereitwillig Auskunft und erhielten daraufhin von den französischen Vertretern der Kommissionen das Angebot, ihre Arbeiten in Paris fortzusetzen.⁸⁶

Da sie mit ihrer beruflichen Situation in Deutschland nicht zufrieden waren, akzeptierten sie das Angebot, siedelten Anfang 1947 nach Paris über und bauten dort innerhalb eines Forschungsprogramms des *Centre National d'Etudes des Télécommunications* (CNET) ein Halbleiterlaboratorium für die *Compagnie des Freins et*

⁸² Jahresbericht des LH Pretzfeld über das Geschäftsjahr 1951/1952, ESD(a) 003.

⁸³ Spenke, *Elektronische Halbleiter*, 1956, S. 114.

⁸⁴ Oszietski, *Frühe Halbleiterforschung*, 1989, S. 147-148; Erker, *Forschung und Entwicklung*, 1993, S. 271; „Selengleichrichter“, SAA 68 / Li 385 A.

⁸⁵ Siehe dazu das Kapitel „Das Laboratorium für Halbleiter in Pretzfeld“ ab S. 167.

⁸⁶ Siehe dazu Welker/Ringer, *Investigations about Ge-Detectors*, 1946, HWD 002; Welker an BIOS/FIAT, 15. April 1946, HWD 002 und BIOS-Report 725.

Zu den Aktivitäten von FIAT und BIOS siehe allgemeiner Gimbel, *Science*, 1990.

Signaux (CFS) Westinghouse auf.⁸⁷ Ihre Familien kamen erst im Laufe des Jahres hinterher.⁸⁸

Heinrich Welker als „unabhängiger Ingenieur“

Mit Kriegsende hatte Welker seine Experimente mit dem „Dreielektrodenkristall“ aufgeben müssen. Im Vordergrund stand nun das Problem, sich und seine Familie zu ernähren. Er machte sich daher auf dem Gebiet der Halbleitertechnologie mit einem Ingenieurbüro in Planegg bei München, seinem Wohnort seit Oktober 1941, selbständig.⁸⁹ Dort arbeitete er offenbar in Kooperation mit Wolfgang Büll, der in Planegg eine kleine Firma mit dem Namen *Proton* zur Diodenfabrikation betrieb. Die Beziehung zu Büll war schon während der Kriegszeit entstanden, da auch Büll am *Flugfunk-Forschungsinstitut Oberpfaffenhofen* an der „Entwicklung der Kristallgleichrichter (Detektoren) für Zentimeterwellen“ gearbeitet hatte. Büll bot in der Nachkriegszeit Germaniumdetektoren in einem Quarzgehäuse für Zentimeterwellen an, die er 1942 am Flugfunk-Forschungsinstitut entwickelte hatte.⁹⁰

Welker interessierte sich neben dieser Tätigkeit aber auch für die akademische Laufbahn. Ende 1945 wollte ihn Arnold Sommerfeld für Vorlesungen und als kommissarischen Vertreter für den Lehrstuhl für Theoretische Physik an der Universität München gewinnen, doch als früheres SA-Mitglied und „Parteianwärter“ mußte Welker fürchten, daß die Militärregierung ihn nicht akzeptieren würde.⁹¹ In der Tat wurde Sommerfelds Ersuchen mit der Begründung abgelehnt, daß Welker in seiner Studienzeit SA-Mitglied gewesen war.⁹²

Zur gleichen Zeit kümmerte Welker sich zwar um Bescheinigungen, die ihm bestätigten, daß er weder „im Parteibuch der hiesigen Ortsgruppe Planegg/Krailling“ geführt wurde, noch sich bei seiner Bewerbung 1940 in Gräfelfing „als Mitglied der NSDAP noch als Angehöriger der angeschlossenen Gliederungen bezeichnet“ hatte.⁹³ Doch sein Entnazifizierungsverfahren wurde - für die Vertretung des Sommerfeld Lehrstuhls zu spät - erst im Februar 1947 abgeschlossen. Welker wurde als Mitläufer eingestuft.⁹⁴

In der Zwischenzeit war der Sommerfeld-Lehrstuhl zunächst von Spenkes Doktorvater Richard Gans vertreten worden, der als Jude seine Professur in Königsberg 1935 hatte niederlegen müssen und unter abenteuerlichen Umständen den Zweiten

⁸⁷ Mataré-Interview 1998; Lebenslauf von Heinrich Welker in LMU E-II-N Welker; Personalakte Mataré, Hochschularchiv der RWTH Aachen.

⁸⁸ Reisegenehmigung für Welker und seine Familie, 12. April 1947, HWD 005; Mataré-Interview 1998.

⁸⁹ Bestätigung der Gemeinde Planegg, 2. Nov. 1945, HWD 005.

⁹⁰ Für die Nachkriegsaktivitäten Bülls siehe Inserate von *Proton* in den ersten Nachkriegsausgaben der *Funkschau*. (Ich danke Berthold Bosch für diesen Hinweis.) Einen Überblick über die Produktion und die Produktpalette der ersten Jahre gibt Büll in Büll, *Kristaldioden*, 1950 und in weiteren Berichten in der *Funkschau* (z.B. „Proton-Breitband-Dioden“, *Funkschau* 1950, Jg. 22, Heft 23, S. 414).

Zu den Entwicklungen während des Krieges siehe Büll, *Kristallgleichrichter*, 1943.

⁹¹ „Eine Vorlesung: ‚Einführung in die Theoretische Physik‘ soll im kommenden Wintersemester (3stündig + 1 Übungsstunde, Beginn voraussichtlich Anfang Januar) von meinem früheren Assistenten Dr. Welker abgehalten werden. Es könnte aber sein, daß er als ‚Parteianwärter‘ abgelehnt wird.“ Sommerfeld an Gans, 6. Dez. 1945 zitiert nach Swinne, *Richard Gans*, 1992, S. 133-134.

⁹² Sommerfeld an Heisenberg, 17. Februar 1946, Archiv des Max-Planck-Instituts für Physik, München.

⁹³ Bestätigung der Gemeinde Planegg, 2. Nov. 1945, HWD 005; Bescheinigung des FFO, gez. Rendla, „der von der Milit. Reg. beauftragte Treuhänder“, 9. April 1946, HWD 005.

⁹⁴ Aus Welkers „Spruchkammerbescheid“ vom 4. Feb. 1947 geht hervor, daß er von 1934 bis 1939 „SA-Student“, von 1937 bis 1939 NSDAP-Anwärter gewesen war und von 1942-1945 der NS-Volkswohlfahrt angehörte. Er wurde daraufhin als „Mitläufer“ eingestuft und mit einer Geldstrafe von 500 Mark belegt („Spruchkammerbescheid“ in LMU E-II-N Welker).

Weltkrieg in Deutschland überlebt hatte. Da Sommerfeld seinen Vertreter Richard Gans als „keine analytische Fortsetzung der Sommerfeldschule“⁹⁵ ansah, legte Gans seine Vertretungsprofessur zum Ende 1946 nieder. Einerseits wollte er mit seinen Söhnen nach Argentinien zurückkehren, wo diese geboren waren, und andererseits war er aber auch darüber verärgert, daß er sich „seit 9 Monaten bei allen ausschlaggebenden Instanzen vergeblich bemüht habe, die Entnazifizierung eines Assistenten und des früheren Institutsmechanikers durchzusetzen, und [er] auch keine Hoffnung habe, dies in absehbarer Zeit zu erreichen.“⁹⁶ Da aus unterschiedlichen Gründen weder Werner Heisenberg noch Hans Bethe für die Sommerfeld-Nachfolge zu gewinnen waren, wurde der Lehrstuhl schließlich 1947 von Fritz Bopp übernommen.⁹⁷

Ohne Hoffnung auf eine akademische Karriere wechselte Welker Anfang 1947 nach Paris und baute dort gemeinsam mit Herbert Mataré ein Halbleiterlaboratorium auf.

Herbert Mataré als Lehrer und Assistent

Herbert Mataré war nach Schließung des Telefunkenlabors im Thüringer Wald zunächst zu seiner Familie nach Wabern bei Kassel gegangen. Durch seine Englischkenntnisse kam er schnell mit den dortigen amerikanischen Offizieren in Kontakt, die ihm anrieten, sich am College der 3. amerikanischen Infanteriedivision in Wabern als Lehrer zu bewerben. Dort konnte er ab Oktober 1945 Studenten des 2. und 3. Semesters, die in den USA studierten, aber zum Militär verpflichtet waren, in Physik und Mathematik unterrichten.⁹⁸ Nach Schließung dieses Colleges wurde er an die „San Francisco Technical University“ in Eschwege versetzt, wo er seine Lehrtätigkeit fortsetzte und auch ein physikalisches Demonstrationslaboratorium einrichtete.⁹⁹

Nachdem die Technische Hochschule in Aachen im Januar 1946 wieder eröffnet worden war, nahm Mataré zum Juli 1946 eine auf neun Monate befristete Stelle als planmäßiger Assistent am Physikalischen Institut bei Prof. Wilhelm Fucks an. Mataré hatte Fucks während seines Studiums in Aachen noch als Dozenten und Extraordinarius für Theoretische Physik kennengelernt, doch während des Krieges war Fucks zum Lehrstuhlinhaber für Experimentalphysik und somit zum Direktor des Physikalischen Instituts befördert worden.¹⁰⁰

Da gegen Mataré aus der NS-Zeit nichts Belastendes vorlag, erhob auch die „Special Branch“ bei der Militärregierung Aachen mit Billigung des Untersuchungsausschusses der TH Aachen und des Entnazifizierungsausschusses der Stadt Aachen keine Einwände gegen Matarés Tätigkeit an der TH Aachen.¹⁰¹

Als planmäßigem Assistenten am Physikalischen Institut oblag Mataré die Durchführung von einführenden Lehrveranstaltungen in Physik und in Kooperation mit dem Institut für Elektrotechnik von Walter Rogowski auch in Elektrotechnik.¹⁰² For-

⁹⁵ Sommerfeld an Bethe, 1. Nov. 1946, zitiert nach Swinne, *Richard Gans*, 1992, S. 141-142 und Eckert, *Atomphysiker*, 1993, S. 257.

⁹⁶ Gans an die Naturwissenschaftliche Fakultät der Universität München, 24. Dez. 1946, zitiert nach Swinne, *Richard Gans*, 1992, S. 140-141.

Ob es sich bei dem genannten Assistenten um Heinrich Welker gehandelt hat, ist nicht geklärt, jedoch kannten sich Welker und Gans recht gut, wie ihr Briefwechsel ab 1947 belegt. HWD 006.

⁹⁷ Zur Biographie von Richard Gans siehe Swinne, *Richard Gans*, 1992. Zur Sommerfeld-Nachfolge nach 1945 siehe Eckert, *Atomphysiker*, 1993, S. 256-261.

⁹⁸ Mataré-Interview 1998.

⁹⁹ Personalakte Mataré, Hochschularchiv der RWTH Aachen.

¹⁰⁰ Zu Wilhelm Fucks siehe seinen Nachruf, HA 160b und weitere Unterlagen im Hochschularchiv der RWTH Aachen. Zur Wiedereröffnung der TH Aachen nach dem Krieg, besonders im Hinblick auf die Schwierigkeiten, politisch unbelastete Professoren zu finden, siehe Ricking, *Geist bewegt Materie*, 1995, S. 157-168.

¹⁰¹ Personalakte Mataré, Hochschularchiv der RWTH Aachen.

¹⁰² Mataré-Interview 1998.

schungsmöglichkeiten bestanden für Mataré aber zunächst nicht, da in Aachen vieles zerstört war und der Wiederaufbau sowie die Ausbildung der nächsten Studentengeneration im Vordergrund standen. Nach Matarés Einschätzung konnte er mit einer Möglichkeit zu selbständiger Forschung in den nächsten Jahre nicht rechnen. Daher akzeptierte auch er das Angebot der französischen Post, in Paris auf dem Gebiet der Halbleiterforschung tätig zu werden.¹⁰³

Matarés Familie mußte zunächst in Deutschland zurückbleiben. Ihr war aber eine Sonderbehandlung versprochen worden, und sie wurde zunächst von Wabern nach Säckingen (Baden) in die französische Zone gebracht.

„Zuerst haben die Franzosen meine Familie nach Säckingen in Baden gebracht, das die Franzosen besetzt hatten. Es sollten auch besondere Rechte und besondere Karten existieren, was aber sehr lange dauerte. Ich war inzwischen in Paris und habe mich mit Welker eingerichtet, wir hatten erst eine Wohnung im Hotel und dann konnten wir uns ein Haus suchen, eine Privatwohnung, damit die Familie nachkommen konnte. Das kam erst viel später.“¹⁰⁴

Mit dem 15. Februar 1947 schied Mataré offiziell aus der TH Aachen aus und siedelte nach Paris über.¹⁰⁵

Germaniumdioden

In Paris arbeiteten Mataré und Welker ab Anfang 1947 für die *Compagnie des Freins et Signaux (CFS) Westinghouse*, die regelmäßig Forschungsaufträge für die französische Post durchführte.¹⁰⁶ In einem dieser Aufträge sollte die CFS Westinghouse die Materialeigenschaften und Produktionsverfahren von Silizium- und Germaniumdetektoren erforschen. Das *Comité de Coordination des Télécommunications Imperiales*, die zuständige Planungsbehörde der Post, hatte zu diesem Thema mit der CFS Westinghouse im Dezember 1946 einen Vertrag über 6 Millionen (alte) Franc für Forschung und Produktion abgeschlossen. Obwohl der offizielle Beginn der Förderung auf März 1947 verschoben worden war, hatte die CFS Westinghouse das Projekt schon Ende 1946 gestartet.¹⁰⁷

Bis dahin hatte die CFS Westinghouse auf dem Halbleitersektor lediglich mit Selengleichrichtern Erfahrung gesammelt, wollte aber das Arbeitsgebiet auch auf Hochfrequenzdioden ausweiten. Dazu mußte zu den Materialien Germanium und Silizium übergegangen und, um Verunreinigungen zu vermeiden, ein von den Selenarbeiten getrenntes Labor eingerichtet werden. Die aus Deutschland angeworbenen Spezialisten Herbert Mataré und Heinrich Welker bekamen daher den Auftrag, in Aulnay-sous-Bois in der Nähe von Paris ein Laboratorium einzurichten, in dem Techniken zur Herstellung von Silizium- und Germanium-Dioden sowie zur Reinstdarstellung dieser Elemente untersucht werden konnten. Literaturrecherchen sowie Untersuchungen des Metall-Halbleiter-Kontakts gehörten ebenfalls zu ihren Aufgaben.¹⁰⁸

Mataré erinnert sich, daß sie ein völlig leeres Gebäude vorfanden, das mit nur geringen Finanzmitteln zu einem funktionsfähigen Forschungslabor umzuwandeln war. Es

¹⁰³ An den anderen Universitäten bot sich ein ähnliches Bild. Beispielsweise wurden in Hamburg bis 1948 kaum langfristige Forschungsvorhaben aufgenommen oder fortgesetzt. (Sywottek, *Kontinuität und Neubeginn*, 1991, S. 1403-1404.)

¹⁰⁴ Mataré-Interview 1998.

¹⁰⁵ Personalakte Mataré, Hochschularchiv der RWTH Aachen.

¹⁰⁶ Siehe dazu Bothelo, *Industry Policy*, 1994, S. 166-169; Lebenslauf von Heinrich Welker in LMU E-II-N Welker; Mataré-Interview 1998.

Die *Compagnie des Freins et Signaux Westinghouse* war als ein Ableger der amerikanischen *Westinghouse Electric* in Paris gegründet worden und wurde später vom Staat und zum Teil von französischen privaten Firmen übernommen, so daß die *Compagnie des Freins et Signaux Westinghouse* 1947 nicht mehr mit der Muttergesellschaft verbunden war.

¹⁰⁷ Bothelo, *Industry Policy*, 1994, S. 166-168.

¹⁰⁸ Ebenda, S. 168.

wurden zwei Bereiche eingerichtet. Welker war für das Ziehen der Kristalle zuständig, Mataré kümmerte sich um die Herstellungstechnik der Dioden und die Hochfrequenzmessungen.

„Welker und ich hatten das Labor von Grund auf aufzubauen. Hier ist ein leeres Gebäude. Der eine richtete die Kristallsache ein, der andere macht die Detektoren fertig für die Messungen und Lieferung. Das mußten wir uns einteilen. Mehr war da nicht.“¹⁰⁹

Welker richtete eine Kristallschmelzapparatur ein, die es ihm ermöglichte, Germanium im Vakuum mit möglichst wenig Verunreinigungen zu schmelzen. Dazu erhitze er induktiv das in einem Schmelztiegel aus gereinigtem Quarz liegende Germanium im Vakuum durch einen Hochfrequenzsender bis knapp über den Schmelzpunkt von ca. 960°C. Bei diesen Temperaturen führte der Kontakt mit dem gut vorgereinigten Tiegelmateriale zu keinen nennenswerten Verunreinigungen. Kühlte man die Schmelze langsam ab, war es möglich, daß sie von einem Punkt aus kristallisierte und so einen Einkristall bildete. Wahrscheinlicher war allerdings, daß sich mehrere Kristallisationskerne bildeten und daher polykristallines Germanium entstand. Meist entstanden daher kleine polykristalline Kristallnadeln aus Germanium mit kleinen monokristallinen Bereichen. Mataré baute die so gewonnenen Kristallnadeln in Detektoren ein, prüfte sie auf dem von ihm errichteten Hochfrequenzprüfstand und machte sie für die Lieferungen fertig.

Ziel dieser Arbeiten war es, Germaniumdetektoren zu entwickeln, die den bekannten *Sylvania*-Detektoren vergleichbar waren. *Sylvania*-Detektoren bestanden aus Germanium und waren während des Krieges in den USA von der *Sylvania Electric Products Company* hergestellt worden.¹¹⁰

Daher konzentrierten sich Mataré und Welker darauf, Herstellungsverfahren für Germaniumdetektoren zu entwickeln. Sobald erste Verfahren zur Verfügung standen, wurde die Produktion aufgenommen. Erste Berichte aus der Produktion zeigten aber Mitte 1947, daß die bisher produzierten Detektoren schlechter als vergleichbare amerikanische Detektoren arbeiteten. Optimistisch versprach der Direktor von *Westinghouse* Paris, A. Engel, bald Abhilfe. Als jedoch Anfang 1948 bereits 3000 Detektoren pro Monat produziert wurden, war der Hauptabnehmer, die französische Armee, mit deren Hochfrequenzverhalten immer noch nicht zufrieden. Erst ab Anfang 1949 konnten 10000 bis 20000 (Misch-)Dioden pro Monat produziert werden, die hinunter bis zu einer Wellenlänge von 3 cm mit akzeptabler Leistung arbeiteten.¹¹¹

Schon seit Beginn der ersten Produktionslinie Mitte 1947 hatten Mataré und Welker mehr Zeit für ihre eigenen Forschungen, die sie nun parallel zu ihren Entwicklungsarbeiten an den Germaniumdetektoren durchführten. Aber richtig zufrieden mit ihrer Anstellung in einem kleinen, bescheiden eingerichteten Entwicklungslabor waren sie nicht und schauten sich daher auch nach anderen Möglichkeiten um. Beide erwogen sogar, eine Stelle in Argentinien anzunehmen. Denn im Frühjahr 1947 hatten sie Richard Gans in Paris getroffen, der sich auf der Durchreise nach Argentinien befand, wo er, bereits 66-jährig, eine Professur antreten wollte. Kaum dort angekommen berichtete er an Welker:

„An der Universität B[uenos] Aires will man ein Institut für Nachrichtentechnik gründen und braucht einen oder mehrere Spezialisten. ...
Ich weiß nicht, wie weit Sie selbst in Frage kommen oder Ihr Kollege, der mit Ihnen einmal bei uns im Hotel war ...“¹¹²

¹⁰⁹ Mataré-Interview 1998.

¹¹⁰ Als mögliche Bezugsgröße könnte hier die *Sylvania*-Diode 1N34 gedient haben (siehe z.B. Thorrey/Whittmer, *Crystal Rectifiers*, 1948, S. 363-364).

¹¹¹ Bothelo, *Industry Policy*, 1994, S. 168 (Archivunterlagen SHAA E1 2216 und E7-2202).

¹¹² Gans an Welker, 9. Juli 1947, HWD 006.

Sowohl Mataré als auch Welker zeigten sich interessiert und reichten ihre Unterlagen an Gans weiter. „Manchmal scheint es so, als ob es glücken würde. Bisher hat es sich dann aber immer wieder zerschlagen. Sie können sich kaum vorstellen, wie viele hierher kommen möchten.“¹¹³ Noch im Mai 1950 hatte sich die Frage nicht völlig geklärt, Gans schrieb:

„Ausserdem ist hier der Markt ausländischer Wissenschaftler ziemlich gesättigt. Aber wo man heute gar keine Möglichkeit sieht, kann sich plötzlich einmal eine bieten, und ich werde dann auf Sie hinweisen und Ihnen Nachricht geben.“¹¹⁴

Mataré und Welker blieb nichts anderes übrig, als sich erst einmal in Paris einzurichten, und sich dort auf ihre eigenen Forschungen zu konzentrieren. Schon bei ihren Einstellungsgesprächen hatten sie darauf hingewiesen, daß sie an Forschungen an einem verstärkenden Halbleiterbauteil interessiert seien, doch nur Mataré begann nun, auch entsprechende Forschungen durchzuführen. Welker hatte sich frustriert durch seine bisherigen Mißerfolge von diesem Thema abgewandt und konzentrierte sich wieder auf seine in der Vorkriegszeit begonnenen Arbeiten zur Theorie der Supraleitung.¹¹⁵

Von der Kristallduodiode zum „Transistron“

Wie bereits erwähnt, hatte auch Mataré schon während des Krieges die Idee eines verstärkenden Drei-Elektroden-Kristalls entwickelt. Dabei war er von seinen Experimenten mit Kristallduodioden ausgegangen, die zur Rauschkompensation beim Überlagerungsempfang genutzt werden sollten. Während des Krieges konnte er damit aber keine reproduzierbaren Erfolge erzielen, da die Charakteristiken der beiden Metall-Halbleiter-Kontakte auch bei sehr eng benachbarten Spitzen nicht identisch waren. In Paris setzte er nun seine Arbeiten in dieser Richtung fort.¹¹⁶

Im Mai 1947 reichte er in Frankreich und im April 1948 in den USA ein Patent zur Realisierung einer Kristallduodiode unter dem Namen „Push-Pull Konverter“ ein.¹¹⁷ Dort schlug er allerdings nicht wie in den vorhergehenden Versuchen zwei nebeneinander liegende Punktkontakte vor, sondern beschrieb elektrolytisch aufgebrauchte Kontakte an gegenüberliegenden Seiten eines Metallplättchens (siehe Abb. 27).

Auf das dünne Metallplättchen (siehe Abb. 27; 1) wurde in einem Verfahrensschritt auf beiden Seiten eine halbleitende Schicht (3a, 3b) aufgebracht. Bringt man nun auf den beiden gegenüberliegenden Seiten jeweils einen Punktkontakt an, wird der Abstand zwischen ihnen im wesentlichen durch die Dicke des Metallplättchens und diejenige der halbleitenden Schichten bestimmt. Dadurch konnten die für die Arbeit im Zentimeterwellenbereich nötigen kleinen Gerätedimensionen erreicht werden. Die geringe Auflagefläche der Punktkontakte sorgte dafür, daß auch die durch die Sperrschicht des Detektors gebildete Kapazität möglichst klein war. Die Punktkontakte sollten nach einer 1943 von Mataré patentierten Methode hergestellt werden. Dabei wurden beispielsweise durch Funkenentladung Löcher in der isolierenden Schicht (6a, 6b) erzeugt, die dann im Idealfall sehr klein waren und sich nach außen konisch erweitern. Diese Löcher wurden dann durch Aufdampfen oder Auelektrolytierung mit einem Metallpfropfen gefüllt.¹¹⁸

¹¹³ Gans an Welker, 26. Dez. 1947 und 31. Juli 1948 (Zitat), HWD 006.

¹¹⁴ Gans an Welker, 6. Mai 1950, HWD 006.

Mataré wurde 1953 tatsächlich nach Buenos Aires berufen, entschied sich aber wegen der besseren Forschungsmöglichkeiten für eine Karriere in den USA.

¹¹⁵ Mataré, *Lebenslauf*, Archiv DM; Mataré-Interview 1998.

¹¹⁶ Siehe zu Matarés früheren Arbeiten die Kapitel „Überlagerungsempfang“ ab S. 65 und „Weitere Forschungen im Telefunken Laboratorium“ ab S. 73.

¹¹⁷ Mataré, *Push-Pull Converter*, 1948, US-Patent 2,552,052.

¹¹⁸ Telefunken/Mataré, *Kristalldetektor*, 1944, Schweizer Patent 243490.

Ausschlaggebend war bei dieser Anordnung allerdings, daß es gelang, auf beiden Seiten des Metallplättchens eine halbleitende Schicht mit genau gleicher Charakteristik aufzubringen. Mataré behauptete im Patent zwar, daß dies möglich sei:

„It is actually possible to produce composite layers of predetermined and identical properties on both sides of the metal base plate in the course of a single operation.“¹¹⁹

Es haben sich aber nur einzelne der so hergestellten Push-Pull Konverter zur Rauschkompensation geeignet, denn mit den damals zur Verfügung stehenden Methoden war es sehr schwierig, zwei gegenüberliegende Halbleiterschichten mit exakt gleichen Charakteristiken zu erzeugen. Daher testete Mataré parallel zur Patentanmeldung auch noch andere Anordnungen. Schließlich kam er zu den Experimenten zurück, bei denen zwei Metallspitzen dicht nebeneinander auf einem Germaniumkristall angebracht wurden. Er hoffte mit den nun im Vergleich zur Kriegszeit besseren Kristallen gleiche Charakteristika der beiden Metall-Halbleiterkontakte zu finden. Die immer noch geringe Reinheit und die sehr kleinen Germaniumkristalle erschwerten diese Versuche zwar sehr, doch Ende 1947 stellten sich erste Erfolge in der Rauschkompensation ein.

Im Laufe dieser Arbeiten bemerkte Mataré auch, daß er „mit einer Seite positiv vorgespannt, die andere verstärkt steuern konnte“. Aber mit den sehr kleinen Kristallen, die Welker zunächst produziert hatte, war der verstärkende Effekt nur schlecht reproduzierbar.¹²⁰

Sein Kollege Welker hatte schon während des Krieges mit der Herstellung von Germaniumkristallen Erfahrung sammeln können und in Paris daran angeknüpft. Das Germanium für die Laborversuche wurde von der belgischen Minen-Gesellschaft „Vieille Montagne“ und den deutschen *Otavi-Minen Co.* geliefert. In seiner Reinheit war dieses Germanium noch nicht sehr gut und mußte daher mehrfach kristallisiert werden, um die Verunreinigungen abzuscheiden.¹²¹ Auch schon bei der Beschaffung traten die üblichen Nachkriegsprobleme auf. Beispielsweise mußte Mataré, um das Germanium aus Deutschland zu bezahlen, Lebensmittel zu einem Kontaktmann schicken, der dann für den Gegenwert das Germanium kaufte und es nach Paris schickte. Der Grund für dieses Vorgehen war, daß vor der Währungsreform die Mark in Frankreich nicht als Zahlungsmittel akzeptiert wurde und danach die deutsche Mark nicht sofort konvertiert wurde.¹²²

Welker war mit dem so beschafften *Germanium* sparsam umgegangen und hatte daher zunächst nur sehr kleine und dünne Germanium-Kristallnadeln in Graphitformen hergestellt, die für den Bau von Detektoren aber ausreichten. Mataré vermutete nun, daß größere Kristalle die Steuerung eines Stromes im Halbleiter eher erlau-

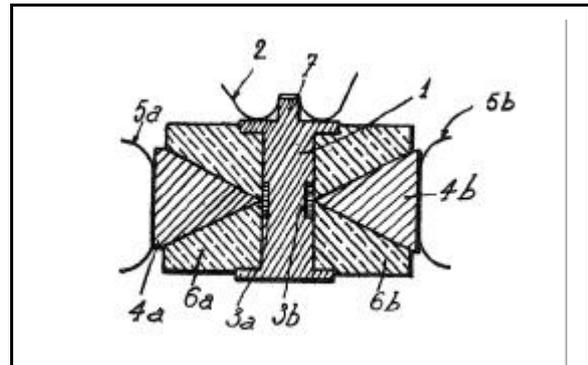


Abb. 27: Push-Pull Konverter.

- 1 Metallplättchen;
- 2 Kontakt;
- 3a, 3b halbleitende Schicht;
- 4a, 4b Kontaktmetall;
- 5a, 5b Kontakte;
- 6a, 6b Isolierschicht;
- 7 Erhebung, zur Erleichterung des Kontakts zwischen 1 und 2.

(Abbildung aus Mataré, *Push-Pull Converter*, 1948, US-Patent 2,552,052.)

¹¹⁹ Mataré, *Push-Pull Converter*, 1948, US-Patent 2,552,052, S. 2.

¹²⁰ Mataré Interview 1998, Mataré, pers. Mitteilung, 18. Dez. 1997, S. 3 (Zitat).

¹²¹ Mataré, *Lesser known*, 1997 (Manuskript), S. 5-7.

¹²² Mataré-Interview 1998.

ben würden und bat Welker, solche Kristalle herzustellen. Mit diesen konnte Mataré ab Anfang 1948 dann regelmäßig Stromsteuerung erzielen.¹²³

„Transistron“ - der französische Transistor

Diese positiven Ergebnisse erneuerten Welkers Interesse am Drei-Elektroden-Kristall, und er versuchte zu verstehen, wie das realisierte Bauteil funktionierte. Ausgehend von der Schottky-Theorie und seinen Überlegungen zu einem Feldeffekt-Transistor kam er schon bald zu dem Schluß, daß es sich auch bei dem vorliegenden Bauteil mit zwei Punktkontakten um einen Feldeffekt-Transistor handeln müsse. In einem Manuskript, das teilweise wörtlich in eine spätere Patentanmeldung einging, verglich er die beiden Anordnungen unmittelbar (siehe Abb. 28).

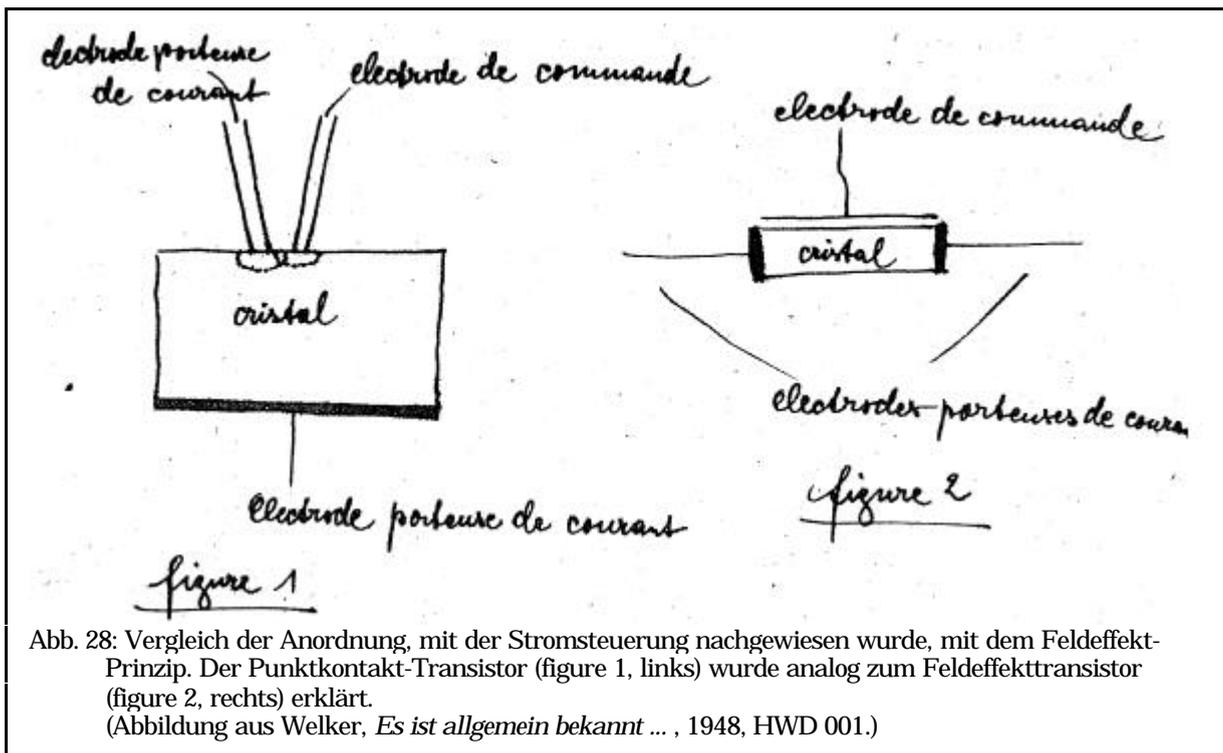


Abb. 28: Vergleich der Anordnung, mit der Stromsteuerung nachgewiesen wurde, mit dem Feldeffekt-Prinzip. Der Punktkontakt-Transistor (figure 1, links) wurde analog zum Feldeffekttransistor (figure 2, rechts) erklärt.
(Abbildung aus Welker, *Es ist allgemein bekannt ...*, 1948, HWD 001.)

Er führte aus:

“Eine derartige Anordnung mit der man wenigstens prinzipiell Ströme in einem Kristall steuern könnte besteht darin, daß man z.B. auf einem Detektorkristall [figure 1] benachbart zwei Spitzen aufsetzt. Der Abstand der beiden Spitzen muß dabei so gewählt werden, daß die eine Spitze in den Bereich der Sperrschicht der anderen fällt und umgekehrt.”¹²⁴

Dann wäre es möglich, mit der einen Spitze („électrode de commande“) die Sperrschicht der anderen Spitze („électrode porteuse de courant“) zu beeinflussen und den Strom zwischen den beiden „stromtragenden“ Elektroden („électrode porteuse de courant“) zu steuern. Praktisch war allerdings ein solches Arrangement sehr schwierig herzustellen, da die in Frage kommenden Sperrschichten zu klein waren, um darin zwei Metallspitzen zu plazieren. Welker kam daher zu dem Schluß, daß, selbst wenn man von „außerordentlich großen Sperrschichtdicken (bis zu 1 μ herauf)“ ausginge, die Realisierung der abgebildeten Anordnung „mit rein mechanischen Hilfsmitteln fast schon ein Produkt des Zufalls“ wäre.¹²⁵

¹²³ Mataré-Interview 1998, Mataré, *Lesser known*, 1997 (Manuskript), S. 6, Mataré, *Transistor in Gestation*, 1998.

¹²⁴ Welker, *Es ist allgemein bekannt ...*, 1948, HWD 001.

¹²⁵ Ebenda.

Mataré konnte aber zu seinem und Welkers größtem Erstaunen reproduzierbare Resultate noch bei Spitzenabständen in der Größenordnung von $100\ \mu$ vorweisen.¹²⁶ Folglich mußte eine andere Erklärung gefunden werden, die Mataré und Welker weiterhin auf Basis der Schottky-Theorie suchten und auch fanden. Sie meldeten daraufhin am 13. August 1948 in Frankreich ihr erstes gemeinsames Patent zu diesem Thema an.¹²⁷ Darin erklären sie ihren Transistor analog zu Welkers früheren Überlegungen als einen Sperrschicht-Feldeffekt-Transistor, der dadurch funktionierte, daß zwei Halbleiter unterschiedlichen Leitungstyps aufeinander trafen. Durch die sich dazwischen ausbildende Sperrschicht sollte eine gezielte Beeinflussung der einen Sperrschichtcharakteristik durch die andere Sperrschicht möglich sein. Sie schrieben:

„Ladite invention est essentiellement caractérisée par le fait qu'on associe dans un système à plusieurs électrodes au moins deux semi-conducteurs cristallins à caractères de conductibilité différents dont l'une des électrodes semi-conductrices constitue l'électrode de commande et comporte une couche d'arrêt ou de blocage superficielle.“¹²⁸

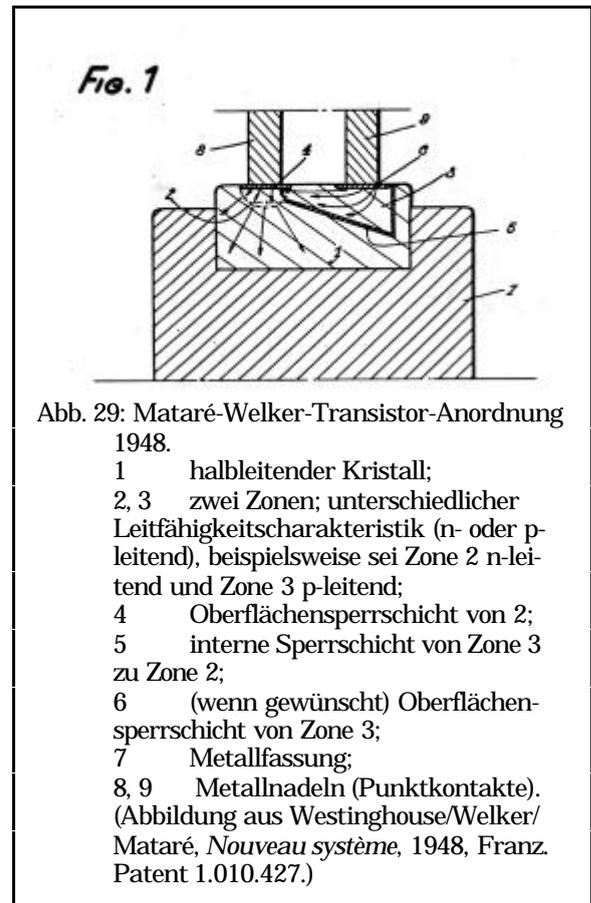


Abb. 29: Mataré-Welker-Transistor-Anordnung 1948.

- 1 halbleitender Kristall;
 - 2, 3 zwei Zonen; unterschiedlicher Leitfähigkeitscharakteristik (n- oder p-leitend), beispielsweise sei Zone 2 n-leitend und Zone 3 p-leitend;
 - 4 Oberflächensperrschicht von 2;
 - 5 interne Sperrschicht von Zone 3 zu Zone 2;
 - 6 (wenn gewünscht) Oberflächensperrschicht von Zone 3;
 - 7 Metallfassung;
 - 8, 9 Metallnadeln (Punktkontakte).
- (Abbildung aus Westinghouse/Welker/Mataré, *Nouveau système*, 1948, Franz. Patent 1.010.427.)

Wie die zwei unterschiedlich leitenden Bereiche in einem Kristall hergestellt werden sollten, wurde von Mataré und Welker nicht ausgeführt. Sie gingen aber davon aus, daß sie herstellbar waren und in den meisten Fällen durch eine sichtbare Korngrenze getrennt sein würden. Dann war es lediglich notwendig, die beiden Kontakte auf unterschiedlichen Seiten dieser Korngrenze anzubringen (siehe Abb. 29).

So sollte ihrer Meinung nach beispielsweise der Strom von der Metallspitze (8) durch den Halbleiterkristall zur Metallfassung (7) gesteuert werden, indem die Sperrschicht des Punktkontakts (4) durch Anlegen einer Steuerspannung an den p-leitenden Bereich (3) beeinflusst wurde.

Noch klarer wird diese grundsätzliche Idee in einer anderen Realisierung (Abb. 30), die von Welker vorgeschlagen wurde, aber im Gegensatz zur Spitzenanordnung (Abb. 29) nie funktioniert hat.¹²⁹

¹²⁶ Mataré-Interview 1998.

¹²⁷ Westinghouse/Welker/Mataré, *Nouveau système*, 1948, Franz. Patent 1.010.427 und Mataré/Welker, *Crystal Device*, 1949, US Patent 2,673,948.

¹²⁸ Westinghouse/Welker/Mataré, *Nouveau système*, 1948, Franz. Patent 1.010.427.

In der späteren US-amerikanischen Fassung liest sich der gleiche Absatz:

„A more specific object of this invention is a multi-electrode device with at least two semiconductors of different conductivity characteristics; one of the semiconductors forms a control electrode and includes a surface barrier layer.“ (Mataré/Welker, *Crystal Device*, 1949, US Patent 2,673,948).

¹²⁹ Mataré-Interview 1998.

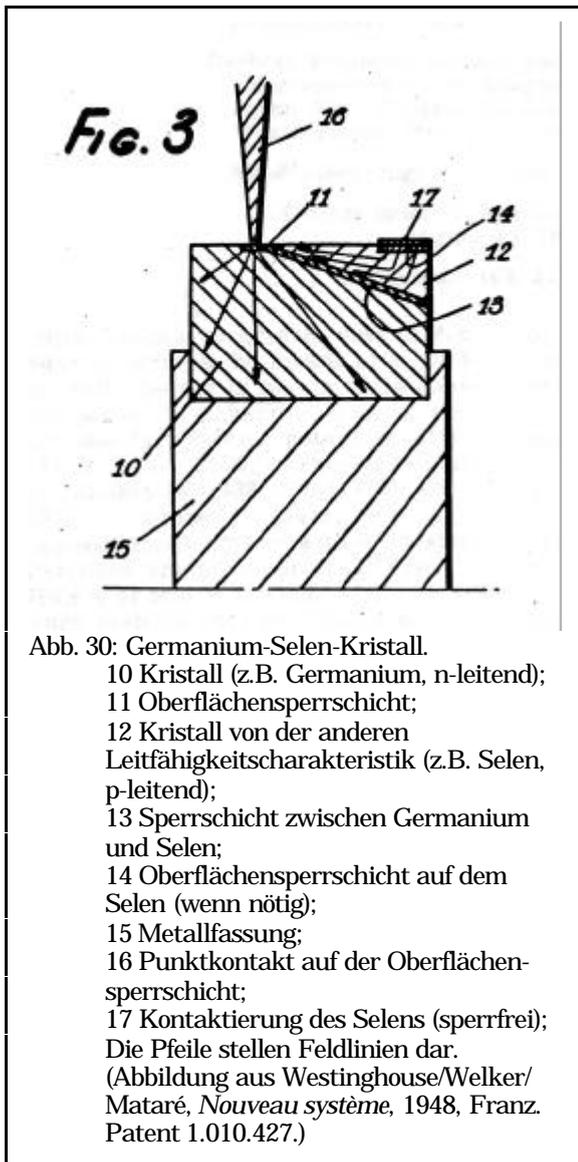


Abb. 30: Germanium-Selen-Kristall.
 10 Kristall (z.B. Germanium, n-leitend);
 11 Oberflächensperrschicht;
 12 Kristall von der anderen
 Leitfähigkeitscharakteristik (z.B. Selen,
 p-leitend);
 13 Sperrschicht zwischen Germanium
 und Selen;
 14 Oberflächensperrschicht auf dem
 Selen (wenn nötig);
 15 Metallfassung;
 16 Punktkontakt auf der Oberflächen-
 sperrschicht;
 17 Kontaktierung des Selens (sperrfrei);
 Die Pfeile stellen Feldlinien dar.
 (Abbildung aus Westinghouse/Welker/
 Mataré, *Nouveau système*, 1948, Franz.
 Patent 1.010.427.)

Auf einen n-leitenden Germaniumkristall wurde in der Nähe des Punktkontakts (16) ein p-leitender Selenkristall (12) aufgebracht, der ohne eine Sperrschicht auszubilden kontaktiert (17) werden konnte (Abb. 30). Durch das Anlegen einer Spannung an das Selen (17 bzw. 12) sollte nun die Sperrschicht des Punktkontakts (11) und damit der fließende Strom gesteuert werden.

Bei beiden Anordnungen - und auch bei den anderen in den Patenten vorgeschlagenen - handelte es sich um („unipolare“) Sperrschicht-Feldeffekt-Transistoren, bei denen nur jeweils eine Ladungsträgerart betrachtet wurde, die den Strom tragen sollte. Die Steuerung wurde durch ein angelegtes Kontrollfeld („le champ de commande“, „the control field“) gewährleistet.¹³⁰

Die Pfeile in den beiden Abbildungen (Abb. 29, Abb. 30) stellen entsprechend keine Ströme von Elektronen sondern Feldlinien dar.

Die von Welker und Mataré angegebene Erklärung für den an der Punktkontakt-Anordnung (Abb. 29) beobachteten Effekt der Stromsteuerung hielt sich vollständig an die theoretischen Vorstellungen des Schottky-Theorie. Heute muß allerdings angenommen werden, daß diese Punktkontakt-Anordnung auch wie ein Punktkontakt-Transistor und nicht wie ein Feldeffekt-Transistor funktioniert hat,

Welker und Mataré aber nicht in der Lage waren, sich von der Schottky-Theorie weit genug zu lösen, um den Punktkontakt-Transistor korrekt zu erklären. Dazu hätten sie beispielsweise die Injektion von „Löchern“ in das elektronenleitende Germanium zulassen und gleichzeitig den Einfluß von Majoritäts- und Minoritätsladungsträgern auf den fließenden Strom beschreiben müssen. Das war aber innerhalb des theoretischen Rahmens der von ihnen als „im Wesentlichen für zutreffend“¹³¹ gehaltenen Schottky-Theorie nicht möglich.¹³²

Erst die amerikanischen Physiker John Bardeen und Walter Brattain von den Bell-Laboratorien lösten sich weit genug von diesen Vorstellungen, um eine neue Erklärung für den Punktkontakt-Transistor vorzuschlagen. In Kriegsforschungen außerhalb des Radarprojekts waren sie im Gegensatz zu Mataré und Welker nicht täglich auf die Gültigkeit der Schottky-Theorie angewiesen gewesen und hatten daher weniger Probleme, sich in ihren Nachkriegsforschungen davon zu lösen. Ihre im wesentlichen bekannte Erfindung des Punktkontakt-Transistors wird nun kurz in einem

¹³⁰ Westinghouse/Welker/Mataré, *Nouveau système*, 1948, Franz. Patent 1.010.427 und Mataré/Welker, *Crystal Device*, 1949, US Patent 2,673,948.

¹³¹ Welker an BIOS, 15. April 1946, HWD 002.

¹³² Spenke hat später die Nichtbeachtung der möglicherweise gleichzeitig im Halbleiter vorhandenen Löcher und Elektronen als einen blinden Fleck der Schottky-Theorie charakterisiert (Spenke, *Leistungsgleichrichter auf Halbleiterbasis*, 1958, S. 872).

Exkurs dargestellt und danach in einzelnen Punkten mit Matarés und Welkers Arbeiten verglichen.

Exkurs: Erfindung des Punktkontakt-Transistors in den Bell Laboratorien¹³³

Die technischen Fortschritte mit den Halbleitermaterialien Germanium und Silizium während des Zweiten Weltkrieges waren auch von den Forschungsplanern der großen Industrielaboratorien nicht unbemerkt geblieben. Kommerziell verwertbare Produkte schienen in greifbare Nähe zu rücken. Schon seit 1943 entwickelte Mervin Kelly, der Forschungsdirektor der Bell Laboratorien, einen Plan für die Neuorganisation der dortigen Forschung in der Nachkriegszeit. Im Juli 1945, als sich das Ende des Krieges klar abzeichnete, strukturierte er die physikalische Forschungsabteilung so um, daß den Grundlagen der Festkörperphysik durch drei neue Forschungsgruppen mit den Themen „Elektronendynamik“, „Physikalische Elektronik“ und allgemein „Festkörperphysik“ größere Beachtung geschenkt wurde.

Die Leitung der Gruppe „Festkörperphysik“, die bereits seit März 1945 im Aufbau war, übertrug Kelly dem theoretischen Physiker William Shockley und dem Chemiker Stanley Morgan. Shockley übernahm auch direkt die Leitung der Untergruppe „Halbleiter“. Sein Team war interdisziplinär besetzt und bestand neben Shockley aus Experimentalphysikern, Chemikern und Elektronikspezialisten. Als weitere Verstärkung der Gruppe schlug Shockley vor, den als Festkörperspezialisten anerkannten theoretischen Physiker John Bardeen für die Gruppe zu gewinnen.¹³⁴

Bardeen hatte nach dem Studium der Elektrotechnik und erster Industrietätigkeit Mitte der 1930er Jahre bei Eugene Wigner in Princeton mit einem Thema aus der theoretischen Festkörperphysik promoviert. Darin beschäftigte er sich mit der Austrittsarbeit von Elektronen aus Metallen und konnte für Alkalimetalle gute quantitative Übereinstimmung seiner theoretischen Vorhersagen mit den experimentellen Daten erzielen.¹³⁵ In seiner anschließenden Zeit als Junior Fellow an der *Harvard University* arbeitete er eng mit dem Experimentalphysiker Percy Bridgman zusammen, der damals Untersuchungen zum Verhalten von Metallen bei hohen Drucken durchführte, für die er 1946 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet wurde. 1938 ging Bardeen als *Assistant Professor* an die *University of Minnesota* in Minneapolis und arbeitete dort an Problemen der Theorie der Supraleitung, bis er 1941 in die Kriegsforschung wechselte.

Als typischer amerikanischer theoretischer Physiker seiner Generation vereinigte Bardeen in einer Person eine fundierte quantenmechanische Ausbildung, die er zu einem großen Teil von den europäischen Pionieren der Quantenphysik und somit quasi aus erster Hand erhalten hatte, mit einer „operationalen“ Herangehensweise, die durch seine enge Zusammenarbeit mit Experimentatoren und Ingenieuren bedingt war.¹³⁶

Während des Krieges hatte Bardeen für die amerikanische Marine in Washington an Problemen des Schutzes von Schiffen gegen magnetische Minen gearbeitet. Als ihm gegen Ende des Krieges die Bell Laboratorien ein ausgesprochen attraktives Angebot machten, zögerte er nicht lange, nahm das Angebot sofort nach seiner Freistellung an

¹³³ Diese Geschichte ist gut erforscht und wird daher hier nur kurz referiert. (Siehe Hoddeson, *Point-Contact Transistor*, 1981; Riordan/Hoddeson, *Crystal Fire*, 1997; Riordan/Hoddeson, *Minority Carrier*, 1997; Bardeen, *Spitzenkontakt-Transistor*, 1957).

¹³⁴ Zur Umorganisation der Bell-Forschung nach dem Zweiten Weltkrieg siehe Eckert/Schubert, *Kristalle*, 1986, S. 173-181 und Riordan/Hoddeson, *Crystal Fire*, 1997, S. 108-120.

¹³⁵ Bardeen, *Work Funktion*, 1936.

¹³⁶ Zur Biographie von Bardeen siehe ausführlicher Riordan/Hoddeson, *Crystal Fire*, 1997. Zu seinem Forschungsstil und seinen Arbeiten zur Theorie der Supraleitung siehe Handel, *Research Styles*, 1996 und ausführlicher Handel, *Historische Entwicklung*, 1994.

und kam im Oktober 1945 zu den Bell Laboratorien in die Halbleitergruppe Shockleys.¹³⁷ Bardeen erinnerte sich später, daß, obwohl die Halbleitergruppe offiziell auf den Erwerb von Grundlagenwissen über Halbleiter ausgerichtet war, jeder das „Ziel im Hinterkopf [hatte], einen Verstärker aus halbleitendem Material zu bauen.“¹³⁸

William Shockley nutzte den Einstieg Bardeens bei den Bell Laboratorien sofort, um seine eigenen Rechnungen zu den gescheiterten Feldeffekt-Transistor-Experimenten von einem ausgewiesenen Experten in der theoretischen Festkörperphysik überprüfen zu lassen. Doch auch Bardeen kam zum gleichen Ergebnis wie Shockley: Bei den durchgeführten Experimenten hätte ein Feldeffekt nachgewiesen werden müssen. Aus der Tatsache, daß kein Feldeffekt nachgewiesen werden konnte, schloß Bardeen, daß irgend etwas verhinderte, daß das außen angelegte elektrische Feld in den Halbleiter eindrang und so die Ladungsträgerzahl beeinflusste. Im März 1946 kam er zu dem Schluß, daß es sich dabei um Oberflächenzustände handeln müsse, in denen Elektronen an der Oberfläche eines Halbleiters gefangen (lokalisiert) werden konnten.¹³⁹

Oberflächenzustände

Auf früheren Arbeiten seines Chefs Shockley aufbauend, kam Bardeen zu der Erkenntnis, daß an der Oberfläche der betrachteten Halbleiterkristalle neue, von der bisherigen Theorie nicht erwartete Effekte auftreten können. In der Quantentheorie der Festkörper wird zur Vereinfachung in der Regel ein unendlich großer Kristall angenommen. Reale Halbleiterkristalle sind aber nicht unendlich ausgedehnt und haben Oberflächen, an denen die quantenmechanischen Wellenfunktionen nicht mehr periodisch fortgesetzt werden können. Das führte innerhalb der Bandtheorie zu der Vermutung, daß sich lokalisierte Elektronenzustände an der Halbleiteroberfläche bildeten, deren Energie zwischen Valenz- und Leitungsband liegen könnte. Solche Zustände waren früher schon von dem russischen Physiker Igor Tamm postuliert aber nicht experimentell nachgewiesen worden. Sie wurden daher auch Tamm-Zustände genannt. Da diese lokalisierten Zustände durch Abspaltung aus dem Valenzband hervorgehen sollten, wäre die Oberfläche eines Elektronenleiters (n-leitend) positiv geladen, wenn diese Zustände alle unbesetzt wären. Eine Besetzung dieser Oberflächenzustände führt aber dazu, daß Elektronen an der Oberfläche „gefangen“ (lokalisiert) werden und das Eindringen eines äußeren elektrischen Feldes verhindern.¹⁴⁰

John Bardeen wandte seine noch wenig ausformulierte Theorie der Oberflächenzustände sofort auf die Gleichrichtung am Metall-Halbleiter-Kontakt an. Er stellte fest, daß der von der Schottky-Theorie postulierte Zusammenhang zwischen Vakuumaustrittsarbeit des Metalls und der sich einstellenden Diffusionsspannung zwar qualitativ von den Experimenten bestätigt wurde, quantitativ gab es aber nur geringe Übereinstimmungen. Neuere Messungen von Walter Meyerhof, die dieser insbesondere an Silizium-Detektoren ausgeführt hatte, hatten sogar eine vollständige Unabhängigkeit der Diffusionsspannung von der Vakuumaustrittsarbeit des Metalls ergeben.

¹³⁷ Dreier an Bardeen, 26. Mai 1945, JBD.

Bardeen erinnerte sich, daß das Angebot neben den guten Arbeitsbedingungen auch finanziell sehr interessant war: „From a financial viewpoint I got about twice as much money at Bell Labs and really couldn't afford to go back to Minnesota for what they were offering me wasn't much more than I was getting before the war ... I guess the authorities at Minnesota hadn't realized how things had changed.“ (Bardeen-Interview 1977, S. 16).

¹³⁸ Bardeen-Interview 1977 nach Eckert/Schubert, *Kristalle*, 1986, S. 175.

¹³⁹ Siehe dazu Bardeens Notizbücher von März und April 1946 nach Hoddeson, *Point-Contact Transistor*, 1981, S. 64 und Bardeen, *Surface States*, 1947.

¹⁴⁰ Siehe Bardeen, *Surface States*, 1947. Grundlegend sind die Arbeiten von Igor Tamm (Tamm, *Elektronenbindung an Kristalloberflächen*, 1932) und William Shockley (Shockley, *Surface States*, 1939). Shockley, *Electrons and Holes*, 1950, S. 31-34 gibt eine sehr anschauliche Zusammenfassung.

„[T]he height of the potential barrier ... is practically independent of the kind of metal used and also of the structure of the silicon surface. These results are in contradiction to the present theoretical model of the silicon rectifier.“¹⁴¹

Bardeen schloß daraus, daß sich auch ohne ein Metall eine Sperrschicht an der Halbleiteroberfläche bildete. Diese könnte entstehen, wenn ein Teil der Ladungsträger im Halbleiter in Oberflächenzuständen an der Halbleiteroberfläche gefangen würde. Dann bildete sich bei genügend dichten Oberflächenzuständen aus den gleichen Gründen wie bei Schottky eine Sperrschicht aus, die von der Anwesenheit eines Metalls allerdings unabhängig wäre.¹⁴²

Nach dieser Theorie war ein wesentlicher Grund für die Gleichrichtung am Metall-Halbleiter-Kontakt in den Oberflächenzuständen gefunden. Bardeen konnte so auch verschiedene Abweichungen der Experimente von der Schottky-Theorie erklären, weitere Untersuchungen der Oberflächenzustände waren aber notwendig. Daher wurden die Experimente für einen Halbleiterverstärker erst einmal aufgegeben, um detailliertere Experimente zur Klärung der Existenz und Eigenschaften der Oberflächenzustände durchzuführen. Unter Mitwirkung von John Bardeen wurden diese Experimente an Silizium- und Germaniumkristallen hauptsächlich von Walter Brattain und Gerald Pearson in der Zeit von März 1946 bis November 1947 ausgeführt.¹⁴³

Walter Brattain hatte zunächst am Whitman College und dann in Minneapolis Physik studiert, wo er Vorlesungen von John Van Vleck über Quantenmechanik und Gast-Vorlesungen zu diesem Thema von Erwin Schrödinger und Arnold Sommerfeld hörte. 1929 promovierte er bei John Tate und wechselte bald darauf an die Bell Laboratorien, wo er über Eigenschaften von „Kupferoxydul“ arbeitete und spezielle Fragen zum Gleichrichtereffekt untersuchte. Ende der 1930er Jahre beschäftigte er sich zunehmend mit Silizium- Kristalldetektoren, bevor er ab 1941 für die Marine an der magnetischen Detektion von U-Booten arbeitete. Danach arbeitete er ab 1943 an Infrarotdetektoren und wurde im Sommer 1945 in die Halbleitergruppe versetzt.¹⁴⁴

In einem Experiment vom April 1947 demonstrierte Brattain die Abhängigkeit des Kontaktpotentials vom Lichteinfall und konnte so die Existenz der Oberflächenzustände direkt experimentell nachweisen und gemeinsam mit Shockley ihre Dichte schätzen. Diese reichte aus, um jeden Steuereinfluß eines von außen angelegten elektrischen Feldes auf das Innere des Halbleiters abzublocken.¹⁴⁵

Um die bei diesen Versuchen auftretenden unerwünschten Nebeneffekte durch kondensierendes Wasser auf der Oberfläche des Halbleiters zu vermeiden, tauchte Brattain im November 1947 die gesamte Apparatur in einen Elektrolyten ein. Zu seiner Überraschung war es nicht nur weiterhin möglich, die Veränderung des Kontaktpotentials bei Lichteinfall zu messen, sondern der Effekt war jetzt sogar noch größer. Nähere Untersuchungen zeigten daraufhin, daß durch den Elektrolyten die Ladungsträger an der Halbleiteroberfläche beeinflußt werden konnten. Mit einem angelegten elektrischen Feld konnte Brattain die Oberflächenzustände sogar neutralisieren.¹⁴⁶

¹⁴¹ Meyerhof, *Contact Potential Difference*, 1947, S. 727.

¹⁴² Bardeen, *Surface States*, 1947, S. 724-726.

¹⁴³ Riordan/Hoddeson, *Crystal Fire*, 1997, S. 125-128.

¹⁴⁴ Zu Brattains Biographie siehe insb. Riordan/Hoddeson, *Crystal Fire*, 1997; Hoddeson, *Roots*, 1977; Hoddeson, *Entry*, 1980.

¹⁴⁵ Brattain, *Evidence*, 1947; Brattain/Shockley, *Density*, 1947.

¹⁴⁶ Hoddeson, *Point-Contact Transistor*, 1981, S. 65-68; Riordan/Hoddeson, *Crystal Fire*, 1997, S. 128-130.

Weitere Feldeffekt-Versuche

Diese Ergebnisse ließen die Idee eines Feldeffekt-Transistors wieder aufleben. John Bardeen schlug eine neue Feldeffekt-Transistoranordnung vor, die eine nur wenige Tausendstel Millimeter dicke, chemisch hergestellte n-leitende Oberflächenschicht auf einem p-leitendem Stück Silizium benutzte.¹⁴⁷ Bardeen

argumentierte, daß in dieser sehr dünnen Schicht die Anzahl der Ladungsträger besser als in einem dicken Kristall durch ein äußeres Feld zu modulieren sein würde. Daher wurde auf diese Schicht ein Punktkontakt aufgebracht, der durch Wachs von der Elektrolytflüssigkeit - destilliertes Wasser - isoliert war (siehe Abb. 31). Legte man nun an die Elektrolytflüssigkeit eine Spannung an, konnte durch einen Feldeffekt die Charakteristik des Punktkontakts beeinflusst werden.

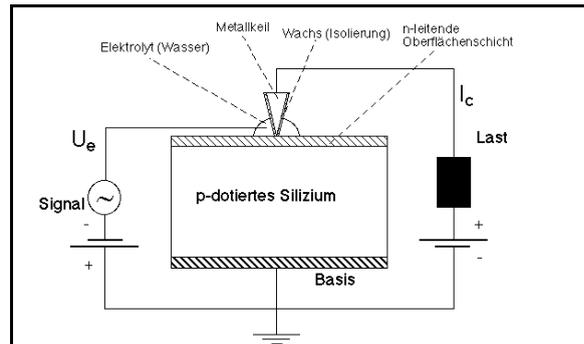


Abb. 31: Feldeffekt-Transistor nach Bardeens Vorschlag vom 21. November 1947.

(Abbildung nach Hoddeson, *Point-Contact Transistor*, 1981, S. 68 und Bardeen, *Spitzenkontakt-Transistor*, 1957, S. 452).

Wird nun der Punktkontakt (wie abgebildet) positiv zum Halbleiter vorgespannt, so entspricht das der Sperrichtung, es fließt nur ein kleiner Sperrstrom.

„Es wurde gefunden, daß die Stromstärke durch Anlegen einer Spannung an den Elektrolyten ... infolge Feldeffekt beeinflusst werden konnte. Da nur ein sehr kleiner Strom durch den Elektrolyten fließt, konnte die Anordnung als Verstärker benutzt werden.“¹⁴⁸

Eine negative Spannung am Elektrolyten verringerte den fließenden Strom.

Ende November 1947 stellte diese Anordnung also einen funktionsfähigen Kristallverstärker nach dem Feldeffekt-Prinzip dar, der aus verschiedenen Gründen allerdings nicht praktisch einsetzbar war. Unter anderem verdampfte die Elektrolytflüssigkeit Wasser viel zu schnell und reagierte auf Spannungsänderungen zu träge.

Als erste Verbesserung wurden verschiedene nicht flüchtige Elektrolyte ausprobiert. Als weitere Verbesserung schlug Bardeen vor, auf das an der *Purdue University* ausführlich untersuchte n-leitende Germanium überzugehen, weil damit bekanntermaßen bessere gleichrichtende Kontakte hergestellt werden konnten, und somit ein größerer Effekt zu erwarten war.¹⁴⁹ Ob auch auf der nicht speziell präparierten Germaniumoberfläche eine Schicht des entgegengesetzten Leitungstyps existierte, war zunächst nicht klar. Sie konnte aber in den folgenden Versuchen rasch nachgewiesen werden.¹⁵⁰ Bardeen schlug daraufhin vor, daß diese p-leitende Oberflächenschicht durch den Elektrolyt-Tropfen elektrisch induziert gewesen sei, da das Germanium

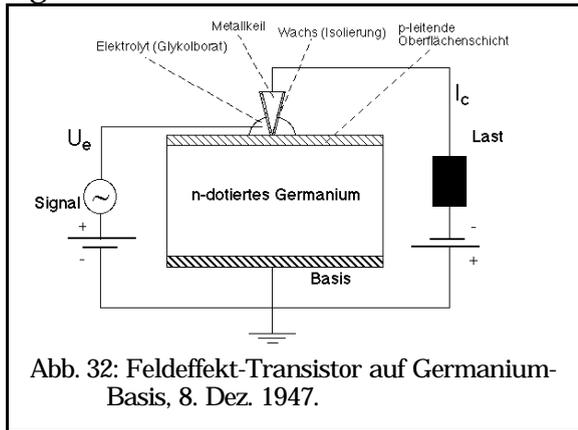
¹⁴⁷ Während des Zweiten Weltkrieges hatten Wissenschaftler der Bell Laboratorien, Russell Ohl und Jack Scaff in Zusammenarbeit mit Walter Brattain, pn-Übergänge in Siliziumkristallen realisiert und richtig als Übergänge von p-leitenden zu n-leitenden Silizium interpretiert. Dieses Wissen über pn-Übergänge wurde aber von den Bell Laboratorien nicht in das US-amerikanische Radarprojekt eingebracht, sondern bis zur Patenterteilung im Juni 1946 geheimgehalten. In Konsequenz standen in den Bell Laboratorien 1947 p-leitende Siliziumkristalle mit durch Dotierung n-leitend gemachter Oberflächenschicht zur Verfügung. (Riordan/Hoddeson, *Origins pn Junction*, 1997; Riordan/Hoddeson, *Crystal Fire*, 1997, S. 88-110 und 132).

¹⁴⁸ Bardeen, *Spitzenkontakt-Transistor*, 1957, S. 453.

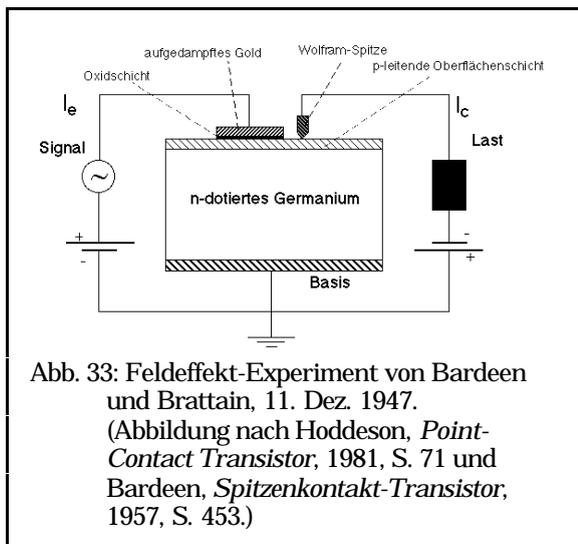
¹⁴⁹ Zur Forschung an Germanium an der Purdue University siehe Henriksen, *Physics at Purdue*, 1987.

¹⁵⁰ Hoddeson, *Point-Contact Transistor*, 1981, S. 71, Bardeen, *Spitzenkontakt-Transistor*, 1957, S. 453.

vorher nicht speziell behandelt worden war, und sie daher nicht chemisch erzeugt gewesen sein konnte.¹⁵¹



Bei den ersten Experimenten mit Germanium wurde die zu den Silizium-Versuchen identische Anordnung gewählt (Abb. 32) und neben der Strom- und Leistungsverstärkung auch eine beträchtliche Spannungsverstärkung gemessen. Da jetzt n-leitendes Germanium statt p-leitendem Silizium verwendet wurde, galt aufgrund der Überlegungen zu einem Feldeffekt-Transistor, daß eine positive Spannungsänderung an der Sonde den Gegenstrom verminderte.¹⁵²



Anstelle des Wassers war zwar Glykolborat eingesetzt worden, aber auch dieses reagierte sehr träge auf Spannungsänderungen. Weitere Versuche zielten darauf ab, den Elektrolyten durch eine metallische Steuerelektrode zu ersetzen, die durch eine dünne Oxidschicht gegen den Halbleiter isoliert sein sollte (Abb. 33). In diesen Versuchen wurde jetzt wieder speziell präpariertes Germanium eingesetzt, das eine chemisch hervorgerufene p-leitende Oberflächenschicht haben sollte.¹⁵³

Der an den Versuchen beteiligte Chemiker Robert Gibney hatte beobachtet, daß sich zwischen dem Germanium und dem Elektrolyten eine Oxidschicht bildete, die

möglicherweise isolierend wirkte. In ihren nächsten Experimenten versuchten Brattain und Bardeen daher, nach dem Abwaschen des Elektrolyten auf der Oxidschicht eine Goldkathode aufzudampfen. Obwohl die Oxidschicht nicht wie erwartet isolierte, wurden dennoch weitere Versuche damit ausgeführt.

„Obwohl keiner [der Goldflecken] den gewünschten hochohmigen Kontakt mit dem Block herstellte, beschlossen wir dennoch zu sehen, welche Effekte wir erhalten würden.“¹⁵⁴

Zur Überraschung aller Beteiligten stellte sich genau der entgegengesetzte Effekt als erwartet ein:

„Eine geringfügige Einwirkung auf den Sperrstrom wurde beobachtet, sobald der Goldfleck eine positive Spannung erhielt, aber e n t g e g e n g e s e t z t derjenigen, welche beim Elektrolyten beobachtet worden war. Eine Zunahme der positiven Spannung v e r g r ö ß e r t e eher den Gegenstrom zum Spitzenkontakt, als daß sie ihn verkleinerte.“¹⁵⁵

Als Konsequenz mußte das Konzept des Feldeffekttransistors aufgegeben und eine neue Erklärung gefunden werden. Es wurde schnell vermutet, „daß Defektelektronen

¹⁵¹ Riordan/Hoddeson, *Minority Carrier*, 1997, S. 5.

¹⁵² Bardeen, *Spitzenkontakt-Transistor*, 1957, S. 453.

¹⁵³ Riordan/Hoddeson, *Minority Carrier*, 1997, S. 5. Erst später stellte sich heraus, daß eine spezielle Präparation der Germaniumoberfläche nicht nötig war. (Bardeen/Brattain, *Physical Principles*, 1949, S. 1211).

¹⁵⁴ Bardeen, *Spitzenkontakt-Transistor*, 1957, S. 453.

¹⁵⁵ Ebenda, S. 453-454 [Hervorhebung im Original].

von dem Goldfleck in die Germaniumoberfläche eintreten und daß die auf diese Weise injizierten Defektelektronen in den Spitzenkontakt fließen, um den Gegenstrom zu verstärken.“¹⁵⁶

Weitere Versuche sollten zunächst den beobachteten Effekt stabilisieren und dann eine detaillierte Erklärung des Effekts liefern. Bardeen und Brattain nahmen an, daß sie eine größere Verstärkung erzielen könnten, wenn die beiden Kontakte näher aneinander lägen und als Linien- anstatt als Punkt-Kontakte ausgebildet wären. So kam es zu dem bekannten „ersten“ Punktkontakt-Transistor, der am 16. Dezember 1947 von Brattain und Bardeen erstmals getestet und am 23. Dezember 1947 einer kleinen Gruppe intern in den Bell Laboratorien präsentiert wurde (siehe Abb. 34).¹⁵⁷

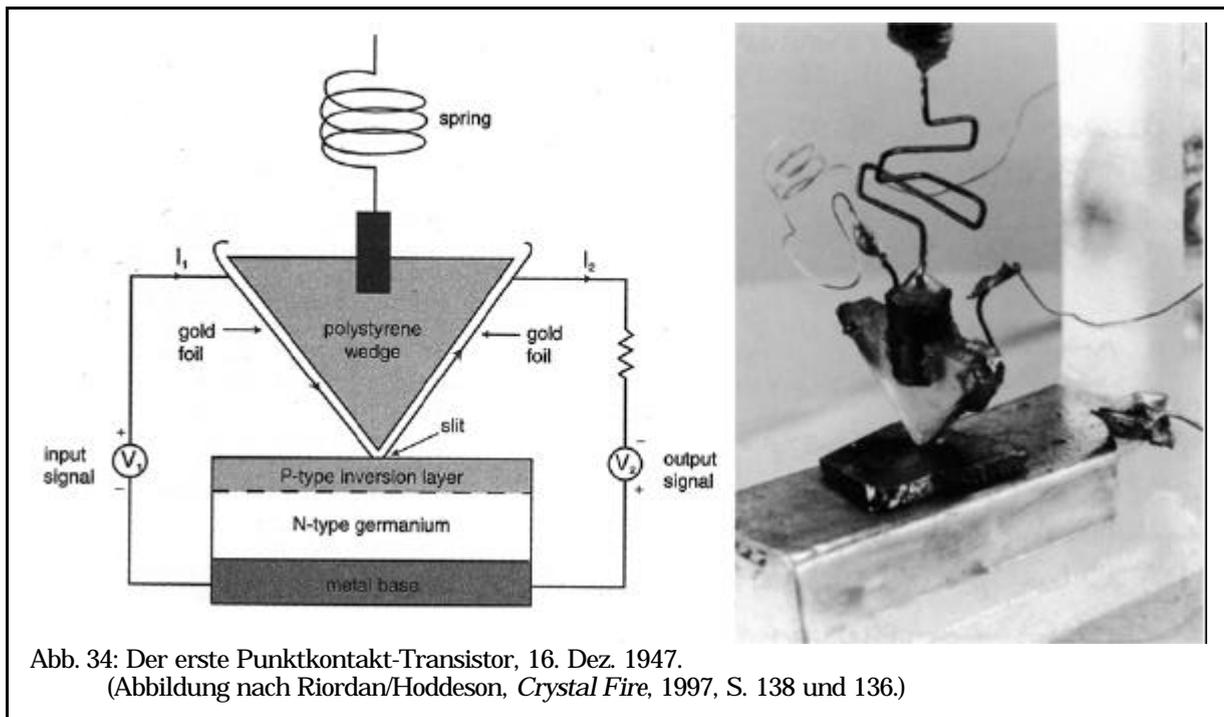


Abb. 34: Der erste Punktkontakt-Transistor, 16. Dez. 1947.
(Abbildung nach Riordan/Hoddeson, *Crystal Fire*, 1997, S. 138 und 136.)

Die interne Präsentation war ein voller Erfolg. Sofort wurde beschlossen, diese revolutionären Versuchsergebnisse zunächst geheim zu halten, bis man die Patente formuliert hatte und die Phänomene besser verstand.¹⁵⁸

¹⁵⁶ Ebenda, S. 453-454.

¹⁵⁷ Hoddeson, *Point-Contact Transistor*, 1981, S. 73.

¹⁵⁸ Zu dieser Phase siehe Riordan/Hoddeson, *Crystal Fire*, 1997, S. 142-163.

Die Wirkungsweise eines Punktkontakt-Transistors

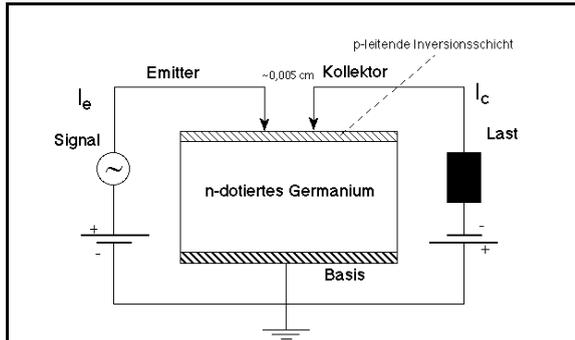


Abb. 35: Schema eines Punktkontakt-Transistors.

Der Punktkontakttransistor besteht aus zwei Punktkontakt-Elektroden, genannt „Emitter“ und „Kollektor“, die in dichtem Abstand an der Oberseite eines n-dotierten Germaniumstücks angebracht sind. Die „Basis“, das dritte Element der Triode, ist ein großflächiger, niederohmiger Kontakt an der Unterseite. Von der Existenz einer p-leitenden Inversionsschicht an der Oberfläche kann ausgegangen werden.

Bardeen und Brattain versuchten daher weiter, die beobachteten Phänomene zu verstehen. Dazu nahmen sie an, daß Defektelektronen durch einen der Punktkontakte in die p-leitende Oberflächenschicht emittiert werden und innerhalb der Oberflächenschicht zu dem anderen Punktkontakt fließen, der sie wegen seiner negativen Vorspannung aufammelt („collect“).

Weitere Experimente ergaben bald, daß der Löcherstrom nicht nur in der p-leitenden Oberflächenschicht, sondern auch durch das n-leitende Germanium fließen konnte. Dies wurde insbesondere in einer sehr klaren Demonstration im Februar 1948 von John Shive eindeutig nachgewiesen.¹⁵⁹

In weiteren Experimenten stellte sich heraus, daß die p-leitende Oberflächenschicht auch nicht chemisch erzeugt werden mußte. Bardeen schloß, daß sie aufgrund der Oberflächenzustände im Germanium

und der daraus resultierenden Verbiegung des Valenz- und Leitungsbandes entstand. Nach Bardeen und Brattain konnte man vereinfachend annehmen, daß sich die Oberflächenzustände gleichmäßig auf den Energiebereich zwischen Valenz- und Leitungsband verteilen. Würden sie von unten her aufgefüllt, dann verbögen sich die Bänder wegen des resultierenden negativen Ladungsüberschusses an der Oberfläche. Bei genügender Dichte der Oberflächenzustände wäre dieser Effekt so stark, daß statt des Leitungsbandes nun das Valenzband in der Nähe des Fermi-niveaus liege. In diesem Fall würde die Leitfähigkeit von n-leitend zu p-leitend übergehen (siehe Abb. 36).¹⁶⁰

Mit Blick auf diesen Mechanismus schrieben sie zwar schon 1948:

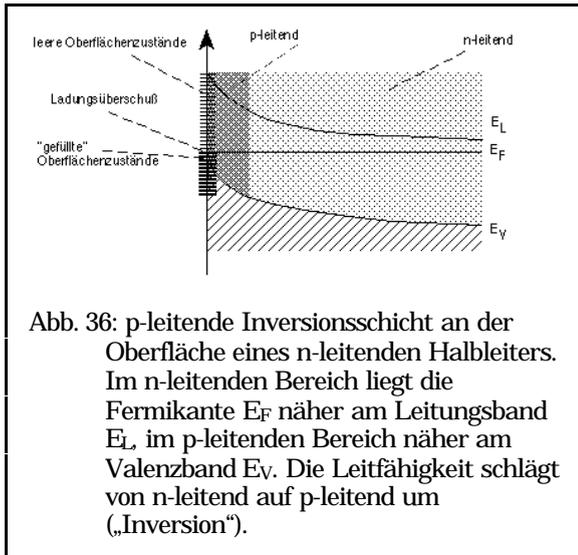
„The thin P-type conducting layer may result from ... a space charge barrier layer which is sufficient to raise the filled band to a position close to the Fermi - level.

The surface states are such as to require the Fermi level to cross the surface near the top of the filled band. The conductivity in the layer right next to the surface is then P-type, and this layer is separated from the normal N-type region in the interior by the P-N rectifying barrier.“¹⁶¹

¹⁵⁹ Shive, *Double-Surface Transistor*, 1949; Riordan/Hoddeson, *Minority Carrier*, 1997, 17-22.

¹⁶⁰ Brattain/Bardeen, *Forward Current*, 1948; Bardeen/Brattain, *Physical Principles*, 1949, S. 1211 und 1218-1223.

¹⁶¹ Brattain/Bardeen, *Forward Current*, 1948, S. 232.



Aber erst ein Jahr später nannten sie diese p-leitende Oberflächenschicht auch „Inversionsschicht“. Diesen Begriff hatten sie bei Schottky und Spenke gefunden, die schon 1939 von einer möglichen „Inversion“ des Leitungsmechanismus“ gesprochen hatten. Schottky und Spenke hatten ihr aber keine physikalisch-technische Bedeutung beigegeben und ihre Analyse auf die Bereiche schwacher Randverarmung beschränkt, in denen diese Inversion nicht auftrat.¹⁶²

Die von Schottky vorgestellte Theorie benötigte das Konzept der Inversionsschicht nicht, da sie als Ein-Ladungsträger-Theorie den gleichrichtenden Effekt am Metall-Halbleiter-Kontakt mit der Annahme einer einzigen Ladungsträgerart erklären konnte.

Nach Schottky waren je nach Material entweder nur Elektronen oder nur Löcher von Bedeutung. Daher sucht man in den anderen wesentlichen Veröffentlichungen Schottkys zu diesem Thema auch vergeblich nach dem Begriff „Inversionsschicht“.¹⁶³

Spenke hat später diese Beschränkung auf eine einzige Ladungsträgerart als „blinden Fleck“ der Gleichrichtertheorie bezeichnet.¹⁶⁴ Ähnliches wird über John Bardeen berichtet, der nach Aussagen eines seiner ehemaligen Studenten die frühere Nichtbeachtung der Löcher in einem n-leitenden Kristall durch Schottky für einen schweren Fehler gehalten hatte. Bardeen betonte in seinen Vorlesungen:

„If Schottky in the '30s had looked here to see what the holes were doing, the transistor would have been invented then.“¹⁶⁵

Zur Erklärung des Punktkontakt-Transistors gingen Bardeen und Brattain 1948 von der Existenz einer p-leitenden Inversionsschicht auf dem n-leitenden Germanium aus und konnten so ihre Versuchsergebnisse erklären.¹⁶⁶

Bei ihren Versuchen hatten Bardeen und Brattain den Emitter positiv mit der Spannung U_e und der Kollektor negativ mit der Spannung U_c so vorgespannt, daß sich der Emitterstrom I_e und der Kollektorstrom I_c von gleicher Größenordnung (ein paar Milli-Ampère) einstellen (siehe Abb. 37).¹⁶⁷

¹⁶² Bardeen/Brattain, *Physical Principles*, 1949, S. 1211; Schottky/Spenke, *Quantitative Durchführung*, 1939, S. 231 und 241.

¹⁶³ Siehe z.B. Schottky, *Sperrschicht- und Spitzengleichrichter*, 1939 und *Vereinfachte Theorie*, 1942.

¹⁶⁴ Spenke, *Leistungsgleichrichter auf Halbleiterbasis*, 1958, S. 872.

¹⁶⁵ Bardeen in seinen Vorlesungen der 1950er Jahre nach Holonyak, *Point-Contact Transistor*, 1992, S. 37.

¹⁶⁶ Bardeen/Brattain, *Transistor*, 1948.

¹⁶⁷ Ebenda, S. 230.

Dazu war es notwendig die Kollektorspannung sehr viel größer als die Emitterspannung zu wählen, denn auch durch den eigentlich in Sperrichtung gepolten Kollektor sollte ein Strom fließen. Es galt $|U_e| \ll |U_c|$.

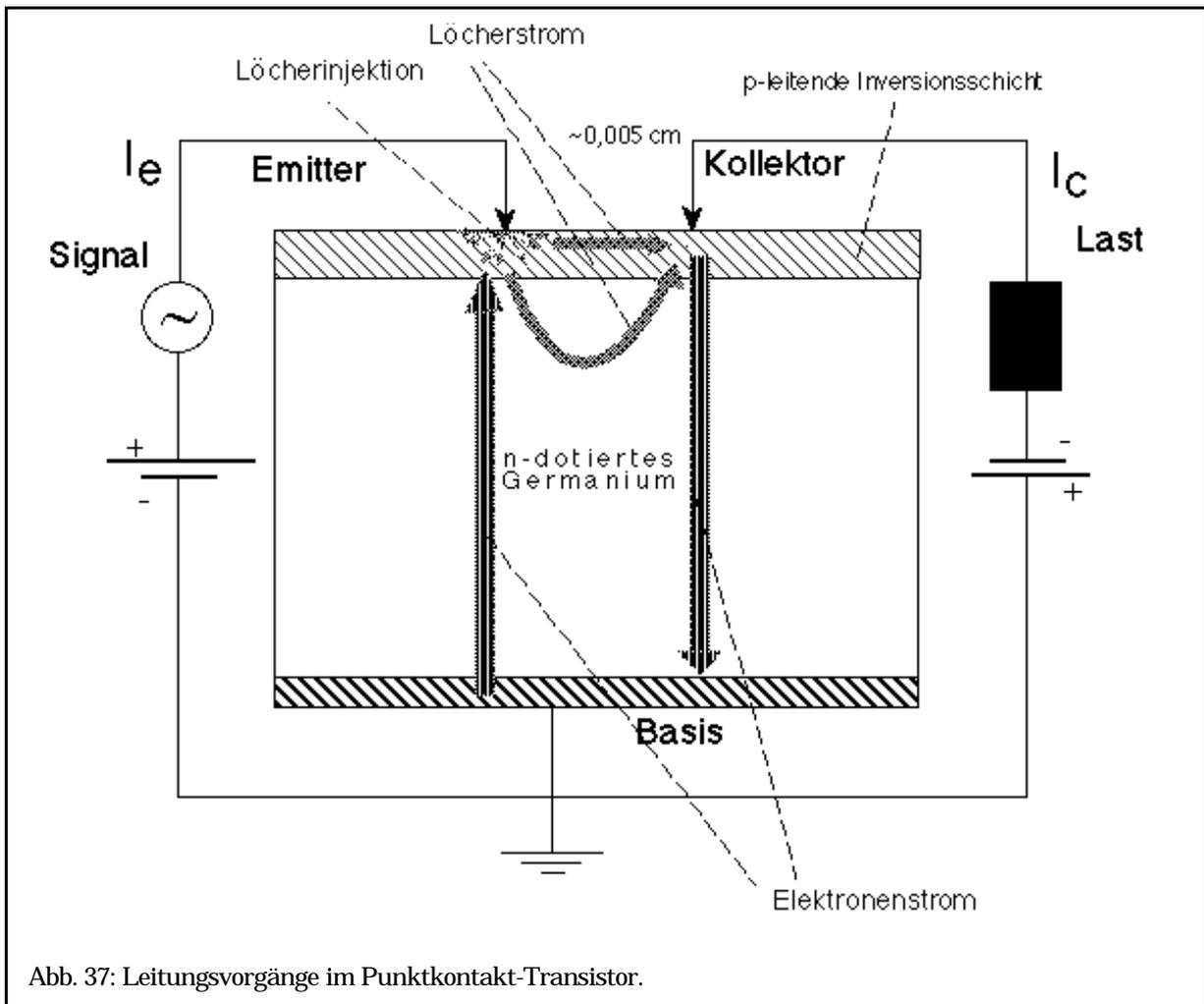


Abb. 37: Leitungsvorgänge im Punktkontakt-Transistor.

Beobachtet wurde nun einerseits, daß einer Spannungsänderung von U_e und damit einer Stromänderung von I_e eine Stromänderung von I_c folgte. D.h. mit dem Strom I_e variierte auch der Strom I_c . Dieser Effekt konnte durch die Annahme eines Löcherstroms vom Emitter zum Kollektor gut verstanden werden. Dann würde sich ein Teil des Emitterstroms zum Kollektorstrom addieren. Die neue Erkenntnis dabei war, daß dieser Strom von den Minoritätsladungsträgern getragen wurde.

„The nature of the collector contact is such as to provide a high resistance barrier to the flow of electrons from the metal to the semiconductor, but there is little impediment to the flow of holes into the contact.“¹⁶⁸

Dies wurde zusätzlich durch die Tatsache bestätigt, daß nach Erhöhung des Emitterstroms die Verstärkung des Kollektorstroms mit einer zeitlichen Verzögerung beobachtet wurde, die vom Abstand zwischen Emitter und Kollektor abhing. Die berechnete Beweglichkeit der Ladungsträger ließ dann auf Löcher schließen.¹⁶⁹ Mit diesem Modell konnte aber nur erklärt werden, daß die Änderung des Kollektorstroms I_c genauso groß wurde wie die Änderung des Emitterstroms I_e . Unerklärbar blieb aber, warum sie größer sein sollte.¹⁷⁰ Im Widerspruch dazu wurde aber eine große Stromverstärkung beobachtet, die das Dreifache des Emitterstroms erreichte.¹⁷¹

¹⁶⁸ Bardeen/Brattain, *Physical Principles*, 1949, S. 1210

¹⁶⁹ Haynes/Shockley, *Hole Injection*, 1949.

¹⁷⁰ Bardeen/Brattain, *Physical Principles*, 1949, S. 1210.

Die abgebildete Schaltung ist eine „Basisschaltung“, mit der sich bei einem Flächentransistor bekanntermaßen zwar eine Spannungs- aber keine Stromverstärkung erzielen ließe (Tietze/Schenk, *Halbleiterschaltungstechnik*, 1978, Kap. 4, S. 49-50).

¹⁷¹ Ebenda, S. 1208.

Diese Tatsache erklärten Bardeen und Brattain mit der Annahme, daß der Fluß der Defektelektronen vom Emitter zum Kollektor den „normalen Strom“ von der Basis zum Kollektor beeinflusse. Die Erhöhung der Ladungsdichte und der Feldstärke am Kollektor machte es dann den Elektronen leichter, aus dem Kollektor in den Halbleiter überzutreten. Der Kollektorstrom I_c setzte sich demzufolge aus einem Löcherstrom vom Emitter zum Kollektor und einem Elektronenstrom vom Kollektor zur Basis zusammen, wobei der letztere durch den ersteren moduliert wurde (siehe Abb. 37).¹⁷²

Das heißt, Löcher aus dem Emitter diffundierten in die Umgebung des Kollektorkontakts und flossen in den Kollektor hinein, wodurch die Charakteristik des Kollektor-Sperrkontaktes verändert wurde. Durch die Anwesenheit der positiven Löcher wurden negative Elektronen angezogen, um die Neutralität wieder herzustellen. Durch diese zusätzlichen Ladungsträger erhöhte sich die Leitfähigkeit des Kollektorkontaktes und somit auch der Elektronenstrom vom Kollektor zur Basis. Obwohl Bardeen und Brattain 1949 noch bedauerten, daß eine „complete quantitative theory ... not yet available“ war, hatten sie mit dieser Erklärung den Punktkontakt-Transistor in seinen wesentlichen Bestandteilen verstanden.¹⁷³

Vergleich zwischen den Bell Laboratorien und CFS Westinghouse (Paris)

Aus der kurzen Darstellung der Erfindung des Punktkontakt-Transistors durch Bardeen und Brattain wurde klar, daß eine spezielle Vorbehandlung des Germanium-Kristalls zur Erzeugung der Transistorwirkung nicht nötig war. Es genügte, auf einen guten (d.h. reinen) Germanium-Kristall zwei Spitzen dicht nebeneinander aufzusetzen und die angelegten Spannungen zu variieren, um einen Transistoreffekt nachzuweisen. Dies ist (sehr wahrscheinlich) auch Mataré und Welker ohne Kenntnis der Experimente in den Bell Laboratorien Anfang 1948 gelungen.

In der Abgeschlossenheit eines kleinen französischen Industrielaboratoriums hatten sie die Ergebnisse ihrer Kollegen in den Vereinigten Staaten nicht regelmäßig und nur sehr verspätet wahrgenommen. Ihre damaligen Arbeitsbedingungen erschwerten die Kenntnis der internationalen Forschungen, da beispielsweise die führende internationale physikalische Zeitschrift *The Physical Review* nicht im Laboratorium vorhanden war, sondern in der Universitätsbibliothek eingesehen werden mußte.

So deutet nichts daraufhin, daß Mataré oder Welker die 1947 in *The Physical Review* publizierten Arbeiten zu den Oberflächenzuständen und den daraus resultierenden Abweichungen von der Schottky-Theorie bekannt gewesen sind. Es ist ebenfalls ausgesprochen unwahrscheinlich, daß sie die im Juli-Heft von 1948 publizierten kurzen Darstellungen Bardeens und Brattains zum Transistor gesehen hatten, bevor sie ihre eigene Patentanmeldung am 13. August 1948 einreichten.

Klar ist aber, daß sie - im Gegensatz zu Bardeen und Brattain - den von ihnen realisierten Punktkontakt-Transistor nicht als solchen erkannten. Spezielle Kenntnisse über die Art und Wirkung der Oberflächenzustände waren zwar zur praktischen Rea-

¹⁷² Bardeen/Brattain, *Transistor*, 1948, S. 230-231; Bardeen/Brattain, *Physical Principles*, 1949, S. 1208-1210.

¹⁷³ Bardeen/Brattain, *Physical Principles*, 1949, S. 1210.

Eine quantitative Theorie ist ausgesprochen aufwendig, da zur Berechnung des Verstärkungseffekts die Kenntnis der Ladungsträgerkonzentrationen notwendig wäre, die aber erst durch eine (theoretische) Trennung des Emitterstroms in einen Löcher- und Elektronenstrom berechnet werden könnte. Experimentell konnten sie nicht direkt getrennt gemessen werden. Abschätzungen ergaben aber die richtige Größenordnung des Effekts und bestätigten so das generelle Bild der Wirkungsweise des Punktkontakt-Transistors. Siehe dazu Bardeen/Brattain, *Physical Principles*, 1949, S. 1224-1225.

lisierung im Labor nicht notwendig gewesen, zum physikalischen Verständnis des Bauteils waren sie aber unabdingbar.

Eine offene Frage bleibt in diesem Zusammenhang allerdings, wie Mataré und Welker die beobachteten Effekte als eine Feldeffekt-Steuerung verstehen konnten. Wie ausgeführt, hätte diese ja zu genau entgegengesetzten Effekten führen müssen. Das Anlegen einer positiven Spannung an der Steuerelektrode (Emitter) müßte nach dem Feldeffekt-Prinzip den Strom zwischen dem anderen Spitzenkontakt (Kollektor) und der Basis verringern, tatsächlich beobachtet wird bei einem Punktkontakt-Transistor aber eine Vergrößerung. Daß dieses Mißverhältnis bei Wissenschaftlern wie Welker und Mataré unbeachtet geblieben sein könnte, ist möglich, aber schwer vorstellbar.¹⁷⁴

Der „Transistron“ in der Serienproduktion



Abb. 38: Erstes Produktionsmuster des „Transistron“ konstruiert bei der CFS Westinghouse 1948. (Abbildung: DM München.)

Auf die Anerkennung ihrer Transistor-Experimente innerhalb der eigenen Strukturen mußten Mataré und Welker warten, bis von der Transistorerfindung „die Nachrichten aus den USA ‘rüber-sickerten“. Erst dann erregten sie das Interesse des Postministers Eugène Thomas und des Chefsingenieurs der Post, R. Sueur, der zugleich als Verantwortlicher des *Centre National d'Etudes des Télécommunications (CNET)* mit der CFS Westinghouse Kontakt hielt. Sueur war es auch, der auf die Idee kam, das Bauteil in Anlehnung an den amerikanischen Transistor „Transistron“ zu nennen. Daraufhin wurden Welker und Mataré als

„pères du transistron“ in der Tagespresse gefeiert und am 18. Mai 1949 mit einem Besuch des Postministers anlässlich der „présentation du TRANSISTRON ... brillante réalisation de la recherche française“ geehrt.¹⁷⁵

Den ersten wissenschaftlichen Artikel zum französischen Transistor verfaßte im Anschluß an diese Präsentation ebenfalls R. Sueur. Dabei stellte er heraus, daß es der französischen Post in Zusammenarbeit mit der CFS Westinghouse gelungen war, die gleichen Resultate wie die Amerikaner zu erzielen.¹⁷⁶ Die Arbeiten von Welker und Mataré an Germanium-Dioden charakterisierte er dabei allerdings lediglich als Vorarbeiten und wies ausdrücklich auf die französischen Leistungen hin.¹⁷⁷ Insbesondere betonte er, daß im gleichen Jahr wie bei den Amerikanern die ersten „Transistrons“ mit in Frankreich hergestelltem Germanium die Laboratorien verlassen hätten.¹⁷⁸ In der anschließenden technischen Beschreibung gab er eine Einführung in die Physik der Halbleiter und erklärte die Funktionsweise des „Transistron“ wie Bardeen und Brattain als einen Punktkontakt-Transistor und somit im Widerspruch zum Patent von Welker und Mataré. Im letzten Teil wurden einige frühe Anwendungen des

¹⁷⁴ Allerdings hat Welker in seinem Teil von Engel/Welker/Mataré, *Cristeaux Détecteurs*, 1950 bei der Beschreibung des Punktkontakt-Transistor-Prinzips auch später noch die Vorzeichen vertauscht. (Siehe Engel/Welker/Mataré, *Cristeaux Détecteurs*, 1950, S. 7.)

¹⁷⁵ Mataré-Interview 1998; Einladungskarte Thomas an Welker, HWP 006, (Zitat).

¹⁷⁶ Sueur, *Transistron*, 1949, S. 389.

„... allaient permettre d'obtenir des résultats identiques à ceux des Américains.“

¹⁷⁷ Ebenda.

„... prélude à la réalisation de la triode à germanium ou transistron triode.“

¹⁷⁸ Sueur, *Transistron*, 1949, S. 389.

„Transistron“ beschrieben, wie zum Beispiel Telefon- und Fernsehverstärker, die in Laboratorien der französischen Post bereits funktionierten.¹⁷⁹

In der deutschen Fachpresse wurde unter Bezug auf Sueurs Veröffentlichung zwar festgestellt, daß der französische Transistor zeitlich nach der „Bekanntgabe der Entdeckung in den USA“ vorgestellt worden sei und in „Aufbau und Eigenschaften ... dem A-Transistor der Bell-Company“ gleiche, jedoch wurde die Entwicklung als „unabhängig von den amerikanischen Forschungsarbeiten“ eingeschätzt.¹⁸⁰

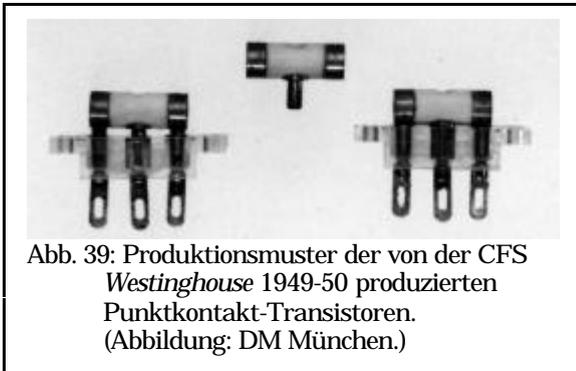


Abb. 39: Produktionsmuster der von der CFS Westinghouse 1949-50 produzierten Punktkontakt-Transistoren. (Abbildung: DM München.)

In der ersten Hälfte des Jahres 1949 wurden bei der CFS Westinghouse bereits ca. 1000 französische Punktkontakt-Transistoren „Transistrons“ aus hochreinem Germanium für Versuchsanwendungen gebaut.¹⁸¹ Sie sind damit als die ersten in Serie gefertigten Transistoren Europas anzusehen. Auch in den USA war der tatsächliche Produktionsbeginn für Punktkontakt-Transistoren nicht früher, da es Probleme bei der Massenfertigung

gab.¹⁸² Die ersten Transistoren der CFS Westinghouse zeigten sogar ein besseres Frequenzverhalten als diejenigen der Bell Laboratorien.¹⁸³ Dennoch kam es in den 1950er Jahren in Frankreich nicht zur Herausbildung einer Halbleiterindustrie, die der amerikanischen vergleichbar gewesen wäre. Die Gründe dafür sind vielfältig.¹⁸⁴

Die große Publizität, die der „Transistron“ gefunden hatte, resultierte beispielsweise nicht in einer größeren finanziellen Unterstützung des CSF Westinghouse-Labors, in dem Mataré und Welker arbeiteten. Im Gegenteil, als die Produktion der Germaniumdioden soweit stand, daß es keiner wissenschaftlichen Begleitung mehr bedurfte, suchten sich sowohl Welker als auch Mataré neue Tätigkeitsfelder, da sie den Eindruck hatten, daß der wissenschaftliche Fortschritt bei der CFS Westinghouse sehr langsam sein würde und für Physiker keine Möglichkeiten zur Forschung und Weiterqualifikation mehr bot.¹⁸⁵ Dies war wohl auch dadurch bedingt, daß nach der öffentlichen Präsentation des „Transistron“ das *Centre National d'Etudes des Télécommunications (CNET)* ein eigenes Halbleiterforschungsprogramm startete und von 1949 bis 1954 in Überschätzung seiner eigenen Möglichkeiten die Forschungen geheim und ohne nennenswerte Kommunikation mit der wissenschaftlichen Welt durchführte. Nur noch wenige Forschungsaufträge wurden nach außen vergeben, von denen die CFS Westinghouse offenbar nach 1950 keine mehr bekam.¹⁸⁶

Dafür begann aber ab 1952 auch die *Compagnie Générale de Télégraphie sans Fil (CSF)* in Zusammenarbeit mit dem Universitätsinstitut von Yves Rocard¹⁸⁷ mit der Halbleiterforschung, doch waren diese Forschungen entsprechend der akademischen Ausrichtung des Laborleiters C. Dugas stark auf Grundlagenforschung ausgerichtet.

¹⁷⁹ Ebenda, S. 396.

¹⁸⁰ Gaulé, *Transistor-Schriftumsübersicht*, 1950, S. 400.

¹⁸¹ Bothelo, *Industry Policy*, 1994, S. 168.

Antonio Bothelo bezieht sich dabei auf Quellen über die Arbeit des *Service des Recherches et du Contrôle technique (SRCT)* des französischen Ministeriums für Post und Telekommunikation (PTT), die beim *Service Historique de l'Armée de l'Air (SHAA)* unter den Aktenzeichen E1-2216 (und auch E7-2202) liegen.

¹⁸² Smits, *Electronics Technology*, 1985, S. 30.

¹⁸³ Mataré, *Transistor-Meßtechnik*, 1950, S. 375.

¹⁸⁴ Siehe dazu Bothelo, *Industry Policy*, 1994 und Jacq, *Research Policy*, 1995.

¹⁸⁵ Mataré-Interview 1998.

¹⁸⁶ Bothelo, *Industry Policy*, 1994, 168-169.

¹⁸⁷ Zu Yves Rocard, Direktor des physikalischen Labors der Ecole Normale Supérieure in Paris, siehe Jacq, *Research Policy*, 1995, S. 293.

Die Technologie der vorgestellten Transistoren „ended up too sophisticated and unstable for mass production“.¹⁸⁸

Während der 1950er Jahre wurde Halbleiterforschung in Frankreich hauptsächlich als Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Festkörperphysik verstanden, daher gehörten enge Beziehungen zur Industrie für die akademische Elite nicht zum Forschungsprogramm.

„In fact, the dominant professional view was that solid state semiconductor research must be detached from industrial concern.“¹⁸⁹

Die speziellen Schwierigkeiten der Halbleitertechnologie konnten aber losgelöst vom Anwendungszusammenhang weder richtig angegangen noch gelöst werden.¹⁹⁰

Selbständiges wissenschaftliches Profil

Mataré und Welker versuchten in dieser Situation, sich innerhalb und außerhalb Frankreichs wissenschaftlich zu profilieren. Mataré nahm sogar die Mühe auf sich, am Institut von Yves Rocard an der *Ecole Normale Supérieure* einen weiteren Dokortitel zu erwerben, da er mit dem Gedanken spielte, in Frankreich zu bleiben, und für eine Karriere in Frankreich ein französischer Dokortitel empfehlenswert war.¹⁹¹

Gemäß der französischen Tradition legte Mataré zwei „thèses de doctorat“ vor. In einer beschäftigte er sich mit Problemen des suprafluiden Heliums und in der anderen mit Problemen des Rauschens in Transistoren. Im Mai 1951, zum Zeitpunkt der Doktorprüfung, fanden die Transistorprobleme größere Beachtung.¹⁹² Mataré setzte sich in seinen entsprechenden Arbeiten mit der Tatsache auseinander, daß sich auf ein und demselben polykristallinen Germaniumstück Bereiche befanden, die sich für Transistoren eigneten und solche, die sich dafür nicht eigneten. Zur raschen experimentellen Unterscheidung dieser beiden Fälle führte er den leicht meßbaren Interaktionsfaktor ein, der auch gleichzeitig ein Maß für die Verstärkung darstellte.¹⁹³

In seinen ersten Veröffentlichungen zum Transistor lehnte sich Mataré noch deutlich an die in seinem Patent vorgeschlagene Funktionsweise des Transistors an, doch kam er bald davon ab und untersuchte den Einfluß von Korngrenzen auf die Transistorwirkung.¹⁹⁴ Publiziert hat er die Idee eines Korngrenzen-Transistors aber erst nach seiner Rückkehr nach Deutschland, wobei er auch unterschiedliche Realisierungsmöglichkeiten vorgeschlagen hat.¹⁹⁵ In diesen Arbeiten wird auf die Möglichkeit hingewiesen, „für die Transistorphysik nicht nur chemische Störstellen im Gitter eines Halbleiterkristalls auszunutzen, sondern auch Gitterdefekte, z.B. in Form von künstlich gewachsenen und definierten Korngrenzen, nutzbar zu machen“.¹⁹⁶

¹⁸⁸ Bothelo, *Industry Policy*, 1994, 170-171.

¹⁸⁹ Ebenda, S. 171,

¹⁹⁰ Ebenda, S. 170.

„The French rationalist scientific world-view and mathematical mind set of its elite engineers had trouble dealing with the interdisciplinary, messy and unpredictable semiconductor technology.“

¹⁹¹ Ein französischer Kollege, Pierre Aigrain, hatte ihn darauf hingewiesen. Auch Aigrain erwarb einen zweiten Dokortitel am Institut von Rocard, obwohl er ebenfalls schon einen ausländischen Dokortitel hatte. (Mataré Interview 1998.)

¹⁹² Mataré Interview 1998. Seine Ergebnisse sind veröffentlicht in Mataré, *Interaction*, 1952.

¹⁹³ Siehe dazu Mataré, *Interaction*, 1952; Mataré, *Transistor-Meßtechnik*, 1950; Mataré, *Remarques*, 1950, Engel/ Welker/Mataré, *Cristeaux détecteurs*, 1950.

¹⁹⁴ Die Abbildung 6 in Mataré, *Dreielektroden-Kristall*, 1949, S. 260 hat noch große Ähnlichkeit mit der entsprechenden aus dem Patent, siehe Abb. 29 aus S. 125.

Korngrenzen als möglicher Einflußfaktor auf die Transistorwirkung werden erstmalig erwähnt in Mataré, *Transistor-Meßtechnik*, 1950, S. 369.

¹⁹⁵ Mataré, *elektronisches Verhalten*, 1954; *Korngrenzenstruktur*, 1955; *Korngrenzen-Transistoren*, 1956; und *Bikristallzwischenschichten*, 1956.

¹⁹⁶ Mataré, *Korngrenzen-Transistoren*, 1956, S. 209.

Solche Korngrenzen bestehen aus einer regelmäßigen Folge von Gitterstörungen, die als Versetzungsgitterfehlstellen (wie durch Dotierung erzielte Verunreinigungsstellen) Akzeptorencharakter haben können. Dadurch stellt eine Korngrenze „eine Elektrode innerhalb des Kristalls dar, die durch Potentialverschiebung oder als Ort für Trägerinjektion die Rolle einer Steuerelektrode übernehmen kann.“¹⁹⁷ Trägerinjektion kann beispielsweise durch eine auf die Korngrenze aufgesetzte Spitze, aber auch durch Lichteinfall in die Korngrenzzone erzeugt werden. Potentialsteuerung ist möglich, da „relativ kleine Änderungen des K.G. [Korngrenzen]-Potentials starke Querstromänderungen zur Folge haben.“¹⁹⁸

Diese Interpretation des Transistoreffekts hat Mataré allerdings erst Mitte der 1950er Jahre ausgearbeitet, da sich nach Bekanntwerden der Erklärung des Punktkontakt-Transistors nach Bardeen und Brattain und den Ideen Shockleys zur Ladungsträgerinjektion und zum Flächentransistor alle Aufmerksamkeit auf den „normalen“ Injektionsvorgang richtete.¹⁹⁹

Mataré erinnert sich:

„Das war das Traurige an der Sache wiederum. Ich kam von den Korngrenzen auf die normale Injektion und hab' die Korngrenzen dann wieder auf Seite geschoben. Später, nachdem alles das klappte mit der Minoritätsinjektion bei sehr hoher Reinigung, habe ich mich wieder den Korngrenzen zugewandt, aus anderen Gründen natürlich, weil Sie eben damit ganz andere Effekte erzielen konnten. ... Es ist ja auch tatsächlich so, daß es erstaunliche Effekte gibt, wir haben das nachher auch am Korngrenzentransistor exerziert. Der Korngrenzentransistor der funktionierte ja tip top, bei flüssigem Helium und noch bei gepumpten Helium bei 2 Kelvin. Nichts funktionierte sonst, war alles ausgefroren. Da sind keine Ladungsträger mehr da, die Sie steuern können. Mit Korngrenzentransistoren machen Sie wunderbare Verstärkung bei gepumptem Helium.“²⁰⁰

Während sich Mataré intensiv mit Halbleiterfragen beschäftigte und darüber auch publizierte, hielt sich Welker in seiner Pariser Zeit mit Veröffentlichungen zum Transistor sehr zurück und schrieb nur einen kleinen Teil in einer gemeinsamen Veröffentlichung des Labors der CFS *Westinghouse*.²⁰¹ Auch später hat er sich nicht weiter mit dem von ihm und Mataré patentierten Transistor beschäftigt. In Paris kümmerte er sich statt dessen in den Jahren 1947 bis 1949 wieder intensiver um die Theorie der Supraleitung und um seine Patentangelegenheiten in Deutschland.

Welkers Patentangelegenheiten

Welker hatte 1944 in Deutschland einen Flächendetektor entworfen, den er dem instabilen und wenig konstanten Spitzendetektor für überlegen hielt. Dieser Überzeugung war er auch noch Ende 1948, so daß sich eine Weiterverfolgung dieses Patents zu lohnen schien.²⁰²

Seine Erfindung beruhte im wesentlichen auf einer geschickten geometrischen Anordnung. Er schrieb dazu:

„Patentansprüche:

1.) Detektor zur Gleichrichtung elektromagnetischer Wellen, insbesondere Ultra-

¹⁹⁷ Mataré, *Korngrenzenstruktur*, 1955, S. 648-649.

¹⁹⁸ Mataré, *Korngrenzen-Transistoren*, 1956, S. 254

¹⁹⁹ Eine erste Diskussion experimenteller Ergebnisse zu Fragen der Korngrenzen im Halbleiter findet sich in einem Brief von Gotthold Zielasek (Intermetall) an Herbert Mataré vom 12. Dez. 1953. Eine serienmäßige Ausführung kam aber zunächst nicht zustande (Mende, *Transistortechnik*, 1959, S. 63).

²⁰⁰ Mataré Interview 1998.

²⁰¹ Engel/Welker/Mataré, *Cristeaux Détecteurs*, 1950.

²⁰² Das Originalpatent wurde am 11. Februar 1944 mit dem Titel „Detektor zur Gleichrichtung von elektromagnetischen Wellen, insbesondere Ultrakurzwellen“ eingereicht. Es ging unter B 205274 VIII a, 21 a4 ein und trug den Namen Brüggemann. Siehe HWD 001.

kurzwellen, dadurch gekennzeichnet, daß die durch einen zwischengelegten Halbleiter voneinander getrennten Elektroden einander so nahe als möglich gebracht werden, indem die Elektroden und der Halbleiter fächerhaft dachziegelartig übereinander vorgesehen werden. ...”²⁰³

Von Frankreich aus bat er im Herbst 1948 seinen Patentanwalt Nuber, sich um die damals nicht zu Ende geführte Patentangelegenheit zu kümmern.²⁰⁴ Welker hatte während des Krieges mit dem Patentanwalt Brüggemann zusammengearbeitet, auf dessen Namen auch das Patent ursprünglich angemeldet worden war. Brüggemann hatte 1944 die Anmeldung auf Welkers Namen „für unzumutbar“ gehalten und vorgeschlagen „erst zu einem späteren Zeitpunkt die Erfindernennung und die Umschreibung“ auf Welkers Namen vorzunehmen.²⁰⁵ Dazu war es aber nicht mehr gekommen, da Brüggemann zuvor verstorben war. Seine Erben traten aber alle Rechte an Welker ab.²⁰⁶

Diese Patentanmeldung in der unmittelbaren Nachkriegszeit hatte besondere Schwierigkeiten, da neue Grafiken angefertigt werden mußten und Welker im Ausland wohnte. Zunächst sollte die Angelegenheit noch über Welkers Firma in Planegg bei München abgewickelt werden, aber die Ausstellung des Erbscheins der Familie Brüggemann und ähnliche Dinge verzögerten die Sache derart, daß fast vier Jahre später im Juni 1952 das Patent immer noch nicht erteilt war.

Welker war mittlerweile schon in Deutschland bei *Siemens* tätig und pries sein Patent der Patentabteilung von *Siemens & Halske* an:

„Da in der jüngsten Zeit in den USA der Übergang vom Spitzentransistor zum spitzenfreien Transistor tatsächlich vollzogen wurde, dürfte die vorliegende Anmeldung bedeutungsvoll geworden sein. Zur genaueren Erläuterung des Sachverhaltes sei bemerkt, dass laut Shockley, Pearson und Haynes, Bell System Techn. J. 28, 356, 1949, Transistorversuche an einem Plättchen mit den Abmessungen 10 x 0,5 x 0,8 mm vorgenommen wurden. Sollte der spitzenfreie Transistor in absehbarer Zeit auf dem Markt erscheinen, was durchaus anzunehmen ist, so würde mit grösster Wahrscheinlichkeit damit gleichzeitig der spitzenfreie Detektor auf dem Markt erscheinen, da zu seiner Herstellung dieselben Fabrikationsmethoden anzuwenden sind, wie für den spitzenfreien Transistor. ...

Da die vorliegende Anmeldung die Priorität vom 11.2.1944 hat, liegt sie mit Sicherheit vor den entsprechenden amerikanischen Anmeldungen.”²⁰⁷

Siemens & Halske übernahmen daraufhin die Patentanmeldung zu der von Welker vorgeschlagenen Aufwandsentschädigung von 500 DM.²⁰⁸ Doch im September 1953 ließ *Siemens & Halske* das (mittlerweile erteilte) Patent mit der Nummer „DBP 889 656 fallen ..., weil es uns nach dem gegenwärtigen Stand als überholt erscheint.”²⁰⁹ Welker erhielt zwar die Möglichkeit, es auf eigene Kosten für DM 110.- weiter aufrecht zu erhalten, ergriff diese aber nicht.²¹⁰

Welker hat, wie dieses Beispiel zeigt, einige seiner Patentanmeldungen mit großem Aufwand weiterverfolgt und eine kommerzielle Verwertung durch *Siemens* angestrebt, aber andere, wie das französische Transistorpatent, völlig unerwähnt gelassen. Seine gemeinsam mit Mataré durchgeführten Transistorversuche aus der Pariser Zeit waren nach Aussagen ehemaliger Kollegen bei *Siemens* völlig unbekannt, obwohl

²⁰³ „Patentansprüche“, gestempelt Heinrich Brüggemann, 1. Februar 1944, HWD 001.

²⁰⁴ Welker an Nuber, 2. Sept. 1948, HWD 001.

²⁰⁵ Ebenda.

²⁰⁶ Nuber an Welker, 1. Dez. 1948 und weiterer Schriftwechsel dazu, HWD 001.

²⁰⁷ Welker an die Patentabteilung von *Siemens & Halske*, 30. Juni 1952, HWD 001.

²⁰⁸ *Siemens & Halske* an Welker, 5. Aug. 1952, HWD 001.

²⁰⁹ *Siemens & Halske* an Welker, 10. Sept. 1953, HWD 001.

Siehe das Patent Welker, *Detektor zur Gleichrichtung*, 1944, DBP 889 656, erteilt am 14. Sept. 1953.

²¹⁰ *Siemens & Halske* an Welker, 10. Sept. 1953; Welker an Dr. Roloff, 14. Sept. 1953, HWD 001.

Siemens an dem entsprechenden Patent sicher hoch interessiert gewesen wäre. Bei *Siemens* machte er nur sein Feldeffekt-Transistor-Patent von 1945 bekannt.²¹¹

Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten wäre, daß Welker bald nach der Erklärung des Punktkontakt-Transistors durch Bardeen und Brattain eingesehen hat, daß Mataré und er mit ihrer Erklärung auf dem völlig falschen Weg gewesen waren. Daher hielt er dieses Patent und seine Arbeiten dazu für wenig bedeutsam und empfand sie eher als peinlich.²¹²

Eine weitere Erklärung wäre, daß er durch andere Arbeiten und Interessen zu stark abgelenkt war. Beispielsweise lag sein wissenschaftliches Hauptinteresse in den Jahren 1947-1949, wie sein Briefwechsel zeigt, mit Sicherheit bei der Theorie der Supraleitung.²¹³ In den Jahren ab 1950 standen bereits die III-V-Verbindungshalbleiter im Vordergrund und beanspruchten die volle Aufmerksamkeit.

Gemischte Leitung und Supraleitung

Als Welker 1947 seine Überlegungen zur Theorie der Supraleitung wieder aufnahm, versuchte er, die Hypothese der Energielücke im Energiespektrum eines Supraleiters, die er früher lediglich postuliert hatte, genauer zu begründen, da ihm klar war, daß nicht jede Lücke im Energiespektrum den bei Supraleitern beobachteten vollständigen Diamagnetismus lieferte. Insbesondere haben auch Isolatoren eine Lücke im Energiespektrum. Daher stellte Welker spezielle Anforderungen an die Wellenfunktionen der Zustände auf, die dafür sorgen sollten, daß einerseits ein elektrischer Leiter beschrieben wird, und andererseits beim Anlegen eines Magnetfeldes die Umbesetzung von Zuständen verhindert und so der ideale Diamagnetismus erzeugt werden sollte.²¹⁴

Im Detail sollte, „wie aus der Londonschen phänomenologischen Theorie gefolgert werden kann, ... im supraleitenden Zustand eine Verfestigung der Elektroneneigenfunktionen stattfinden ohne daß der magnetische Stromanteil (Larmor-Strom) ... verschwindet.“²¹⁵ Das war nach Welkers Meinung dadurch zu erreichen, daß man sich einen „gemischten Leiter“ vorstellt. „Dabei wird unter einem gemischten Leiter ein Elektrizitätsleiter verstanden, in welchem der Ladungstransport gleichzeitig durch Elektronen und Defektelektronen erfolgt.“²¹⁶ Bedingung für das Auftreten von „gemischter Leitung“ war nach Welker das Überlappen des Leitungsbandes mit dem Valenzband. Das konnte theoretisch bei mehrwertigen Metallen vorkommen und wurde auch festgestellt. Bandüberlappung führt zu höherer Streuwahrscheinlichkeit der Elektronen beziehungsweise Defektelektronen und somit zu höherem Widerstand. „Diese Feststellung paßt gut zu der summarischen Feststellung, daß die Supraleiter im Normalzustand schlechter leiten als die bestleitenden Metalle.“²¹⁷

²¹¹ Persönliche Mitteilung von B. Bosch (Bochum), der 1992-1994 dazu ehemalige Mitarbeiter Welkers befragt hat. (Bosch an Handel, 2. März 1998).

Herbert Weiß, ein ehemaliger Kollege Welkers, diskutierte 1975 ausführlich Welkers Transistorarbeiten, ohne die Experimente der Pariser Zeit auch nur zu erwähnen (Weiß, *Steuerung*, 1975). Auch Welker selbst erwähnte seine Pariser Experimente in rückblickenden Darstellungen nie, obwohl er von seinen Feldeffekt-Experimenten von 1945 berichtete. (Siehe z.B. Welker, *Solid State Research*, 1979, S. 14-15).

²¹² Das würde erklären, wieso er es bei *Siemens* nicht erwähnte. Beweisen läßt es sich allerdings nicht.

²¹³ Beispielsweise kommunizierte er ab Anfang 1948, also zur Zeit der Transistorexperimente, intensiv u.a. mit Werner Heisenberg und Eduard Justi über Probleme der Supraleitung (siehe HWD 006). Seine erste Nachkriegsarbeit zu diesem Thema reichte er schon am 21. Juni 1948 ein (siehe Welker, *Wellenmechanisches Modell*, 1948).

²¹⁴ Welker, *Wellenmechanisches Modell*, 1948, S. 461-462.

²¹⁵ Ebenda, S. 467.

²¹⁶ Welker, *Zusammenhang*, 1949, S. 1.

²¹⁷ Ebenda, S. 2.

Im weiteren betrachtete Welker ausführlich den Zusammenhang der Bandstruktur der Metalle mit dem Auftreten der Supraleitung und der Lage der Metalle im periodischen System. Er konnte zeigen, daß die Voraussagen seiner Theorie qualitativ in Übereinstimmung mit den Experimenten waren. Sein wichtigster Parameter war dabei das „reduzierte Elektronenvolumen“, in das die Elektronenzustandsdichte, das Ionenvolumen und weitere Parameter der Kristallstruktur eingingen. Solche Überlegungen, die die Lage der Supraleiter im Periodensystem in Verbindung mit einer einzigen Größe wie dem „Atomvolumen“ oder „Elektronenvolumen“ zu bringen versuchten, hatte es vorher schon einige gegeben. Zuletzt hatte Eduard Justi auf der Physikertagung in Göttingen im Oktober 1946 darüber berichtet. Alle diese Modelle hatten aber den Nachteil, daß sie nicht alle Supraleiter zu einer Gruppe mit einheitlichem Parameter zusammenfassen konnten.²¹⁸ Erst im Wert des von Welker definierten „reduzierten Elektronenvolumen“ unterschieden sich die damals bekannten Supraleiter signifikant von den Materialien, die nicht supraleitend werden.²¹⁹ Aber es blieben noch zu viele Fragen offen, als daß dieser Theorie ein durchschlagender Erfolg vergönnt gewesen wäre.²²⁰ Wichtig für die Halbleiterforschung waren Welkers Arbeiten zur Supraleitung allerdings in zweierlei Hinsicht:

Erstens betrachtete Welker schon Anfang 1948 „gemischte Leiter“, ohne diese Idee auf den Halbleiter Germanium anzuwenden, da seiner Meinung nach die „gemischte Leitung“ ausschließlich durch überlappende Bänder entstand und „man von den im Diamantgitter kristallisierenden Elementen (Si, Ge, graues Sn) aus lichtelektrischen Untersuchungen, Leitfähigkeitsmessungen usw. [wußte], daß die für die Leitfähigkeit in Frage kommenden Energiebänder nicht überlappen.“²²¹ Das bedeutete, daß bei Germanium keine „gemischte Leitung“ (der erwähnten Art) vorliegen konnte, und daher zog er sie auch bei der Erklärung des Transistoreffekts nicht in Erwägung.²²²

Zweitens hatte Welker schon 1948 eine systematische Untersuchung von Materialklassen durchgeführt und den Zusammenhang zwischen der Lage der Elemente im Periodensystem und der Leitfähigkeit am Beispiel der Supraleitung betrachtet. Als Mataré ihn mit den internationalen Forschungsergebnissen an Verbindungshalbleitern bekannt machte, war er daher bereits sensibilisiert für Zusammenhänge von elektrischen Eigenschaften mit Kristallstrukturen und der Lage der Elemente im Periodensystem.

²¹⁸ Justi, *Periodisches System*, 1946; Justi, *Leitfähigkeit*, 1948, bes. S. 187-196.

Erste Ideen in diese Richtung hatte Klaus Clusius bereits 1932 formuliert. Ihm war es gelungen zu zeigen, „daß sämtliche Supraleiter ein Atomvolumen haben, das zwischen 11 und 21 liegt. Ein zu kleines Atomvolumen scheint ebenso wie ein zu großes für den Eintritt der Supraleitung ungünstig zu sein.“ (Clusius, *Supraleitfähigkeit*, 1932, S. 321.) Bereits die bis 1943 neu gefundenen supraleitenden Elemente ließen sich aber nicht mehr so leicht zusammenfassen, so daß W. Meißner und G. Schubert sich entschieden, einem mündlichen Hinweis Welkers folgend, „statt des Atomvolumens den für ein Leitungselektron ... im Metall zur Verfügung stehenden freien Raum zu verwenden.“ (Meißner/Schubert, *Abgrenzung*, 1943.) Diese Vorgehensweise lieferte eine gute, aber nicht perfekte Übereinstimmung mit den Daten. „Bemerkenswert sind zwei Folgerungen: 1. Die Tatsache, daß sinkende Volumen die S-Leitfähigkeit begünstigt, spricht für Wechselwirkungen der Elektronen als Ursache; 2. das Meißner-Schubert-Diagramm läßt anders als das Clusiusche die Möglichkeit offen, daß *sämtliche* metallischen Elemente s-leitend werden, falls man sie nur genügend tief abkühlt.“ (Justi, *Leitfähigkeit*, 1948, S. 190-192.)

²¹⁹ Welker, *Zusammenhang*, 1949, S. 3-13.

²²⁰ Eine erste erfolgreiche, mikroskopische Theorie der Supraleitung wurde erst 1957 von John Bardeen, Leon Cooper und Robert Schrieffer geliefert. (Siehe dazu Handel, *Historische Entwicklung*, 1994; Handel, *Research Styles*, 1996; Hoddeson u.a., *Collective Phenomena*, 1992).

²²¹ Welker, *Wellenmechanisches Modell*, 1948, S. 469.

²²² Später gab Welker diesen Standpunkt auf und betrachtete „gemischte Leitung“ unabhängig von ihrer Entstehungsweise sogar insbesondere in Halbleitern. (Siehe Madelung/Welker, *Gemischte Halbleiter*, 1953).

III-V-Halbleiter

Auf der berühmt gewordenen Konferenz in Reading (England) im Jahre 1950, auf der Shockley, Brattain und Bardeen erstmals ausführlich ihre Arbeiten der wissenschaftlichen Öffentlichkeit Europas vorstellten, teilte C. A. Hogarth mit, daß auch aus natürlichem Bleiglanz (PbS) Transistoren hergestellt werden konnten. Während sich natürliche Bleiglanz-Kristalle für Transistoren gut eigneten, verliefen die Versuche mit künstlichem PbS im wesentlichen negativ.²²³ Bleiglanz wurde als eine chemische Verbindung aus Blei (Pb) und Schwefel (S) in Kristallen gefunden, die Halbleitercharakter aufwiesen und je nach Herkunft n- oder p-leitend sein konnten.²²⁴ Mataré hatte seinem Kollegen Welker, der an dieser Tagung nicht teilgenommen hatte, von den überraschenden Resultaten mit diesem Verbindungshalbleiter berichtet.²²⁵

Angeregt durch seine am Periodensystem orientierten systematischen Überlegungen zur Supraleitung untersuchte Welker nun, welche Verbindungen von Elementen unterschiedlicher Hauptgruppen halbleitende Eigenschaften haben würden. Er kam dabei zu dem Schluß, daß Verbindungen aus Elementen der III. und der V. chemischen Hauptgruppe ähnliche Eigenschaften aufweisen müßten wie die bekannten Halbleiter der IV. Hauptgruppe.²²⁶

Um seine Hypothesen zu überprüfen, stellte er heimlich einen Indiumantimonid-Kristall (InSb) her, da es diese Verbindung nicht fertig zu kaufen gab. Schon die ersten Messungen des spezifischen Widerstands und des Hall-Effekt überzeugten ihn von den halbleitenden Eigenschaften dieser intermetallischen Verbindung.²²⁷ Die Heimlichkeit dieser Versuche mag durch die Vorstellung bestimmt gewesen sein, bei Verhandlungen mit einem möglichen neuen Arbeitgeber nicht in patentrechtliche Schwierigkeiten zu kommen. Erste Gespräche mit Prof. Trendelenburg, Direktor der neuen Forschungslaboratorien der *Siemens-Schuckertwerke*, waren bereits Mitte 1950 angelaufen und konnten nach erfolgreicher Demonstration des Indiumantimonid-Kristalls zum Ende des Jahres abgeschlossen werden. Welker verließ Paris und übernahm zum April 1951 die Leitung der Abteilung „Festkörperphysik“ im Erlanger zentralen Forschungslaboratorium, die er völlig auf die Erforschung der neuen III-V-Halbleiter ausrichtete.²²⁸

Auch Mataré war von den neuen Möglichkeiten der III-V-Halbleiter fasziniert. Aber sowohl auf diesem als auch auf anderen Gebieten gab es bei der CFS *Westinghouse* kein großes Forschungsinteresse. Daher beschloß Mataré, sich ebenfalls ein anderes Tätigkeitsfeld zu suchen und ergriff die Möglichkeit, nach Deutschland zurückzukehren und einen Halbleiterbetrieb zu gründen.²²⁹

²²³ Siehe u.a. den Tagungsbericht in *Elektrotechnische Zeitschrift* 1950, Jg. 71, S. 597-598; Gebbie/Banbury/Hogarth, *Crystal Diode*, 1950; Banbury/Henisch, *Frequency Response*, 1950.

In Deutschland war es später einem Funkbastler gelungen, aus „zwei handelsüblichen Detektoren mit Silberfeder und Bleiglanzkristall“ einen funktionsfähigen Bleisulfid-Transistor herzustellen. „Der praktischen Anwendung ist jedoch durch das rasche Ermüden des Kristalls eine Grenze gesetzt.“ (Friebe, *Selbstgefertigte Bleiglanz-Transistoren*, 1953.)

Doch nicht nur Bleiglanz wurde als möglicher Ersatzstoff diskutiert. „So brachte eine französische Firma [1953] einen Transistor heraus, der auf Siliciumkarbid-Bleisulfid-Basis beruht. Andere Materialien, wie Cadmiumtellurid, Bleitellurid, Cadmiumsulfid bieten ebenfalls solche Möglichkeiten. Versuche mit weiteren Materialien, die wesentlich billiger sein sollen als Germanium, werden augenblicklich in den USA durchgeführt.“ (Büll, *Kristalldioden und Transistoren*, 1953, S. 272.)

²²⁴ Welker, *Spitzendetektor*, 1941, S. 64.

²²⁵ Lebenslauf von Herbert Mataré, DM München.

²²⁶ Siehe dazu auch Madelung, *III-V-Verbindungen*, 1983, S. 80.

²²⁷ Welker, *Discovery*, 1976, S. 666; Heywang, *Memorial Address*, 1983.

²²⁸ Ebenda. Siehe dazu ausführlich das folgende Kapitel „Das Forschungslaboratorium der *Siemens-Schuckertwerke*“ ab S. 148.

²²⁹ Siehe dazu ausführlich das Kapitel „*Intermetall*“ ab S. 190.

Welchem Halbleitermaterial gehört die Zukunft? (1950)

In der unmittelbaren Nachkriegszeit wurde in weiten Bereichen der bereits vor oder während des Krieges eingeschlagene Weg weiterverfolgt. Das galt auch für die Halbleitertechnik.

Eberhard Spenke hatte sich vor dem Krieg bei *Siemens* intensiv mit der Schottky-Theorie und Leistungsgleichrichtern auseinandergesetzt. Nach dem Krieg stellte die Etablierung eines Laboratoriums zur wissenschaftlichen Untersuchung der Selengleichrichter innerhalb des *Siemens*-Konzerns eine konsequente Fortsetzung seiner Vorkriegsarbeiten dar. Durch die Forschung und Entwicklung in Pretzfeld gelang es bis 1950, den Funktionsmechanismus der Selengleichrichter zu verstehen und deren Herstellung technisch zu beherrschen. Jedoch war Spenke zu dieser Zeit schon klar, daß es geeignetere Halbleitermaterialien gab. Germanium war spätestens seit der Transistorerfindung in aller Munde, für Silizium konnte ihn Karl Seiler interessieren.

Seiler hatte seine während des Krieges begonnenen Arbeiten an Silizium mit Engagement und Erfolg in der frühen Nachkriegszeit weiterverfolgt und bald nach dem Krieg Siliziumdetektoren aus eigener Produktion vermarktet. Weitere Experimente hatten es ihm ermöglicht, 1948 erste Silizium-Flächendioden im Labormaßstab zu produzieren. Doch nach der Veröffentlichung der Erfindung des Punktkontakt-Transistors auf Germaniumbasis konzentrierten sich fast alle Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf das Halbleitermaterial Germanium. Die einfache Handhabbarkeit, die Reinheit, in der es herzustellen war, und die hohe Elektronenbeweglichkeit hatten die Erfindung des Transistors erst möglich gemacht. Das damals zur Verfügung stehende Silizium war bei weitem nicht rein genug, um den Transistoreffekt zu zeigen.

Auch Welker und Mataré waren dem Gebiet der Halbleiterforschung treu geblieben und hatten in ihrem Pariser Labor mit Germanium in Transistoranordnungen experimentiert, die Versuchsergebnisse aber nicht völlig richtig deuten können. Auch bei ihren Experimenten hatten sich die Vorteile von hochreinen Germaniumkristallen gezeigt, so daß sie von technisch handhabbaren Halbleitermaterialien mit hohen Elektronenbeweglichkeiten völlig überzeugt waren.

Für die Halbleitertechnik schien 1950 Germanium das Halbleitermaterial der Zukunft zu sein. In einem Überblicksartikel in der *Funkschau* von Mitte 1950 zum Thema „Kristalldioden - Entwicklung in Theorie und Praxis“ hieß es daher nach einer Erläuterung der neuesten Fortschritte auch:

„Diese wenigen Beispiele zeigen schon die Überlegenheit des Germaniums, weshalb man in neuester Zeit wohl nur noch mit diesem Kristall arbeitet. Für Empfangsdioden bei Zentimeterwellen verwendet man jedoch auch *noch* Silizium, da dieses im obigen Frequenzgebiet einen geringeren Rauschfaktor als Germanium besitzt.“²³⁰

²³⁰ Büll, *Kristalldioden*, 1950, S. 210 [Hervorhebung KH].

Industrielle Halbleiterforschung und -entwicklung

Nach der Währungsreform vom Juni 1948 hatte sich die wirtschaftliche Lage in (West-) Deutschland schnell wieder erholt. Die erste Zeit des Wiederaufbaus war durch eine konservative und skeptische Einstellung der deutschen Industrie gegenüber Innovationen bestimmt gewesen, da diese zunächst die Produktionsanlagen soweit wieder aufbauen mußte, daß die Produktion mit den Vorkriegstechnologien aufgenommen werden konnte. Die damit im In- und Ausland erwirtschafteten Gewinne wurden dann langsam in neue Technologien investiert, die nach und nach die alten ablösten.¹ Der bundesdeutsche wirtschaftliche Erfolg wurde zunächst von traditionellen Qualitätsprodukten und nicht von modernen Massenprodukten bestimmt, und stützte sich mehr auf die große Vielfalt und Flexibilität der Industrie als auf ein paar Spitzenprodukte.² Erst der endgültige Durchbruch der fordistischen Massenproduktion in der Automobilbranche durch die Produktion des VW Käfers Mitte der 1950er Jahre läutete eine neue Ära ein.³

Ähnliche Tendenzen galten auch für die bundesdeutsche Elektroindustrie. So wurden beispielsweise bei *Siemens* nach dem „Zusammenbruch zunächst alle Kräfte auf die primitivsten Möglichkeiten für die Durchführung der Arbeiten“ und zum Aufbau der Produktion ausgerichtet.⁴ War zunächst die Arbeitsmoral der Beschäftigten bis zur Währungsreform noch sehr gering, so änderte sich dies danach schlagartig, und Ende 1948 konnten im Geschäftsbericht neue Perspektiven angesprochen werden:

„Nachdem die Grundlage für die Produktion geschaffen ist, wurde den Werken die besondere Pflege und Betreuung der Technik zur Pflicht gemacht, und zwar sowohl hinsichtlich der Grundlagenforschung, Entwicklung und Konstruktion als auch nach der fertigungstechnischen und Qualitätsseite.“⁵

Bald darauf kamen Pläne auf, „ein zentrales, mit allen Hilfsmitteln der modernen Wissenschaft ausgerüstetes Laboratorium einzurichten,“⁶ das unter anderem auch der zunehmenden technischen Bedeutung der neuen Halbleiterwerkstoffe wie Germanium und Silizium Rechnung tragen sollte.

Insbesondere nach der Erfindung des Transistors war die zukünftige Bedeutung von Halbleiterforschung und -entwicklung klar geworden. Diese wurde bald in mehreren Laboratorien der unterschiedlichen *Siemens*-Werke betrieben. Im folgenden werde auf die Forschungen in der von Heinrich Welker geleiteten „Abteilung Festkörperphysik“ des zentralen Forschungslaboratoriums der *Siemens-Schuckertwerke* in Erlangen und das bereits erwähnte, ebenfalls zu den *Siemens-Schuckertwerken* gehörige Laboratorium für Halbleiter in Pretzfeld unter Leitung von Eberhard Spenke ausführlicher behandelt. Auf weitere Forschungen, die insbesondere bei *Siemens & Halske* in Berlin,

¹ Radkau, *Technik in Deutschland*, 1989, S. 313-318.

Radkau argumentiert, daß erst in „den späten fünfziger Jahren ... technikgeschichtlich eine neue Ära“ begann, und daß die frühe Nachkriegszeit aus technikhistorischer Sicht der vorausgehenden Periode zuzuschlagen sei. Bis dahin wurde die technische Entwicklung der Ökonomie untergeordnet und erst danach konnten sich Automatisierung und Massenproduktion durchsetzen.

² Stokes, *Wirtschaftswunder*, 1991, S. 21-22.

³ Wellhöner, *Wirtschaftswunder*, 1996, bes. S. 109-117.

Radkau nennt 1957 als das Stichjahr für den Übergang (Radkau, *Technik in Deutschland*, 1989, S. 314-318).

⁴ Geschäftsberichte Zentral-Werksverwaltung, 1.10.1946 - 30. 9. 1947, SAA 15 / Lk 961.

⁵ Geschäftsberichte Zentral-Werksverwaltung, 1.10.1947 - 30. 9. 1948, [Hervorhebungen im Original], SAA 15 / Lk 961.

⁶ Trendelenburg, *Aufbau und Ziele*, 1952, SAA 35-46 / Lc 375, S. 7.

Karlsruhe und München durchgeführt wurden, kann hier nur am Rande im Zusammenhang mit der Siliziumreinigung hingewiesen werden.⁷

Aber nicht nur *Siemens*, sondern auch andere große deutsche Elektrofir­men wandten sich Ende der 1940er oder Anfang der 1950er Jahre der Beschäftigung mit den neuen Halbleitern zu. Als ein Beispiel dafür wird die *Süddeutsche Apparat­e-Fabrik* in Nürnberg diskutiert, deren Detektorlaboratorium von Ende 1948 bis Anfang 1956 unter der Leitung von Karl Seiler stand.⁸

Schließlich bot die sich erholende wirtschaftliche Lage die Möglichkeit zu Firmen­neugründungen auf dem zwar noch kleinen aber expandierenden Gebiet der Dioden- und Transistorenproduktion. Als Beispiel dafür wird die 1952 unter Beteiligung von Herbert Mataré gegründete Firma *Intermetall* diskutiert, deren Leitung 1956 Karl Seiler übernahm.⁹

Das Forschungslaboratorium der Siemens-Schuckertwerke

Erste Pläne für ein zentrales wissenschaftliches Laboratorium der *Siemens-Schuckertwerke* in Erlangen kamen Anfang 1949 auf. Zu diesem Zeitpunkt waren die dringendsten Wiederaufbauarbeiten abgeschlossen, die Umsätze entwickelten sich günstig und erreichten bereits wieder annähernd den Vorkriegsstand.¹⁰ Nun „konnte man allmählich der Frage wieder nähertreten, wissenschaftliche Entwicklungsarbeit auf lange Sicht einzuleiten.“¹¹ Mit einem neuen Zentrallabor sollte an die erfolgreiche Tradition der *Siemens*-Forschung aus der Vorkriegszeit angeknüpft werden.

Bereits vor dem Zweiten Weltkrieg hatte man bei *Siemens* erkannt, daß bei Industrieforschung sich zwei unterschiedliche Anforderungen widerstreitend gegenüberstehen. Einerseits besteht das Problem, den Erfahrungsaustausch der Wissenschaftler und Techniker untereinander zu fördern und die wissenschaftliche Kommunikation anzuregen. Nur so kann eine wissenschaftliche und kreative Atmosphäre entstehen. Andererseits müssen die Forscher in den Produktionsablauf soweit eingebunden werden, daß sie die konkreten Probleme der Konstruktion und Produktion berücksichtigen können. Die erste Forderung würde im Extremfall zu einer zentralen Forschungsabteilung führen, in der möglichst alle Wissenschaftler und Techniker in engem Kontakt miteinander arbeiten. Umgekehrt würde die zweite Forderung zu einer Angliederung der Forschungs- und Entwicklungsabteilungen an die jeweiligen Produktionsstätten führen, da nur dort ein tiefgehender Einblick in die Probleme der Fertigung möglich wäre.¹²

Bei *Siemens* war schon in den 1920er Jahren versucht worden, beide Anforderungen miteinander zu kombinieren. Einerseits wurde ein Großteil der konkreten Entwick-

⁷ Siehe dazu ausführlicher Gaudlitz, *Historischer Rückblick I*, 1962, SAA 35-78 Lc 403; Gaudlitz, *Historischer Rückblick II*, 1963, SAA 35-78 Lc 403; Plettner, *Abenteuer Elektrotechnik*, 1994, S. 188-196; Pfisterrer, *Geschichte des Reinst-Siliziums*, 1994.

⁸ Weitere traditionsreiche Firmen, die Anfang der 1950er mit Dioden und Transistoren auf den deutschen Markt drängten, waren beispielsweise *Philips*, *Telefunken* und *TEKADE* („Süddeutsche Telefon-Apparate-, Kabel und Drahtwerke AG“, später „TEKADE, Felten und Guillaume“).

Zu *Philips* siehe Schopmann, *Industrious Science*, 1988; Schopmann, *Philips' Antwort*, 1983 und Erker, *Forschung und Entwicklung*, 1993. Zu den Halbleiteraktivitäten von *Telefunken* und *TEKADE* liegen noch keine historischen Studien vor.

⁹ Weitere Firmen­neugründungen stellten zum Beispiel die Firmen *Proton* von Wolfgang Büll in Planegg bei München und die Firma *Kristallogen* von Rudolf Rost in Hannover dar.

¹⁰ Feldenkirchen, *Wiederaufbau*, 1997, S. 193-195.

¹¹ Trendelenburg, *Aufbau und Ziele*, 1952, SAA 35-46 / Lc 375, S. 6.

¹² Braun, *Innovationskrieg*, 1994, S. 60-63.

lungsarbeiten in einzelnen Werkslaboratorien zusammengefaßt, die jeweils einzelnen Produktionsstätten zugeordnet und dort für die konkreten Probleme in der Produktion zuständig waren. Diese Laboratorien waren aber groß genug, um einen fruchtbaren internen Gedankenaustausch unter den dort tätigen Ingenieuren und Wissenschaftlern zu gestatten. Andererseits wurde 1916 in Berlin ein zentrales „Forschungslaboratorium der *Siemens & Halske AG* und der *Siemens-Schuckertwerke GmbH*“¹³ gegründet, das sich langfristigen Forschungsaufgaben widmen sollte, deren praktische Anwendung durch einzelne Produktgruppen oder Verfahrensgebiete noch nicht vorausgesehen werden konnte. An dieser Arbeitsteilung orientierten sich auch die Aufgaben des 1951 gegründeten Forschungslaboratoriums der *Siemens-Schuckertwerke* in Erlangen. Neben der Einrichtung eines zentralen Forschungslaboratoriums wurden auch einzelne Werkslaboratorien an anderen Orten aufgebaut.¹⁴

Von Anfang an wurde bei der Einrichtung des Forschungslaboratoriums auch ein weiteres Problem beachtet, mit dem sich speziell Industrielaboratorien auseinander zu setzen hatten. Es war sicherzustellen, daß auch die Wissenschaftler im zentralen Forschungslaboratorium die Interessen des Unternehmens im Auge behielten. In einem ersten internen Schreiben über die Einrichtung eines zentralen Forschungslaboratoriums hieß es daher:

„So sehr es einerseits wünschenswert ist, daß auch die in einem großen Forschungslabor der Industrie tätigen Wissenschaftler möglichst frei ihren wissenschaftlichen Plänen nachgehen können, so ist es andererseits doch unbedingt erforderlich, daß sie von vorne herein ein klares Verantwortungsgefühl gegenüber den speziellen Belangen der Firma erlangen und dementsprechend handeln. In dieser Richtung hat die Leitung eines Laboratoriums auch eine erzieherische Arbeit zu leisten.“¹⁵

Auf die konkreten Forschungen im Forschungslaboratorium hat diese „erzieherische Arbeit“ aber keinen merklichen Einfluß gehabt. Die Wissenschaftler konnten frei ihren Forschungen nachgehen, darüber publizieren und mit anderen Wissenschaftler kommunizieren. Von organisatorischen Aufgaben blieben sie weitestgehend verschont, und ihre Mithilfe bei konkreten Problemen der Produktion sollte auf ein Minimum beschränkt bleiben und nur solche Aufgaben umfassen, „die die Werkslaboratorien tatsächlich nicht lösen können.“¹⁶

Die Abteilung „Festkörperphysik“

In den ersten Vorschlägen zur Gründung des Forschungslaboratoriums von 1949 wurden zunächst fünf Abteilungen diskutiert.¹⁷ Doch das Bekanntwerden der Transistorerfindung änderte diese Pläne, so daß eine eigene Abteilung zum Thema „Festkörperphysik“ geplant wurde.

„Als wir die erste Planung begannen, waren gerade die ersten Nachrichten aus USA über die Entdeckung des Transistoreffekts im Germanium zu uns gekommen. ... So erschien es uns damals besonders wichtig, in einem möglichst frühen Ausbauzustand an die Halbleiterfragen heranzugehen.“¹⁸

¹³ Es wurde zunächst als „Physikalisch-Chemisches-Laboratorium“ 1916 gegründet und erst 1924 in Forschungslaboratorium umbenannt. (Trendelenburg, *Geschichte der Forschung*, 1975, S. 46.)

¹⁴ Braun, *Innovationskrieg*, 1994, S. 60-63; Trendelenburg, *Geschichte der Forschung*, 1975. Das „Forschungslaboratorium“ war 1951 als „Allgemeines Laboratorium“ gegründet worden, wurde aber bald umbenannt.

¹⁵ Trendelenburg an Scharowsky, März 1949, Abschrift in SAA 35-46 / Lc 375.

¹⁶ Trendelenburg, *Aufbau und Ziele*, 1952, SAA 35-46 / Lc 375, S. 25.

¹⁷ Meßwesen, Magnetik (Magnetische Materialien, etc. ...), Elektronenphysik (Trockengleichrichter, Halbleiter, Kontaktphysik, erforderlichenfalls auch Gasentladungen), Anorganische Chemie und Organische Chemie. (Trendelenburg an Scharowsky, März 1949 (Abschrift), SAA 35-46 / Lc 375.)

¹⁸ Trendelenburg, *Aufbau und Ziele*, 1952, SAA 35-46 / Lc 375, S. 19.

Neben der Abteilung „Festkörperphysik“ sollten noch vier weitere wissenschaftliche Abteilungen eingerichtet werden: „Meßwesen“ (Leitung Dr. Schade), „Gasentladung“ (zunächst Dr. H. Maecker, später Prof. Dr. Finkelnburg), „Anorganische Chemie“ (Dr. Iwantschew) und „Organische Chemie“ (Dr. Kasten). Dazu kam eine Abteilung „Verwaltung und Betrieb“ (Leitung Ob. Ing. Lutz), der auch die mechanische und die Glasbläser-Werkstatt unterstanden. Für den ersten Ausbau bis zum Oktober 1952 wurde ein zunächst bescheidener Personalstand von 25 Wissenschaftlern bei insgesamt rund 70 Angestellten Gesamtpersonal des Laboratoriums angestrebt, der sich in den nächsten Jahren aber beständig erhöhte.¹⁹

Auf der Suche nach einem Leiter für die Abteilung Festkörperphysik nahmen die *Siemens-Schuckertwerke* im August 1950 auch mit Heinrich Welker in Paris Kontakt auf. Bei dieser Gelegenheit konnte Welker dem Leiter der Forschungslaboratorien, Prof. Dr. Ferdinand Trendelenburg, seine Idee einer ganz neuen Materialklasse vorstellen, die sich durch eine Kombination der Elemente der III. mit denen der V. Hauptgruppe ergaben. Nach seinen theoretischen Überlegungen und ersten experimentellen Bestätigungen sollten diese Verbindungen halbleitenden Charakter aufweisen und technisch interessante Materialeigenschaften haben. Trendelenburg reagierte enthusiastisch auf die Möglichkeit, neue noch unbekannte Halbleiterwerkstoffe herstellen zu können, und gewann Welker dafür, nach Erlangen ins Forschungslaboratorium zu kommen.²⁰

Schon bald darauf reichten die *Siemens-Schuckertwerke* gemeinsam mit Welker ein grundlegendes Patent ein, das allgemein „elektrisches Halbleitergerät“ schützte, das dadurch gekennzeichnet war, daß „als Halbleiter eine Verbindung mit Atomverhältnis 1:1“ der Elemente der III. und V. Hauptgruppe verwendet wurden. Damit wollten die *Siemens-Schuckertwerke* sich bei der wirtschaftlichen Ausnutzung der neuen Materialklasse Vorteile verschaffen, um auf dem Halbleitergebiet mit den führenden amerikanischen Firmen konkurrieren und von deren Patenten unabhängig werden zu können. Auch die deutschen Konkurrenten sahen in der Patentierung einer ganzen Materialklasse eine Bedrohung und brachten Einwände gegen das Patent vor. Dennoch wurde es 1955 in Deutschland in vollem Umfang erteilt.²¹

Die Ausrichtung der Forschung auf die neuen Materialien folgte diesen wirtschaftlichen Überlegungen, stellte aber auch ein „physikalisch wohlbegründete[s] Arbeitsprogramm“²² dar und stimmte mit der generellen Philosophie des Forschungslaboratoriums der *Siemens-Schuckertwerke* überein, die Ferdinand Trendelenburg 1952 so formuliert hatte:

„Wenn überhaupt noch der Anschluss an die ausländische Forschung gewonnen werden kann, und wenn wir überhaupt noch hoffen können, ernsthaft in der internationalen Wissenschaft mitreden zu können, so ist dies nur dann möglich, wenn wir eine ganz scharfe Konzentration aller Kräfte auf bestimmte aussichtsreich erscheinende wissenschaftliche Gebiete vornehmen.“²³

¹⁹ Ebenda, S. 7-12. Siehe für die weitere Entwicklung die Berichte zur Einweihung des neuen Forschungszentrums der *Siemens-Schuckertwerke* im Mai-Heft 1965 der *Siemens-Zeitschrift*.

²⁰ Ebenda, S. 19; Welker, *Discovery*, 1976, S. 656.

²¹ Oszietski, *Frühe Halbleiterforschung*, 1989, S. 155; Welker, *Elektrisches Halbleitergerät*, 1951, DBP 970420.

Insgesamt hat es gegen dieses Patent in Deutschland fünf Einsprüche von unterschiedlichen Firmen gegeben. Darunter waren die auch *Süddeutsche-Apparatefabrik* (SAF) und die Firma *Intermetall*, von denen an anderer Stelle die Rede ist. (Trendelenburg, Vortrag auf der wissenschaftlichen Tagung des FL - 5. April 1955, SAA 35-46 / Lc 375.)

Weltweit soll es sogar über einhundert Einsprüche gegeben haben (Plettner, *Elektrotechnik*, 1994, S. 204). Das grundlegende Patent wurde am 10. März 1952 in den USA eingereicht und am 5. Juli 1957 erteilt (Welker, *Semiconductor Devices*, 1952, US-Patent 2,798,989.)

²² Welker, „Fortschritte der Arbeiten auf dem Halbleitergebiet“ (Vortrag zur AL-Tagung, März 1953), SAA 35-46 / Lc 375.

²³ Trendelenburg, *Aufbau und Ziele*, 1952, SAA 35-46 / Lc 375, S. 25.

Entsprechend wurden große Finanzmittel zum Aufbau eines auf die III-V-Halbleiter spezialisierten Labors bereitgestellt. Welker ergriff die sich bietende Möglichkeit, von seiner rein theoretischen und spekulativen Arbeit ausgehend die neue Materialklasse auf einer breiten Basis auch experimentell zu untersuchen, und baute ab April 1951 die Abteilung Festkörperphysik mit dem Forschungsschwerpunkt „III-V-Halbleiter“ auf.²⁴

Theoretische Voraussagen über III-V-Halbleiter in Paris

In Paris hatte sich Welker zuvor mangels geeigneter experimenteller Möglichkeiten vornehmlich theoretisch mit der neuen Materialklasse der III-V-Verbindungen auseinandergesetzt und war zu einigen bemerkenswerten Schlußfolgerungen gekommen, die Vorteile dieser Verbindungen gegenüber dem Germanium erkennen ließen.

Um 1950 schien Germanium das überlegene Halbleitermaterial zu sein. Welker war zu dieser Einschätzung bereits während des Krieges gekommen, als er sich mit Materialeigenschaften auseinandersetzte, um das beste Material zur Anwendung in Spitzendetektoren zu finden. Damals hatte er sich zunächst wegen der günstigen technologischen Eigenschaften für Germanium entschieden, da beim Germanium „die äussere Formgebung ... durch Gießen möglich war“ und Halleffektmessungen, die eine Beurteilung der Ladungsträgerbeweglichkeit ermöglicht hätten, noch nicht vorlagen.²⁵ Eigene Messungen hatten aber bald die hohe Elektronenbeweglichkeit als weiteren entscheidenden Materialvorteil des Germaniums gegenüber den anderen Halbleitern wie Selen und Silizium ergeben.²⁶ Als auch der Transistoreffekt 1948 im Germanium gefunden wurde, schien das seine Einschätzung zu bestätigen. Zu diesem Zeitpunkt bewegte sich das allgemeine Interesse stark zum Germanium als dem beinahe ausschließlich betrachteten Halbleitermaterial hin.

Welker wußte aber auch, daß Silizium ebenfalls während des Krieges große technische Bedeutung erlangt hatte und sich insbesondere im Hochfrequenzbereich als mindestens konkurrenzfähig erwiesen hatte. Damals waren für Spitzendetektoren nur Elementhalbleiter in Frage gekommen, da sich die vorher üblichen Verbindungen wegen der großen, am Spitzenkontakt entstehenden Wärme in ihre Bestandteile zersetzten. Als Welker aber 1950 von der erfolgreichen Demonstration des Transistoreffekts im Bleiglanz (PbS) hörte, inspirierte ihn dies, systematisch zu untersuchen, welche weiteren Materialien noch als Halbleiter in Frage kämen und günstige physikalische wie technische Eigenschaften besäßen.²⁷ Welker kombinierte bei dieser Untersuchung moderne theoretische Vorstellungen über den Aufbau von Kristallen mit einer systematischen Durchforstung der zugänglichen Literatur und kleineren ersten Experimenten.²⁸

Angeregt durch seine früheren Überlegungen zur Theorie der Supraleitung, bei denen er unter anderem den Zusammenhang von Gitterstruktur und Leitfähigkeit untersucht hatte, betrachtete Welker zunächst die Elemente der vierten Hauptgruppe des Periodischen Systems und kam zu dem Schluß, daß „(C, Si, Ge, Sn) in den letzten Jahren ... als Halbleiter für Gleichrichter und Kristallverstärker ... eine große Bedeutung erlangt“ hatten. Welker untersuchte ihre Gemeinsamkeiten und fand heraus, daß ihr wichtigstes gemeinsame Kennzeichen das Diamantgitter war, in dem „die Atome

²⁴ Welker, *Discovery*, 1976, S. 656.

²⁵ Welker, *Germanium als Detektormaterial*, 1943, HWD 002, S. 8-9.

²⁶ Siehe Ringer/Welker, *Leitfähigkeit*, 1948 für eine Zusammenfassung der Meßergebnisse.

²⁷ Welker, *Halbleitende Verbindungen I*, 1952, S. 745.

²⁸ Im wesentlichen stütze er sich dabei auf Grimm/Sommerfeld, *Zusammenhang*, 1926; Goldschmidt, *Verteilungsgesetze*, 1927; van Arkel, *Reine Metalle*, 1939; Justi, *Leitfähigkeit*, 1948 und Pauling, *Chemical Bond*, 1948.

Experimentell stellte er nach eigenen späteren Aussagen im Jahre 1950 zu Versuchszwecken einen ersten stöchiometrischen Indiumantimonid-Kristall (InSb) her. (Welker, *Discovery*, 1976, S. 656; Heywang, *Memorial Address*, 1983).

durch eine gerichtete abgesättigte Valenzkraft zusammengehalten“ (kovalente beziehungsweise homöopolare Bindung) werden. Daraus ließen sich verschiedene wichtige Eigenschaften wie die Bandlücke und die hohe Beweglichkeit der durch Störstellen gebildeten Elektronen erklären. Welker argumentierte weiter:

„Die Bedeutung der vier genannten Körper für die Physik und Technik der Halbleiter einerseits, gewisse Schwierigkeiten bei diesen Körpern andererseits, wie Unmöglichkeit der synthetischen Herstellung beim Diamanten, Schwierigkeiten der Reinstdarstellung beim Silicium, hoher Preis beim Germanium und Instabilität des Diamantgitters beim grauen Zinn, zeigen das Problem auf, neue Körper zu finden, die das wichtige Kennzeichen der homöopolaren Bindung von einem Aufatom zu den nächsten vier Nachbarn besitzen. Darüber hinaus möchte man, im Hinblick auf technische Anwendungen, eine Möglichkeit finden, die Breite der verbotenen Zone in einer Weise variieren zu können, die in höherem Maße stetig ist, als dies beim Durchlaufen der Reihe C, Si, Ge, Sn der Fall ist.“²⁹

Das konnte nach Welkers Argumentation durch Verbindungen im Atomverhältnis 1:1 von Elementen aus der 3. und der 5. Hauptgruppe geschehen. Um die Ähnlichkeit mit den Elementen der vierten Gruppe aufrechtzuerhalten, konzentrierte sich Welker in der Patentanmeldung von 1951 auf die Verbindungen, „die in der kubischen Zinkblendestruktur kristallisieren“, die sich nur wenig vom Diamantgitter unterscheidet. Das Zinkblendegitter ist ein Diamantgitter für zweikomponentige Verbindungen. Von einem Atom ausgehend befindet sich auf dem jeweils nächsten Gitterplatz ein Atom der anderen Sorte.³⁰

Halbleitercharakter der „Nachbildungen“

Zunächst war fraglich, welche der in Frage kommenden Verbindungen auch tatsächlich Halbleitercharakter aufweisen würden. Welker konzentrierte sich bei seiner Argumentation auf den Aspekt der Nachbildungen. Die III-V-Verbindungen sollten gute Nachbildungen der Halbleiter der IV. Hauptgruppe darstellen (siehe Abb. 40). Zwar fielen einige der in Frage kommenden III-V-Verbindungen unter den Sammelbegriff „Intermetallische Verbindungen“, deren vereinzelte Halbleitereigenschaften auch von anderen Gruppen diskutiert wurden.³¹ Doch Welker ging es um die Definition und Erforschung einer ganzen Materialklasse von Halbleitern und für die Mehrzahl aller intermetallischen Verbindungen galt, daß sie Metallcharakter besitzen. Nur ein geringer Teil hatte Halbleitercharakter.³²

²⁹ Welker, *Elektrisches Halbleitergerät*, 1951, DBP 970420.

Interessanterweise bezieht Welker in dieser Patentanmeldung von 1951 das Element Kohlenstoff in der Form des Diamanten noch in seine Argumentation mit ein, während es schon in der ersten wissenschaftlichen Veröffentlichung nicht mehr betrachtet wird. (Welker, *Halbleitende Verbindungen I*, 1952.)

³⁰ Ebenda.

³¹ Insbesondere Eduard Justi und Günter Lautz in Braunschweig arbeiteten zu den Halbleitereigenschaften von intermetallischen Verbindungen und gaben auch an, warum sich Halbleitereigenschaften einstellen sollten. Zunächst bearbeiteten sie das Beispiel von Cadmiumantimonid (CdSb) um dann auch mit Aluminiumantimonid (AlSb) einen III-V-Halbleiter zu diskutieren. Eine Materialklasse ließ sich aber durch den Begriff nicht abgrenzen, und die Argumentation, warum bestimmte Verbindungen Halbleitereigenschaften aufweisen sollten, mußte für jede Verbindung einzeln und „unter besonderen Annahmen ... über die Kristallstruktur“ durchgeführt werden. Siehe dazu Justi/Lautz, *Halbleitereigenschaften*, 1952; Justi/Lautz, *Intermetallische Verbindungen I*, 1952 (Zitat); Justi/Lautz, *Intermetallische Verbindungen II*, 1952 und Justi/Lautz, *Verhalten von AlSb*, 1953.

³² Welker, *Halbleitende Verbindungen II*, 1953, S. 250.

Mindestens Indium (In), Gallium (Ga), Aluminium (Al) und Antimon (Sb) waren als Metalle anzusehen.

Periodensystem			III-V-Verbindungen			
III.	IV.	V. Gruppe				
B	C	N		BN		
				BP	AlN	
Al	Si	P	BA _s	AlP		GaN
			BS _b	AlAs	GaP	InN
Ga	Ge	As	AlSb	GaAs		InP
				GaSb	InAs	
In	Sn	Sb		InSb		

Abb. 40: Veranschaulichung des Entstehens der III-V-Verbindungen aus den Elementen der III. und V. Hauptgruppe des Periodensystems. Die Elemente der vierten Hauptgruppe und die III-V-Verbindungen mit halbleitendem Charakter sind fett gedruckt. (Abbildung nach Welker, *Halbleitende Verbindungen*, 1956).

Doch die Arbeiten von Linus Pauling und anderen zur chemischen Bindung ermöglichten es Welker, zu entscheiden, daß die „9 Verbindungen AlP, AlAs, AlSb, GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, InSb“ in der Zinkblendestruktur kristallisieren und damit den Halbleitern der vierten Hauptgruppe von der Struktur her ähnelten. Bei Kombination mit den leichteren Elementen (B, N) würde sich das Wurzitgitter gegen das Zinkblendegitter durchsetzen und die Ähnlichkeit wäre nicht mehr so ausgeprägt. Bei Kombinationen mit den hier nicht betrachteten schweren Elementen (Tl, Bi) würde der metallische Charakter überwiegen (siehe Abb. 40).³³

Im einzelnen griff Welker für seine Argumentation auf das von Linus Pauling in den 1930er Jahren entwickelte Konzept der „kovalenten Bindungsradien“ oder „Kovalenzradien“ zurück. Dieses ging davon aus, daß der Gleichgewichtsabstand zwischen zwei Atomen A und B beim gleichen Bindungstyp fast immer gleich ist („in most cases very nearly the same“). Daher war es möglich, den Atomen Bindungsradien zuzuordnen, die in einer additiven Beziehung zueinander standen. Die Summe beider Radien ergab ungefähr die Länge einer Einfachbindung zwischen den betreffenden Atomen. In Kristallgittern entsprach das dem Abstand zum nächsten Nachbarn.³⁴

Aus diesen Überlegungen konnte Welker schließen, daß die Gitterabstände der oben genannten neun Verbindungen denjenigen der jeweiligen Halbleiter der vierten Hauptgruppe sehr ähnlich sein müßten. Er schrieb beispielsweise:

„So ist der Abstand nächster Nachbarn im Si 2,34 Å, während seine Nachbildung, das AlP, den Abstand 2,36 Å besitzt. Ähnliches gilt sowohl für Germanium (2,44 Å) und GaAs (2,44 Å) als auch für graues Sn (2,80 Å) und InSb (2,80 Å). ... Rechnung und Messung stimmen dabei aufs beste überein.“³⁵

Die Übereinstimmung von Vorhersage und Meßdaten führte Welker weiter zu dem Schluß, daß bei den betrachteten neun III-V-Verbindungen hauptsächlich kovalente Bindung vorlag, sie im Zinkblendegitter kristallisierten und der Ionenanteil der Bindung zwar vorhanden aber schwach ausgeprägt sein würde. Damit war erwiesen, daß

³³ Welker, *Halbleitende Verbindungen I*, 1952, S. 745-746; Pauling, *Chemical Bond*, 1948; Goldschmidt, *Verteilungsgesetze*, 1927; Grimm/Sommerfeld, *Zusammenhang*, 1926.

³⁴ Pauling, *Chemical Bond*, 1948, S. 160-169.

³⁵ Welker, *Halbleitende Verbindungen I*, 1952, S. 746.

Die Informationen über Gitterstruktur und -abstand hat Welker Goldschmidt, *Verteilungsgesetze*, 1927 entnommen.

diese Verbindungen gute „Nachbildungen der vierwertigen Elemente“ darstellten und daher auch Halbleitercharakter haben sollten (siehe Abb. 40).³⁶

Beweglichkeit der Ladungsträger

Eine der wichtigsten Eigenschaften von Halbleitern war für Welker die Elektronenbeweglichkeit. Er hatte schon früher erkannt, daß ihre Größe (z.B. beim Germanium) mit zwei typischen Eigenschaften des Diamantgitters zusammenhing. Einerseits waren wegen „der hohen Bindungsfestigkeit im Diamantgitter ... die Amplituden der thermischen Gitterschwingungen besonders klein“ und andererseits „dürfte die Existenz der homöopolaren Brücken zu einer kleinen scheinbaren Masse m^* der Leitungselektronen führen“.³⁷

Diese Argumentation stimmte mit der quantenmechanischen Elektronentheorie der Metalle überein, die Welker seit seinen Studentagen vertraut war.³⁸ Danach galt für die elektrische Leitfähigkeit σ :

$$(7) \quad \mathbf{s} = e^2 n \frac{\mathbf{t}}{m_{\text{eff}}} = en \mathbf{m}_e$$

wobei e die Elementarladung, n die Elektronendichte, τ die Relaxationszeit und m_{eff} die effektive Masse der Elektronen darstellen. Mit μ_e wird die Elektronenbeweglichkeit bezeichnet. Für sie ergibt sich:³⁹

$$(8) \quad \mathbf{m}_e = \frac{e \mathbf{t}}{m_{\text{eff}}}$$

Die Elektronenbeweglichkeit μ_e hängt entsprechend von der effektiven Masse der Elektronen m_{eff} und der Relaxationszeit τ ab.

Die effektive Masse m_{eff} ist durch die Bandstruktur des Kristalls bestimmt. Eine große Krümmung der Bänder an der Fermikante führt zu einer kleinen effektiven Masse der Leitungselektronen. Welker argumentierte, daß diese Krümmung bei kovalenter (homöopolarer) Bindung wegen der Kurzreichweitigkeit der Bindungskräfte größer sei als bei der metallischen Bindung. Bei kovalenter Bindung dominiert die Wechselwirkung zwischen den nächsten Nachbarn, und sie findet sich daher hauptsächlich in Stoffen, die wie Diamant, Silizium, Germanium und grauer Zinn im Diamantgitter vorliegen. Eine exakte Theorie der Relaxationszeit τ lag zwar 1951 noch nicht vor, jedoch war klar, daß die Relaxationszeit wesentlich von der Wechselwirkung der Leitungselektronen mit den thermischen Gitterschwingungen bestimmt war. Die hohen Bindungskräfte im Diamantgitter führten aber dazu, daß die Amplituden dieser Gitterschwingungen sehr klein waren, daher sollte die Relaxationszeit sehr groß sein.⁴⁰ Welker schloß aus diesen Überlegungen, daß alle im Diamantgitter kristallisierenden Stoffe sowohl eine geringe effektive Masse als auch eine große Relaxationszeit der Leitungselektronen aufweisen müßten und daher eine hohe Elektronenbeweglichkeit hätten.

³⁶ Ebenda, S. 746.

³⁷ Ebenda, S. 745. Siehe auch schon Ringer/Welker, *Leitfähigkeit*, 1948, S. 28-29.

³⁸ Fröhlich, *Elektronentheorie der Metalle*, 1936 gibt eine recht detaillierte Darstellung der quantenmechanischen Elektronentheorie der Metalle und wurde von Welker immer wieder zitiert.

³⁹ Entsprechende Überlegungen gelten auch für die Löcher. Dies wird aber hier weiter nicht betrachtet, da es Welker zunächst auf die Elektronenbeweglichkeit ankam.

⁴⁰ Welker, *Halbleitende Verbindungen I*, 1952; Welker, *Discovery*, 1976, S. 655.

(Siehe auch Lehrbücher der Festkörperphysik z.B. Ascroft/Mermin, *Solid State*, 1976; Ibach/Lüth, *Festkörperphysik*, 1990).

Wenn es nun gelang, weitere den Elementhalbleitern der vierten Hauptgruppe ähnliche Stoffe zu finden, wäre es möglich, daß diese eine noch höhere Beweglichkeit aufwiesen. Für die betrachteten 9 halbleitenden Verbindungen aus Elementen der III. und V. Hauptgruppe galt, da sie im Zinkblendegitter kristallisierten, daß ihre Eigenschaften von den halbleitenden Elementen der vierten Hauptgruppe nur wenig abweichen sollten. Lediglich durch die Tatsache, daß nun die beiden Bindungspartner unterschiedlich geladen waren, sollte die ansonsten kovalente Bindung einen kleinen ionischen Anteil erhalten, der lediglich zu einer leichten Erhöhung der Bindungsenergie führte und dafür sorgte, daß „die Amplituden der Gitterschwingungen bei der Verbindung kleiner als beim entsprechenden Element“ sind. Aus dieser Argumentation folgte beispielsweise, „daß die Elektronenbeweglichkeit im InSb größer als im Grauen Sn“ sein sollte. Allgemeiner hieß das für Welker:

„Grundsätzlich wird man aber ganz allgemein den Satz aufstellen können, daß die Verbindungen $A^{III} B^V$ höhere Elektronenbeweglichkeiten besitzen als die Elemente der vierten Gruppe.“⁴¹

Bandabstand und Schmelzpunkt

Als weitere wichtige Eigenschaften eines Halbleiters sind der Bandabstand und der Schmelzpunkt anzusehen. Wie bereits erwähnt, wurde nach Welker aufgrund des leichten Ionencharakters der Bindung die Bindungsenergie um einen Ionenanteil gegenüber den vergleichbaren Elementen erhöht. Er führte dies auf das „quantenmechanische Resonanzprinzip, welches zwischen dem homöopolaren und dem heteropolaren Anteil der chemischen Bindung wirksam ist“ zurück. Dadurch vergrößerte sich die Bindungsenergie, und es erhöhte sich der Schmelzpunkt der jeweiligen Verbindung. Aus demselben Grund sollten sich die Bandabstände der III-V-Verbindungen im Vergleich zu den Elementen erhöhen, aber wegen des beteiligten Ionenanteils sollte diese Erhöhung überproportional ausfallen.⁴² Zusammenfassend ergab sich:

„Verglichen mit den Elementen der vierten Gruppe besitzen die Verbindungen $A^{III} B^V$, gemessen an ihren Schmelzpunkten relativ große Breiten der verbotenen Zone. Dies ist ein wesentlicher Vorteil für die Herstellung dieser Körper.“⁴³

Darüber hinaus bestand die Hoffnung, daß die Bandabstände der neun in Frage kommenden Verbindungen einen größeren Bereich abdecken würden, als die Bandabstände von Silizium, Germanium und grauem Zinn (siehe Abb. 41 auf S. 158).

Die „Resonanzverfestigung“, die nach Welkers Überlegungen beim Übergang von kovalenter zur ionischer Bindung maßgeblich sein sollte und aus der sich die hier genannten wesentlichen Eigenschaften der III-V-Halbleiter ableiten lassen sollten, hatte, wie sich später herausstellte, nicht „die Tragweite, die Welker ihr beimaß.“ Denn in den 1960er Jahren wurde erkannt, daß für die Bandlücken und Beweglichkeiten der III-V-Halbleiter ganz andere Parameter maßgeblich sind. Das Argument der Resonanzverfestigung ist für kristallchemische Parameter wie den Schmelzpunkt anwendbar; die Vergrößerung der Bandlücke und der Beweglichkeit resultierte aber vielmehr aus der Tatsache, daß in einem Kristall mehrere Bänder existieren, die berücksichtigt werden müssen. Das führte beispielsweise beim Vergleich von Germanium mit Galliumarsenid zu der Erkenntnis, daß im Germanium das L-Band, im Galliumarsenid aber das Γ -Band für die Bandlücke und die Beweglichkeit entscheidend ist.⁴⁴

⁴¹ Ebenda, S. 747-748.

⁴² Ebenda, S. 747-748.

⁴³ Ebenda, S. 748.

⁴⁴ Siehe Madelung, *III-V-Verbindungen*, 1983. Ich danke Otfried Madelung für weitere Hinweise und Erläuterungen. Abbildungen der Bandstruktur von Germanium und Galliumarsenid finden sich beispielsweise in Ibach/Lüth, *Festkörperphysik*, 1990, S. 281-282.

Erste Bestätigung mit Indiumantimonid

Zeitgleich mit seinen theoretischen Überlegungen hatte Welker, um seine Vorhersagen zu überprüfen, im Laufe des Jahres 1950 einen kleinen Indiumantimonid-Kristall (InSb) im Labor hergestellt. Dazu hatte er in einer Edelgasatmosphäre gleiche Teile von Indium und Antimon bei ca. 500-600°C in einem Quarztiegel zusammengeschmolzen und einen polykristallinen Brocken erhalten, der wie Germanium glänzte. Widerstands- und Halleffekt-Messungen bestätigten den Halbleitercharakter des Indiumantimonids. Die gemessene Elektronenbeweglichkeit bewegte sich in der gleichen Größenordnung wie diejenige von Germanium. Diese Ergebnisse waren in qualitativer Übereinstimmung mit der Theorie und gemessen an Welkers beschränkten experimentellen Möglichkeiten ein großer Erfolg.⁴⁵

Konzentration auf III-V-Halbleiter in Erlangen

Diese Einschätzung teilte auch Ferdinand Trendelenburg und lud Welker ein, diese Untersuchungen als Leiter einer Forschungsabteilung in Erlangen fortzusetzen. Welker war über das Angebot sehr erfreut, da man bei seinem bisherigen Arbeitgeber *CFS Westinghouse* wenig an Grundlagenforschung auf dem Halbleitergebiet interessiert war und das Labor materiell wie personell stets nur mit dem Nötigsten ausgestattet gewesen war. So kündigte Welker am 26. Dez. 1950 sein dortiges Arbeitsverhältnis und begann zum 1. April seine neue Tätigkeit in Erlangen.⁴⁶

Gemäß der *Siemens*-Forschungs-Philosophie einer scharfen „Konzentration aller Kräfte auf bestimmte aussichtsreich erscheinende wissenschaftliche Gebiete“⁴⁷ richtete Welker die Abteilung Festkörperphysik des Forschungslaboratoriums fast ausschließlich auf die Untersuchung der III-V-Halbleiter aus. Zunächst mußte allerdings das Labor, das im wesentlichen aus leeren Räumen bestand, eingerichtet und geeignetes Personal gefunden werden. Ein früherer Mitarbeiter Welkers beschreibt rückblickend die Forschungsbedingungen als nahezu ideal, da unter anderem genügend Geld zur Verfügung gestanden habe, um die notwendigen Geräte anzuschaffen und genügend Mitarbeiter einzustellen. So konnten bald die ersten Experimente zur Herstellung der unterschiedlichen III-V-Verbindungen beginnen.⁴⁸

Herstellung von Einkristallen

Grundsätzlich bestünde eigentlich bei der Herstellung von III-V-Halbleitern in einem stöchiometrischen Verhältnis von 1:1 das Problem, „daß ein Atom A auf einem B-Platz sitzen kann und dadurch eine Art von Gitterstörung möglich wird, die selbst bei sorgfältigster Reinigung der Ausgangsstoffe nicht beseitigt werden kann.“ Glücklicherweise stellte sich aber heraus, daß die Atome der III. und V. Gruppe sich so unähnlich waren, daß es sehr schwierig war, sie am falschen Gitterplatz einzubauen, da sie sich „in der stöchiometrisch zusammengesetzten Verbindung $A^{III} B^V$ “ als unlöslich erwiesen. Das führte dazu, daß sich das Verhältnis 1:1 im Kristall selbsttätig einstellte und war „die Voraussetzung dafür, daß die stöchiometrisch zusammengesetzte Verbindung überhaupt hergestellt werden kann.“⁴⁹

Dies galt insbesondere für die Antimonide, da sie wegen ihres niedrigen Dampfdrucks am Schmelzpunkt ohne besondere Vorrichtungen relativ einfach durch Ziehen aus der

⁴⁵ Welker, *Discovery*, 1976, S. 656.

Walter Heywang schreibt, daß Welker diese Experimente im Keller seines Pariser Hauses durchgeführt habe (Heywang, *Memorial Address*, 1983).

⁴⁶ Brault, *CFS Westinghouse*, an Welker, 28. Dez. 1950, HWD 005.

⁴⁷ Trendelenburg, *Aufbau und Ziele*, 1952, SAA 35-46 / Lc 375, S. 25.

⁴⁸ Persönliche Mitteilung von Otfried Madelung, 16. Jan. 1999.

⁴⁹ Welker, *Halbleitende Verbindungen I*, 1952, S. 749. Das war ein glücklicher Umstand für die III-V-Verbindungen, gilt aber nicht allgemein.

Schmelze nach dem Czochralski-Verfahren hergestellt werden konnten.⁵⁰ Aluminium- und Indiumantimonid wurden daher schon bald zu den Testmaterialien für die Herstellungsverfahren und Experimentalkonstruktionen. Erste Aluminiumantimonid-Kristalle konnten schon ab September 1951 hergestellt und getestet werden. Intensive Arbeiten wurden aber mit Indiumantimonid gestartet, weil dieses Material „neben seiner einfachen technologischen Handhabung (Schmelzpunkt 523 °C)“ eine extrem hohe Elektronenbeweglichkeit besaß,⁵¹ die sich in den folgenden Experimenten als über 65000 cm²/Vs bei Zimmertemperatur herausstellte und zu einer hohen Widerstandsänderung im Magnetfeld Anlaß gab.⁵² Durch die geringe Energielücke von nur $\Delta E = 0,18$ eV bei Zimmertemperatur, war InSb (im Gegensatz zu AlSb) aber für Transistoren und Gleichrichter nicht zu gebrauchen.⁵³

Um dem generellen Forschungsziel näher zu kommen, alle 16 möglichen III-V-Verbindungen auch herzustellen, wurden weitere Verfahren entwickelt, auch die Arsenide und Phosphide in qualitativ hochwertigen, stöchiometrischen Einkristallen herzustellen. Da Arsen und Phosphor leicht flüchtig sind, würden sie unter gewöhnlichen Bedingungen aus der Schmelze ausdampfen und sich an den kühleren Stellen des Gefäßes niederschlagen. Daher mußten diese Stoffe in einem geschlossenen Gefäß geschmolzen werden, während man alle Gefäßwände auf einer höheren als der Kondensationstemperatur der flüchtigen Substanzen hielt. Innerhalb dieses Gefäßes mußten die Einkristalle mit Hilfe von speziellen Vorrichtungen berührungsfrei aus der Schmelze gezogen werden. So konnten auch hochwertige Einkristalle der Verbindungen mit Arsen und Phosphor hergestellt werden.⁵⁴

Erste Indiumphosphid- und Galliumarsenid-Kristalle waren zwar zuvor schon mit anderen Methoden hergestellt und deren Eigenschaften untersucht worden, doch waren diese Kristalle noch von mäßiger Qualität.⁵⁵ Welker konnte daran aber schon 1953 die gleichrichtenden Eigenschaften von Indiumphosphid und Galliumarsenid nachweisen, bei Indiumphosphid wurde sogar der Transistoreffekt gefunden.⁵⁶ Erste Meßergebnisse zu den elektrischen Eigenschaften von Indiumarsenid und Galliumphosphid konnten wenig später angegeben werden.⁵⁷ Anfang 1955 war das Forschungsziel, alle (in Abb. 40 dargestellten) 16 möglichen III-V-Verbindungen herzustellen, erreicht. Wie vorausgesagt kristallisierten außer den Nitriden alle in der tetraedrischen Zinkblendestruktur.⁵⁸

⁵⁰ Zum Czochralski-Verfahren siehe das Unterkapitel „Das Czochralski-Verfahren“ ab S. 196.

⁵¹ Gremmelmaier/Madelung, *Herstellung*, 1953.
Siehe auch Welker, „Forschungen auf dem Halbleitergebiet, (Vortrag zur FL-Tagung am 4. März 1954)“, SAA 35-46 / Lc 375.

⁵² Weiß/Welker, *Widerstandsänderung von InSb*, 1954.
Zur Widerstandsänderung im Magnetfeld siehe das Unterkapitel „Feldplatten“ ab S. 161.

⁵³ Siehe Weiß, *Elektrische Eigenschaften I*, 1953; Folberth/Madelung, *Deutung*, 1953; Madelung/Weiß, *Elektrische Eigenschaften II*, 1954, Pfister, *Spaltbarkeit*, 1955, Trendelenburg, *Forschungslaboratorium*, 1953.

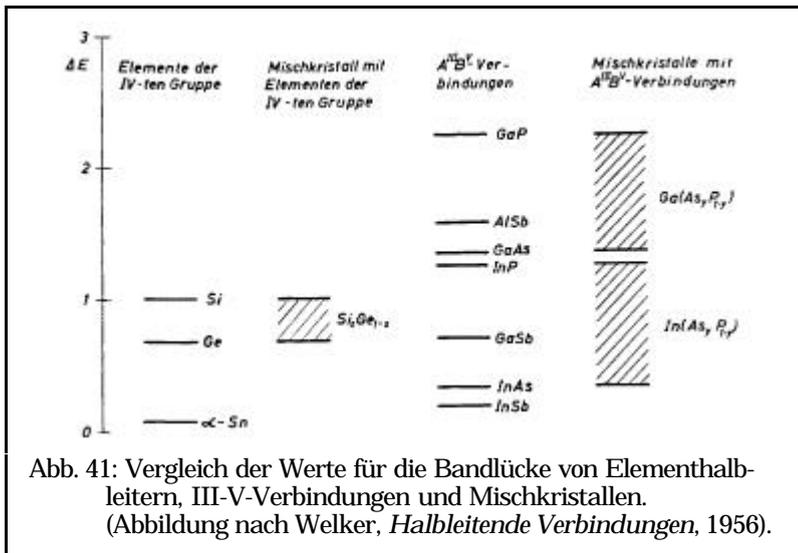
⁵⁴ Gremmelmaier, *Herstellung*, 1956.
Siehe auch Welker, *Halbleitende Verbindungen*, 1956, S. 11; Trendelenburg, *Forschungslaboratorium II*, 1957, S. 51.

⁵⁵ Für andere Herstellungsverfahren von InP und GaAs siehe z.B. Folberth/Weiß, *Herstellung*, 1955.

⁵⁶ Welker, *Halbleitende Verbindungen II*, 1953, S. 250.
In einer späteren Ausgabe der *Zeitschrift für Naturforschung* wurde allerdings demonstriert, daß die von Welker angegebenen Transistorkennlinien „keinen hinreichenden Beweis eines Transistoreffekts darstellen“, da sich die gleichen Kennlinien auch durch eine Schaltung von „zwei getrennten InP-Gleichrichtern“ erzeugen ließen. (Jenny, *Bemerkung*, 1955).

⁵⁷ Folberth/Grimm/Weiß, *Elektrische Eigenschaften*, 1953; Folberth/Oswald, *Halbleitereigenschaften*, 1954; Folberth/Weiß, *Elektrische Eigenschaften III*, 1956.

⁵⁸ Welker, „Entwurf für den Vortrag zur FL-Tagung am 5. 4. 1955“, SAA 35-46 / Lc 375.



Die weiteren Forschungen ermöglichten bald die Herstellung von Mischkristallen. Mit ihnen war es möglich, halbleitende Verbindungen mit einer vorgegeben Größe der Bandlücke herzustellen. Auch „Germanium und Silizium bilden eine lückenlose Mischkristallreihe“, in der die Bandlücke Werte zwischen „0,69 eV und 1,03 eV“ annehmen kann. Doch mit Mischkristallen aus III-V-Verbindungen konnte dieser

Bereich wesentlich erweitert werden. Insbesondere Mischkristalle aus Gallium, Arsen und Phosphor ($\text{Ga}(\text{As}_y\text{P}_{1-y})$) sowie solche aus Indium mit Arsen und Phosphor ($\text{In}(\text{As}_y\text{P}_{1-y})$) eigneten sich dafür sehr gut (siehe Abb. 41).⁵⁹

Reinheit und Dotierung

Für die kontrollierte Mischkristallbildung und die Herstellung von sehr reinen Einkristallen war es natürlich notwendig, daß die Ausgangsstoffe bereits in extrem hoher Reinheit vorlagen. Daher wurden unter Leitung von G. Iwantschew in der Abteilung für anorganische Chemie für „die Herstellung der neuen Halbleiterstoffe ... besondere chemische Reinigungsverfahren ..., insbesondere Verfahren zur Reinstdarstellung von Indium, Arsen und Antimon entwickelt.“⁶⁰

Mit Hilfe reiner Einkristalle konnten auch pn-Übergänge durch alle üblichen Verfahren der Dotierung hergestellt werden. Dabei erwies sich die Voraussage Welkers, daß sich zur Dotierung „die Elemente der zweiten Gruppe wie Cd, Zn als Acceptoren, die der sechsten Gruppe wie Se, Te als Donatoren“ besser als zusätzliche Atome aus der III. beziehungsweise V. Gruppe eignen würden, als richtig. Elemente der sechsten Gruppe ließen sich beispielsweise viel leichter an einem Gitterplatz eines Atoms der V. Gruppe einbauen als dieses an einen Platz eines Atoms der III. Gruppe.⁶¹

Galvanomagnetische Effekte

Als einer der wesentlichen frühen Forschungsschwerpunkte kristallisierte sich bald die Erforschung der besonderen Eigenschaften der gefundenen III-V-Halbleiter im Magnetfeld heraus. Hierbei kam es vor allem auf die zum Teil extrem hohen Elektronenbeweglichkeiten der neuen Materialien an. Diese waren einerseits dafür verantwortlich, daß sich lange bekannte Effekte wie der Halleffekt technisch zur Messung von Magnetfeldern und zur Steuerung nutzen ließen. Andererseits führten die hohen Elektronenbeweglichkeiten auch zur Vorhersage völlig neuer Effekte wie der sogenannten „magnetischen Sperrschicht“ und sorgten dafür, daß eine erweiterte Theorie der magnetischen Effekte in Halbleitern formuliert werden mußte.⁶²

⁵⁹ Folberth, *Mischkristalle*, 1955.

⁶⁰ Trendelenburg, *Forschungslaboratorium I*, 1953, S. 399; Beispiele für die im Forschungslaboratorium der *Siemens-Schuckertwerke* entwickelten Verfahren gibt Trendelenburg in *Forschungslaboratorium III*, 1962, S. 432-439.

⁶¹ Welker, *Halbleitende Verbindungen I*, 1952, S. 748.

⁶² Ein Mitarbeiter Welkers, Herbert Weiß, hat zum Thema „Physik und Anwendung galvanomagnetischer Bauelemente“ 1969 ein Buch herausgebracht, das unter anderem die Ergebnisse der Forschungs- und Entwicklungsarbeit in Erlangen umfaßt (Weiß, *Galvanomagnetische*

Halleffekt

Wird ein stromdurchflossener Festkörper in ein Magnetfeld gebracht, so bewirkt aufgrund der Lorentzkraft die senkrecht zur Stromrichtung stehende Komponente des Magnetfelds eine Ablenkung der fließenden Ladungsträger. Diese Ablenkung war 1879 durch den amerikanischen Physiker Edwin Herbert Hall erstmals beobachtet worden und wurde bald darauf nach ihrem Entdecker als „Halleffekt“ bekannt.⁶³

Der Halleffekt kann in der beschriebenen Versuchsanordnung beobachtet werden (siehe Abb. 42). Fließt durch einen quaderförmigen Festkörper ein Steuerstrom i_s und wird senkrecht dazu ein (Steuer-)Magnetfeld B angelegt, stellt sich senkrecht zu beiden die sogenannte Hallspannung U_H ein.

Für diese ergibt sich:

$$(9) \quad U_H = \frac{R_H}{d} i_s B$$

wobei R_H die Hallkonstante bezeichnet und d die Dicke des Festkörpers in Richtung des Magnetfelds angibt. Überwiegt in einem Halbleiter eine Ladungsträgerart erheblich, ergibt sich für einen Elektronenleiter die Hallkonstante R_H :

$$(10) \quad R_H = -\frac{1}{ne}$$

Mit n wird die Elektronenkonzentration bezeichnet, e gibt die Elementarladung an.⁶⁴ Für Elektronenleitung ergibt sich daher eine positive Hallkonstante. Bei Löcherleitung folgt aus analogen Überlegungen eine negative Hallkonstante. Mißt man nicht nur die Hallspannung U_H , sondern auch die Leitfähigkeit σ , so ist es aus der Kombination der Meßwerte möglich, die Ladungsträgerbeweglichkeit zu bestimmen⁶⁵:

$$(11) \quad \underline{m} = R_H \sigma$$

Diese Möglichkeit wurde schon lange Jahre ausgenutzt, um die Ladungsträgerbeweglichkeiten der verschiedensten Materialien, hauptsächlich Halbleiter, zu bestimmen.⁶⁶ Wollte man aber nun den Halleffekt beispielsweise zur Messung eines Magnetfeldes

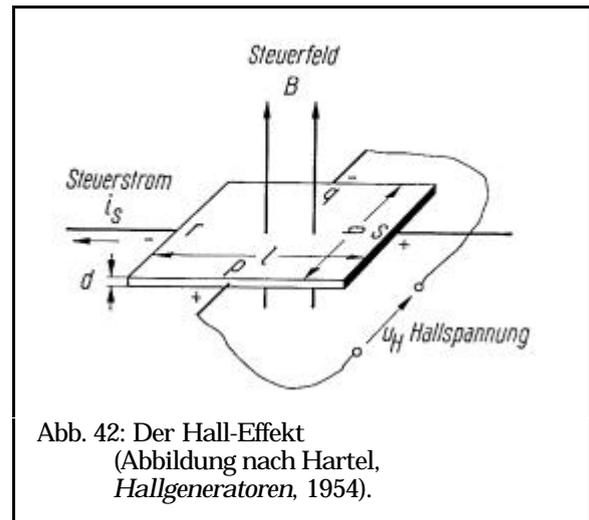


Abb. 42: Der Hall-Effekt
(Abbildung nach Hartel,
Hallgeneratoren, 1954).

Bauelemente, 1969). Zu den Ergebnissen der physikalischen Forschungen siehe detaillierter das Buch von Otfried Madelung, der ebenfalls Mitarbeiter bei Welker gewesen war (Madelung, *III-V-Compounds*, 1964). Hallgeneratoren werden im Detail von den *Siemens*-Mitarbeitern Friedrich Kuhrt und Hans Joachim Lippmann diskutiert (Kuhrt/Lippmann, *Hallgeneratoren*, 1968).

⁶³ Hall, *New Action*, 1879.

⁶⁴ Streng genommen gilt das Gesagte nur für den Fall, daß alle Elektronen dieselbe effektive Masse besitzen und ihre Relaxationszeit τ von der Geschwindigkeit unabhängig ist. Im einfachen Fall einer isotropen Verteilung der Relaxationszeiten τ in Abhängigkeit von den Elektronen-Geschwindigkeiten ergibt sich in der Gleichung für den Hallkoeffizienten R_H ein Vorfaktor r , der meist nur unwesentlich von 1 verschieden ist (Weiß, *Galvanomagnetische Bauelemente*, 1969, S. 11).

Andere Modelle mit realistischeren Annahmen über die Relaxationszeit führen zu weit komplexeren Ergebnissen. Siehe dazu zum Beispiel Fröhlich, *Elektronentheorie der Metalle*, 1936, S. 212-224 und 240-242 für die grundlegende Theorie und in Erweiterung dieser Ansätze Madelung/Welker, *Gemischte Halbleiter*, 1953 und Madelung, *Isotrope Halbleiter*, 1953.

⁶⁵ Kombination der Gleichung (7) auf S. 154 mit Gleichung (10) auf S. 159.

⁶⁶ Auch Welker hat gemeinsam mit Walter Ringer diese Methode schon während des Zweiten Weltkriegs zur Bestimmung der Elektronenbeweglichkeit von Germanium benutzt (siehe Ringer/Welker, *Leitfähigkeit*, 1948).

nutzen, kam es darauf an, daß die sich ergebende Hallspannung genügend groß war. Das sollte erreicht werden, ohne den Meßstrom zu groß zu machen. Für die Hallspannung gilt nach den Gleichungen (9) und (11):

$$(12) \quad U_H = \frac{m_e i_s B}{s d}$$

Das heißt, ein hoher Quotient aus Elektronenbeweglichkeit und Leitfähigkeit führt zu einer hohen Hallspannung. Um diese technisch ausnutzen zu können, muß auch eine kleine Leistung entnommen werden können. Daher darf die Leitfähigkeit nicht zu niedrig sein. Weiter muß für technische Anwendungen die Hallspannung möglichst temperaturunabhängig sein.⁶⁷

Hallgeneratoren

Alle diese Eigenschaften waren erstmals mit den halbleitenden Verbindungen Indiumantimonid und Indiumarsenid gleichzeitig erfüllt. Die ersten Hallgeneratoren aus diesen Materialien wurden 1954 in den Entwicklungslaboratorien entwickelt und versuchsweise zu Messungen eingesetzt, wenig später konnten auch „durch einfache Rückkopplungsschaltungen ... Schwingungen erzeugt werden.“⁶⁸ Hallgeneratoren wurden aber hauptsächlich zur Messung von Magnetfeldern eingesetzt und werden in diesem Bereich auch häufig Hallsonden genannt. In den 1950er Jahren wurde aber die Bezeichnung Hallgeneratoren nach der folgenden Argumentation geprägt.

„Im allgemeinen wird in der Elektrotechnik eine Einrichtung dann als Generator bezeichnet, wenn die zugeführte Energie (z.B. mechanische Energie, Wärme- oder Strahlungsenergie) zur Erzeugung einer elektromotorischen Kraft verwendet wird, die elektrische Energie an einen Verbraucher abgeben kann.“⁶⁹

Beim Hallgenerator wird die „zugeführte Energie“ durch den Steuerstrom i_s geliefert und durch die elektromotorische Kraft des Magnetfelds B wird eine Hallspannung U_H aufgebaut. Fließt nun ein Hallstrom i_H , wird „elektrische Energie“ an einen Verbraucher abgegeben.⁷⁰ Der Wirkungsgrad ergibt sich als Quotient aus der verbrauchten und der zugeführten Leistung und hängt quadratisch von der Elektronenbeweglichkeit im Festkörper ab. „Daraus ergibt sich für InSb und InAs, deren Elektronenbeweglichkeiten um eine Größenordnung größer als bei Ge sind, ein um 2 Größenordnungen höherer Wirkungsgrad als bei Ge.“ So wurden erst durch die extrem hohen Elektronenbeweglichkeiten im Indiumarsenid und Indiumantimonid brauchbare Wirkungsgrade von über der Hälfte des maximalen Wirkungsgrads von 17,2 % erreicht.⁷¹

Hallgeneratoren wurden Mitte der 1950er Jahre neben der Messung von Magnetfeldern und Gleichströmen beispielsweise auch zur Regelung des Drehmoments von Gleichstrommotoren eingesetzt. Weitere Einsatzmöglichkeiten eröffneten sich durch die Tatsache, daß die Hallspannung U_H sowohl dem Steuerstrom i_s als auch dem Magnetfeld B proportional war. Wird nun das Magnetfeld durch einen elektrischen Strom erzeugt, ist die Hallspannung dem Produkt zweier Ströme proportional und kann als Signal angesehen werden. Entsprechend ist mit Hilfe einer geeigneten Schaltung die Durchführung von Rechenoperationen (im einfachsten Fall eine analoge Multiplikation) möglich.⁷²

⁶⁷ Kuhrt, *Eigenschaften*, 1954; Hartel, *Anwendung*, 1954.

⁶⁸ Kuhrt, *Schwingungserzeugung*, 1956 (Zitat); Kuhrt/Braunersreuther, *Drehmomentsmessung*, 1954; Kuhrt, *Eigenschaften*, 1954; Hartel, *Anwendung*, 1954.

⁶⁹ Hartel, *Anwendung*, 1954, S. 377-378.

⁷⁰ Ebenda.

⁷¹ Welker, *Halbleitende Verbindungen*, 1956, S. 7.

⁷² Hartel, *Anwendung*, 1954, S. 379-381.

Feldplatten

In der vereinfachten Darstellung der Anordnung zum Halleffekt (Abb. 42) wirkt, nachdem sich die Hallspannung U_H gebildet hat, keine Kraft mehr auf die fließenden Elektronen des Steuerstroms I_s zwischen r und s. Es ergibt sich unter diesen Annahmen also keine Widerstandsänderung im Magnetfeld. Streng genommen ist diese Argumentation nicht ganz richtig, denn tatsächlich tritt immer eine Widerstandsänderung im Magnetfeld auf. Üblicherweise kann sie aber vernachlässigt werden, da sie nur merklich wird, wenn das Produkt von Ladungsträgerbeweglichkeit und Magnetfeldstärke sehr groß wird und zugleich gemischte Leitung vorliegt, das heißt Löcher und Elektronen gleichzeitig an der Leitung beteiligt sind.⁷³ Darüber hinaus gilt:

„Zu der oben besprochenen ‚physikalischen‘ Widerstandsänderung kommt ... eine zusätzliche Widerstandsgröße hinzu, die davon herrührt, daß der Strom [unter Einfluß des Magnetfeldes] den Leiter nicht mehr auf dem kürzesten Wege durchsetzt und daß ferner die verlängerten Strompfade einen verkleinerten Querschnitt besitzen.“⁷⁴



Dieser sogenannte „geometrische Widerstandseffekt“ hatte im Gegensatz zum üblicherweise kaum merklichen „physikalischen Widerstandseffekt“ bereits Anfang des 20. Jahrhunderts praktische Bedeutung erlangt und war zur Messung von Magnetfeldern in der sogenannten „Wismut-Spirale“ und seit 1911 auch in der „Corbino-Scheibe“ ausgenutzt worden.⁷⁵ Dabei wurde ausgenutzt, daß im Magnetfeld die Richtung des Stromes zu der des elektrischen Feldes um den sogenannten Hallwinkel gedreht war. Die Größe des Hallwinkels hing vom Produkt der Ladungsträgerbeweglichkeit und der magnetischen Feldstärke ab, so daß die neuen halbleitenden Verbindungen, insbesondere Indiumantimonid, den „geometrischen Widerstandseffekt“ besonders deutlich zeigten.⁷⁶

Zur weiteren Verstärkung dieses „geometrischen Widerstandseffekts“ war es Anfang der 1960er Jahre gelungen, „stark inhomogene Materialien reproduzierbar herzustellen“. Insbesondere erwies sich Nickelantimonid in einer Indiumantimonid-Schmelze als löslich, erstarrte aber in kleinen metallischen Nickelantimonid-Nadeln innerhalb des Indiumantimonid-Kristalls, da es im festen Indiumantimonid nicht löslich war. Es wirkte daher auch nicht als Dotierstoff, und das Indiumantimonid blieb zwischen den Nadeln unverändert. Bei den Experimenten hatte sich darüber hinaus gezeigt, daß die Nadeln senkrecht zur

⁷³ Madelung/Welker, *Gemischte Halbleiter*, 1953; Madelung, *Isotrope Halbleiter*, 1953; Weiß/Welker, *Widerstandsänderung von InSb*, 1954.

⁷⁴ Weiß/Welker, *Widerstandsänderung von InSb*, 1954, S. 326-327.

⁷⁵ Zur Wismutspirale siehe zum Beispiel Jaeger, *Elektrische Meßtechnik*, 1922, S. 473; die Corbino-Scheibe erklärt Welker, *Halbleitende Verbindungen*, 1956, S. 8-9.

⁷⁶ Weiß/Welker, *Widerstandsänderung von InSb*, 1954, S. 327-329.

Phasengrenze flüssig-fest wachsen. Daher wurde es möglich, InSb-Kristalle herzustellen, die mit ausgerichteten NiSb-Nadeln durchsetzt waren.

Eine solche zweiphasige Struktur, wie sie in Abb. 43 schematisch dargestellt ist, ermöglichte eine beinahe optimale Ausnutzung des geometrischen Widerstandseffekts. Schickt man einen Strom senkrecht zu den Nadeln, mißt man ohne Magnetfeld nahezu denselben Widerstand wie für das homogene Material. Legt man nun ein Magnetfeld senkrecht zu Nadel- und Stromrichtung, werden die Stromlinien gedreht. Die metallischen Nadeln stellen aber weiterhin Flächen gleichen Potentials dar, so daß die Ladungsträger nun wie in Abb. 43 gezeichnet durch den Kristall laufen. „Das ergibt eine ‚Verlängerung‘ der Strombahnen und damit eine Erhöhung des Widerstands im Magnetfeld.“⁷⁷

Aus diesem Material konnte man sogenannte „Feldplatten“ herstellen, die einerseits zur Messung von Magnetfeldern eingesetzt wurden. Andererseits wurde in vielen weiteren Anwendung die Möglichkeit ausgenutzt, ihren ohmschen Widerstand berührungslos durch ein Magnetfeld zu steuern.⁷⁸

Magnetische Sperrschichten

Ein bislang unbekannter magnetischer Effekt war von Welker 1951 aus theoretischen Überlegungen vorhergesagt worden. Er war davon ausgegangen, daß sich bei gemischter Leitung die Materialgrößen Beweglichkeit der Ladungsträger (μ_e , μ_h) beziehungsweise deren Dichte (n_e , n_h) nicht mehr allein durch Messungen der Leitfähigkeit und der Hallspannung bestimmen ließen. Die beiden Bestimmungsgleichungen (7) und (9) reichten zur Festlegung der vier Größen nicht aus. Daher untersuchte er die Theorie des Halleffekts genauer und führte noch in Paris Experimente zur Frequenzabhängigkeit des Halleffekts durch. Dabei stellte er fest, daß Löcher und Elektronen im Magnetfeld in die gleiche Richtung abgelenkt werden, und es so zu einer ungleichmäßigen Ladungsverteilung kommen kann.⁷⁹

Im Idealfall eines Eigenhalbleiters (Elektronendichte n_e = Löcherdichte n_h) bei gleichzeitig angenommener gleicher Ladungsträgerbeweglichkeit (Elektronenbeweglichkeit μ_e = Löcherbeweglichkeit μ_h) würde sich überhaupt keine Hallspannung ausbilden, da der Ladungstransport in der Halleffekt-Anordnung streng paarweise abliefe. Dadurch ließen sich bei geeignet gewählten Feldern beträchtliche Unterschiede in der räumlichen Verteilung von Elektronen und Löchern realisieren (siehe Abb. 44).⁸⁰

⁷⁷ Weiß, *Neue Halbleiterwerkstoffe*, 1965 (Zitate auf S. 433 und 436).

⁷⁸ Weiß, *Neue Halbleiterwerkstoffe*, 1965.

⁷⁹ Welker, *l'effet hall*, 1950; Welker, *Galvanomagnetische Effekte*, 1951.

In der ersten Arbeit beschrieb Welker, daß die ersten Berechnungen und Versuchsergebnisse bereits Anfang 1945 in München vorgestellt wurden (Welker, *l'effet hall*, 1950, S. 309).

⁸⁰ Weißhaar/Welker, *Magnetische Sperrschichten I*, 1953.

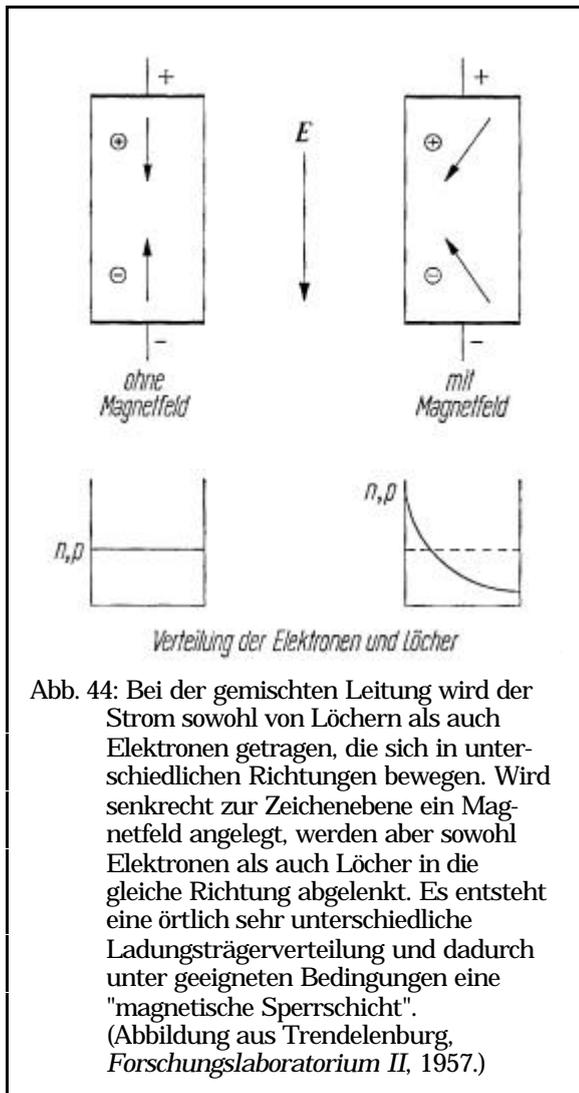


Abb. 44: Bei der gemischten Leitung wird der Strom sowohl von Löchern als auch Elektronen getragen, die sich in unterschiedlichen Richtungen bewegen. Wird senkrecht zur Zeichenebene ein Magnetfeld angelegt, werden aber sowohl Elektronen als auch Löcher in die gleiche Richtung abgelenkt. Es entsteht eine örtlich sehr unterschiedliche Ladungsträgerverteilung und dadurch unter geeigneten Bedingungen eine "magnetische Sperrschicht". (Abbildung aus Trendelenburg, *Forschungslaboratorium II*, 1957.)

Welker hatte schon in Paris erste Messungen an Germanium durchgeführt und diesen Effekt grundsätzlich bestätigt gefunden, doch erst 1953 in Erlangen konnten er und sein Mitarbeiter E. Weishaar klare experimentelle Evidenz vorlegen.⁸¹ In weiteren Arbeiten wurden die beiden Kristallseiten, an denen sich die Hallspannung aufbauen müsste (p und q in Abb. 42, S. 159), unterschiedlich präpariert, um dort die Erzeugung und Rekombination von Elektron-Loch-Paaren zu beeinflussen. Wird beispielsweise eine Seite „einer Oberflächenbehandlung zur Verminderung der Rekombination durch chemische Ätzung“ und die andere Seite „einer Oberflächenbehandlung zur Steigerung der Rekombination durch Sandstrahlen“ unterworfen, so ist je nach Polung des Magnetfeldes die Gesamtladungsträgerzahl sehr groß oder sehr klein und die Ladungsträger sind örtlich sehr unterschiedlich verteilt (Abb. 44, unten rechts). Durch diesen Effekt ließen sich beachtliche Widerstandsänderungen hervorrufen und zur magnetischen Steuerung von Strömen in Kristallen nutzen.⁸² Welker sprach in Analogie zur Schottky-Sperrschicht von der Bildung einer „magnetischen Sperrschicht“.⁸³ Ihre Wirkung bei der Steuerung von Strömen demonstrierte er auf einer *Siemens*-Tagung im März 1954, indem er „einen magnetisch gesteuerten Kristallgleichrichter“ vorführte,

mit dem man „bei 220 V Spannung am Kristall eine Leistung von etwa 50 W steuern“ konnte.⁸⁴

Weitere Anwendungen

Neben diesen galvanomagnetischen Anwendungen wurden die neuen Halbleiterstoffe auch für die Anwendung in anderen Bereichen getestet. Beispielsweise experimentierte Rolf Gremmelmaier 1954 mit ersten Photozellen auf Galliumarsenidbasis. Man hoffte, aus Galliumarsenid Solarzellen mit hohem Wirkungsgrad fertigen zu können, da die Bandlücke dieses Materials mit 1,38 eV sehr nahe dem zur Ausnutzung der Sonnenenergie optimalen Wert von etwa 1,5 bis 1,6 eV kam. Da bei „Silizium, das für Solarbatterien bereits verwendet wird, ... die verbotene Zone nur etwa 1,1 eV breit“ ist, kamen Hoffnungen auf, in diesem Gebiet zu einer weiteren Anwendung der III-V-Halbleiter zu kommen. Da in diesem Bereich die Herstellungskosten über den möglicherweise besseren Wirkungsgrad wirtschaftlich dominierten, hat sich allein Silizium

⁸¹ Welker, *Galvanomagnetische Effekte*, 1951, S. 191; Weißhaar/Welker, *Magnetische Sperrschichten I*, 1953.

⁸² Weißhaar, *Magnetische Sperrschichten II*, 1955; Madelung/Tewordt/Welker, *Magnetische Sperrschicht*, 1955.

⁸³ Welker, *Galvanomagnetische Effekte*, 1951, S. 187.

⁸⁴ Trendelenburg, „Überblick über die Arbeiten des Forschungslaboratoriums, März 1954“, SAA 35-46 / Lc 375.

auf dem Markt der Solarzellen etablieren können.⁸⁵ Ähnlich erging es den Hoffnungen auf III-V-Transistoren. Denn anfänglich war man im Forschungslaboratorium der *Siemens-Schuckertwerke* davon überzeugt, „daß die Technologie von Silizium mindestens so schwierig, wenn nicht schwieriger sei, wie die von III-V-Verbindungen (mit Schmelzpunkten unterhalb des Siliziums)“.⁸⁶ Anfang der 1960 setzte sich aber die Erkenntnis durch, daß elektronische Bauteile aus III-V-Halbleitern doch nicht massenweise abgesetzt werden konnten. Die *Siemens-Schuckertwerke* reduzierten daher ihre Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf diesem Gebiet.⁸⁷

Einen weiteren möglichen Anwendungsbereich stellten in den 1950er Jahren lichtemittierende Dioden (LED) und später Halbleiterlaser dar. Erste Beobachtungen von Elektrolumineszenz an GaP- und GaAs-Kristallen wurden 1955 in verschiedenen Laboratorien in den USA gemacht und bei *Siemens* bestätigt.⁸⁸ Die Bedeutung, die diese Erscheinung einmal haben würde, konnte damals aber noch niemand einschätzen, zumal ähnliche Effekte an SiC und anderen Materialien bereits seit Jahren bekannt waren und wenig spektakulär erschienen.⁸⁹ So kam Welker in einem zusammenfassenden Bericht von 1956 nur nebenbei auf dieses Phänomen zu sprechen. Der Leiter des Forschungslaboratoriums, Ferdinand Trendelenburg, zählte die lichtelektrischen Effekte offenbar weder 1957 noch 1962 zu den „Arbeiten ...“, deren Ergebnisse von allgemeinem Interesse zu sein scheinen“, da sie in seinen zusammenfassenden Berichten keine Erwähnung fanden.⁹⁰

Bei den *Siemens-Schuckertwerken* wurde aber an lichtemittierenden Dioden (LED) weiter gearbeitet, und so konnten, nachdem Ende 1962 international beinahe zeitgleich von verschiedenen Gruppen von ersten geglückten Versuchen mit Halbleiterlasern berichtet wurde, auch in Erlangen bald mit den ersten funktionierenden Galliumarsenid-Laserdioden experimentiert werden.⁹¹ III-V-Halbleiter (insbesondere GaAs) setzten sich auf diesem Gebiet durch, da in ihnen die notwendigen pn-Übergänge (und später auch entsprechende Heterostrukturen) herstellbar waren, und ihre Bandstruktur mit dem sogenannten direkten Gap optische Übergänge im sichtbaren Bereich ermöglichte.⁹²

Professur oder Industrieforschung

An den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an Halbleiterlasern und später auch Integrierten Schaltkreise auf GaAs-Basis war Heinrich Welker nicht mehr aktiv als Forscher beteiligt. Denn als er 1962 die Nachfolge von Ferdinand Trendelenburg als Direktor der Forschungslaboratorien antrat, war er für einen weiten Bereich von Forschungsaktivitäten verantwortlich geworden, der ihm kaum mehr Zeit für eigene Forschung ließ.

Bis zu etwa diesem Zeitpunkt hatte Welker auch immer wieder erwogen, seine Industrietätigkeit zugunsten einer Hochschulkarriere aufzugeben. Schon 1953 hatte

⁸⁵ Gremmelmaier, *GaAs-Photoelement*, 1955; Trendelenburg, *Forschungslaboratorium II*, 1957, S. 48-49 (Zitat).

⁸⁶ Persönliche Mitteilung von Otfried Madelung, 16. Jan. 1999.

⁸⁷ Nach der Etablierung der Halbleiterlaser Mitte der 1960er Jahre nahmen die Forschungsaktivitäten auf diesem Gebiet wieder zu. Siehe dazu Pfisterer, *Siemens Research Laboratories*, 1987.

⁸⁸ Braunstein, *Radiative Transitions*, 1955; Wolff/Herbert/Broder, *Electroluminescence of GaP*, 1955.

⁸⁹ Zur Geschichte der Elektrolumineszenz siehe Loebner, *Light Emitting Diode*, 1976.

⁹⁰ Welker, *Halbleitende Verbindungen I*, 1956, S. 14; Trendelenburg, *Forschungslaboratorium II*, 1957; Trendelenburg, *Forschungslaboratorium III*, 1962.

⁹¹ Erste Ergebnisse wurden im September 1963 auf der Physikertagung in Hamburg vorgetragen (Henkel, *GaAs-Laser-Dioden*, 1963). Siehe auch Gremmelmaier/Henkel, *Galliumarsenid-Laserdioden*, 1965 für eine Zusammenfassung der Arbeiten des Forschungslaboratorium der *Siemens-Schuckertwerke* auf diesem Gebiet bis 1965.

Zur etwa zeitgleichen Realisierung der ersten GaAs-Halbleiterlaser siehe Bertolotti, *Masers and Lasers*, 1983, S. 165-174 und Hall, *Injection Lasers*, 1976.

⁹² Madelung, *III-V-Verbindungen*, 1983, S. 82.

die Naturwissenschaftliche Fakultät der Universität München die Erteilung einer Honorarprofessur für Physik an Heinrich Welker beantragt. In der Antragsbegründung strichen sie neben Welkers wissenschaftlichen Leistungen insbesondere auch die Bedeutung des Faches „Festkörperphysik“ für die Lehre heraus:

„Dr. Welker gehört zu den führenden Forschern auf dem Gebiet der Festkörperphysik, insbesondere der Halbleiter und der Transistoren. Er hat hier theoretisch und experimentell vollständig neue Wege erschlossen und ist als führender Forscher auf diesem Gebiete international anerkannt.

Die Gewinnung von Dr. Welker als Honorarprofessor gibt die Möglichkeit, dieses neue, für die Zukunft besonders wichtige, in Deutschland noch wenig gepflegte Gebiet in unserer Fakultät vor allen Dingen durch den Unterricht zu vertreten. Es würde hierdurch ein in der Ausbildung unserer Studierenden fehlendes Gebiet vertreten sein.“⁹³

Diesem Antrag folgend wurde Welker im April 1954 zum Honorarprofessor an der Hochschule ernannt, die ihn 1939 habilitiert, ihm danach keine weiteren Chancen geboten und ihm 1946 die Vertretung des Sommerfeld-Lehrstuhls wegen seiner Zugehörigkeit zu nationalsozialistischen Organisationen verwehrt hatte.

Ebenfalls im Laufe des Jahres 1954 war Welker auch für den neu zu schaffenden Lehrstuhl für Angewandte Physik an der Technischen Hochschule in Karlsruhe ins Gespräch gekommen und im Frühjahr 1957 „primo et unico loco“ von der zuständigen Kommission vorgeschlagen worden. Welker antwortete auf die Erteilung des Rufs prompt und erklärte dem Kultusminister von Baden-Württemberg:

„Ich habe mir oft überlegt, ob ich im Falle einer Berufung an eine Hochschule meine bisherige Industrietätigkeit aufgeben soll und bin zu dem Schluß gekommen, die Annahme des an mich ergangenen Rufs ernsthaft in Erwägung zu ziehen.“⁹⁴

Aber nachdem er sich „zur weiteren Klärung“ mit dem zuständigen Ministerialrat in Stuttgart getroffen hatte, schrieb er, daß er den an ihn „ergangenen Ruf an die Technische Hochschule in Karlsruhe zu ... [seinem] größten Bedauern aus familiären Gründen nicht annehmen kann.“⁹⁵

In der Folgezeit blieb er seiner Industrietätigkeit treu und wurde 1969 nach der Gründung der *Siemens AG* zum Leiter der vereinten Forschungslaboratorien von *Siemens & Halske* und den *Siemens-Schuckertwerken* 1969 ernannt. In dieser Tätigkeit formulierte er die „Zielsetzungen und Schwerpunkte der Arbeit des Forschungslaboratoriums“ und setzte sich mit grundsätzlichen Aspekten der „industriellen Forschung“ auseinander.⁹⁶

III-V-Halbleiter in Konkurrenz zu anderen Materialien

Die Entdeckung des halbleitenden Charakters der betrachteten III-V-Verbindungen und die Vorhersage einiger ihrer wesentlichen Materialparameter wie Beweglichkeit der Ladungsträger, Bandlücke und Schmelzpunkt stellt ein faszinierendes Beispiel dafür dar, wie durch geschickte Kombination von verschiedenen wissenschaftlichen Teilgebieten neue Erkenntnisse gewonnen werden können. Welker war es gelungen, das neue Wissen über die Halbleiter der vierten Hauptgruppe (hauptsächlich über Germanium) zu generalisieren und auf ihre Kristallstruktur zurückzuführen. Durch Aussagen der physikalischen Chemie über die Bindungsverhältnisse der tetraedrisch gebundenen Stoffe von Grimm und Sommerfeld 1926 und Goldstein 1927 erkannte er eine Strukturähnlichkeit der meisten III-V-Verbindungen mit den Elementen der

⁹³ Siehe die Personalakte Welkers, E-II-N Welker, LMU.

⁹⁴ Welker an den Kultusminister von Baden-Württemberg, 10. April 1957, HWD 005.

⁹⁵ Welker an den Kultusminister von Baden-Württemberg, 25. Juli 1957, HWD 005.

⁹⁶ Welker, *Zielsetzungen*, 1965; Welker, *Industrielle Forschung*, 1974.

vierten Hauptgruppe. Solche Strukturähnlichkeiten hatte Welker bereits in seinen früheren Forschungen über die supraleitenden Materialien mit wenig Erfolg gesucht. Doch Welkers Blick für mögliche Strukturähnlichkeiten unterschiedlicher Materialien war durch diese Suche geschärft worden, und bei den III-V-Verbindungen hatte sich dieser Ansatz als ausgesprochen fruchtbar erwiesen.

Aufbauend auf die Quantenchemie von Linus Pauling konnte Welker voraussagen, welche Eigenschaften in den betrachteten Verbindungen besonders ausgeprägt sein würden: Dies führte zu der Gewißheit, daß sie auch technisch einsetzbar sein würden. Dies war insbesondere interessant, da diese Verbindungen zwar nicht natürlich vorkommen, aber bereits bekannt, im Labor hergestellt und untersucht worden waren. Bis zu Welkers Untersuchungen waren sie jedoch eine Laborkuriosität ohne technischen Nutzen geblieben. In der Folge der bei *Siemens* und anderswo in den 1950er und 1960er Jahren durchgeführten Materialuntersuchungen konnten die meisten der theoretischen Vorhersagen bestätigt werden. Darüber hinaus kamen aber auch andere, nicht erwartete Materialeigenschaften hinzu, die heute großen Anteil an der technischen Nutzung der III-V-Halbleiter haben.

Vom Standpunkt der physikalischen Materialeigenschaften her waren einige der III-V-Halbleiter den anderen halbleitenden Stoffen wie Germanium und Silizium, aber auch „Kupferoxydul“ und Selen zum Teil beachtlich überlegen. Ihre hohe Elektronenbeweglichkeit und die Variabilität der Größe der Bandlücke eröffneten in vielen Bereichen außerordentliche technische Anwendungsmöglichkeiten. Neben verschiedenen anderen Effekten wurden die besonderen Möglichkeiten der extrem hohen Elektronenbeweglichkeiten in InSb und AlSb schon ab Mitte der 1950er zur Messung und Steuerung von Magnetfeldern mit sogenannten „Hallgeneratoren“ und „Feldplatten“ technisch ausgenutzt. Auch die spezielle Art der Bandlücke und ihre einstellbare Größe fand ab Mitte der 1950er Jahre in lichtemittierenden Dioden (LED) und später in Halbleiterlasern weitverbreitete Anwendung.

In beiden genannten erfolgreichen Anwendungsbeispielen gaben die speziellen Eigenschaften der dafür verwendeten III-V-Halbleiter, die im Silizium prinzipiell nicht realisiert werden können, den Ausschlag für den Erfolg. So werden bei der Elektrolumineszenz und in den Halbleiterlasern mit der Größe der Bandlücke und ihrer Art (direktes Bandgap, Photonenemission im sichtbaren Bereich) zwei Eigenschaften einzelner III-V-Halbleiter (z.B. GaAs) ausgenutzt, die die Elementhalbleiter Germanium und Silizium nicht aufweisen. Ähnlich sieht es auch bei den erfolgreich eingesetzten „Hallgeneratoren“ und „Feldplatten“ aus, da sich dort Elektronenbeweglichkeiten von einer Größe günstig auswirken, wie sie in keinem anderen Material bisher gefunden wurden. So ist in den 1960er und 1970er Jahren für III-V-Halbleiter ein kleiner Markt für Spezialanwendungen gewachsen, doch in allen Bereichen, in denen Silizium einsetzbar war, stellten sie keine ernsthafte Konkurrenz dar. Das galt vor allem für den Bereich der Gleichrichter, Transistoren und integrierten Schaltkreise.

Dies war aber in den 1950er Jahren nicht vorauszusehen gewesen. Die III-V-Halbleiter erschienen für die Transistor- und Diodenproduktion durchaus konkurrenzfähig. Bei der Leitung der *Siemens-Schuckertwerke* hatte man sich 1953 sogar berechtigte Hoffnungen gemacht, daß das auf die „Entwicklung von Starkstromgleichrichtern auf p-n-Basis“ konzentrierte Halbleiterlaboratorium in Pretzfeld einmal „auf die im Allgemeinen Laboratorium von Dr. Welker entwickelten neuen Halbleiter-Werkstoffe“ übergehen würde.⁹⁷

Doch Ferdinand Trendelenburg hatte schon bei der Einrichtung des Forschungslaboratoriums erkannt:

⁹⁷ Geschäftsberichte Zentral-Werksverwaltung, 1951/52, datiert auf 11. Feb. 1953, SAA 15 / Lk 961.

„Bei der Planung der Forschung auf lange Sicht darf man niemals verkennen, dass der Weg von der physikalischen Erkenntnis bis zur technischen Ausnutzung meistens ein ausserordentlich langer und fast immer dornenvoller ist.“⁹⁸

Er behielt Recht, denn der massenhafte Einsatz von Bauelementen auf Basis der III-V-Halbleiter kam erst in den 1980er Jahren, über 30 Jahre nach deren Entdeckung, in Form von III-V-Halbleitern in kleinen Festkörperlasern in der Konsumelektronik (CD-Player), Computertechnik und vielen anderen Bereichen. Die III-V-Halbleiter sind so heute eine der Grundlagen für die immer weiter um sich greifende (Computer-)Kommunikation via Glasfaserkabel.

Das Laboratorium für Halbleiter in Pretzfeld

Umorientierung der Arbeiten

Das Laboratorium für Halbleiter war bereits 1946 in Pretzfeld unter der Prämisse gegründet worden, daß es irgendwann endgültig nach Erlangen verlagert und in eine größere Struktur eingegliedert werden sollte. Nachdem die Entwicklung der Selengleichrichter abgeschlossen und das zentrale Forschungslaboratorium der *Siemens-Schuckertwerke* gegründet worden war, gab es eigentlich keinen Grund mehr, die ehemalige „Laborgruppe Spenke“⁹⁹ beziehungsweise „Selengruppe Sielbeck“¹⁰⁰ in Pretzfeld zu belassen, zumal das Pretzfelder Laboratorium in der Forschungs- und Entwicklungsstruktur der *Siemens-Schuckertwerke* keinen Platz hatte. Seit 1946 war es sowohl für Grundlagenforschungs- als auch für Entwicklungsfragen auf dem Gebiet der Selengleichrichter zuständig gewesen. Die Entwicklungsaufgaben hätten einerseits vom Werkslaboratorium des Schaltwerks in Berlin übernommen werden können, und andererseits hätten die grundlegenden Halbleiterforschungen dem zentralen Forschungslaboratorium angegliedert werden können.

Spenke wollte aber die Unabhängigkeit seines Labors bewahren. Er hatte im Laufe des Jahres 1950 seine Aufmerksamkeit von den Selengleichrichtern weg auf neue Themen ausgerichtet und Überlegungen zu Germanium- und Siliziumgleichrichtern angestellt. Eine erste Abschätzung hatte ihn im Mai 1950 zu der Ansicht geführt, daß

„infolge des niedrigen Widerstandes der bisher bekannten Silizium- und Germaniumsorten die technische Flächenbelastung von Silizium- und Germanium-Flächengleichrichtern um ca. 4 Zehnerpotenzen zu groß sein würde, um mit den bisherigen Kühlmethoden (Luftkühlung) beherrscht zu werden.“¹⁰¹

Im Oktober 1950 hatte ihm aber Karl Seiler von seinen Arbeiten berichtet, die es ermöglichen, Silizium mit einem hohen Widerstand herzustellen und so erste Silizium-Flächengleichrichter zu produzieren. Diese waren zwar noch sehr klein und wurden schnell heiß, aber es bestand nach Seilers Ansicht die Möglichkeit, bald Leistungsgleichrichter aus Silizium für technische Zwecke herzustellen. Daher schlug Spenke vor, „angesichts dieses Tatbestandes ... die Frage zu diskutieren, ob eine diesbezügliche Entwicklung eingeleitet werden soll.“¹⁰²

⁹⁸ Trendelenburg, *Aufbau und Ziele*, 1952, SAA 35-46 / Lc 375, S. 26.

⁹⁹ Aktenvermerk 14074, Erlangen, den 25. Juni 1946, SAA 68 / Li 385 A.

¹⁰⁰ Aktenvermerk 14071, Erlangen, den 24. Mai 1946, SAA 68 / Li 385 A.

¹⁰¹ Spenke, „Zur Frage eines Silizium-Flächengleichrichters“, Aktenvermerk, 7. Oktober 1950, WSD 039. Spenke beruft sich in diesem Aktenvermerk auf von ihm am 19. Mai 1950 gegebene Abschätzungen.

¹⁰² Ebenda.

Seiler hatte Spenke direkt in Pretzfeld von seinen Forschungen informiert, da Spenke nicht zum Physikertag nach Bad Nauheim kommen konnte, auf dem Seiler seine Ergebnisse vorzutragen gedachte. Für eine sehr knappe Zusammenfassung von Seilers Vortrag siehe Seiler, *Flächengleichrichter aus Silizium*, 1950. Das Verfahren ist ausführlicher beschrieben in Seiler, *Herstellung von*

Doch durch die leichtere technische Beherrschbarkeit des Germaniums gegenüber dem Silizium war man in Pretzfeld nicht sofort auf die Anregung Seilers eingegangen, mit Silizium zu arbeiten, sondern hatte sich zunächst auf Germanium konzentriert. Seit der Erfindung des Germanium-Transistors stand Germanium im Zentrum des allgemeinen Interesses und ein ehemaliger Mitarbeiters Spenkes erinnert sich, daß sich alle Gedanken und Diskussionen in Pretzfeld im Herbst 1950 um Germanium drehten. „Dabei standen dessen Chancen für industrielle Anwendung gar nicht so sehr im Vordergrund, wie dessen Eignung als Modells substanz, an der man endlich wirklich Halbleiterphysik lernen konnte.“¹⁰³ Auch Seiler selbst hatte in den Jahren 1950/51 hauptsächlich mit Germanium gearbeitet und dies Spenke auch mitgeteilt.¹⁰⁴

Schon 1948 hatte Spenke die Erfindung des Germanium-Punktkontakt-Transistors mit großer Aufmerksamkeit verfolgt und seinen Kollegen wenig später „über die amerikanischen Arbeiten“¹⁰⁵ referiert. Diese Gelegenheit nahm er zum Anlaß, sich kritisch mit der von ihm mitformulierten Schottky-Randschichttheorie auseinanderzusetzen. In dieser spielte die Randdichte der Ladungsträger n_R eine entscheidende Rolle.

„Diese Größe [Randdichte der Ladungsträger n_R] wird nach der ursprünglichen Schottkyschen Konzeption durch die Austrittsarbeit des Metalls bestimmt, und so bedeutete es eine schöne Bestätigung der Schottkyschen Theorie, als seinerzeit Schweickert einen Zusammenhang zwischen den Austrittsarbeiten verschiedener Metalle und ihrer Sperrwirkungen als Elektroden eines Selengleichrichters nachweisen konnte.

Bei den Ge-Gleichrichtern stellte sich aber nun umgekehrt eine weitgehende Unabhängigkeit der Sperreigenschaften vom Metall der Kontaktspitze heraus, und dies war für Bardeen die Veranlassung, 1947 seine Theorie der Oberflächenzustände aufzustellen.“¹⁰⁶

Daraus schloß Spenke, daß bei Germanium generell die Gleichrichterwirkung durch einen pn-Übergang erklärt werden müsse. Er kam sogar zu der Einschätzung, daß schon bei den seit 1943 von *Siemens & Halske* produzierten Germaniumdetektoren unbemerkt pn-Übergänge und nicht die Metall-Halbleiter-Kontakte für die Gleichrichtung verantwortlich gewesen waren. Allgemein formulierte er:

„Wir können also den bisher betrachteten n-Kristall mit Bardeenscher Oberflächenschicht als Kontakt eines n-Kristalls mit einem unendlich dünnen p-Kristall auffassen und kommen so automatisch zu der Betrachtung der Effekte, die sich am Kontakt eines Überschuß- und eines defektleitenden Ge-Kristalls einstellen.“¹⁰⁷

Aber sowohl bei den Radar-Detektoren wie bei den ersten Transistoren entstanden diese maßgebenden Grenzübergänge in einem winzigen Bereich um die auf den Halbleiter aufgesetzten Metallspitzen. Wegen der geringen Größe der Kontaktfläche schieden solche Punktkontakt-Wirkungen für Anwendungen in der Leistungselektronik von vorne herein aus. Dennoch schien das Halbleitermaterial Germanium große Chancen zu bieten, einmal für Leistungsanwendungen brauchbar zu sein, wenn es gelang flächenhafte pn-Übergänge herzustellen.¹⁰⁸

Entsprechend schlugen nach Einrichtung der Abteilung „Festkörperphysik“ im Erlanger Forschungslaboratorium Spenke und Welker Anfang 1952 gemeinsam vor,

Flächengleichrichtern, 1949, Patent DBP 883 784; siehe auch „Flächengleichrichter aus Silizium“ ab S. 108.

¹⁰³ Pers. Mitteilung von Otfried Madelung, 16. Jan. 1999.

¹⁰⁴ Seiler an Spenke, 19. Dez. 1951, ESD(a) 046.

¹⁰⁵ Spenke, *Wirkungsweise*, 1949, ESD(a) 410.

¹⁰⁶ Spenke, *Neuere Ergebnisse*, 1951, ESD(a) 410, S. 10.

¹⁰⁷ Ebenda, S. 11.

¹⁰⁸ Ebenda, S. 11.

daß parallel zu den Arbeiten an III-V-Verbindungshalbleitern in Pretzfeld weiter an Germanium gearbeitet werden sollte.¹⁰⁹

„Im Laufe des Geschäftsjahres [1951/52] wurde klar, daß man mit der Realisierung des p-n-Gleichrichterprinzips nicht warten könne, bis im AL [Allgemeinen Laboratorium]/Dr. Welker ein neuer Halbleiterwerkstoff physikalisch und technologisch völlig reif geworden ist, sondern daß man die entsprechenden Arbeiten sofort mit dem weitgehend erforschten Werkstoff ‚Germanium‘ aufnehmen soll.“¹¹⁰

Aufgrund dieser Einschätzung wurden weitgehende Umstrukturierungsmaßnahmen getroffen, die „die Herren Dr. Hoffmann und Dr. Schweickert neben ihren sonstigen Arbeiten [bewältigten], so daß mit Beginn des neuen Geschäftsjahres [1952/53] die Arbeitsgruppe Dr. Hoffmann schon völlig zu den Germaniumarbeiten übergehen konnte.“ Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an Selen wurden bald darauf eingestellt.¹¹¹

Parallel zu Germanium testeten Schweickert, Herlet und Haus in Pretzfeld auch Aluminiumantimonid-Einkristalle (AlSb) wegen ihrer physikalisch günstigen Eigenschaften (großer Bandabstand, niedriger Schmelzpunkt), konnten aber für technische Zwecke keine ausreichend großen Einkristalle sondern nur kleine einkristalline Bereiche in polykristallinem Material herstellen. „Auch sonst war dieser Werkstoff für die weitere Verarbeitung zum Bauelement ungeeignet, da das Material an Luft ... zerrieselte.“ Daher wurden die Untersuchungen in dieser Richtung nicht fortgesetzt.¹¹² Die Geschäftsführung vertraute aber so sehr auf „die von Dr. Welker entwickelten neuen Halbleiter-Werkstoffe“, so daß man offiziell in Pretzfeld plante, nur solange mit Germanium zu arbeiten, bis die III-V-Halbleiter soweit seien.¹¹³

Tatsächlich wurden in Pretzfeld neben Germanium schon spätestens Mitte 1953 intensive Forschungen auch an Silizium aufgenommen. Es galt aber wegen seines hohen Schmelzpunktes als schwierig zu bearbeiten; insbesondere die Reinstdarstellung warf Probleme auf. Doch durch das von Reimer Emeis in Pretzfeld Ende 1953 entwickelte „tiegelfreie Zonenziehverfahren“ konnte Silizium technisch in genügender Reinheit hergestellt werden und wurde so bald das bevorzugte Halbleitermaterial.

Neue Halbleitermaterialien für Leistungsanwendungen?

Schon bei der Beschäftigung mit Selen hatte sich herausgestellt, daß es notwendig ist, das „Halbleitermaterial selbst, möglichst rein und reproduzierbar in die Hand zu bekommen.“¹¹⁴ Das hatte bei Selen zu großen Schwierigkeiten geführt. Spenke argumentierte daher, daß Germanium als Halbleitermaterial wegen seines höheren Schmelzpunktes und der Kristallisation im Diamantgitter für Starkstromanwendungen beispielsweise für Leistungsgleichrichter besser geeignet sei.¹¹⁵

Doch in der in den frühen 1950er Jahren auch in Deutschland entstehenden Halbleiterindustrie konzentrierte man sich auf die Anwendungen des Halbleiters Germanium in der Schwachstromtechnik (z.B.: Nachrichtentechnik und Meßwesen). Mitte der 1950er Jahre dominierten noch klar die Punktkontakt-Dioden und -Transistoren. Flächenhafte pn-Übergänge waren zwar erst in wenigen kommerziellen Produkten

¹⁰⁹ Aktenvermerk AL/LH Dr. Spenke, Dr. Welker v. 12.Feb. 1952, nach ESD(a) 003 (dort nur Verweis); Tschermak, *Leistungshalbleiterelemente*, 1976, ESD(a) 017, S. 8.

¹¹⁰ Jahresbericht des LH Pretzfeld über das Geschäftsjahr 1951/52, ESD(a) 003, S. 2.

¹¹¹ Ebenda.

¹¹² Siehe z.B. „Hochohmiges p-Silizium als Ausgangsmaterial für legierte Gleichrichter“, SAA 68 / Li 385 A.

¹¹³ Geschäftsberichte Zentral-Werksverwaltung, 1951/52, datiert auf 11. Feb. 1953, SAA 15 / Lk 961.

¹¹⁴ „Selengleichrichter“, SAA 68 / Li 385 A.

¹¹⁵ „Bericht über die Arbeiten des LH-Pretzfeld in den Jahren 1947 bis 1951.“, SAA 35-46 / Ld 954.

enthalten, doch würden sie sich nach einhelliger Einschätzung bald durchsetzen.¹¹⁶ Die Realisierung von flächenhaften pn-Übergängen eröffnete schließlich auch die Möglichkeit, Leistungsgleichrichter und Leistungstransistoren zu bauen. Nachdem 1952 Robert N. Hall gezeigt hatte, wie pn-Gleichrichter auch für große Leistungen realisiert werden könnten, begannen in Pretzfeld im Herbst 1952 intensive Versuche mit Germanium.¹¹⁷

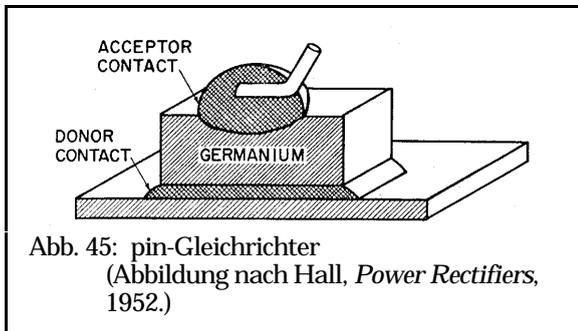


Abb. 45: pin-Gleichrichter
(Abbildung nach Hall, *Power Rectifiers*, 1952.)

Das Problem hatte zunächst darin bestanden, daß bei einem gewöhnlichen pn-Übergang „große Sperrfähigkeit U_b und gute Durchlaßeigenschaften, also kleiner Bahnwiderstand R_B zunächst nicht miteinander vereinbar sind.“ Überschritt bei angelegter äußerer Spannung der Potentialgradient im pn-Übergang einen kritischen Wert, setzten Zener-Übergänge oder Gitterionisation ein und zerstörten so

die Gleichrichtung. Der Wunsch nach hoher Sperrspannung entsprach demjenigen nach einem niedrigen Potentialgradient, der sich nur durch schwach dotierte, aber ausgedehnte n- und p-Gebiete erreichen ließ. Schwache Dotierungen lieferten aber einen hohen Bahnwiderstand R_B , da dann nicht genügend Ladungsträger zur Verfügung standen.¹¹⁸

Einen Ausweg bot der durch Hall entwickelte pin- (positiv-intrinsisch-negativ) Gleichrichter. Zwischen den stark dotierten p- und n-Gebieten ist ein schwach p- oder n-leitendes, intrinsisches (nicht dotiertes) Gebiet angeordnet. Dieses verhindert, daß bei hohen Spannungen in Sperrrichtung einer der dotierten Bereiche mit Ladungsträgern der anderen Dotierung überschwemmt wird und dadurch seine Sperrwirkung verliert. In Durchlaßrichtung hat aber die schwache Dotierung des Mittelgebiets keine nachteiligen Folgen, da es mit Ladungsträgern aus den beiden hochdotierten Bereichen überschwemmt wird, sofern es nicht merklich dicker als zwei Diffusionslängen ist.¹¹⁹

Praktisch hergestellt wurden die pin-Gleichrichter, indem in ein hochohmiges Germaniumstück von der einen Seite Akzeptoren und von der anderen Seite Donatoren eingelegt wurden. Dadurch bildete sich ein pn-Übergang mit der gewünschten schwach dotierten - fast isolierenden - Schicht dazwischen (siehe Abb. 45).¹²⁰

Dank dieser Erfindung zeichnete sich auf dem Gebiet der Leistungsgleichrichter bald die Überlegenheit der auf pn-Übergängen beruhenden Gleichrichter ab, wenn auch ihr Wirkungsgrad bei Hochfrequenz wegen der Dicke der isolierenden Schicht noch zu wünschen übrig ließ.

„Dennoch ist der pn-Gleichrichter eine wertvolle Bereicherung auf dem Gleichrichtergebiet: er übertrifft die bisher üblichen Gleichrichter auf Cu₂O- oder Se-Basis ganz erheblich. ... Der pn-Gleichrichter steht in seiner Gesamtbewertung sogar über dem Hochvakuum- und Generatorgleichrichter.“¹²¹

Obwohl allgemein gehalten, zielte die obige Aussage allein auf Germaniumgleichrichter. Silizium konnte wegen seines hohen Schmelzpunkts von ca. 1410°C nur sehr schwer in genügender Reinheit hergestellt werden. Jedes Tiegelmaterial führte bei so hohen Temperaturen zu zusätzlichen Verunreinigungen des Materials. Dem gegenüber stand aber die höhere Temperaturfestigkeit der Gleichrichtereigenschaften des

¹¹⁶ Siehe dazu zum Beispiel Rost, *Kristallogentechnik*, 1954 und Dosse, *Transistor*, 1955.

¹¹⁷ Hall, *Power Rectifiers*, 1952; „Übergang zur Diamantgitter-Struktur“, SAA 68 / Li 385 A.

¹¹⁸ Spenke, *Siliziumleistungsgleichrichter*, 1956, S. 631.

¹¹⁹ Ebenda.

¹²⁰ Hall, *Power Rectifiers*, 1952.

¹²¹ Rost, *Kristallogentechnik*, 1954, S. 63.

Siliziums. Während die elektrischen Eigenschaften von Germanium schon ab ca. 60°C deutlich von der Temperatur abhingen, waren diejenigen von Silizium bis wenigstens 150°C stabil. Das hing mit dem unterschiedlich großen Abstand zwischen dem Valenzband und dem Leitungsband zusammen. Während der Bandabstand bei Germanium nur ca. 0.72 eV betrug, waren es bei Silizium immerhin 1.1 eV. Das führte dazu, daß die Eigenleitung bei Silizium später einsetzte und erst ab ca. 150°C merklich wurde.¹²²

Entsprechend waren Forschungen zu Siliziumgleichrichtern einerseits interessant und erfolgversprechend, andererseits aber auch risikoreich, da sich die Materialeigenschaften noch recht schlecht kontrollieren ließen. Spenke erinnerte sich, daß in Pretzfeld Vergleiche zwischen beiden Materialien angestellt wurden. Er schrieb 1976 in einem Brief, daß

„Herlet und Hoffmann ... auf meine Veranlassung im Jahre 1952 eine Reihe von Silizium-Gleichrichtern durchrechneten. Dabei stellte sich trotz sehr vorsichtiger Annahmen die haushohe Überlegenheit des Siliziums gegenüber dem Germanium heraus und dies war eine wesentliche Veranlassung für uns, von da ab das Germanium zu vernachlässigen und auf Silizium loszugehen.“¹²³

Der Bericht von Herlet und Hoffmann zu diesem Thema kam allerdings erst im Januar 1954 heraus. Darin äußerten sich die beiden Autoren damals viel zurückhaltender und differenzierter. Gute Germaniumgleichrichter könne man demnach quasi sofort bauen, während man für die theoretisch besser geeigneten Silizium- oder III-V-Verbindungshalbleiter-Gleichrichter die ausreichende technologische Entwicklung in der Präparation der jeweiligen Materialien abwarten müsse. Konkret schrieben sie:

„Will man also auf einen möglichst vielseitig verwendbaren Gleichrichterwerkstoff hinaus, so sollte man die genügende technologische Entwicklung des Siliziums - bzw. der III-V-Verbindungen - abwarten. Wenn man aber möglichst bald Leistungsgleichrichter auf p-n-Basis bauen will, so wird man sich des technologisch recht gut bekannten Germaniums bedienen, ohne dass dies den Stempel einer ausgesprochenen Fehlentwicklung tragen würde.“¹²⁴

Jedenfalls wurden 1953 in Pretzfeld sowohl Untersuchungen an Germanium als auch an Silizium durchgeführt. Nach den ersten erfolgreichen Versuchen bei der Reinstdarstellung von Silizium im Herbst 1953 ging man aber doch recht rasch vollständig zum Silizium über.

Reinstdarstellung von Siliziumeinkristallen

Reine Germaniumeinkristalle wurden in den 1940er Jahren zunächst durch einfaches Schmelzen und Auskristallisieren in gereinigten Graphit- beziehungsweise Quarztiegeln hergestellt. Durch anschließendes Zonenziehen erhöhte sich die Reinheit und

¹²² Konkret galt für Silizium, daß das Verhältnis der Ströme von Durchlaß- zur Sperrichtung bei 100°C immerhin 10⁶: 1 und bei 200°C noch 10⁴: 1 erreichte und erst bei 300°C auf 10: 1 absank. Siehe dazu Pearson/Sawyer, *Silicon P-N Junction*, 1952, S. 1348 und Rost, *Kristallogentechnik*, 1954, S. 45.

¹²³ Spenke an Tschermak, 29. April 1976, ESD(a) 017.

^{I124} Technischer Bericht Nr. 104, vom 17. Jan. 1954, von Dr. A. Herlet und Dr. A. Hoffmann „Die Dimensionierung von p-n-Gleichrichtern und ein Vergleich zwischen Selen-Germanium und Siliziumgleichrichtern“, in „Berichte des Forschungslaboratoriums Pretzfeld Nr. 5-295 (1947-1962)“, SAA 35-46 / LI 32.

Offenbar gingen in diesen Bericht die im Sommer/Herbst 1953 gewonnen Einsichten über das „Tiegelfreie Zonenziehverfahren von Silizium“ noch nicht ein, das es ermöglichte, Silizium in ausreichender Reinheit und monokristallin herzustellen. Der entsprechende erste Versuchsbericht ist auf den 24. Juli 1953 datiert. Trotzdem kann man annehmen, daß Herlet und Hoffmann ihre Arbeiten danach abschlossen, da ihr Bericht eine höhere Nummer trägt. (TB Nr. 102, R. Emeis, ZW/LH-Pretzfeld Versuchsbericht, vom 24. Juli 1953).

verbesserte sich die Kristallstruktur. Ab Anfang der 1950er Jahre setzte sich dann das Czochralski-Verfahren zur Herstellung von Germanium-Einkristallen durch. Doch beide Verfahren, das Zonenziehen und das Czochralski-Ziehen, konnten zur Herstellung von reinen Siliziumeinkristallen nur sehr schlecht angewendet werden. Während bei Schmelztemperaturen um die 960°C das Tiegelmaterialelement noch kaum Verunreinigungen in die Schmelze abgab, wurde das flüssige Silizium bei 1410°C von jedem Anfang der 1950er Jahre bekanntem Tiegelmaterialelement verunreinigt. Daher entschieden sich Spenke und seine Mitarbeiter, nach anderen Verfahren zu suchen.¹²⁵

Ab 1953 konzentrierte man sich in Pretzfeld daher zunächst auf die chemische Reinstdarstellung des Elements Silizium, denn erst nachdem dieses zur Verfügung stand, konnten daraus Einkristalle hergestellt werden. Anfangs orientierte man sich dabei an einem Verfahren, das 1952 auf Anregung des Werkstoffhauptlaboratoriums (WHL *Siemens & Halske*) am Anorganisch-Chemischen Instituts der Universität München unter Prof. Wiberg entwickelt worden war. Dieses Verfahren war eine Übertragung des bereits bekannten Darstellungsverfahrens für das Element Bor auf das Element Silizium. In diesem später kurz „A-Verfahren“ genannten Prozeß wurde Silizium durch Zersetzen von SiHCl_3 bez. SiCl_4 im Lichtbogen bei Gegenwart von Wasserstoff gewonnen. Es lieferte zwar nur etwa 5-50 mg Silizium pro Stunde, aber es entstanden 3-4 mm dicke polykristalline Siliziumstäbe, die nicht mit den Gefäßwänden in Berührung gekommen waren und daher schon einen recht hohen elektrischen Widerstand aufwiesen, der anzeigte wie rein das Material schon war. Weitere Messungen an diesen Stäben ergaben eine Elektronenbeweglichkeit von $1200 \text{ cm}^2/\text{Vs}$. Ein so hoher Wert war im Silizium noch nie gemessen worden und gab Anlaß zur Hoffnung, daß sich auch aus Silizium Transistoren herstellen lassen würden.¹²⁶

Das A-Verfahren hatte trotz der geringen Ausbeute wegen der Reinheit des erhaltenen Materials große Vorteile gegenüber dem schon länger bekannten B-Verfahren, bei dem sehr viel mehr Silizium pro Stunde (ca. 10-20 g) produziert werden konnte, das allerdings weniger rein war und nur in Nadel- beziehungsweise Pulverform vorlag. Dieses B-Verfahren war zu Beginn der 1940er Jahre beim amerikanischen Chemiekonzern *DuPont* entwickelt worden und wird daher auch *DuPont*-Verfahren genannt. *DuPont* konnte dadurch noch während des Krieges dem amerikanischen Militär relativ große Mengen reines Siliziummaterial zur Verfügung stellen. Die bei diesem Verfahren anfallenden kleinen Siliziumnadeln hatten zwar zur Produktion von Radardetektoren ausgereicht, für die Nachkriegsanwendungen waren aber größere Einkristalle notwendig.¹²⁷ Zur Weiterverarbeitung zu einem Einkristall erwies sich später stabförmiges Silizium als günstig, das im Anschluß an das *DuPont*-Verfahren erst durch Pressen, Sintern und später auch durch Anschmelzen der Kristalle an einen hängenden Siliziumtropfen erzeugt werden mußte.¹²⁸

Anfang 1954 wurde schließlich im Werkstoffhauptlaboratorium das später sogenannte C-Verfahren entwickelt.¹²⁹

¹²⁵ Das Czochralski-Ziehen von Siliziumeinkristallen wurde allerdings zur gleichen Zeit an verschiedenen Stellen mit mehr oder weniger Erfolg erprobt. Siehe dazu zum Beispiel die Arbeiten, die bei der *Süddeutschen Apparate-Fabrik* in Zusammenarbeit mit der TH Stuttgart durchgeführt wurden (ab S. 185 - oder Kleinknecht, *Silizium-Einkristalle*, 1952). Zur amerikanischen Entwicklung bei *Texas Instruments* etc. siehe Teal, *Single Crystals*, 1976.

¹²⁶ Fischer u.a., *Historische Übersicht*, 1958, HWD 001; „Hochohmiges p-Silizium als Ausgangsmaterial für legierte Gleichrichter“, SAA 68 / Li 385 A; Pfisterer, *Geschichte des Reinst-Siliziums*, 1994, S. 120-121.

¹²⁷ Die Herstellung des Siliziums im Dupont-Verfahren erfolgte durch Reduktion von SiCl_4 mittels Zink ($\text{SiCl}_4 + 2 \text{Zn} \rightarrow \text{Si} + 2 \text{ZnCl}_2$). Zur Silizium-Herstellung bei *DuPont* siehe z.B. Seitz/Einspruch, *Electronic Genie*, 1998, S. 128-135.

¹²⁸ Das Anschmelzen der Kristalle an einen hängenden Siliziumtropfen wurde auch „Stippverfahren“ genannt. Siehe dazu Reuschel/Emeis, *Verfahren*, 1954, DBP 1068024.

¹²⁹ Pfisterer, *Geschichte des Reinst-Siliziums*, 1994, S. 121-123.

„Dabei wurde ein ca. 3 mm dicker Siliziumstab an beiden Enden mit Kohlehalterungen versehen und durch direkten Stromdurchgang auf 1150° - 1200°C erhitzt, und ein Gasgemisch von SiHCl₃ und Wasserstoff im Verhältnis von 1:12 bis 1:15 am heißen Silizium zur Reaktion gebracht. Nach der Gleichung:

$$\text{SiHCl}_3 + \text{H}_2 (1200^\circ) \leftrightarrow (400^\circ) \text{Si} + 3 \text{HCl}$$
scheidet sich Silizium am glühenden Stab ab und läßt ihn dicker wachsen.“¹³⁰

Das Endprodukt des C-Verfahrens waren Stäbe aus polykristallinem Silizium.¹³¹

Unter Leitung von Spenke wurden in Pretzfeld Anfang 1954 zunächst ohne offiziellen Auftrag die Arbeiten an allen anderen Halbleitermaterialien zu Gunsten von Silizium eingeschränkt. Nachdem schon Ende 1953 erste Tests mit dem B-Verfahren durchgeführt worden waren, experimentierte man ab Sommer beziehungsweise Herbst 1954 auch mit dem A- und dem C-Verfahren. So gelang es in den folgenden Jahren, das C-Verfahren zur Produktionsreife fortzuentwickeln.¹³²

Die als Ausgangsprodukt wichtigen Dünnstäbe von 2 – 4 mm Stärke wurden anfänglich durch das A-Verfahren bereitgestellt, bis es in Pretzfeld gelang, die Siliziumproduktion ganz vom A-Verfahren zu lösen. Zuerst wurden die Silizium-Dünnstäbe durch Längszersägen bereits durch das C-Verfahren produzierter Stäbe hergestellt. Bald setzte sich aber das sog. „Dünziehen“ der Siliziumstäbe durch.¹³³

Parallel zur Entwicklung dieser „chemischen“ Verfahren zur Reinstdarstellung von Silizium wurde ein „physikalisches“ Verfahren entwickelt, das das im ersten Schritt erhaltene polykristalline Silizium weiter reinigte und in einen einkristallinen Zustand überführte.

Tiegefreies Zonenziehverfahren

Germanium kann durch das Zonenziehverfahren gereinigt und in einen einkristallinen Zustand überführt werden. Es war Mitte 1950 von William Pfann bei den Bell Laboratorien entwickelt worden und hatte sich danach rasch weltweit ausgebreitet. Pfann hatte schon kurz vor dem Krieg über ein Zonenschmelzverfahren nachgedacht, um Blei-Antimon-Kristalle herzustellen. Nach dem Krieg kam er zur Reinigung von Germanium auf diese Methode zurück. Bringt man eine schmale Zone eines Germanium-Kristalls in einem hochreinen Quarztiegel zum Schmelzen und läßt diese durch den Kristall hindurchwandern, so sammeln sich die Verunreinigungen in der flüssigen Phase und können nach dem Erstarren abgetrennt werden. Durch mehrfache Wiederholung dieses Prozesses läßt sich eine hohe Reinheit des Materials erzielen.¹³⁴

Diese Methode setzte sich für Germanium sehr schnell durch, war aber für Silizium wegen der höheren Schmelztemperatur nicht anzuwenden. Den Durchbruch brachte

¹³⁰ „Hochohmiges p-Silizium als Ausgangsmaterial für legierte Gleichrichter“, SAA 68 / Li 385 A. Siehe auch Laboratoriumsbericht, WHL, Karlsruhe, den 27. 9. 54, Dr. Friedrich Bischoff, „Siliciumgewinnung durch Abscheidung an direkt erhitztem hochreinen Silicium“, SAA 35-78 Lc 782, Ordner bis 1955.

¹³¹ Diese Stäbe enthielten teilweise einkristalline Bereiche, so daß ab 1957 versucht wurde, direkt aus der Gasphase einkristalline Siliziumstäbe herzustellen. „Zusammenfassung: Bei geeigneter Reaktionsführung können Silizium-Einkristalle durch direkte Abscheidung aus der Gasphase hergestellt werden. Zur Zeit gelingt jedoch nur das Aufwachsen eines n-leitenden Materials.“ (Technischer Bericht Nr. 169, Dr. K. Reuschel, 18. Nov. 1957, „Herstellung von Silizium-Einkristallen durch direkte Abscheidung aus der Gasphase“, SAA 35-46 / Li 32.)

Auch in der Halbleiterfabrik München wurde dieses Verfahren weiterentwickelt bis monokristallines Silizium aufwuchs. Siehe dazu „Einkristallines Aufwachsen des Si auf Si-Dünnstäben nach dem thermischen Aufwachsverfahren“, München, 30. Dez. 1957, Dr. Grabmaier, SAA 35-78 Lc 782, Ordner 1956-1958.

¹³² Fischer u.a., *Historische Übersicht*, 1958, S. 3, HWD 001; Pfisterer, *Geschichte des Reinst-Siliziums*, 1994, S. 123-124.

¹³³ Ebenda; „Hochohmiges p-Silizium als Ausgangsmaterial für legierte Gleichrichter“, SAA 68 / Li 385 A. Erläuterung zum „Dünziehen“ siehe S. 175.

¹³⁴ Riordan/Hoddeson, *Crystal Fire*, 1997, S. 198-200

hier das tiegelfreie Zonenschmelzverfahren. Es wurde etwa gleichzeitig bei *Siemens* (Karl Siebertz, Heinz Henker, Reimer Emeis) und der *Süddeutschen Apparate-Fabrik* (Siegfried Müller) in Deutschland und bei *Western Electric* (Henry C. Theurer) und der *US-Army* (P. H. Keck, M. J. E. Golay) in den USA entwickelt.¹³⁵

Bei *Siemens & Halske* in Karlsruhe wurde durch die Physiker Karl Siebertz und Heinz Henker bereits im Sommer 1952 die Idee des tiegelfreien Zonenziehens formuliert. In ihrer Erfindungsmeldung vom 30. Okt. 1952 war zwar vermerkt, daß sie den Grundgedanken schon im April 1952 in Notizen festgehalten hätten, das Verfahren selbst war aber Ende Oktober 1952 noch immer nicht erprobt.¹³⁶ Erste Patentanmeldungen dazu wurden im Februar 1953 eingereicht.¹³⁷

In Pretzfeld war etwa um die gleiche Zeit das tiegelfreie Zonenziehen im wesentlichen von dem jungen Physiker Reimer Emeis vorangetrieben worden. Eine erste Patentanmeldung lag wie bei Siebertz und Henker im Februar 1953 vor, ein erster technischer Bericht folgte im Juli 1953, die erste Veröffentlichung erschien im Januar 1954.¹³⁸

Emeis gelang es, die Berührung des heißen Siliziums mit dem Tiegelmateriale zu vermeiden, indem er das Zonenziehverfahren in senkrechter Anordnung durchführte.

„[Dabei wird] die flüssige Schmelzzone durch einen freistehenden, an beiden Enden eingespannten Siliciumstab geführt Die flüssige Zone wird durch die relativ große Oberflächenspannung als Tropfen zwischen den beiden Stabenden gehalten.“¹³⁹

Erhitzt wurde die Schmelzzone in der ersten Ausführung durch einen induktiv geheizten Wolframstrahler. Erst ein Jahr später ging Emeis in Pretzfeld zur rein induktiven

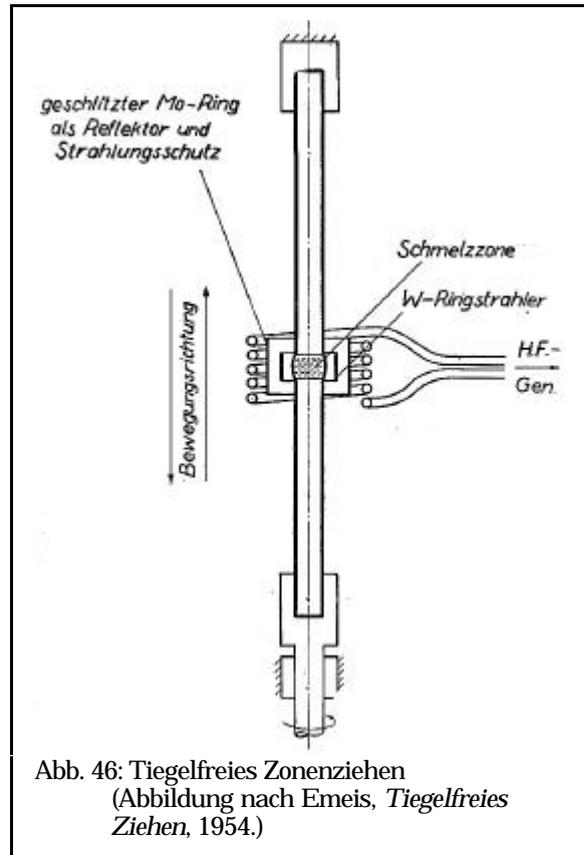


Abb. 46: Tiegelfreies Zonenziehen
(Abbildung nach Emeis, *Tiegelfreies Ziehen*, 1954.)

¹³⁵ Goetzler, *Geschichte der Halbleiter-Bausteine*, 1972, S. 44; Müller, *Siliziumreinigung*, 1954.
¹³⁶ „Einrichtung zum Reinschmelzen und Ziehen von Einkristallen, insbesondere Halbleiterwerkstoffen“, Erfindungsmeldung von Karl Siebertz und Heinz Henker, 30. Okt. 1952, ESD(a) 102.
¹³⁷ Zum tiegelfreien Zonenschmelzen meldeten Siebertz und Henker am 14. Feb. gleich mehrere leicht unterschiedliche Patente gemeinsam an. Siehe Dr. Karl Siebertz und Dr. Heinz Henker, „Verfahren zum zonenweisen Umschmelzen von Stäben und anderen langgestreckten Werkstücken“, DBP 1 061 527 (Auslegeschrift), Kl. 40d 1/30, und DBP 1 794 287 (Auslegeschrift) sowie DBP 1 056 840 (Auslegeschrift). Darüberhinaus meldeten sie wiederum in leichter Abwandlung auch jeder einzeln noch Patente an. Siehe Dr. Heinz Henker, „Verfahren und Einrichtung zum tiegellosten Schmelzen von stabförmigen Körpern“, DBP 976 672, 40 d, 3/02 und Dr. Karl Siebertz, „Verfahren und Vorrichtung zum Umschmelzen von langgestreckten Körpern durch Zonenschmelzen“, DBP 1 062 431 (Auslegeschrift).
¹³⁸ Patentanmeldung PA 9/350/274 (nach Goetzler, *Geschichte der Halbleiter-Bausteine*, 1972, S. 44); Technischer Bericht Nr. 102, „Tiegelfreies Zonen- und Einkristallziehen in senkrechter Anordnung“ von Reimer Emeis, 24. Juli 1953, SAA 68 / Li 385 B1; Emeis, *Tiegelfreies Ziehen*, 1954. Einige Jahre später erwirkte Emeis ein Patent für eine technisch ausgereifte Gestaltung des tiegelfreien Zonenschmelzens (Emeis, *Vorrichtung*, 1958, DBP 1 151 669).
¹³⁹ Emeis, *Tiegelfreies Ziehen*, 1954.

Heizung der Schmelzzone über, bei der auch die Verunreinigung durch aus dem Heizstrahler abdampfendes Wolfram vermieden wurde.¹⁴⁰

Kleinere Testversuche wurden zwar anfangs auch mit Germanium durchgeführt, doch die ersten ernsthaften Versuche hatten bereits aus Siliziumpulver gesinterte Stäbe als Ausgangsmaterial. Mehrere Zonendurchgänge lieferten zunächst einen grobkristallinen Stab und nach weiteren Durchgängen erhielt man einen einkristallinen Stab, dessen spezifischer Widerstand mit 0,02 Ohmcm noch relativ gering war, weil das Ausgangsmaterial noch sehr unrein gewesen war.¹⁴¹ Aber auch in den folgenden Versuchen stellte sich stets p-Leitung ein und der Widerstand konnte nach ca. 20 Durchgängen nicht mehr weiter gesenkt werden. Emeis schloß, daß eine Verunreinigung mit Bor vorliegen müsse.

„Die Reinigung des Siliziums von Bor ist wegen des nahe bei 1 liegenden Verteilungskoeffizienten mit Hilfe des Zonenziehverfahren zu aufwendig. Hier können nur chemische Methoden helfen.“¹⁴²

Ende 1954 konnte das Bor nachgewiesen und Emeis' These bestätigt werden.¹⁴³

Unabhängig und unbeeinflusst von der deutschen Entwicklung hatten auch Paul H. Keck und Marcel J. E. Golay beim amerikanischen Militär (Signal Corps) das tiegelfreie Zonenziehverfahren entwickelt und bereits im Januar 1953 und somit vor Emeis zur Veröffentlichung eingereicht. Von einer Kleinigkeit abgesehen gleichen sich die Arbeiten von Emeis und Keck/Golay sehr.¹⁴⁴ Auch bei *Western Electric* wurden Versuche in die gleiche Richtung angestellt und führten schon Ende 1952 zu einer Patentanmeldung durch Henry Theurer, der damit den Deutschen um wenige Wochen zuvorkam.¹⁴⁵

Zwar gelang es, mit dem tiegelfreien Zonenziehverfahren Einkristalle größerer Reinheit herzustellen. Aber bestimmte Verunreinigungen, namentlich das Element Bor, konnten damit nicht entfernt werden. Hier bot sich eine Kombination mit den chemischen Reinstdarstellungsverfahren, insbesondere mit dem C-Verfahren an. Dieses hatte nämlich den Vorteil, daß aus der Dampfphase das Element Bor nicht in gleichem Maße wie Silizium abgeschieden wurde. Beim C-Verfahren begann man mit einem noch stark p-dotierten (Bor enthaltenden) dünnen Silizium-Stab, der durch den Aufdampfprozeß mit reinem, insbesondere wenig mit Bor verunreinigtem Silizium verdickt wurde. Danach wurde durch das tiegelfreie Zonenschmelzen eine einheitliche und niedrigere Konzentration von Bor erreicht.¹⁴⁶

Durch das sogenannte „Dünnziehen“ wurden aus dem so gewonnenen Grundmaterial dünne Siliziumstäbe für das C-Verfahren hergestellt. Bewegt man nämlich während des tiegelfreien Zonenziehens die beiden Stabenden voneinander weg, so zieht sich die flüssige Zone auseinander, der fertige Stab wird dünner. Die so hergestellten dünnen

¹⁴⁰ „In späteren Versuchen wurde das Silizium allerdings rein induktiv geschmolzen, so daß der Wolfram-Ringstrahler fortfiel und die Gefahr das flüssige Si durch abdampfendes W zu verunreinigen, völlig vermieden wird.“ TB Nr. 112, „Tiegelfreies Zonenziehen von Silizium“, von R. Emeis, 10. Sept. 1954, S. 9, SAA 35-46 / Li 32.

Auch Siegfried Müller bei der *Süddeutschen Apparate-Fabrik* in Nürnberg erhitze das Silizium induktiv (Müller, *Siliziumreinigung*, 1954).

¹⁴¹ Emeis, *Tiegelfreies Ziehen*, 1954.

¹⁴² TB Nr. 112, „Tiegelfreies Zonenziehen von Silizium“ (S. 4), R. Emeis, 10. Sept. 1954, SAA 35-46 / Li 32.

¹⁴³ TB Nr. 115, Dr. Schink, Frh. Stauch, 22. Nov. 1954, nach „Hochohmiges p-Silizium als Ausgangsmaterial für legierte Gleichrichter“, SAA 68 / Li 385 A.

¹⁴⁴ Keck und Golay verwendeten einen Tantalstrahler statt eines Wolframstrahlers zur Erzeugung der Schmelze (Keck/Golay, *Crystallization*, 1953).

¹⁴⁵ Theurer, *Verfahren*, 1953, DBP 1 014 332, 40d, 1/30, US-Priorität vom 17. Dez. 1952.

¹⁴⁶ Ein Abreicherungsfaktor > 100 konnte erzielt werden.

TB Nr. 115, Dr. Schink, Frh. Stauch, 22. Nov. 1954, nach „Hochohmiges p-Silizium als Ausgangsmaterial für legierte Gleichrichter“, SAA 68 / Li 385 A.

Stäbe konnten dann wieder durch das C-Verfahren verdickt werden und waren nun noch reiner. Dieses Verfahren konnte auch zur genauen Einstellung des Borgehalts im Silizium verwendet werden.¹⁴⁷

Die Kombination von C-Verfahren, tiegelfreiem Zonenziehen und Dünnsziehen erwies sich für die Herstellung von hochwertigem Silizium als ideal und wurde weltweit als das „*Siemens-Verfahren*“ bekannt. Im Jahre 1956 führte Spenke auf einer internationalen Tagung erstmals legierte Siliziumleistungsgleichrichter vor, deren Grundmaterial durch das *Siemens-Verfahren* hergestellt worden war. Sie hatten sich in Proberäten bewährt und augenfällig ihre Vorteile gegenüber Selengleichrichtern demonstriert.¹⁴⁸ Der Vortrag erregte großes Aufsehen und in der Folgezeit kam es zu „Lizenz- und Know-How-Verträgen mit folgenden Firmen: Merck, Dow Corning, Monsanto (alle USA), Shin-Etsu (Japan), Monsanto (England), Wacker-Chemie (Deutschland), Montecatini (Italien), Lonza (Schweiz)“.¹⁴⁹ Daraufhin setzte sich das *Siemens-Verfahren* weltweit durch, so daß 1980 etwa 80% des weltweiten Jahresbedarfs von 2000 Tonnen Silizium nach diesem Verfahren gewonnen wurden.¹⁵⁰

Der Blick auf die internationale Konkurrenz

Die Forschungen und Entwicklungen in dem „stillen Dorf“ Pretzfeld waren zwar nicht völlig abgeschnitten vom Rest der Welt, denn insbesondere mit der Forschungsgruppe von Heinrich Welker in Erlangen gab es freundschaftliche Verbindungen und intensive Zusammenarbeit. Informationen aus den USA zu erhalten, gestaltete sich jedoch manchmal sehr schwierig.

Beispielsweise wollte Spenke Ende 1951 einen zusammenfassenden Vortrag über die „Neuentwicklungen auf dem Kristallgleichrichtergebiet“ halten und bemühte sich seit dem Sommer, konkrete Informationen aus den USA zu erhalten. Für diese Zwecke beschäftigte *Siemens* den Ingenieur Dr. Hans Klemperer, der in den USA wohnte und Rechercheaufträge für die *Siemens-Laboratorien* durchführte. Klemperer beantwortete Spenkes Anfrage, indem er ihm die spärlich zur Verfügung stehenden gedruckten Firmeninformationen und Sonderdrucke aus den neuesten Zeitschriften schickte. Darüber hinaus gab er weitere Informationen aus mündlichen Anfragen bei unterschiedlichen Firmen und Pressekonferenzen wieder. Dabei galt allerdings oft: „Gedrucktes Material besteht nicht und die Typen sind unverkäuflich. ... Leistungsgrenzen blieben unklar und ueber Herstellungsfragen hing der dichte Schleier des Firmengeheimnisses.“¹⁵¹

Auch die Transistoren selbst waren 1951/52 schwer zu bekommen, so beklagte sich auch die amerikanische Presse, daß man die häufig angepriesenen Transistoren nicht kaufen könne:

„ELECTRONICS called six manufacturers known to be working on commercial forms of the transistor, asking for orderplacing information, got the following replies: Western Electric, none available, all going to military; General Electric, limited supply to equipment manufactures only; Raytheon, did have model CK-703 available for \$18, now discontinued in favor of model CK-716 expected to be available next month; Sylvania, not on market, still in engineering stage; Westinghouse, not available commercially; RCA, not available. The new day may be dawning, but it's still pretty dark in the channels of trade.“¹⁵²

¹⁴⁷ Siehe dazu z.B. „Bor-Dotiertes Silizium für Transistoren“, SAA 68 / LI 385 A.

¹⁴⁸ Spenke, *Siliziumleistungsgleichrichter*, 1956.

¹⁴⁹ „Hochohmiges p-Silizium als Ausgangsmaterial für legierte Gleichrichter“, SAA 68 / Li 385 A.

¹⁵⁰ Siemens-Museum, *Leistungen des Hauses*, 1986, Kap. 342, S. 3; Spenek/Heywang, *Silizium*, 1981, S. 8.

¹⁵¹ Klemperer an Spenke, 28. Nov. 1951, ESD(a) 46.

¹⁵² „Industry Report“, ESD(a) 046.

Im Zusammenhang mit Spenkes Nachforschungen wurden im Oktober 1951 in Pretzfeld erste Gerüchte über Germanium-Leistungsgleichrichter von *General Electric* bekannt und konnten von Klemperer im Januar 1952 bestätigt werden. Germanium schien zu dieser Zeit nach Einschätzung der amerikanischen Fachpresse auch auf dem Gebiet der Leistungsgleichrichter das Material der Zukunft zu sein.¹⁵³ So begann man um die Jahreswende 1951/52 auch in Pretzfeld zunächst intensive Versuche mit Germanium.

Beim Silizium waren zu dieser Zeit insbesondere die Probleme der Materialbeschaffung und Reinigung noch nicht gelöst. Für die bereits beschriebenen Reinigungs- und Kristallisationsverfahren war es von größtem Interesse, bereits mit sehr sauberen Ausgangsstoffen zu beginnen. Diese waren aber in Deutschland nicht einfach zu beschaffen. Wiederum über Klemperer waren im Sommer 1953 intensive Versuche angelaufen, von *DuPont* und *Sylvania* Reinstsilizium zu erwerben, doch erwies sich dies auch als alles andere als einfach. Bis Herbst 1953 war noch keine Lieferung erfolgt. Das Ausgangsmaterial für den ersten im Herbst 1953 in Pretzfeld durch das tiegelfreie Zonenziehen von Emeis produzierten Siliziumeinkristall wurde deshalb von der Firma Pechiney (Paris) geliefert. Dessen Reinheit von lediglich 99,8 % war aber noch um Größenordnungen kleiner als von gut gereinigtem Germanium.¹⁵⁴

Doch durch die Erfolge von Emeis hatte Spenke sofort die neuen Möglichkeiten des tiegelfreien Siliziumreinigens erkannt und versuchte nun verstärkt, zu Vergleichszwecken das reinere *DuPont*-Silizium als Ausgangsmaterial zu bekommen.¹⁵⁵ Dies führte Anfang 1954 endlich zu einer ersten Lieferung. Doch weitere Beschaffungsaufträge an Klemperer blieben nicht aus. So erkundigte sich Spenke bei ihm im Juni 1954 auch nach reinem n-dotiertem Silizium von *DuPont*, das ja wegen der verbleibenden Borverunreinigungen durch das tiegelfreie Zonenziehen nicht leicht zu erreichen war, und nach hochreinem Feinzink mit einem Reinheitsgrad von mindestens 99,999 Gewichtsprozent. Beides war in Deutschland nicht zu bekommen.¹⁵⁶

Neben diesen organisatorischen Aufgaben wandte sich Spenke auch mit grundsätzlichen Gedanken zur Ausrichtung seines Labors an Klemperer, der die amerikanischen Einschätzungen wiedergeben sollte. Es ging für Spenke Anfang 1954 um die Frage, ob man in Pretzfeld weiter an Germanium arbeiten solle, „wo schnelle (relativ!) Erfolge winken, die aber nur begrenzte Bedeutung haben dürften, oder ob wir uns ganz auf Si[lizium] werfen sollen, wo Fortschritte erheblich mehr Zeit beanspruchen, dafür aber endgültigen Charakter haben dürften.“¹⁵⁷ Klemperer antwortete sofort und berichtete:

„Bei General Electric liegt das Hauptgewicht nach wie vor bei der Germanium Entwicklung; das Hauptinteresse jedoch bei Silizium. ... Eine Umschaltung auf Silizium in der Zukunft erscheint keineswegs ausgeschlossen; zur Zeit wird noch das eine betrieben, ohne das andere zu vernachlässigen. ... Kleinfirmiten mit geringen Mitteln und geringer Verantwortung fuer eine laufende Fabrikation folgen der Mode und stellen sich auf Silizium um. Wir halten dies für eine gewagte Spekulation.“¹⁵⁸

In einem weiteren Bericht, der über Umwege zu Spenke kam, äußerte sich Klemperer ähnlich:

„Experten erwarten, dass im Laufe von 1 bis 2 Jahren das Silizium als Dioden- und Transistormaterial das Germanium verdrängen wird. Die Laenge dieser Zeit haenge lediglich ab von der Frage, wann man Silizium von aehnlich grosser Rein-

153 Techn. Daten: Sperrspannung 1000V, Leistung 100 W, Stromdichte 50 A/cm², Betriebstemperaturen bis 80°C. (Klemperer an Spenke, 14. Nov. 1951 und 29. Jan. 1952, ESD(a) 046).

154 Emeis, *Tiegelfreies Ziehen*, 1954; Briefwechsel von Spenke und Klemperer, ESD(a) 046-047.

155 Spenke an Klemperer, 17. Dez. 1953, ESD(a) 047.

156 Spenke an Klemperer, 30. Jan. 1954 und Spenke an Klemperer, 21. Juni 1954, ESD(a) 047.

157 Spenke an Klemperer, 18. Jan. 1954, ESD(a) 047.

158 Klemperer an Spenke, 23. Jan. 1954, ESD(a) 047.

heit erhalten wird wie heute Germanium erhaeltlich ist. ... Das reinste Silizium produziert heute DuPont. ... Die Zukunft ist gross, aber man ist noch weit davon entfernt.“¹⁵⁹

Als schließlich Anfang 1954 erste bestätigte Berichte über pn-Siliziumflächendioden nach Pretzfeld kamen, entschied sich Spenke für die „gewagte Spekulation“ (Klemperer), sämtliche Forschungen des Pretzfelder Labors noch ohne offizielle Rückendeckung völlig auf Silizium auszurichten und das Germanium zurückzustellen. Schon im nächsten Jahr wurde diese Ausrichtung von der obersten Vorstandsebene der *Siemens-Schuckertwerke* gebilligt, und so konnte sich das Pretzfelder Labor ganz auf die Silizium-Halbleitertechnik konzentrieren und, obwohl von guten Kunden auch Germaniumgleichrichter nachgefragt wurden, die Entwicklung von Germaniumgleichrichtern zu Gunsten der Siliziumgleichrichter vernachlässigen.¹⁶⁰

Schon Anfang 1955 fühlte sich Spenke auf dem Siliziumgebiet „labormäßig den Amerikanern ein bißchen voraus, aber eben nur ein bißchen. Da ich nur für das Laboratorium zuständig bin, braucht mich die Lage auf dem Fertigungssektor ja nicht zu berühren.“¹⁶¹ Um diesen Vorsprung nicht zu verlieren, erkundigte sich Spenke stets nach den neuesten in den USA angewandten Verfahren. Im Punkte Reinstsilizium konnte er zu seiner Beruhigung im April 1955 erfahren, daß man dort das reinste Silizium von *DuPont* erhielt, und daß Nachreinigungsverfahren wie bei Germanium üblich, für Silizium nicht angewandt wurden.¹⁶² Wenig später bestätigten die Bell Laboratorien die herausragende Qualität des in Pretzfeld hergestellten Siliziums:

„In general we were very impressed by the excellence of your silicon crystals and I wish to thank you for the opportunity to compare your crystals with our material. You have obviously made great advances in silicon technology and your crystals are unquestionably among the finest we have seen.“¹⁶³

Nach eigener Einschätzung bestand 1956 allerdings kein großer Vorsprung vor der internationalen Konkurrenz. In einem Bericht aus dieser Zeit hieß es:

„Im Hause Siemens besteht nach unseren Informationen z.Zt. in der Herstellung von hochreinem Si ein Vorsprung vor den Laboratorien der in- und ausländischen Konkurrenz. Man hat aber den Eindruck, daß in letzter Zeit namentlich in den USA erkannt worden ist, worauf unser Vorsprung beruht. Es besteht dort offensichtlich auch die Tendenz, auch die tiegelfreie Methode des Zonenreinigens besser auszubauen und außerdem die Qualität des Siliciums durch Reduktion der Si-Halogenide mittels Wasserstoff zu verbessern. Beide Verfahren stehen dort noch am Anfang der Entwicklung und wir können vielleicht annehmen, daß der eingangs erwähnte Vorsprung im Hause Siemens – rein labormäßig betrachtet – in der Herstellung von hochreinem Silicium nur noch etwa 6 Monate bestehen bleibt.“¹⁶⁴

Um diesen Vorsprung auch in Produkte umwandeln zu können, wandte man sich im Laboratorium für Halbleiter in Pretzfeld – dem Auftrag eines Forschungs- und Entwicklungslabors gemäß – auch der Entwicklung von Bauelementen auf Siliziumbasis zu. In Anlehnung an die Tradition der *Siemens-Schuckertwerke* konzentrierte man sich dabei auf den Bereich der Leistungsbauelemente.

¹⁵⁹ Klemperer an Klewitz, 8. Jan. 1954, ESD(a) 047.

¹⁶⁰ Oszietski, *Frühe Halbleiterforschung*, 1989, S. 157-158; siehe dazu detaillierter Tschermak, *Leistungshalbleiterelementen*, 1976, ESD(a) 017, S. 8-9.

¹⁶¹ Spenke an Klemperer, 31. März 1955, ESD(a) 048.

¹⁶² Klemperer an Spenke, 8. April 1955, ESD(a) 048.

¹⁶³ Tannenbaum (Bell Laboratorien) an Patalong (Pretzfeld), 25. April 1956, ESD(a) 049.

¹⁶⁴ Technischer Bericht des LH Pretzfeld, Nr.130 „Die Situation auf dem Si-Gebiet“, Dr. Schweickert/Dr. Reuschel, 27. Feb. 56, SAA 68 / Li 385 B1.

Silizium-Leistungsbaulemente

Siliziumleistungsgleichrichter

Silizium eignete sich nach Spenke besser für Leistungsanwendungen als Germanium, da Silizium wegen des größeren Bandabstands für höhere Temperaturen geeignet war. Dieser Vorteil wog auch die schlechteren Durchlaßeigenschaften auf. Prinzipiell wären einige der III-V-Halbleiter wegen ihres noch höheren Bandabstands noch besser geeignet gewesen, ihre Herstellungstechniken wurden aber noch nicht beherrscht. „In den meisten Entwicklungslaboratorien hat man sich daher für Leistungszwecke auf das Silizium konzentriert. Das trifft auch für das Laboratorium Pretzfeld der Siemens-Schuckertwerke zu.“¹⁶⁵

Dort wurden im Frühjahr 1956 zu Probe- und Demonstrationszwecken Siliziumgleichrichter hergestellt, die vergleichbaren Selengleichrichtern an Raumbedarf und Zuverlässigkeit weit überlegen waren. Ein Siliziumgleichrichter für Leistungen von über 300 kW ließ sich in einer nicht einmal einen Meter hohen Tonne inklusive Kühlung unterbringen.¹⁶⁶

„Mit einer wirksamen Fläche von 150mm² des weichgelöteten, gekapselten Si-Gleichrichters wurde im Januar 1956 die Gleichrichterentwicklung abgeschlossen. Die Sperrfähigkeit dieser Elemente betrug etwa 1000 V und die Strombelastbarkeit bei Fremdbelüftung 300 A“¹⁶⁷

Wegen des geringen Platzbedarfs wurden Siliziumgleichrichter bald auch in elektrischen Lokomotiven erfolgreich eingesetzt.¹⁶⁸ So schien es für technische Anwendungen 1958 völlig klar, daß Silizium als Gleichrichtermaterial den anderen Materialien wie „Kupferoxydul“, Selen und Germanium in den wichtigsten Kenngrößen überlegen war.¹⁶⁹ Diese Überlegenheit konnte beim Siliziumgleichrichter aber nur in den Bereichen zu einem wirtschaftlichen Einsatz führen, in denen die Qualitäten des Silizium auch ausgenutzt wurden. In den anderen Bereichen würde nach einer zeitgenössischen Einschätzung „der Selen-Gleichrichter ... mindestens vorläufig aus wirtschaftlichen Gründen interessant bleiben.“¹⁷⁰

Nachdem die Entwicklungsarbeiten in Pretzfeld abgeschlossen waren, wurde die Serienfertigung von Siliziumgleichrichtern im Berliner Schaltwerk aufgenommen, doch traten in der Anwendung bald unerwartete Probleme auf. Die gelöteten Anschlüsse hielten wegen der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten (insbesondere schnellen) Temperaturwechseln nicht stand und verursachten Ausfälle. Nachdem zunächst Teile der Pretzfelder Belegschaft erfolglos versucht hatten, die Probleme direkt am Fertigungsort in Berlin zu lösen, wurde die Gleichrichterentwicklung nochmals nach Pretzfeld zurückgenommen. Ab Anfang 1959 entwickelte insbesondere Reimer Emeis statt der Weichlötstellen eine Druckkontaktierung, die sich in den 1960er Jahren international durchsetzte. Die aufgewendete Entwicklungskapazität führte allerdings zu einer Zurückstellung der 1958 begonnenen Entwicklungsarbeiten auf dem Leistungstransistor- und Thyristorgebiet.¹⁷¹

¹⁶⁵ Spenke, *Silizium als Baustoff*, 1958, S. 114.

¹⁶⁶ Spenke, *Siliziumleistungsgleichrichter*, 1956, S. 634-639.

¹⁶⁷ „Der legierte, weichgelötete Gleichrichter“, SAA 68 / Li 385 A.

Ein erster kleinerer Siliziumgleichrichter war bereits zuvor, als die Laboratoriumsarbeiten noch voll im Gang waren, hergestellt worden, um ihn unter Betriebsbedingungen zu erproben.

¹⁶⁸ Zenneck, *Erfahrungen*, 1958, S. 123-125.

¹⁶⁹ Pfaffenberger, *Technik*, 1958, S. 115.

¹⁷⁰ Zenneck, *Erfahrungen*, 1958, S. 126-127.

¹⁷¹ „Gleichrichter - Weiterentwicklung ab 1959“, SAA 68 / Li 385 A; Tschermak, *Leistungshalbleiter-elemente*, 1976, ESD(a) 017, S. 10-15.

Silizium-Leistungstransistor

Wie bereits erwähnt, hatte sich Spenke schon seit ihrem Bekanntwerden für Transistoren interessiert, jedoch schien das frühe Punktkontakt-Prinzip für Leistungsanwendungen nicht geeignet zu sein. Sobald flächenhafte pn-Übergänge realisiert werden konnten, wurde neben der schon diskutierten Entwicklung im Leistungsgleichrichterbereich die Frage nach Leistungstransistoren interessant. In Pretzfeld wurde daher parallel zu den Arbeiten an Siliziumleistungsgleichrichtern ab Ende 1954 intensiv auch an Leistungstransistoren auf Siliziumbasis geforscht, und so konnte noch im Jahr 1955 ein Prototyp eines in Pretzfeld hergestellten Silizium-Transistors intern präsentiert werden.¹⁷²

Erst kurz zuvor war auf einer Konferenz in Dayton (Ohio) der erste Siliziumtransistor überhaupt vorgestellt worden. Gordon Teal hatte ihn bei *Texas Instruments* im Frühjahr 1954 entwickelt. Noch im selben Jahr nahm *Texas Instruments* auch die Produktion auf.¹⁷³ In Pretzfeld hatte man allerdings den Ehrgeiz, den Prototyp zu einem marktfähigen Silizium-Leistungstransistor weiterzuentwickeln. Weniger das Legierungsverfahren zur Herstellung der pn-Übergänge als die Kontaktierung und Kapselung stellten sich dabei als schwierig heraus. Gleichbleibende Qualität konnte lange nicht erzielt werden, so daß erst im Sommer 1957 mit dem Schaltwerk in Berlin über die Fertigung diskutiert werden konnte. Die Vorbereitungen zur Aufnahme einer Serienfertigung setzten jedoch erst zum Jahresende tatsächlich ein.¹⁷⁴

Zu einer Produktion kam es aber auch dann nicht, da 1958 bei *General Electric* in den USA der Thyristor entwickelt wurde, der wesentliche Funktionen des Leistungstransistors übernehmen konnte.¹⁷⁵ Nach Pretzfelder Einschätzung würde ein Leistungstransistor hauptsächlich in der Funktion eines Schalters eingesetzt werden, „der periodisch einen Stromkreis öffnet oder schließt.“¹⁷⁶ Genau das konnte aber von Thyristoren viel einfacher und billiger geleistet werden.

Thyristoren (Silizium-Leistungs-Schalter)

Ein Thyristor ist ein steuerbarer Siliziumgleichrichter, der als Schalter eingesetzt werden kann. Im ausgeschalteten Zustand sperrt er in beiden Richtungen, nach dem Einschalten ist er in eine Richtung durchlässig. Anschaulich kann man sich vorstellen, daß ein Thyristor ein Tor einseitig öffnet, weswegen er in älteren Veröffentlichungen auch manchmal „Stromtor“ genannt wurde. Physikalisch ist er durch vier aufeinanderfolgende Schichten, etwa durch eine pnnpn-Schichtenfolge, realisiert und wird daher auch manchmal „Vierschichter“ genannt.

¹⁷² „Arbeitsthemen und Personalstärken“ und „Transistoren“, SAA 68 / Li 385 A; Klemperer an Spenke, 23. Jan. 1954, ESD(a) 047.

Silizium hatte von vorne herein als aussichtsreicher als Germanium gegolten, da die Probleme der Kühlung bei Germanium schwer in den Griff zu bekommen waren.

¹⁷³ Adcock u.a, *Silicon Transistor*, 1954; Teal, *Single Crystals*, 1976, S. 634-637; Riordan/Hoddeson, *Crystal Fire*, 1997, S. 208-209.

¹⁷⁴ „Transistoren“, SAA 68 / Li 385 A.

¹⁷⁵ Heumann/Stumpe, *Thyristoren*, 1973.

¹⁷⁶ Technischer Bericht des LH Pretzfeld, Nr. 144, „Dimensionierung von Schalttransistoren für hohe Leistungen“, Dr. A. Herlet, 16. Juli 1956, SAA 68 / Li 385 B1.

Wenn es um Schaltvorgänge ging, konnten Thyristoren mit geringerem Aufwand und besserem Wirkungsgrad die Funktion von zwei antiparallel geschalteten Leistungstransistoren übernehmen. Daher war es attraktiv, Thyristoren herzustellen, auch wenn das zur Herstellung von Gleichrichtern angewandte Legierungsverfahren zur Produktion der vier Schichten nicht ausreichte.¹⁷⁷ Zur Herstellung dieser vier unterschiedlich dotierten Schichten wurden 1959 zunächst das Legierungs- und das Diffusionsverfahren miteinander kombiniert, ab 1962 wurden alle vier Schichten durch die Diffusionstechnik hergestellt. Der Thyristor wurde dann wie die Siliziumgleichrichter durch Druckkontakte elektrisch verbunden. Große Probleme bereitete zunächst die Wärmeabfuhr der bei großen Strömen entstehenden Verlustwärme. In der Scheibenzellenbauform wurde dieses Problem dadurch gelöst, daß die Verlustwärme nicht nur nach einer, sondern nach zwei Seiten abgeführt werden konnte (siehe Abb. 47).¹⁷⁸

Dieser Scheiben-Thyristor wurde auf der Hannover Messe 1965 vorgestellt und als technische Sensation gefeiert. Mit ihm ließen sich Ströme bis zu 700 Ampère bei einer Spitzenspannung von 1000 Volt schalten. Die benutzten Siliziumscheiben hatten eine Fläche von ca. 600 mm² und waren nur etwa 0,3 Millimeter dick. Unterschiedliche Anwendungen als Schalter und Gleichrichter (etwa „Thyristor-Lastschalter für Wechselstrom-Triebfahrzeuge“, „Erregerstromrichter für Synchronmaschinen“ und „Gleichrichter für elektrolytische Metallabtragung“¹⁷⁹) wurden vorgeführt. Der Thyristor wurde in der Presse gefeiert und ersetzte bald die bis dahin für gesteuerte Gleichrichtung eingesetzten „Quecksilberdampf-Gleichrichter“, deren Produktion 1969 eingestellt wurde. Bis dahin hatte sich aber nach *Siemens-Eigeneinschätzung* die Thyristorentwicklung kommerziell noch nicht rentiert.¹⁸⁰

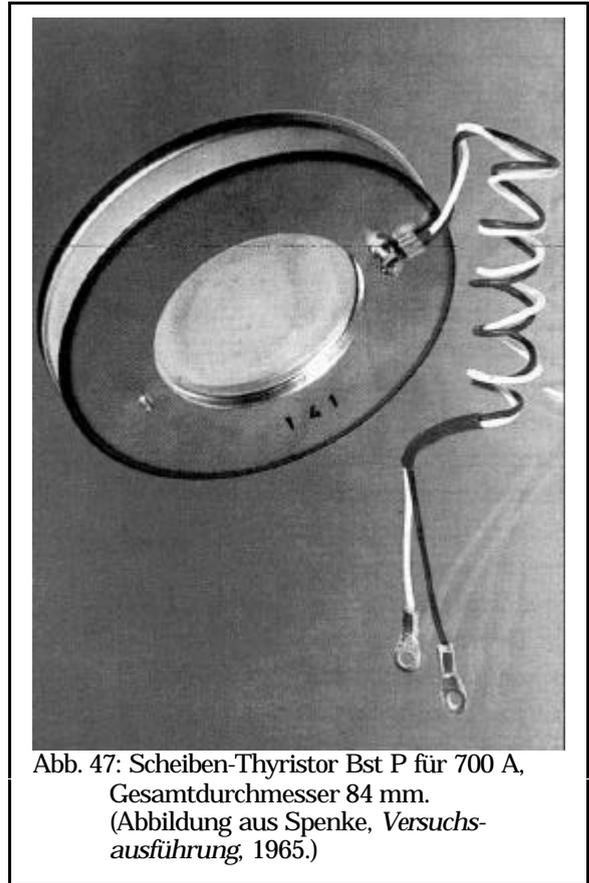


Abb. 47: Scheiben-Thyristor Bst P für 700 A, Gesamtdurchmesser 84 mm. (Abbildung aus Spenke, *Versuchsausführung*, 1965.)

¹⁷⁷ „Thyristoren (Stromtore)“, SAA 68 / Li 385 A; Tschermak, *Leistungshalbleiterelemente*, 1976, ESD(a) 017, S. 10-15.

¹⁷⁸ Spenke, *Versuchsausführung*, 1965; Herlet/Hoffmann, *Flächengröße*, 1965; Siemens-Museum, *Leistungen des Hauses*, 1986, Kap. 343, S. 4-6.

¹⁷⁹ Tschermak, *Leistungshalbleiterelemente*, 1976, ESD(a) 017, S. 14.

¹⁸⁰ „Hannover Messe 1965“, SAA 68 / Li 385 A; Tschermak, *Leistungshalbleiterelemente*, 1976, ESD(a) 017, S. 14.

Exkurs: Funktionsweise und Realisierung des Thyristors¹⁸¹

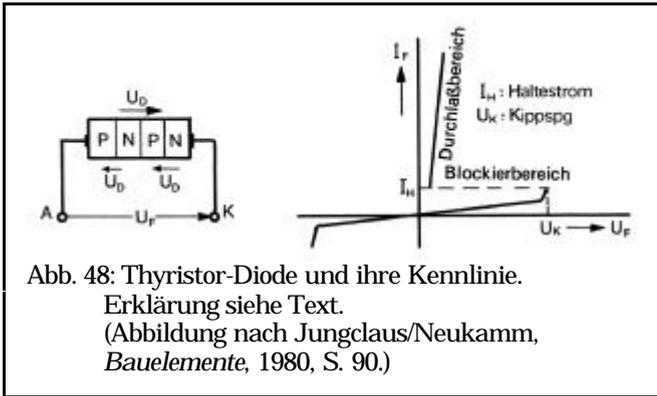


Abb. 48: Thyristor-Diode und ihre Kennlinie.
Erklärung siehe Text.
(Abbildung nach Jungclaus/Neukamm, *Bauelemente*, 1980, S. 90.)

Ungesteuert ergeben sich die Verhältnisse bei der Thyristor-Diode wie folgt: Bei Durchlaßpolung wird die Anode A positiv gegen die Kathode K gepolt. Die beiden äußeren pn-Übergänge sind dadurch in Flußrichtung geschaltet, der innere in Sperrichtung. Die äußere Spannung fällt dadurch nahezu vollständig am inneren pn-Übergang ab. Die Diode ist solange blockiert, bis die angelegte Spannung einen kritischen

Wert („Kippspannung“ U_K) übersteigt, an dem der innere pn-Übergang durchbricht. Der Strom steigt an und überschwemmt den mittleren pn-Übergang mit Ladungsträgern (Löchern aus dem äußeren p-Gebiet und Elektronen aus dem äußeren n-Gebiet), die Spannung fällt ab, die Diode schaltet durch und bleibt solange leitend, bis der Strom den sogenannten Haltestrom I_H unterschreitet, und fällt erst dann in den blockierenden Zustand zurück (siehe Abb. 48).

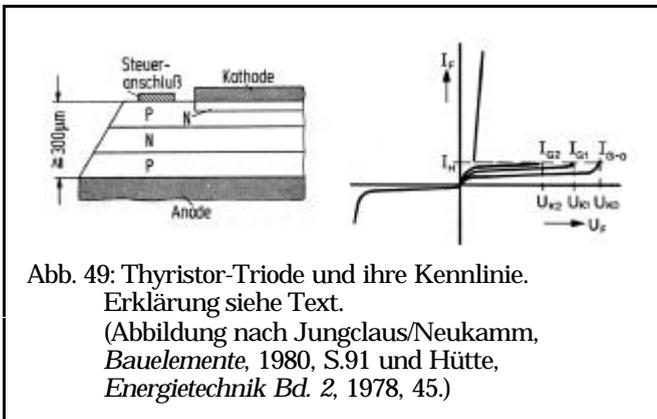


Abb. 49: Thyristor-Triode und ihre Kennlinie.
Erklärung siehe Text.
(Abbildung nach Jungclaus/Neukamm, *Bauelemente*, 1980, S.91 und Hütte, *Energietechnik Bd. 2*, 1978, 45.)

Um die Kippspannung zu steuern und das Schalten zu erleichtern, kann man eine dritte Elektrode als Steueranschluß am inneren pn-Übergang anbringen. Die so entstandene Thyristor-Triode wird im deutschen Sprachgebrauch üblicherweise als Thyristor bezeichnet (siehe Abb. 49). Über diesen Steueranschluß („Gate“) können dem inneren pn-Übergang zusätzliche Ladungsträger zugeführt werden. Ein kleiner Steuerstrom führt dabei zu großen

Veränderungen in der Kennlinie und so zu einer Verringerung der Kippspannung (siehe Abb. 49, rechts). Durch den Steuerstrom kann also der Thyristor „gezündet“ oder „durchgeschaltet“ also geöffnet werden. Ausschalten läßt er sich allerdings nicht über das „Gate“. Auch der Thyristor geht erst wieder in den blockierenden Zustand über, wenn der Haltestrom I_H unterschritten wird.¹⁸²

¹⁸¹ Siehe Heumann/Stumpe, *Thyristoren*, 1974, S. 1-57; Jungclaus/Neukamm, *Bauelemente*, 1980, S. 89-91; Böning, *Energietechnik Bd. 2*, 1978, 44-46.

¹⁸² Eine Weiterentwicklung des normalen Thyristors stellt der Zweiwegthyristor oder TRIAC (triode alternating current switch) dar. Mit ihm lassen sich Ströme in beide Richtungen schalten. Ein TRIAC ist eine Antiparallelschaltung von zwei Thyristoren mit einem gemeinsamen Steueranschluß (siehe Jungclaus/Neukamm, *Bauelemente*, 1980, S. 90).

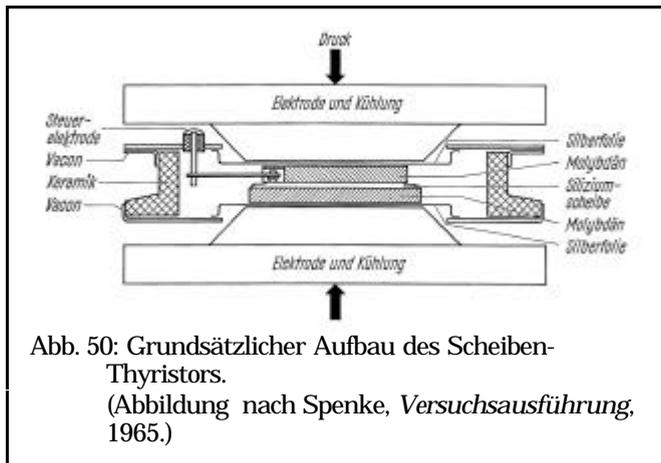


Abb. 50: Grundsätzlicher Aufbau des Scheibenthyristors.
(Abbildung nach Spenke, *Versuchsausführung*, 1965.)

Technisch realisiert wurde der erfolgreiche Scheibenthyristor der Firma Siemens von 1965 wie aus der Schemazeichnung ersichtlich (siehe Abb. 50). Im Inneren befindet sich, nur durch Druckkontakte arretiert, die etwa 0,3 mm dicke Siliziumscheibe in der die Vierschichtstruktur eindiffundiert ist. Über Molybdänplatten und Silberfolien werden die Elektroden, die gleichzeitig Kühlkörper sind, nach beiden Seiten kontaktiert. Der Anschluß für die Steuer-elektrode wird isoliert ausgeführt.

Ein Keramikring mit angelöteten Vaconteilen (Ni-Fe-Legierung) schließt die Konstruktion nach außen ab.

Pretzfeld: ein kleines, flexibles und unabhängiges Labor

Die beschriebenen technischen Entwicklungen wurden unter unsicheren äußeren Bedingungen durchgeführt, da das Pretzfelder Laboratorium 1946 als Provisorium gegründet worden war und dies mit Einschränkungen auch stets geblieben war. Zwar wurde im Sommer 1952 durch die Umorientierung auf Germanium die Unabhängigkeit gegenüber dem Erlanger Forschungslaboratorium gewahrt und die Möglichkeit diskutiert, die „Dienststelle Pretzfeld“ zu einem richtigen Halbleiterlaboratorium mit 10 Akademikern und einem Reinraum auszubauen.¹⁸³ Doch schon gegen Ende 1953 stand wieder eine Verlagerung diesmal „nach Nürnberg in einen grossen Laborneubau“ an. Spenke war „über diesen Beschluß eines hohen Vorstandes alles andere als glücklich.“ Daher schrieb Spenke an Klemperer und bat um dessen Unterstützung:

„Das Allerschlimmste in diesem Zusammenhang erscheint uns folgender Umstand: von allen Seiten wurde uns bisher bestätigt, daß Pretzfeld für Siemensverhältnisse ein ungewöhnliches Arbeitstempo hat. Das beruht gerade auf der Kleinheit von Pretzfeld, wodurch die bürokratische Schwerfälligkeit im Verkehr zwischen dem Physiker und der Werkstatt vermieden werden kann. Wir sehen durch mannigfache Vergleiche mit unseren Kollegen in Berlin, München und Karlsruhe, welch ein entscheidender Vorteil das ist und nun droht uns in Nürnberg das Schreckgespenst der Zentralwerkstatt, in die der Weg nur über ein zentrales Konstruktionsbüro führt, womit dann die üblichen Siemenstermine gesichert sein dürften.... Im erbitterten Kampf, den ich gegen diese Regelung führe, brauche ich Munition. Mir wird von hiesigen Amerikafahrern versichert, daß zum Beispiel bei Bell jede Laborgruppe (ca. 30 Mann) eine eigene Laborwerkstatt zur großen Zentralwerkstatt habe. ... Könnten Sie mir bitte einmal schreiben, ob sich diese Erkenntnisse von der Nützlichkeit der Dezentralisierung der Werkstätten in Forschungsinstituten nicht auch noch bei anderen amerikanischen Firmen durchgesetzt hat, ... Eventuell gibt es auch ein Buch über die Organisation von Forschungsinstituten, in dem etwas einschlägiges gesagt wird. Ich wäre Ihnen für eine Unterstützung in dieser Frage sehr dankbar, muß Sie aber natürlich bitten, diese Angelegenheit vertraulich zwischen uns beiden zu behandeln insbesondere bei einem Besuch im nächsten Jahr, ...“¹⁸⁴

Spenke wollte an den kurzen Dienstwegen von Pretzfeld festhalten und seinem Labor die bisherige Flexibilität erhalten. Zu diesem Zweck hoffte er, die Ratschläge von Dr. Hans Klemperer als externem Experten mit USA-Erfahrung für sich in die Diskussion bringen zu können. Die USA waren Mitte der 1950er Jahre das Vorbild in der

¹⁸³ Spenke an Direktor Dr. A. Siemens, 3. Juli 1952, ESD(a) 003.

¹⁸⁴ Spenke an Klemperer, 17. Dez. 1953, ESD(a) 047.

Halbleiterentwicklung und daher war zu erwarten, daß Klemperers Urteil intern bei *Siemens* Gehör finden würde. Doch Klemperer ließ sich nicht so leicht für Spenkes Interessen einspannen und äußerte sich in einem ersten Brief dahingehend, daß er den Umzug in ein größeres Labor mit zentraler Werkstatt für unumgänglich und eine laboreigene Werkstatt für Luxus hielt. Ausnahmen von der Struktur des Zentrallabors waren nur bei „Musterbetrieben“ wie den Bell Laboratorien zu finden, die „im Gelde schwimmen“. ¹⁸⁵

Spenke wollte sich mit einem Umzug und einer Zentralwerkstatt aber nicht abfinden und fragte bei Klemperer nach, ob er nicht „inhaltlich das Gleiche“ umformuliert noch einmal schreiben könne, und schlug daher folgende Formulierung vor:

„Zu Ihren Erkundigungen bezüglich der Frage Zentralwerkstatt oder laboreigene Werkstatt kann ich Ihnen mitteilen, daß man in dem Musterbetrieb der Bell Labs die teure und langsame Zentralwerkstatt vermieden hat.“ ¹⁸⁶

Klemperer formulierte schließlich salomonisch:

„Ich habe gefunden, dass sich kleinere und ihren Mitteln begrenzte Organisationen immer mit einer langsam und umstaendlich arbeitenden Zentralwerkstatt fuer alle Laboratorien abfinden muessen. Wenn finanziell moeglich und falls gute individuelle Leitung vorhanden, verbuergt eine dem einzelnen Labor angegliederte Spezialwerkstatt schnelleren Fortschritt und moeglicherweise Ersparnis im Ganzen. In den Bell Laboratories in Murray Hill findet man eine ganze Anzahl solcher laboreigener Spezialwerkstaetten unter sachkundiger Leitung.“ ¹⁸⁷

Obwohl Spenkes Versuch, den Sachverständigen Klemperer für seine Zwecke, nämlich vordergründig den Erhalt der laboreigenen Werkstatt und hintergründig den Erhalt des unabhängigen Labors in Pretzfeld, einzuspannen, nur teilweise geglückt war, blieb das Labor Pretzfeld in der bisherigen Organisationsform mit wechselnden Arbeitsschwerpunkten noch viele Jahre erhalten. ¹⁸⁸ Bis 1965 hatte sich beispielsweise die Laborfläche verzwanzigfacht und die Belegschaft wuchs in etwa gleichem Maße. ¹⁸⁹ Spenke hatte sich durchgesetzt und seine Unabhängigkeit gewahrt.

Als ein weiterer möglicher Grund für die Fortführung von Pretzfeld als unabhängigem Labor kann auch die frühe, erfolgreiche und international konkurrenzfähige Konzentration auf den Werkstoff Silizium angesehen werden. Dies brachte dem Gesamtkonzern im Zeitraum von 1957/58 bis 1965 immerhin 16,3 Mio. Mark an Lizeinnehmungen ein, während mit III-V-Verbindungshalbleitern zu dieser Zeit noch kein Geld zu verdienen war. ¹⁹⁰

Trotz dieser beachtlichen Erfolge beim Aufbau des Pretzfelder Laboratoriums war Spenke mit seiner Tätigkeit als Laborleiter nicht immer zufrieden. Da er sich zur Grundlagenforschung berufen sah, war er frustriert darüber, daß er wegen seiner organisatorischen Tätigkeiten für eigene Forschungen kaum noch Zeit zur Verfügung hatte. Walter Schottky hatte bereits 1950 über Spenke geschrieben, daß er

„sich als Laborleiter mit x Physikern, Ingenieuren, Mechanikern, Laborantinnen und einem Professor rumschlägt und diese Karre in Ordnung zu halten versucht, dabei aber als einziges wirkliches Vergnügen die wenigen Vormittagsstunden

¹⁸⁵ Klemperer an Spenke, 4. Jan. 1954, ESD(a) 047.

¹⁸⁶ Spenke an Klemperer, 12. Jan. 1954, ESD(a) 047.

¹⁸⁷ Klemperer an Spenke, 23. Jan. 1954, ESD(a) 047.

¹⁸⁸ Ob die Stellungnahme Klemperes jemals tatsächlich zur Begründung herangezogen worden ist, bleibt nach der Aktenlage unklar. Anfang 1954 wurde der Umzug des Pretzfelder Labors ohne Einflußnahme Klemperers für zunächst ein Jahr vertagt (Klemperer an Spenke, 4. Jan. 1954 und Spenke an Klemperer, 12. Jan. 1954, ESD(a) 047). Danach war von einem Umzug keine Rede mehr.

¹⁸⁹ „Arbeitsthemen und Personalstärken“, SAA 68 / Li 385 A.

¹⁹⁰ „Gesamtlizenzaufkommen aus Siliziumverträgen“, SAA 68 / Li 385 A.

betrachtet, in denen er mal 2. oder 3. Annäherungsrechnungen zur Gleichrichtertheorie durchrechnen kann!“¹⁹¹

Spenske wollte aber seine eigenen Forschungen auch dann nicht aufgeben, als das Labor immer größer wurde und seine organisatorischen Aufgaben weiter zunahmen. Zum Beispiel verzichtete er, um sich seinen Forschungen zu widmen, im Sommer 1955 auf einen kurzen Aufenthalt in den USA.

„I was sorry that I could not come with my colleagues to USA. But here in Pretzfeld I am the manager, and I try sometimes, in spite of this fact, to work as a physicist. For this happiness I have to pay with denying myself a trip to the USA.“¹⁹²

Im Herbst 1956 mußte Spenske sogar eine Einladung als Gastwissenschaftler zum Siemens-Partner *Westinghouse* und als Gastprofessor am Carnegie Institute of Technology (Pittsburgh) in die USA ablehnen, da *Siemens* ihn nicht für ein Semester freistellte. Von beiden Institutionen lagen formelle Einladungen vor.

„But for going in medias res: I get no leave of absence of Siemens. Leave of absence is unusual in Germany, even for lectures at a university or institute of technology, and therefore Dr. Knott, who, besides other tasks, is Vicepresident in charge of research, fears to establish a precedent. I believe this is a principle and will therefore stay also in future.“¹⁹³

Innerhalb seines eigenen Labors kam Spenske aber kaum zur wissenschaftlichen Arbeit und hoffte daher immer wieder, einen kürzeren oder längeren Auslandsaufenthalt einschieben zu können. Die Grundfrage diesbezüglich lautete aber stets „How much time will Siemens leave to me [?]“.¹⁹⁴

Spenkes Probleme, genügend Zeit für seine eigenen Forschungen zu bekommen, haben auch eine andere Seite. Er war für die *Siemens-Schuckertwerke* nicht als Wissenschaftler, sondern als Leiter des Laboratoriums in Pretzfeld in der Rolle eines Forschungsmanagers ausgesprochen wichtig und unabkömmlich. Auf seine Initiative war das Pretzfelder Labor gegründet worden und hatte sich als unabhängige Einrichtung erhalten. Die Grenzen der Selentechnologie waren frühzeitig erkannt und Forschungen an Ersatzmaterialien aufgenommen worden. In der räumlichen und personellen Beschränkung des Labors hatte sich Spenske dafür entschieden, das aussichtsreichere aber schwieriger zu handhabende Material Silizium intensiver zu untersuchen. Die dabei erzielten Ergebnisse hatten *Siemens* Geld, Anerkennung und eine führende Stellung bei der Herstellung von Reinstsilizium in der zweiten Hälfte der 1950er Jahre eingebracht. Darüber hinaus hatte er es verstanden, in Pretzfeld nicht nur reine Materialforschung zu etablieren, sondern auch bei konkreten Produktentwicklungen mitzuwirken.

So hat Spenske trotz möglicherweise eingeschränkter wissenschaftlicher Freiheiten und ohne im eigentlichen Sinn bedeutendere kreative wissenschaftliche Leistungen erbracht zu haben, von den 1940er bis in die 1960er Jahre wichtige Entwicklungen in der Halbleiterphysik und -technik angestoßen.

Süddeutsche Apparate-Fabrik (SAF) in Nürnberg

Auch bei der *Süddeutschen Apparate-Fabrik* (SAF) in Nürnberg wurde man sich Ende der 1940er Jahre der zukünftigen Bedeutung der neuen Halbleiter Germanium und

¹⁹¹ Schottky an Gans, undatiert, vermutlich Frühjahr 1950, zitiert nach Swinne, *Richard Gans*, 1992, S. 149.

¹⁹² Spenske an Brattain, 26. Juli 1955, ESD(a) 048.

¹⁹³ Spenske an Fox (Head, Department of Physics, Carnegie Institute of Technology), 11. Dez. 1956, ESD(a) 050.

¹⁹⁴ Spenske an Angello (*Westinghouse*, USA), 24. Okt. 1956, ESD(a) 050.

Silizium bewußt.¹⁹⁵ Bis zu diesem Zeitpunkt waren bei der SAF lediglich Leistungs-gleichrichter auf Selenbasis - allerdings mit großem Erfolg - hergestellt worden.¹⁹⁶ Um auch auf dem Bereich der neuen Halbleiterwerkstoffe tätig werden zu können, enga-gierte die SAF Ende 1948 Karl Seiler als Laborleiter des neu eingerichteten „For-schungs- und Entwicklungslabors für Halbleiter und Transistoren“.¹⁹⁷

Mit Seilers Hilfe gelang es bald, kommerziell verwertbare Produkte herzustellen, denn auch Seiler konzentrierte seine Entwicklungsarbeit zu dieser Zeit hauptsächlich auf Germanium, weil dies leichter zu beherrschen war. So konnte die SAF schon 1949 geschweißte Germanium-Punktkontaktdioden in Serie herstellen. „Der Spitzenkon-takt einer Pt-Ir [Platin-Iridium] Nadel wurde durch einen kurzen Stromstoß mit dem Germaniumplättchen leicht verschweisst. SAF war damals die erste Firma in Deutschland, die solche Dioden in größerer Stückzahl fabrizierte.“¹⁹⁸ Aufbauend auf dieser Technik brachte Ende 1952 „die SAF als erstes der großen deutschen Unter-nehmen einen Transistor auf den Markt“.¹⁹⁹ Der Germanium-Punktkontakt Transi-stor VS 200 der SAF war der erste in Deutschland in Serie hergestellte Transistor und ab Anfang 1953 „in jedem technischen Büro der SAF für 15 DM je Stück“ erhältlich.²⁰⁰ Andere deutsche Hersteller folgten im Laufe des Jahres mit eigenen Produkten.²⁰¹

Zum Aufbau einer Serienfertigung waren nicht unbeträchtliche Kapitalmittel not-wendig, so daß in Deutschland kritisch beobachtet wurde, daß „vor kurzem vier große und gewiß nicht notleidende amerikanische Unternehmen Staatsgelder in Höhe von je 1 bis 1,5 Millionen Dollar allein zur Verbesserung der Fabrikationseinrichtungen für Transistoren erhielten.“²⁰² Und auch in den folgenden Jahren flossen viele Millionen Dollar an Fördermitteln aus dem amerikanischen Rüstungsetat in den Ausbau von Produktionskapazitäten der Halbleiterindustrie in den USA. Eine vielleicht noch wichtigere Rolle spielte das amerikanische Militär als sicherer Abnehmer der zu-nächst sehr teuren Halbleiterprodukte und fungierte so als „Geburtshelfer“ einer neuen Industrie.²⁰³

In Deutschland hatte das Militär verständlicherweise zu Beginn der 1950er Jahre keinen Einfluß, aber dennoch bildete sich langsam eine Halbleiterindustrie heraus. Da auch in der Serienproduktion die Spitzen beim Germanium-Punktkontakt-Transisto-ren per Hand unter dem Mikroskop eingerichtet werden mußten, eignete sich diese Herstellungsweise nicht für eine zuverlässige und preisgünstige Massenproduktion

¹⁹⁵ Wenig später interessierte man sich auch für die III-V-Halbleiter zumindest weit genug, um gegen Welkers grundlegendes Patent einen Einspruch zu formulieren. (Trendelenburg, Vortrag auf der wissenschaftlichen Tagung des FL - 5. April 1955, SAA 35-46 / Lc 375).

¹⁹⁶ In den Berichten der Alliierten über die wissenschaftlich-technischen Leistungen Deutschlands während des Krieges werden neben den Selengleichrichtern der AEG immer nur diejenigen der SAF genannt (siehe z.B. JIOA-Report 56 und Supplement, BIOS-Report 1751).

¹⁹⁷ Die Quellenlage zur *Süddeutschen Apparate-Fabrik* (SAF) ist leider äußerst schwierig. Die SAF ging 1929 aus einer 1875 von F. Heller gegründeten Telephonfabrik hervor, 1930 erwarb die zum ITT-Konzern gehörige *Standard Elektrizitäts-Gesellschaft* (SEG) alle Anteile der SAF. 1954 wurde die SAF mit *Mix & Genest* zur *Standard Elektrizitäts-Gesellschaft* (SEG) verschmolzen, und diese fusionierte 1958 mit der *C. Lorenz AG* zur *Standard Elektrik Lorenz AG* (SEL). 1987 wurde die SEL in die neugegründete *Alcatel* eingebunden, die seit 1992 als *Alcatel SEL AG* firmiert. Bedauerlicherweise sind bei der *Alcatel SEL AG* - wie auf Anfrage mitgeteilt wurde - „nur wenige Doku-mente über die Firmengeschichte“ vorhanden. Ein Firmenarchiv existiert nicht. An anderen Stellen hieß das Labor, das Seiler bei der SAF leitete, auch „Detektorlaboratorium“ oder „Labor für Kristalldioden“ (siehe Personalakte Seiler, Universitätsarchiv Stuttgart).

¹⁹⁸ Seiler an Teichmann, 10. Dez. 1982, Korrespondenz Teichmann, DM-Archiv.

¹⁹⁹ Mende, *Neuer deutscher Transistor*, 1953.

²⁰⁰ „Was kosten Transistoren?“, *Funkschau* 1953, Jg. 25, Heft 12, S. 211.

²⁰¹ Zum Beispiel *Intermetall* und *Siemens* (siehe dazu Fußnote 247 auf S. 196).

²⁰² Mende, *Neuer deutscher Transistor*, 1953.

²⁰³ Die Literatur zu den Hintergründen der Etablierung einer Halbleiterindustrie in den USA ist umfangreich. Siehe zu diesem Themenkomplex besonders Braun/Macdonald, *Revolution*, 1982, insb. S. 54-87; Eckert/Schubert, *Kristalle*, 1986, insb. S. 182-196; Forman, *Quantum Electronics*, 1987; Misa, *Military Needs*, 1985 und Molina, *Social Basis*, 1989.

von Transistoren konstanter Qualität. Die Herstellung von Germaniumdioden und -transistoren mit pn-Übergängen schien viel erfolgsversprechender. Daher wurde im Laboratorium der SAF schon seit Anfang der 1950er Jahre mit flächenhaften pn-Übergängen experimentiert, die durch Legierung oder mittels der Czochralski-Methode hergestellt worden waren.²⁰⁴

Bei der SAF entschied man sich wie auch in den meisten anderen Industriebetrieben trotz erfolgreicher Laborversuche mit der Czochralski-Methode für die Serienproduktion von Flächendioden und -transistoren nach dem Legierungsverfahren. Es schien der einfachere und sicherere Weg zur Herstellung von pn-Übergängen zu sein.²⁰⁵ Im April 1954 brachten die SAF den ersten „in Deutschland gezeigten Germanium-Flächengleichrichter“ unter der Bezeichnung DF 450 auf den Markt. Bei ihm wurde der pn-Übergang in Anlehnung an das Legierverfahren einfach durch Aufschweißen einer Indium-Elektrode auf n-leitendes Germanium hergestellt. Die dabei entstehenden Gleichrichter waren für den Leistungsbereich bei niedrigen Frequenzen gedacht und standen in direkter Konkurrenz zu Gleichrichterröhren und Selengleichrichtern. Im Vergleich zu diesen wiesen sie günstigere elektrische Eigenschaften auf und waren viel kleiner, jedoch mußten Einschränkungen des Temperaturbereiches in Kauf genommen werden. Germaniumgleichrichter waren nur bis ca. 60°C Betriebstemperatur brauchbar.²⁰⁶

Daß die Ursache dafür „grundsätzlich materialbedingt“²⁰⁷ war und „daß die starke Temperaturabhängigkeit der Sperrkennlinie der Germaniumflächengleichrichter ... ihre Verwendung als Leistungsgleichrichter ohne Fremdkühlung nicht zuläßt“²⁰⁸, war den SAF-Mitarbeitern von Anfang an völlig klar. Daher schaute sich Seiler nach anderen Materialien um und kam bald wieder auf das Silizium zurück.

²⁰⁴ Zur Czochralski-Methode siehe das Unterkapitel „Das Czochralski-Verfahren“ ab S. 196.

²⁰⁵ Zur Erläuterung des Legierverfahrens und den Vorteilen der legierten vor den gezogenen Flächentransistoren siehe das Unterkapitel „Legierte oder „gezogene“ Flächentransistoren?“ ab S. 200 oder Seiler, *Physik und Technik*, 1964, S. 84-87.

²⁰⁶ „Neuheiten auf der deutschen Industriemesse“, *Funkschau* 1954, Jg. 26, Heft 8, S. 154-155 (Zitate); Raithel/Spitzer, *SAF-Germanium-Flächengleichrichter*, 1954; Rost, *Kristallogentechnik. 2. Auflage*, 1956, S. 310.

²⁰⁷ Raithel/Spitzer, *SAF-Germanium-Flächengleichrichter*, 1954.

²⁰⁸ Seiler, *Schichtkristall*, 1953, S. 90.

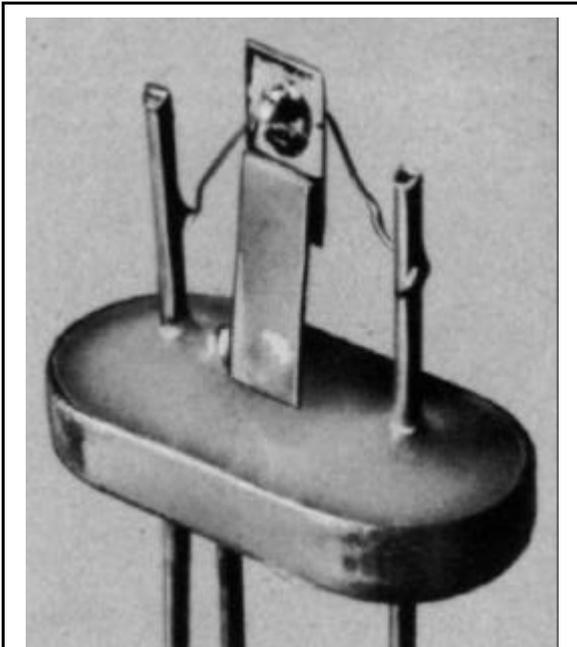


Abb. 51: Legierter Germanium-Flächentransistor der SAF ohne Kappe. (Abbildung aus *Funkschau* 1955, S. 227-228.)

Die SAF produzierte zwar weiterhin Germaniumdioden und bald auch legierte pnp-Germanium-Flächentransistoren (Serie OC 110 bis 130),²⁰⁹ doch für Seiler war der pn-Übergang im Germanium nur „ein Schulbeispiel für den Gleichrichter im allgemeinen“, und deshalb hatte er schon länger parallel zum Germanium auch Untersuchungen an Silizium und anderen Halbleitern bei der SAF und an der TH Stuttgart durchführen lassen.²¹⁰

Die Zusammenarbeit des SAF Labors mit der Experimentalabteilung des Instituts für Angewandte und Theoretische Physik der TH Stuttgart ging auf Seiler zurück, der 1948, bevor er zur SAF ging, für kurze Zeit Assistent an diesem Institut gewesen war. Seiler hatte 1948 die Experimentalabteilung für Halbleiterforschung an der TH Stuttgart ins Leben gerufen und „privatim mit den ersten experimentellen Hilfsmitteln ausgerüstet.“²¹¹ Später wurden die Arbeiten des Laboratoriums auch

wesentlich durch die *Süddeutsche Apparatefabrik* und Seilers persönliches Engagement bei der Betreuung von Abschlußarbeiten unterstützt. Darüber hinaus lehrte Seiler seit 1949 regelmäßig als Lehrbeauftragter über Themen der Halbleiterphysik, 1953 wurde er von der TH Stuttgart zum Honorarprofessor mit der Begründung ernannt, daß er „zu den besten Kennern der Halbleiter-Probleme [gehört], die es zurzeit in Deutschland gibt.“²¹² An diesem Laboratorium, das eines der ersten deutschen Hochschullaboratorien war, das sich ausschließlich der Erforschung der Elementhalbleiter widmete, wurden viele Diplomanden und Doktoranden ausgebildet, die bald führende Positionen in der deutschen Halbleiterindustrie einnahmen. Untersuchungsschwerpunkt waren nach Experimenten mit der Modellsubstanz Germanium in den ersten Jahren vor allem Untersuchungen von Silizium und Tellur.²¹³ Der Schwerpunkt lag dabei zunächst auf der Erforschung der physikalischen Eigenschaften dieser Materialien.²¹⁴

Experimente mit Silizium

Als Begründung für ihre Experimente mit Silizium erklärten Seiler und Hans Kleinknecht in einer ersten ausführlichen Veröffentlichung:

„Auch im Hinblick auf die technische Anwendung, war es erstrebenswert, Gleichrichter aus Silizium herzustellen, da Germanium bei erhöhter Betriebstemperatur eigenleitend wird und seine Gleichrichter- und Transistoreigenschaften verliert (z.B. für 10 Ω cm-Germanium bei 85 °C), während das für Silizium

²⁰⁹ *Funkschau* 1955, Jg. 27, Heft 9, S. 163 und 227-228; Rost, *Kristallogentechnik*. 2. Auflage, 1956, S. 338-341.

²¹⁰ Seiler, *Schichtkristall*, 1953, S. 87; siehe auch Seiler, *Halbleiter*, 1953.

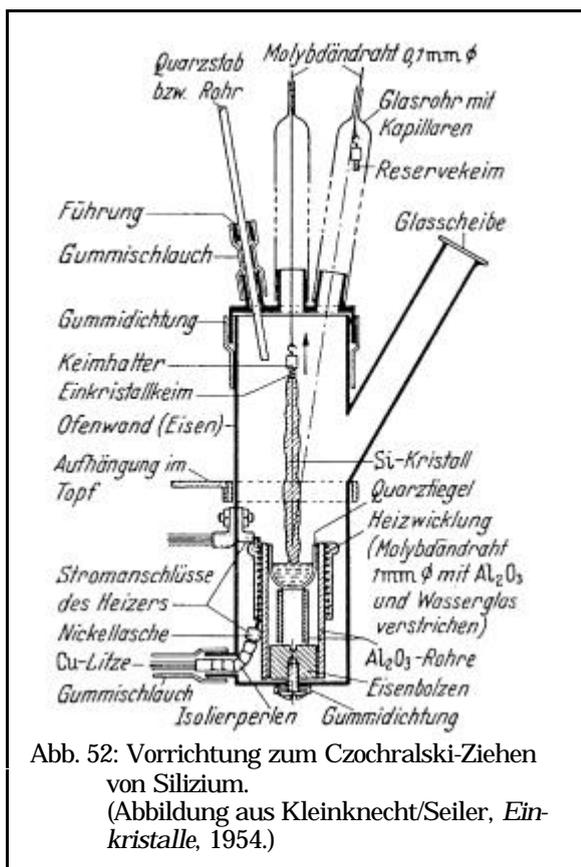
²¹¹ Dehlinger/Fues, *Institut*, 1954, S. 41.

²¹² Siehe die Personalakte von Karl Seiler, Universitätsarchiv Stuttgart, Zitat aus einem Gutachten.

²¹³ Dehlinger/Fues, *Institut*, 1954; Sautter, *Seiler zum Gedenken*, 1992.

²¹⁴ Ein Einblick in die dortigen Forschungen läßt sich über die Arbeiten von Seilers Schülern aus der ersten Zeit gewinnen. Siehe dazu zum Beispiel Kleinknecht, *Silizium-Einkristalle*, 1952; Kleinknecht/Seiler, *Einkristalle*, 1954; Müller, *Siliziumreinigung*, 1954; Weidel, *Tellur-Einkristalle*, 1954; Bösenberg, *Diffusion*, 1955.

mit seinem größeren Bandabstand (1,12 eV gegenüber 0,75 eV) erst bei höheren Temperaturen eintritt (für 10 Ωcm -Silizium erst bei etwa 230 °C).²¹⁵



Diesen Vorteilen der größeren Bandlücke beim Silizium stand der Nachteil der im Vergleich zum Germanium sehr viel höheren Schmelztemperatur (960 °C im Vergleich zu 1414 °C) gegenüber. Wegen dieser hohen Schmelztemperatur stellte Silizium höhere Anforderungen als Germanium beim Herstellen von reinen Einkristallen, denn das flüssige Silizium hatte eine so „starke Aggressivität gegen fast alle Stoffe“, daß die Graphittiegel Verunreinigungen in die Schmelze abgaben und in „kürzester Zeit durchreagiert“ waren.²¹⁶ Seiler wußte seit seinen Kriegsforschungen von diesen Problemen, hielt aber Silizium aus verschiedenen Gründen für den technisch interessantesten Halbleiter und interessierte sich daher parallel zu den Anfang der 1950er Jahre aktuellen Germaniumarbeiten auch sehr für Verfahren zur Siliziumbearbeitung und -reinigung. Ende der 1940er Jahre war er unter den ersten, die Silizium für Flächengleichrichter einsetzen wollten, und konnte dies 1948 im Labormaßstab auch verwirklichen, als Eberhard Spenke und viele andere noch der

Ansicht waren, daß Silizium nur für Spitzendioden, aber nicht für Flächengleichrichter geeignet sei.²¹⁷ Spenke in Pretzfeld und viele andere haben ihre Meinung sehr bald geändert und auch Arbeiten auf dem Gebiet der Siliziumreinigung begonnen. So wurde in parallelen Arbeiten zwischen 1952 und 1954 das tiegelfreie Zonenziehverfahren für Silizium in Pretzfeld und München bei *Siemens*, in Nürnberg bei der SAF und in den USA entwickelt.²¹⁸

Unter Seilers Anleitung hatte seit 1952 Hans Kleinknecht an der TH Stuttgart erste „Silizium-Einkristalle von etwa 10 cm Länge und einigen Millimetern Dicke“ nach dem Czochralski-Verfahren hergestellt. Dabei zeigte sich, daß auch bei Silizium „wie bei Germanium die meisten Fremdstoffe bevorzugt in der Schmelze bleiben“. Daher eignete sich das Czochralski-Verfahren auch als erstes grobes Silizium-Reinigungsverfahren.²¹⁹ Ähnliches war vorher auch schon bei Germanium festgestellt worden.²²⁰

²¹⁵ Kleinknecht/Seiler, *Einkristalle*, 1954, S. 599-600.

²¹⁶ Ebenda.

²¹⁷ Spenke, „Zur Frage eines Silizium-Flächengleichrichters“, Atenvermerk, 7. Oktober 1950, WSD 039; Seiler an Teichmann, 10. Dez. 1982, Korrespondenz Teichmann, DM-Archiv; Seiler-Interview 1982.

²¹⁸ Zum tiegelfreien Zonenziehverfahren für Silizium siehe das Kapitel „Tiegelfreies Zonenziehverfahren“ ab S. 173.

²¹⁹ Kleinknecht, *Silizium-Einkristalle*, 1952; Kleinknecht/Seiler, *Einkristalle*, 1952.

²²⁰ Dürr/Jaumann/Seiler, *Löslichkeit und Ionisierbarkeit*, 1951.

Bei den wissenschaftlichen Experimenten zur Löslichkeit von Fremdstoffen im Germanium an der TH Stuttgart wurden die Germaniumeinkristalle aber nicht mit dem Czochralski-Verfahren hergestellt, sondern man ließ sie wegen der besseren quantitativen Kontrolle in einem abgeschlossenen Quarzgefäß langsam von unten nach oben erstarren. Siehe dazu die ausführliche Darstellung Dürr/Jaumann/Seiler, *Löslichkeit und Ionisierbarkeit*, 1953, S. 41-43. Im SAF-Labor wurden aber in ähnlich ausgerichteten Versuchen die Germaniumkristalle nach dem Czochralski-Verfahren hergestellt (Bösenberg, *Diffusion*, 1955).

Für diese Versuche wurde noch relativ unreines Silizium als Ausgangsmaterial benutzt, so daß die durch den Quarzkristall abgegebenen Verunreinigungen wenig ausmachten. Erst mit dem von Siegfried Müller bei der SAF verbesserten tiegelfreien Zonenschmelzverfahren wurden die entstandenen Siliziumkristalle später weiter gereinigt.²²¹

Mit ihrer Vorrichtung zum Czochralski-Ziehen stellten Kleinknecht und Seiler zwar auch erfolgreich pn-Übergänge in Silizium her, doch die Überführung dieser Laborergebnisse in marktfähige Produkte auf Siliziumbasis gelang bei der SAF offenbar nicht.²²²

In Übersichten über die Produktpalette der deutschen Halbleiterindustrie finden sich 1956 neben Germaniumprodukten lediglich Silizium-Punktkontakt-Dioden der SAF. Bauelemente mit flächenhaften pn-Übergängen im Silizium tauchen nicht auf.²²³ Das mag mit den organisatorischen Veränderungen bei der SAF in Zusammenhang gestanden haben, die 1954 mit der auf die Herstellung von Telephonapparaten spezialisierten *Mix & Genest* zur *Standard Elektrizitäts-Gesellschaft* (SEG) verschmolzen wurde, welche wiederum 1958 mit der *C. Lorenz AG* zur *Standard Elektrik Lorenz AG* (SEL) fusionierte.²²⁴

Möglicherweise wirkte sich auch Seilers Weggang negativ auf die Innovationsfähigkeit der SAF aus. Anfang 1956 war Karl Seiler von der amerikanischen *Clevite Corporation* abgeworben worden, die gerade die Firma *Intermetall* gekauft hatte, und einen neuen Geschäftsführer suchte. Seiler erinnert sich:

„Ja da kam eines schönen Tages so ein Herr, der war von der Clevite, der war hier in Deutschland auf Rundreise, ... [er] hatte fünf Namen auf seiner Liste und dachte ich wäre der richtige Mann aus *Intermetall* wieder was zu machen, die waren praktisch pleite, ...“²²⁵

Seiler akzeptierte das Angebot und ging im März 1956 als alleiniger Geschäftsführer nach Düsseldorf, um die 1952 von Herbert Mataré gegründete und zwischenzeitlich in finanzielle und organisatorische Schwierigkeiten gekommenen *Intermetall* wieder aufzubauen.

Intermetall

Die stabilisierte wirtschaftliche Lage in der Bundesrepublik Deutschland erlaubte es Anfang der 1950er Jahre, auch technologieorientierte Unternehmen zu gründen, die sich auf die Herstellung von Halbleiterbauteilen spezialisierten. Zu den wenigen, die sich am Markt durchsetzen konnten, gehört die heute in Freiburg im Breisgau ansässige Firma *Intermetall*.²²⁶ Sie wurde als „Intermetall - Gesellschaft für Metallurgie“

²²¹ Müller, *Siliciumreinigung*, 1954.

Müller erhitzte im Gegensatz zu Rainer Emeis in Pretzfeld schon 1954 das Silizium induktiv in einem Hochfrequenzfeld. Das hatte den Vorteil, daß Verunreinigungen durch den Heizstrahler vermieden wurden und so Siliziumeinkristalle großer Qualität und Reinheit entstanden. Die nach mehreren Durchgängen des Zonenziehens immer noch im Silizium verbleibende Verunreinigungen mit dem Element Bor konnten aber auch von Müller nicht beseitigt werden. Zu diesem Problem siehe das Kapitel „Tiegelfreies Zonenziehverfahren“ ab S. 173.

²²² Kleinknecht/Seiler, *Einkristalle*, 1954.

²²³ Rost, *Kristallogentechnik*. 2. Auflage, 1956, Rost, *Kristallogentechnik*. 1. *Ergänzungslieferung*, 1956. 1960 taucht in entsprechenden Zusammenstellungen die SAF als Lieferant überhaupt nicht mehr auf (Rost, *Kristallogentechnik*. 2. *Ergänzungsband*, 1960).

²²⁴ Konkrete Unterlagen darüber liegen aber nicht vor. Ein Firmenarchiv existiert nicht. Zur Geschichte von *Mix & Genest* siehe *Mix & Genest, 75 Jahre*, 1954.

²²⁵ Seiler-Interview 1982.

²²⁶ Andere Firmen waren beispielsweise die von Wolfgang Büll in Planegg bei München gegründete *Proton*, die Anfang der 1950er Jahre zu den wenigen deutschen Lieferanten von Kristalldioden gehörte. *Proton* bot bereits 1950 Germaniumdioden für Hochfrequenzanwendungen (bis 50 000

1952 in Düsseldorf mit zunächst 14 Mitarbeitern gegründet.²²⁷ „Der Zweck der Gesellschaft ist die Forschung sowie die Herstellung und der Vertrieb von Erzeugnissen auf dem Gebiet der Metallurgie sowie auf verwandten Gebieten.“²²⁸ Der Name „Intermetall“ leitete sich aus den erwarteten großen technischen Möglichkeiten der neuen Verbindungshalbleiter ab, die Anfang der 1950er Jahre auch als „intermetallische Verbindungen“ bekannt wurden. Bei *Intermetall* wurde dementsprechend anfangs viel in die Technik der neuen Verbindungshalbleiter investiert.

Gründung von *Intermetall* in Düsseldorf

Herbert Mataré war 1951 in Paris mit dem Anwalt Reschowsky in Kontakt gekommen, der im Auftrag von Jakob Michael jemanden suchte, um in Deutschland eine Halbleiterfabrikation aufzubauen. Jakob Michael, ein deutscher Jude, hatte vor dem Krieg die Kaufhauskette „Deutsches Familien-Kaufhaus“ (DEFKA) besessen und danach wieder zurückerhalten. Anfang der 1950er Jahre suchte er eine Möglichkeit, sein Vermögen in die USA zu transferieren. Da die Deutsche Mark noch nicht frei konvertierbar war, konnte er es nicht direkt in die USA überweisen. So kam die Idee auf, in Deutschland Transistoren zu produzieren und diese dann in den USA zu verkaufen, um so das Geld in die USA zu transferieren.²²⁹

Herbert Mataré nahm das Angebot an, eine Firma zur Produktion von Dioden und Transistoren zu gründen, und kehrte Anfang 1952 nach Deutschland zurück. Beim Aufbau der Firma *Intermetall* wurde er auf technisch-wissenschaftlicher Seite durch den Elektroingenieur Robert Stasek, den Techniker und Ofenspezialisten Oskar Walter und beim Aufbau der Serienproduktion von Dioden durch den Techniker George Callon unterstützt. Mataré kannte alle drei, da sie bis dahin ebenfalls in unterschiedlichen Funktionen für die CFS *Westinghouse* in Paris gearbeitet hatten. Stasek hatte die CFS *Westinghouse* auf dem Bereich der Elektronik beraten, während er gleichzeitig für das französische Verteidigungsministerium an Radarfragen arbeitete. Walter war Matarés Mitarbeiter in Aulnay-sous-Bois gewesen und hatte dort die durch Hochfrequenz beheizten Öfen betreut. Callon war in Paris für die Serienproduktion der Germaniumdioden der CFS *Westinghouse* zuständig gewesen.²³⁰

Intermetall profitierte somit wesentlich von den Erfahrungen, die die CFS *Westinghouse* bis zum Anfang der 1950er Jahre auf dem Dioden- und Transistorgebiet gesammelt hatte. Dort waren zu dieser Zeit bereits Hochfrequenz-Germaniumdioden und die ersten europäischen Germanium-Punktkontakt-Transistoren in Serie produziert worden. Danach wurde aber die Halbleiterforschung- und -entwicklung, wie bereits erwähnt, in Frankreich in andere Bahnen gelenkt, so daß sich die dortigen Mitarbeiter nach anderen Möglichkeiten umsahen und auch nach Düsseldorf zum Aufbau einer neuen Firma kamen.²³¹

MHz) an und spezialisierte sich auf Kleinst-Kristalldioden. (Siehe dazu Inserate und Artikel von Wolfgang Büll in der *Funkschau 1950-1955* - teilweise im Literaturverzeichnis angegeben). Darüber hinaus war auch die Firma *Kristallogen*, die von Rudolf Rost in Hannover geleitet wurde, mit Halbleiterdioden und -transistoren bis in die 1960er Jahre auf dem Markt vertreten. *Kristallogen* bot ab 1951 „temperaturfeste Kristall-Dioden“ und schon 1952 Germanium-Transistoren „in begrenzter Zahl“ an. (Siehe dazu die Artikel und Bücher von Rudolf Rost, die im Literaturverzeichnis aufgeführt sind.)

²²⁷ „Die Geschichte von Intermetall“, IMC.

²²⁸ Eintrag in das Handelsregister Düsseldorf, 5. August 1952.

²²⁹ Mataré, Lebenslauf, Archiv des Deutschen Museums, München; siehe auch Mataré-Interview 1998.

²³⁰ Stasek, *Erinnerungen*, 1993, S. 1-2, IMC.

Wenig später kam noch Oskar Rösner dazu, der als Chemiker bei den Otavi-Minen Germanium gereinigt hatte und dies nun bei der *Intermetall* weiterführen sollte.

²³¹ Ebenda, S. 2-4, IMC; Mataré-Interview 1998.

Nachdem das Stammkapital zunächst auf 20.000 DM festgelegt worden war, konnte Mitte 1952 begonnen werden, eine Produktionsstätte für Germaniumdioden und ein Labor zur Forschung an III-V-Verbindungshalbleitern aufzubauen.²³² Diese Anfangsinvestitionen verschlangen zwar sehr viel Geld, doch die *DEFAKA* hatte einen größeren Betrag bereitgestellt.²³³ So wurde in einem alten Fabrikgebäude ein komfortables Labor, in dem ca. 10 Akademiker mit neuen Geräten an Weiterentwicklungen und an den III-V-Halbleitern arbeiteten, und eine Produktions- und Prüfstätte eingerichtet. Für Labor und Produktion mußten Vakuumpumpen, Schmelzöfen, Kristallziehapparaturen, Hochfrequenzgeräte und vieles mehr angeschafft werden. Die Meßgeräte für die Experimentiertische und die Prüfstände wurden in personal- und kostenintensiver Arbeit selbst gebaut, da es vieles nicht fertig zu kaufen gab.²³⁴

Im Oktober 1952 war als ein erstes Ziel formuliert worden, in den nächsten 6 bis 9 Monaten eine Produktion von 20000 Germaniumdioden monatlich zu etablieren. Dazu waren im März 1953 ca. 25 bis 30 neue Mitarbeiter für Entwicklung, Produktion und Qualitätskontrolle eingestellt worden. Tatsächlich wurde so das Ziel erreicht, und ab Sommer 1953 konnten ca. 20000 Germaniumdioden pro Monat produziert werden.²³⁵

Germaniumdioden

Die Hauptschwierigkeiten bei der Produktion von Germaniumdioden bestanden anfangs in der Reinigung des Germaniums. Nur sehr reines Germanium war für die Dioden und für die später zu produzierenden Transistoren brauchbar.

Das Ausgangsmaterial Germanium wurde zunächst zu Germaniumtetrachlorid chloriert, dann über einen mehrfachen Destillationsprozeß chemisch gereinigt und schließlich in Gefäßen aus reinem Quarz zu Germaniumdioxid hydrolisiert. Das sich ergebende weiße Pulver wurde daraufhin auf seine Reinheit getestet und, wenn es als chemisch rein anzusehen war, mit ebenfalls hochreinem Wasserstoff zu reinstem Germanium reduziert. Mit Hilfe des „Zonenschmelzverfahrens“ konnte es dann in einem Hochfrequenz-Ofen bis auf eine Reinheit von einem Fremdatom zu 10^8 Germaniumatomen gereinigt werden. Danach konnte es erst mit Fremdatomen dotiert und in vorgereinigten Formen bei einem Unterdruck von 10^{-5} bis 10^{-6} Torr auskristallisiert werden.

²³² Das Stammkapital setzte sich aus 19.000 DM von der Aktiengesellschaft für Anlagewerte in Düsseldorf und 1.000 DM von der Bollenhagen & Co., GmbH zusammen, so daß die Eröffnungsbilanz am 16. Mai 1952 20.000 DM betrug. (Siehe Gesellschaftsvertrag „Intermetall“ 1952 und Eröffnungsbilanz 1952, Aktenbestand Geschäftsführung Intermetall).

Die Aktiengesellschaft für Anlagewerte gehörte der *DEFAKA* und war eigens zu dem Zweck gegründet worden, die *Intermetall* zu finanzieren. Bollenhagen & Co war ein renommiertes Import-Export-Unternehmen, das auch zur *DEFAKA* gehörte.

²³³ Nach Erinnerungen eines Mitarbeiters aus der ersten Zeit soll es sich um einen „Betrag von 2 Millionen Mark für die Dauer von 2 Jahren“ gehandelt haben (Knabe-Interview 1992, S. 9).

²³⁴ Mataré-Interview 1998.

²³⁵ Stasek, *Erinnerungen*, 1993, S. 3-4, IMC; Knabe-Interview 1992, S. 8-9.

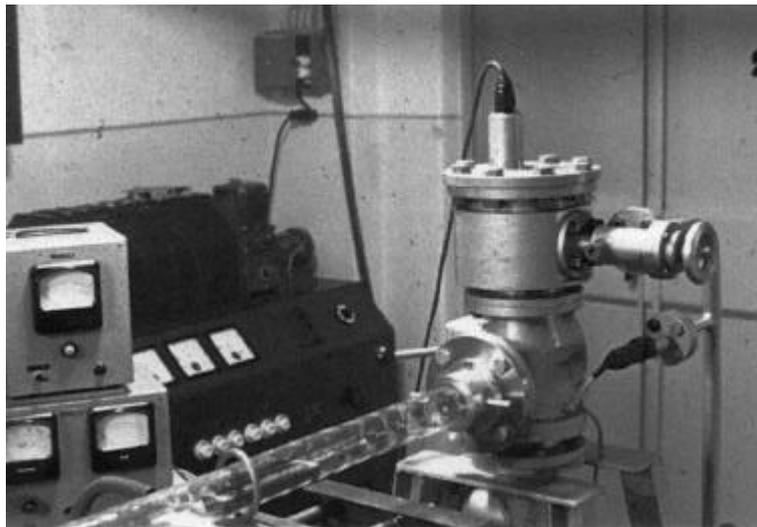


Abb. 53: Zonenschmelzen von Germanium bei *Intermetall* 1953. Man erkennt die Vakuumpumpe (rechts), die das Quarzrohr evakuiert, in dem sich ein mit Germanium gefüllter Graphittiegel befindet. Die Heizspule (links vorne) kann längs des Rohres bewegt werden und schmilzt so das Germanium zonenweise. (Abbildung: Mataré Privatbesitz.)

Das Zonenschmelzverfahren beruhte auf der Tatsache, daß sich bestimmte Verunreinigungen vorwiegend in der flüssigen Phase ansammeln. Setzt man einen langgezogenen Germaniumstab einem wandernden Hochfrequenzfeld aus, so schmilzt jeweils die Zone im Feld und trägt die Verunreinigungen mit sich fort. Im Gegensatz zum „Tiegelfreien Zonenschmelzverfahren“ (siehe S. 173) konnten bei Germanium wegen der Schmelztemperatur von nur um 960°C ohne große Schwierigkeiten Graphittiegel benutzt werden, die allerdings vorher gut gereinigt sein mußten (siehe Abb.

53). Sie und alle anderen Teile des Schmelzofens wurden daher in einem speziellen Ofen über 24 Stunden bei einer Temperatur von 2000°C und einem Unterdruck von 10^{-5} Torr gereinigt. Der Unterdruck wurde mit einer Öldiffusionspumpe ständig aufrechterhalten, so daß die Verunreinigungen mit den entstehenden Dämpfen kontinuierlich abgepumpt werden konnten.²³⁶



Abb. 54: Dioden-Prüffeld bei *Intermetall*, Düsseldorf 1953. (Abbildung aus „Neue Intermetall-Kristalloden“, *Funkschau* 1953, S. 351.)

Genügte der Germanium-Kristall den Anforderungen, wurde er mit einer automatischen Diamantsäge in kleine Germaniumplättchen geschnitten, deren Oberflächenstörungen weggeätzt wurden, bevor sie in Kupfer oder Nickel gefaßt wurden. Bei den anfänglich produzierten Dioden wurde der Spitzenkontakt durch eine elektrolytisch angespitzte Klaviersaite (Durchmesser 0,1 mm) realisiert, die unter

Einfluß von impulsartig hohen Spannungen (und teilweise bei hohen Strömen) auf den Kristall aufgesetzt wurde, „wobei man von einer Formierung oder künstlichen Alterung der Kontaktstelle sprechen kann.“²³⁷

²³⁶ Mende, *Intermetall-Germaniumdioden*, 1953, S. 310; Mataré, *Möglichkeiten und Probleme*, 1954, S. 264.

²³⁷ Ebenda.

Zu 'Formierprozessen' bemerkt Eberhard Spenke zeitgenössisch: „Das sind elektrische Überlastungen mit Fluß- oder Sperrstrom oder auch mit Wechselstrom. Trotz gewisser Ansätze handelt es sich hierbei wie auch bei den Oberflächenbehandlungen im Wesentlichen immer noch um kunstvolle Empirie; denn die Physik der Spitzenkontakte ist noch keineswegs geklärt.“ (Spenke, *Elektronische Halbleiter*, 1965, S. 114, Fußnote 1).

Die Kennlinien der so hergestellten Dioden wurden an den entsprechenden Meßtischen, dem sogenannten „Dioden-Prüffeld“, mit selbstentwickelten Kennlinienschreibern aufgenommen. 1953 waren bereits mindestens 15 solcher Diodenmeßtische bei *Intermetall* in Betrieb. Erst nach der Prüfung der elektrischen Eigenschaften wurden die Dioden mit einem wasserfesten Schutzlacküberzug von allen äußeren Einflüssen abgeschirmt. Nun konnten sie verpackt und verkauft werden. Die langwierige und hohe Genauigkeit erfordernde Arbeit der Montage, des Anbringens der Spitzenkontakte und der Prüfung wurde bei *Intermetall* wie auch bei anderen Halbleiterbauelemente-Herstellern (wie zum Beispiel *Philips*) hauptsächlich von weiblichen Arbeitskräften ausgeführt (Abb. 54).²³⁸



Abb. 55: *Intermetall*-Germaniumdioden 1953.
(Abbildung: Privatbesitz Mataré.)

Die so in Serie hergestellten Germanium-Spitzendioden wurden ab 1953 in Deutschland verkauft. Erste Presseberichte und Preistabellen gaben acht verschiedene Dioden der M-Serie an, die bei einer Betriebstemperatur von -20°C bis $+60^{\circ}\text{C}$ und Spitzenspannungen von 25 bis 160 Volt zufriedenstellend arbeiteten und zwischen 3.20 und 6 DM kosteten (Abb. 55).²³⁹ Zur Vermarktung dieser Dioden hatte der neue kaufmännische Leiter, Dr. Rolf Wiesinger, alle großen deutschen Rundfunkgerätehersteller angeschrieben, *Intermetall* als neues Halbleiter-Unternehmen vorgestellt, einen Besuch zur Demonstration der Dioden angekündigt und so versucht, die *Inter-*

metall-Produkte in Deutschland zu verkaufen.²⁴⁰

Hauptsächlich hatte man bei *Intermetall* allerdings den viel einträglicheren Markt des amerikanischen Militärs im Auge. Daher ließ man einige der produzierten Germaniumdioden von den *National Scientific Laboratories* in Washington testen. Diese kamen zwar zu dem Schluß, daß *Intermetall* exzellente Dioden produziere, die für den kommerziellen Markt gut geeignet seien, für „government equipment“ jedoch nicht in Frage kämen, da dies einerseits dem „Buy American Act“ widersprechen würde und andererseits die Dioden nicht nach den „Joint Army Navy specifications“ gebaut seien. Bei rauscharmen Hochfrequenzdioden gab es aber andere Möglichkeiten, und die *National Scientific Laboratories* schieben:

“We may add that there is a very firm demand at the present time for a mixer diode to work on 700 MCS [MegaCycles per Second] and having a very low noise level. If you make diodes of this type, we shall be happy to test them and submit them to our contacts for test purpose. If they are really good insofar as noise is concerned, substantial orders might result. The present price for diodes of this type is around 88¢ in quantity.”²⁴¹

²³⁸ Auf den erhaltenen Abbildungen aus den Produktionshallen sind vor allem weibliche Arbeitskräfte zu sehen. Siehe „Neue Intermetall-Kristalldioden“, *Funkschau* 1953, Jg. 25, Heft 18, S. 351-352; Mende, *Intermetall-Germaniumdioden*, 1953, S. 310. Ähnliches gilt zum Beispiel für die Firma *Philips*, siehe dazu Boon, *Germanium-Dioden*, 1955, S. 14-16.

²³⁹ „Neue Intermetall-Kristalldioden“, *Funkschau* 1953, Jg. 25, Heft 18, S. 351-352; Preisblatt der Firma *Intermetall* vom 1. Sept. 1953.

²⁴⁰ Stasek, *Erinnerungen*, 1993, S. 4-5, IMC.

Rolf Wiesinger war gemeinsam mit Herbert Mataré am 13. August 1953 neuer Geschäftsführer der *Intermetall* geworden (Eintrag im Handelsregister Düsseldorf).

²⁴¹ Ellison, Associate Director, *National Scientific Laboratories*, an *Intermetall*, 15. Sept. 1953, IMC.

Die gebotenen Preise entsprachen in etwa den Vorstellungen von *Intermetall*, jedoch arbeiteten die bis September 1953 produzierten Dioden nur in einem Frequenzbereich bis zu 500 MHz, so daß sie für diesen Markt noch nicht in Frage kamen.²⁴²

Germanium-Transistoren

Neben den Germaniumdioden arbeitete *Intermetall* auch an der Serienproduktion von Punktkontakt-Transistoren und konnte auf der Funkausstellung vom 29. August bis zum 6. September 1953 in Düsseldorf auch erste Transistoren vorstellen. Dafür wurde das Germanium zunächst wie für die Dioden aufbereitet, allerdings mußten nun zwei Punktkontakte in einem geringen Abstand zueinander aufgebracht werden.

Zu Demonstrationszwecken führten auf der Funkausstellung mehrere Hersteller ausschließlich mit Transistoren bestückte Radios vor.²⁴³ *Intermetall* präsentierte ein kleines Radio mit Netzanschluß und Lautsprecher, sowie ein batteriebetriebenes Handgerät mit Ohrstecker, die mit Germanium-Punktkontakt-Transistoren aus der eigenen Herstellung ausgestattet waren. Allerdings war die Empfangsleistung noch von schlechter Qualität und auf den Mittelwellenbereich beschränkt. So war lediglich „mäßige Lautsprecherwiedergabe der Ortssender möglich.“ Der Empfang des UKW-Rundfunks konnte mit den 1953 in Deutschland zur Verfügung stehenden Punktkontakt-Transistoren zwar noch nicht realisiert werden, doch hielt man es nur für „eine Frage der Entwicklungszeit, bis die aus den USA bekannten höheren Grenzfrequenzen erreicht sind.“²⁴⁴



Abb. 56: Transistorempfänger. Vorgeführt von *Intermetall* auf der Funkausstellung 1953. (Abbildung: Privatbesitz Mataré.)

Ein Besucher der Ausstellung strich in einem Bericht heraus, daß

„nur die Intermetall und SAF serienmäßig gefertigte Transistoren [anboten], während *Siemens* und *Tekade* wohl Transistoren ausstellten, sie aber ausdrücklich als Versuchsausführungen bzw. Entwicklungsmuster bezeichneten, für die auch kein Prospektmaterial ausgegeben wurde. ... Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die deutsche Halbleiterindustrie aus dem Schatten der amerikanischen Kristalloden-Industrie herausgewachsen ist.“²⁴⁵

Er bedauerte allerdings, daß sich nicht mehr deutsche Hersteller auf diesem Gebiet betätigten und machte „die sprichwörtliche deutsche Gründlichkeit für die Zurückhaltung der meisten einschlägigen Firmen verantwortlich.“²⁴⁶

Ein Preisblatt von *Intermetall* vom 1. Sept. 1953 wies zwei unterschiedliche Typen von Germanium-Transistoren aus, die 15 DM (GSN 1) und 12 DM (GSN 2) kosteten und in ihren Kenndaten, beispielsweise bei der Leistungsverstärkung, ähnlich Werte

²⁴² Mende, *Intermetall-Germaniumdioden*, 1953, S. 309.

²⁴³ Darunter waren neben *Intermetall* die Nürnberger Firma TEKADE („Süddeutsche Telefon-Apparate-, Kabel und Drahtwerke AG“, später „TEKADE, Felten und Guillaume“) und der westfälische Radiohersteller Graetz.

Zur Geschichte der Funkausstellungen siehe allgemein Riedel, *70 Jahre Funkausstellung*, 1994.

²⁴⁴ Möller, *Deutsche Transistoren*, 1953; Bildersammlung Mataré, Nr. 89-94; Reuber, *Funk-Ausstellung*, 1953.

²⁴⁵ Mende, *Kristallodentechnik*, 1953.

²⁴⁶ Ebenda.

lieferten wie diejenigen der SAF und der anderen wenig später auf den Markt kommenden Konkurrenzprodukte.²⁴⁷

Die Fertigung dieser Transistoren war aber noch ausgesprochen aufwendig und unsicher. An manchen Tagen konnten mit einem Materialeinsatz von 1360 Kristallen gerade einmal 38 funktionierende Transistoren produziert werden. Mit einer Ausbeute von knapp 3% lag man aber bei *Intermetall* zu dieser Zeit im internationalen Trend, auch die amerikanischen Transistorfabrikanten sprachen von 98% Ausschuß.²⁴⁸

Materialfragen

Neben diesen Produktionsproblemen setzten sich auch die Forscher bei *Intermetall* mit der Frage des „richtigen“ Halbleitermaterials auseinander. Zur Produktion von Dioden und Transistoren hatte man mit Germanium begonnen, da viele Gründungsmitglieder schon Erfahrungen mit der Serienproduktion von Germanium-Bauteilen aus Paris mitbrachten. Trotzdem konnten die für den deutschen und internationalen Markt wichtigen Hochfrequenzdioden und -transistoren auf Germaniumbasis zunächst nicht geliefert werden. In diesem Gebiet war nach wie vor Silizium überlegen. Nach Einschätzung Matarés lag dies einerseits an der „kleineren Diffusionsspannung des niederohmigen Silizium[s], [und] andererseits an den beim Ge[ermanium] ausgeprägten Oberflächenzuständen, die laufzeiterhöhend und kapazitätserhöhend wirken.“²⁴⁹

In technischen Anwendungen konnte man aber die nötige Hochfrequenz auch dadurch erreichen, daß man in Mischempfängern (Superheterodyn-Prinzip) die Oberwellen eines Oszillators nutzte und diese mit dem Signal mischte. Das hatte den Vorteil, daß der Oszillator bei niedrigeren Frequenzen schwingen konnte und sich somit seine Frequenz in der Regel leichter konstant halten ließ. Mataré testete unterschiedliche Germanium- und Siliziumdioden in bezug auf Oberwellenmischung und Verzerreigenschaften und kam zu dem Schluß, daß „optimale Eigenschaften in dieser Beziehung eher beim Germaniumgleichrichter als beim Siliziumdetektor“ zu finden sind, und daß für diese technische Anwendung „das Germanium dem Silizium auch im Gebiet höchster Frequenzen (bis 10^4 MHz) vorzuziehen ist.“²⁵⁰ Somit konnte die anfängliche Konzentration auf Germanium-Produkte auch wissenschaftlich gerechtfertigt werden.

Das Czochralski-Verfahren

Darüber hinaus hatte man bei *Intermetall* Ende 1953 begonnen erfolgreich nach dem Czochralski-Verfahren Germanium-Einkristalle aus der Schmelze zu ziehen. Dies war wegen der dabei nötigen hohen Temperaturen mit Silizium zunächst nicht möglich.

²⁴⁷ Preisblatt der Firma *Intermetall* vom 1. Sept. 1953, IMC.

Noch 1953 brachten auch *Siemens* und die Firma *Kristallogen* von Rudolf Rost in Hannover Transistoren auf den Markt. Vergleichsgrößen in Möller, *Deutsche Transistoren*, 1953, Rost, *Kristallogentechnik*, 1954 und Rost, *Kristallogentechnik. Ergänzungslieferung*, 1956.

²⁴⁸ Knabe-Interview 1992, S. 3.

²⁴⁹ Mataré, *Möglichkeiten und Probleme*, 1954, S. 265.

²⁵⁰ Mataré, *Oberwellenmischung und Verzerrung*, 1953, S. 1 und S. 15.

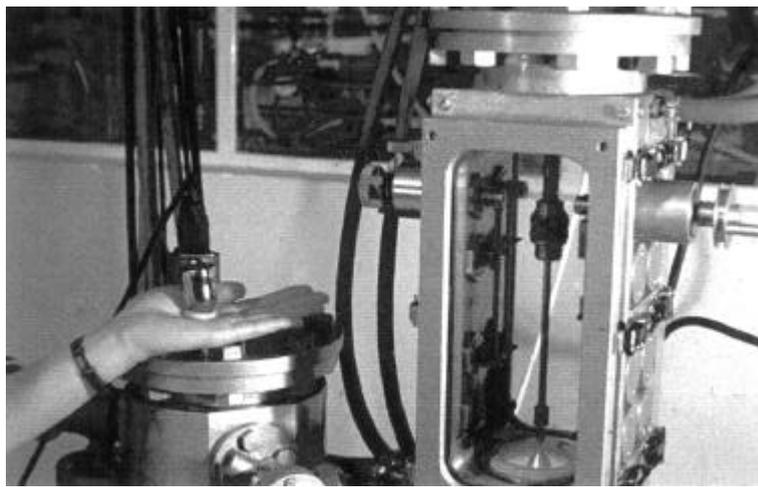


Abb. 57: Von Oskar Walter bei *Intermetall* 1953 konstruierte Czochralski-Apparatur (rechts) und ein gezogener Germanium-Einkristall (links). (Abbildung: Privatbesitz Mataré.)

Beim Czochralski-Verfahren wird ein monokristalliner Keimling in eine Schmelze des gleichen Materials getaucht und langsam wieder herausgezogen. Durch Abkühlung kristallisiert das Material aus und ein Kristall wächst ohne Störungen auf.²⁵¹ Diese nach ihrem Erfinder Czochralski benannte Methode hatten Gordon Teal und John Little in den Bell Laboratorien im Herbst 1948 erstmals zur Herstellung monokristalliner Germaniumkristalle eingesetzt.

Da sie aber von ihrem Chef William Shockley keine offizielle Rückendeckung für ihre Arbeiten bekamen, führten sie zunächst die entsprechenden Versuche auf eigene Initiative und ohne offizielle Genehmigung aus. Doch Ende 1949 ließ sich Shockley durch die bessere Qualität der erhaltenen Kristalle von der Notwendigkeit solcher Verfahren überzeugen. Teal und Little veröffentlichten daraufhin ihre erfolgreichen Versuche und das „Czochralski-Verfahren“ entwickelte sich schon bald zu einem Standardverfahren bei der Herstellung von Halbleitereinkristallen, das auch heute noch weit verbreitet ist.²⁵²

III-V-Halbleiter

Im Gegensatz zu Silizium schien es aber möglich, das Czochralski-Verfahren auch auf III-V-Verbindungshalbleiter anzuwenden und so zum Beispiel Einkristalle aus Aluminiumantimonid (AlSb) herzustellen. Auf diese neuen Materialien hatten Mataré und Mitarbeiter anfangs große Hoffnungen gesetzt und im Hinblick auf den erwarteten Erfolg mit den „intermetallischen Verbindungen“ auch die Firma bereits 1952 *Intermetall* genannt.

Im personell und apparativ gut ausgerüsteten Labor fanden entsprechend intensive Untersuchungen auf dem Gebiet der Verbindungshalbleiter, insbesondere an Aluminiumantimonid (AlSb), statt. Angesichts der überragenden physikalischen Eigenschaften des Aluminiumantimonids, insbesondere der großen Bandlücke von 1,5 eV bei der vergleichsweise niedrigen und damit technisch beherrschbaren Schmelztemperatur von 1060°C, hoffte man, schon bald marktfähige Produkte herstellen zu können. Doch im Vergleich zum Germanium waren die praktischen Probleme so groß, daß zunächst nur polykristalline Stücke durch direktes Zusammenschmelzen von Aluminium und Antimon gewonnen werden konnten. Sie wiesen zwar größere monokristalline Bereiche auf, die Beständigkeit gegen Oxydation der so erhaltenen Stücke war aber extrem gering. So schrieb ein Mitarbeiter von *Intermetall*:

„Es soll nicht verheimlicht werden, daß die Beständigkeit des AlSb noch zu wünschen übrig läßt. Wiederholt wurde beobachtet, daß AlSb - besonders an feuchter Luft - stark korrodiert und zu einem schwarzen Pulver zerfällt. Die bisherigen

²⁵¹ Czochralski, *Neues Verfahren*, 1918.

²⁵² Teal/Little, *Growth*, 1950; Riordan/Hoddeson, *Crystal Fire*, 1997, S. 174-180; Goldstein, *Right Material*, 1993, S. 99-106.

Siehe auch Goetzeler, *Geschichte der Halbleiter-Bausteine*, 1972, S. 44.

Untersuchungen haben aber gezeigt, daß dieses Problem nicht unlösbar ist. An trockener Luft ist ALSb beständig.“²⁵³

Erste Labormuster von Dioden aus diesem Material lieferten teilweise die erhofften Ergebnisse, da sie in bestimmten Spannungsbereichen eine bessere Charakteristik als handelsübliche Germaniumdioden aufwiesen. Insbesondere bei sehr kleinen Spannungen waren die Kennlinien der ALSb-Dioden steiler und die Aufbauzeit der Randschicht („Recovery Time“) war kürzer. Diese Eigenschaften machten sie für Hochfrequenzanwendungen attraktiv, denn dort war es wichtig, „daß bereits bei einigen mV Gleichrichtung auftritt und unterhalb von 0,4 oder 0,2 V hohe Flußströme erzielt werden können. Und hierin scheint das ALSb dem Germanium überlegen zu sein.“ Wegen der geringen Haltbarkeit der Kristalle waren aber marktfähige Produkte auf Basis der III-V-Halbleiter in nächster Zeit nicht zu erwarten.²⁵⁴

Auch Mataré äußerte sich 1954 durchaus kritisch über die sofortige technische Anwendbarkeit von III-V-Halbleitern, gab aber zu bedenken, daß dieses Gebiet sicher der intensiven Bearbeitung wert sei, „denn es besteht die Aussicht, nicht nur den kostspieligen und seltenen Rohstoff Germanium zu ersetzen, sondern vielleicht Halbleitergrundkörper ganz bestimmter Eigenschaften nach ‚Mass‘ herzustellen.“²⁵⁵

Verkauf an Clevite

Diese Aussichten vermochten aber die kaufmännische Leitung nicht zu überzeugen und es kamen Bedenken auf, ob man in das richtige Projekt investiert hatte. Denn der Aufbau eines modernen Halbleiterbetriebs mit Forschungsausrichtung hatte sich bisher als „ein Faß ohne Boden“ herausgestellt, da die Einnahmen aus dem Dioden- und Transistorverkauf anfangs im Vergleich zu den enormen Forschungskosten minimal waren.²⁵⁶

Zwar bildete sich Mitte der 1950er Jahre auch in Deutschland „trotz des Fehlens einer ausgeprägten europäischen Rüstungsindustrie“²⁵⁷ langsam ein kleiner, ziviler Markt für Transistoren und andere Halbleiterbauelemente. Jedoch fanden die damaligen Transistoren nur in kleinen Nischenbereichen Einsatz, in denen Sparsamkeit und Größe die entscheidenden Eigenschaften waren. Dies waren beispielsweise Hör- und Funkgeräte. Da Transistoren im Hochfrequenzbereich und in der Temperaturstabilität noch deutliche Nachteile gegenüber den Elektronenröhren aufwiesen, wurden sie im Bereich der Konsumelektronik noch kaum eingesetzt.²⁵⁸ Erst in der zweiten Hälfte der 1950er kamen zögerlich die ersten transistorisierten Rundfunkempfänger als erste Zeichen des in den 1960er Jahren einsetzenden massenhaften Einsatzes von Transistoren in der Konsumelektronik hinzu.²⁵⁹

Bei *Intermetall* arbeiteten aber 1953 die angestellten Forscher neben Produktentwicklung auf Germaniumbasis gleichzeitig an der schwierigen Reinstdarstellung von Silizium und untersuchten Grundlagenfragen von III-V-Halbleitern. Das stellte ohnehin für eine so kleine Firma ein zu großes Forschungsspektrum dar. Da aber auch der Dioden- und Transistorverkauf noch keinen großen Gewinn abwarf, wurden die Geldgeber ungeduldig und suchten nach anderen Möglichkeiten. Als Jakob Michael 1953 zudem die weltpolitische Lage als extrem unsicher einschätzte und einen Krieg zwischen den beiden deutschen Staaten befürchtete, dachte er daran,

²⁵³ Zielaseck, *ALSb für Kristalloden*, 1954, S. 533.

²⁵⁴ Ebenda, S. 531.

²⁵⁵ Mataré, *Möglichkeiten und Probleme*, 1954, S. 267.

²⁵⁶ Mataré-Interview 1998.

²⁵⁷ Mende, *Kristallogentechnik*, 1953.

²⁵⁸ Dosse, *Transistor*, 1955, S. 71 und 88.

²⁵⁹ Fickers, *Transistor*, 1998, insb. S. 29-71.

seinen Besitz in Deutschland zu verkaufen, um nicht schon wieder alles zu verlieren.²⁶⁰

Schon bald fand er für die *Intermetall* eine Reihe von Interessenten, die aber nicht bereit waren, den geforderten Preis zu zahlen. Daher zogen sich die Verkaufsverhandlungen längere Zeit hin. In dieser unsicheren Situation für die Zukunft von *Intermetall* sahen sich viele Angestellte nach neuen Tätigkeitsfeldern um. Oskar Walter ging zu *Siemens*, George Callon ging zurück nach Frankreich und Herbert Mataré versuchte sein Glück in den USA. Er war enttäuscht, daß er nun einen Käufer für *Intermetall* finden sollte, obwohl ihm anfangs zum Aufbau der profitablen Firma 5 Jahre Zeit zugesichert worden waren, von denen nicht einmal zwei verstrichen waren.²⁶¹

Im Sommer 1954 traten zusätzlich ernste Probleme mit den auf Lager liegenden Transistoren auf. Die zuvor bei einem Ausschuß von weit über 90% produzierten, mühsam einzeln getesteten und mit Meßprotokoll versehenen Transistoren hatten ihre elektrischen Parameter durch die Lagerung von wenigen Monaten völlig verändert. Sie waren nicht mehr zu gebrauchen.²⁶² Nach dieser „Katastrophe“ sollte *Intermetall* im November 1954 schließlich aufgelöst werden. Allen verbliebenen Mitarbeitern war bereits gekündigt worden, als Mataré doch noch einen Käufer fand. Er hatte Mitte Dezember 1954 bei den zur *Clevite Corporation* gehörigen *Transistor Products Inc.* einen Vortrag gehalten und sie mit Photos der Geräte und Produktionsstätten, schriftlichen Unterlagen und Produktionsbeispielen für die Firma *Intermetall* interessieren können.²⁶³

Sofort flog ein Verantwortlicher der *Transistor Products* nach Düsseldorf und besichtigte die Produktionsstätten der *Intermetall*, gewann einen guten Eindruck und wollte zum Ende seines Aufenthalts 100 gute Transistoren aus der neuesten Produktion mit in die USA nehmen. So haben Stasek, Herbert Knabe und andere bis zum Weihnachtsabend 1954 die geforderten Transistoren in die Gehäuse eingebaut, zugelötet und danach erneut getestet. Bei diesen Transistoren handelte es sich schon um die neuen Flächentransistoren OC34 und OC35, die nach dem Legierungsverfahren hergestellt wurden. Diese „ersten Muster ... waren im Frequenzverhalten weit besser als vieles andere, was es damals auf der Welt gab.“²⁶⁴

Aufgrund der guten Qualität der Produktionsmuster zeigte sich die *Clevite Corporation* interessiert, vereinbarte mit Jakob Michael die Weiterführung der Firma für zunächst sechs Monate und erhielt eine Option für die anschließende vollständige Übernahme. Zwar waren die erwähnten Transistoren noch nicht vollständig in Serienproduktion gegangen, doch *Clevite* rechnete mit einem großen Markt auch in den USA dafür. Daher schickten sie Experten aus den USA, die als erstes aus Kosten-

²⁶⁰ Die Verhandlungen für einen Waffenstillstand im Korea-Krieg hatten sich lange hingezogen und waren bis Juli 1953 mehrfach gescheitert. Als sich aber auch danach die Situation nicht entspannte, befürchtete Michael, daß es auch zwischen den beiden deutschen Staaten zu kriegerischen Auseinandersetzungen kommen könnte. (Stasek, *Erinnerungen*, 1993, S. 6, IMC). Die Beschränkungen durch die noch bis Ende 1958 geltende Devisenbewirtschaftung in der Bundesrepublik Deutschland waren im Laufe des Jahres 1953 mit der Wiederinkraftsetzung des deutsch-amerikanischen Handelsvertrages teilweise aufgehoben worden, so daß sich 1953/54 die Möglichkeit bot, den Verkaufserlös direkt in die USA zu transferieren. (Siehe dazu Buchheim, *Wiedereingliederung*, 1990, S. 164-165; Link, *Deutsche und Amerikanische*, 1978, S. 123-124).

²⁶¹ Stasek, *Erinnerungen*, 1993, S. 6-7, IMC; Mataré-Interview 1998.

Die 17 Kaufhäuser der *DEFKA* verkaufte Michael im Dezember 1954 nach geschickten Verhandlungen für einen Betrag von um die 60 Million DM an Helmut Horten. (Engelmann, *Macht am Rhein*, 1968, S. 87-89; Heger/Frommke, *50 Jahre Horten*, 1986, S. 11-16).

²⁶² Knabe-Interview 1998, S. 13-14, Mataré-Interview 1998.

²⁶³ Stasek, *Erinnerungen*, 1993, S. 6-7, IMC; Mataré-Interview 1998.

Transistor Products, Inc., Boston stellte schon seit ca. 1951/52 Transistoren her, die auch in Deutschland erhältlich waren (Büll, *Kristalldioden und Transistoren*, 1953).

²⁶⁴ Knabe-Interview 1992, S. 16-18; Stasek, *Erinnerungen*, 1993, S. 8-9 (Zitat), IMC.

gründen das III-V-Halbleiterlabor schlossen und sich auf die Produktion konzentrieren. Anfang 1955 lief auch die Serienproduktion der legierten Flächentransistoren OC34 und OC35 langsam an.²⁶⁵

Legierte oder „gezogene“ Flächentransistoren?

Flächentransistoren waren weltweit erst seit kurzem auf dem Markt, da es einige Jahre dauerte, um die Fertigungsprobleme in den Griff zu bekommen. Die ersten Labormuster waren 1950 in den Bell Laboratorien als „gezogene“ Flächentransistoren hergestellt worden. Wurde während des Czochralski-Ziehens eines Germaniumkristalls ein Dotierstoff in die Schmelze eingebracht, entstand durch die Dotierung ein flächenhafter pn-Übergang, der 1949 zur ersten experimentellen Bestätigung von Shockleys Theorie des pn-Übergangs genutzt werden konnte. Darauf aufbauend hatten Morgan Sparks und Gordon Teal Anfang 1950 die experimentelle Herstellung einer npn-Schichtenfolge in Angriff genommen und konnten im April 1950 intern in den Bell Laboratorien den ersten funktionsfähigen Germanium-Flächentransistor vorführen. Nach weiteren Tests und Verbesserungen der Herstellungsmethode machten Shockley, Sparks und Teal ein Jahr später ihre Ergebnisse dem Fachpublikum und der Presse zugänglich.²⁶⁶ Zur Herstellung eines gezogenen Flächentransistors mußte nach dem ersten pn-Übergang durch Zugabe eines entgegengesetzten Dotierstoffes die Schmelze erneut umdotiert werden. Dabei bestand eine Schwierigkeit darin, den Vorgang des Umdotierens schnell genug ablaufen zu lassen, so daß die Basis sehr dünn wurde. Daher wurde die dritte Dotierung sehr kurz nach der zweiten in die Schmelze gegeben. Eine sehr dünne Basis war zwar für hochfrequente Verstärkung notwendig, ein Kontakt ließ sich aber nur mit großen Schwierigkeiten daran anbringen. Darüber hinaus hatte dieser Weg der Transistorherstellung den weiteren Nachteil, daß so nur eine Folge von Schichten mit steigender Leitfähigkeit hergestellt werden konnte. Deshalb war er, obwohl der weltweit erste Flächentransistor 1950 so hergestellt wurde, in der Serienproduktion nur für kurze Zeit aktuell und nur wenige Firmen brachten „gezogene“ Flächentransistoren auf den Markt (siehe Abb. 58).²⁶⁷

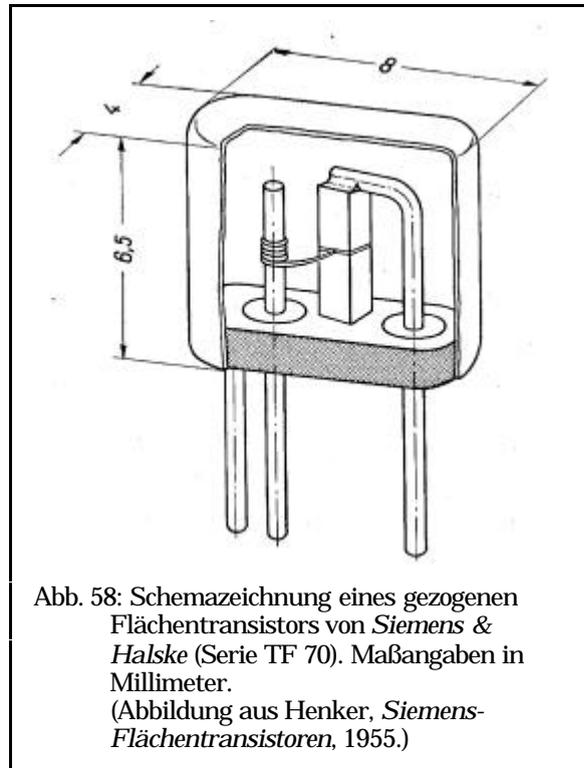


Abb. 58: Schemazeichnung eines gezogenen Flächentransistors von Siemens & Halske (Serie TF 70). Maßangaben in Millimeter.
(Abbildung aus Henker, *Siemens-Flächentransistoren*, 1955.)

²⁶⁵ Ebenda. *Intermetall-Anzeige, Funkschau* 1955, Jg. 27, Heft 3, S. III; Bericht über neue Transistoren, *radio mentor* 21 (1955), Heft 5, S. 282-283.

²⁶⁶ Shockley, *Circuit Element*, 1948, US Patent 2,569,347; Shockley, *Theory of p-n Junctions*, 1949; Shockley/Sparks/Teal, *p-n Junction Transistors*, 1951; Goldstein, *Right Material*, 1993, S. 99-105; Riordan/Hoddeson, *Crystal Fire*, 1997, bes. S. 180-194 und Riordan/Hoddeson, *Minority Carrier*, 1997, S. 14-22.

²⁶⁷ Seiler, *Physik und Technik*, 1964, S. 82.

In Deutschland stellen in den 1950er Jahren vor allem Siemens & Halske gezogene Flächentransistoren (Serie TF 70) her. (Siehe Rost, *Kristallogentechnik*. 2. Auflage, 1956, S. 342-349).

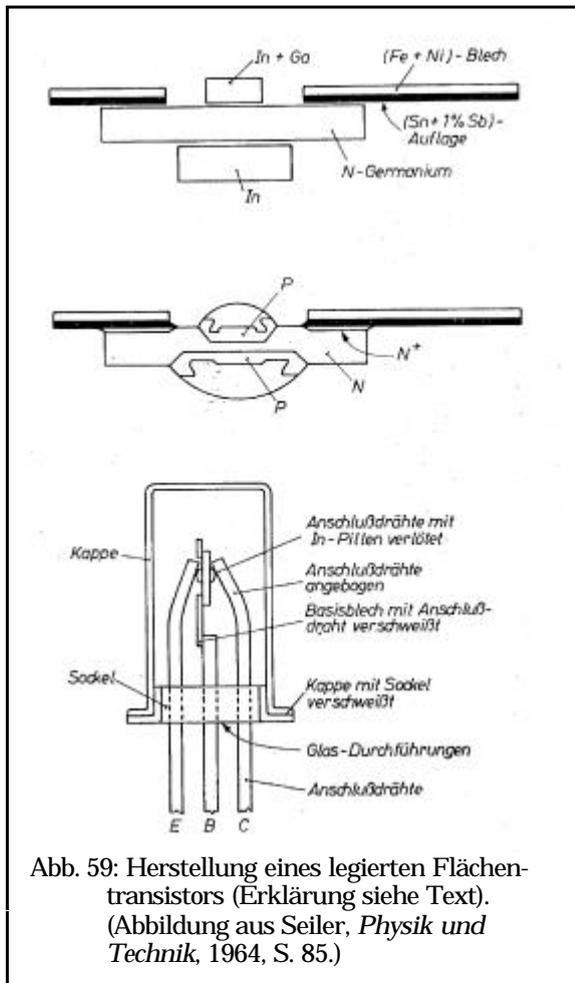


Abb. 59: Herstellung eines legierten Flächentransistors (Erklärung siehe Text). (Abbildung aus Seiler, *Physik und Technik*, 1964, S. 85.)

Im Vergleich dazu war die Herstellung eines legierten Germanium-Flächentransistors einfach. Bei einem pnp-Transistor wurde zunächst auf ein Stück n-dotiertes Germanium von beiden Seiten ein Stück Indium für die pn-Übergänge aufgebracht und die Basis mit einer Nickel-Eisen-Legierung kontaktiert, die den selben Ausdehnungskoeffizienten wie das Germanium hatte. So angeordnet wurden die Einzelteile bei ca. 400°C zusammengeschmolzen. Es bildeten sich zwei pn-Übergänge, die am Indium leicht kontaktierbar waren und der Basiskontakt, der durch die Zinn-Antimon-Beschichtung auf der Kontaktseite „sperrfrei“ wurde. Danach mußte das Arrangement nur noch in einem Gehäuse von allen äußeren Einflüssen abgeschirmt werden und der Transistor war fertig (siehe Abb. 59).²⁶⁸

Die so hergestellten *Intermetall* pnp- und npn-Transistoren der Reihe OC32 - OC34 waren ab Februar 1955 erhältlich und bis zu Frequenzen von 1,1 MHz einsetzbar. Im Mai 1955 folgten ihre Miniaturversionen, deren Gehäuse lediglich 3,5 mm im Durchmesser maßen, und die sich in den elektrischen Eigenschaften kaum von den größeren unterschieden.²⁶⁹ Diese erfolg-

reiche Serienproduktion überzeugte die *Clevite Corporation* endgültig, und sie übernahm *Intermetall* im Sommer 1955 vollständig. Mataré legte die Geschäftsführung nieder und blieb in den USA, da ihm dort bessere Forschungsmöglichkeiten geboten wurden.²⁷⁰

Von *Clevite* kam als neuer Geschäftsführer Rudolf Sachs, der als deutscher Jude 1938 in die USA emigriert war und dort bei *Transistor Products* in der Serienproduktion von Transistoren Erfahrung gesammelt hatte. Im Zuge der steigenden Produktion wurden 1955 die Produktionskapazitäten drastisch erweitert. In sehr kurzer Zeit war die Belegschaft durch Neueinstellungen mehr als verdoppelt worden, so daß keine Möglichkeit bestanden hatte, die neuen Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen vernünftig einzuarbeiten. Die Produktionskapazität stieg zwar an, doch ging die Ausbeute dramatisch auf ca. 1 % zurück. Der ebenfalls neu eingestellte Produktionsleiter, der vorher in der Serienproduktion von Keramiktöpfen gearbeitet hatte, bekam die Probleme nicht in den Griff. So endete „das ganze ... in einer glatten Bauchlandung“ und die *Clevite* sah, „daß man es auf diese Art und Weise nicht handhaben kann.“ Deshalb wurde der ehemalige Produktionsleiter George Callon aus Frankreich zurückgeholt und als neuen Geschäftsführer suchte man nach jemandem, der bereits eine „exponierte Stellung“ in einer anderen Firma in der Halbleitertechnik innehatte und einen „zugkräftigen Namen“ für die „Spitze dieser Firma“ mitbrachte. Die Wahl fiel auf Karl Seiler.²⁷¹

²⁶⁸ Ebenda, S. 85-87.

²⁶⁹ *Intermetall-Anzeige, Funkschau* 1955, Jg. 27, Heft 3, S. III; Bericht über neue Transistoren, *radio mentor* 1955, Heft 5, S. 282-283.

²⁷⁰ Mataré-Interview 1998; Eintrag in das Handelsregister Düsseldorf, 20. Mai 1955.

²⁷¹ Knabe-Interview 1992, S. 31-35.

Die Philosophie des „schnellsten Zweiten“

In der Zwischenzeit hatte die *Clevite* über eine Million DM insbesondere in das moderne Legierungsverfahren für die Dioden- und Transistorproduktion investiert. Erste Labormuster von Leistungstransistoren konnten auf der Funkausstellung im September 1955 in Düsseldorf dem interessierten Publikum vorgestellt werden, waren aber zunächst noch nicht in großen Stückzahlen lieferbar.²⁷² Mit dem Kontakt zur *Transistor Products* war auch der Einstieg in die Siliziumtechnologie gekommen. In den ersten Jahren von *Intermetall* hatten noch die fertigungstechnischen Probleme bei der Bearbeitung von Silizium überwogen, doch gegen Mitte der 1950er Jahre zeichnete sich die Überlegenheit des Siliziums bei hohen Temperaturen immer deutlicher als ein entscheidender Vorteil ab, so daß auch *Intermetall* 1955 erstmals versuchsweise legierte Silizium-Flächendioden anbot, die „selbst bei Temperaturen von 100 bis 150°C noch hohe Sperrwiderstände und Sperrspannungen“ ergaben.²⁷³

Karl Seiler war also genau der richtige Mann, um diesen Einstieg in die Siliziumtechnologie zu beschleunigen und auch in der Serienproduktion umzusetzen. Er übernahm im März 1956 offiziell die Geschäftsführung von *Intermetall* und brachte eine neue Firmenphilosophie mit. In der Produktion von Halbleiterbauelementen wollte Seiler zwar „nicht der Erste zu sein, das kostet zuviel Geld und zuviel Kapital, aber der schnellste Zweite wollten wir sein.“²⁷⁴

Silizium-Transistor

Seiler nahm sofort die Entwicklung eines legierten Silizium-Transistors in Angriff und stellte ihn im September 1956 als den „ersten deutschen Silizium-Transistor“ dem Fachpublikum vor. In einem Bericht in der Fachpresse hieß es dazu: „Während in den USA schon seit längerer Zeit Si-Transistoren auf dem Markt sind, hat in Deutschland als erste Firma die *Intermetall GmbH* die Herstellung von pnp-Si-Flächentransistoren aufgenommen.“²⁷⁵

Bei diesen Transistoren, handelte es sich um legierte Silizium-Flächentransistoren, die auch bei Temperaturen von 150°C noch befriedigend arbeiteten. Die Herstellung von legierten Flächentransistoren auf Siliziumbasis unterschied sich kaum von derjenigen für Germanium-Transistoren. Lediglich die Temperaturen lagen mit 700-800°C deutlich höher als die 400°C, die für Germanium ausreichten. Für die pn-Kontakte wurden Aluminiumdrähte benutzt, der Basiskontakt kam durch einen Gold-Antimonring zustande.²⁷⁶ In Deutschland wurden diese Transistoren unter der Typenbezeichnung OC 430 bis OC 470 von *Intermetall* vertrieben, in den USA konnte man Silizium-Transistoren mit identischen elektrischen Eigenschaften unter der Typenbezeichnung CTP 2N260 bis CTP 2N262A von *Transistor Products* erwerben. Die Preise dieser Silizium-Flächentransistoren lagen im Juni 1956 mit 38 bis 54 DM

²⁷² Die Leistungstransistoren hatten eine maximale Verlustleistung von bis zu 15 Watt. (Siehe *Funkschau* 1955, Jg. 27, Heft 16, S. 341 und Heft 19, S. 421-423).

²⁷³ *Intermetall*-Informationsblatt „Silizium-Flächendioden“ (vom Typ S21 bis S24), August 1955, in Ordner: „Intermetall Prospekte und Werbedrucksachen bis 1957“, Aktenbestand „Technische Dokumentation“, Intermetall.

In einer Preisliste vom März 1956 werden Silizium-Flächendioden (allerdings vom Typ S 32 bis S35) zu Preisen von 12 DM bis 21 DM angeboten. (Ordner „Vergleichsliste, Preisliste, ab 1956“, Aktenbestand „Technische Dokumentation“, Intermetall).

²⁷⁴ Seiler-Interview 1982, Band 1, S. 2.

²⁷⁵ Bericht „Die ersten deutschen Silizium-Transistoren“, *Funktechnik* Bd. 22 (1956), S. 648.

²⁷⁶ Seiler, *Physik und Technik*, 1964, S. 83-87.

Später stellten sich Silizium-Legierungen als spröde heraus und neigten daher zu Rißbildungen an der Legierungsfront (Jungclaus/Neukamm, *Bauelemente*, 1980, S. 71).

bei dem 5-6 fachen vergleichbarer Germanium-Flächentransistoren, die bei *Intermetall* für 6,70 DM bis 11,20 DM angeboten wurden.²⁷⁷

Zenerdiode

Eine ähnliche Politik verfolgte Seiler mit der Silizium-Zenerdiode. *Intermetall* brachte sie Anfang 1957 als erster deutscher Hersteller auf dem Markt und erarbeitete sich eine führende Position auf diesem Markt.²⁷⁸ Seiler erinnert sich:

„Zener-Dioden - wir haben uns als nicht allzu große Firma die Gebiete heraus gesucht, wo wir eine Marktnische vermuteten. Das waren zum Beispiel die Zener-Dioden. Das haben wir so gut gemacht, daß wir quasi weltweit anerkannt waren.“²⁷⁹



Abb. 60: Silizium-Zenerdiode abgebildet auf der Titelseite eines Verkaufsprospekts von *Intermetall* 1959.

Bei Zener-Dioden wird der von Clarence Zener erstmalig beschriebene sogenannte „Zenerdurchbruch“ ausgenutzt, bei dem sich unter Einfluß einer angelegten Sperrspannung die Bänder derart verbiegen, daß Valenzelektronen die Bandlücke zum Leitungsband unter Erhaltung der Energie „durchtunneln“ können. Wird eine bestimmte kritische Spannung, die Zenerspannung, erreicht, nimmt der Sperrstrom sehr stark zu. Dioden mit geeignet dotierten pn-Übergängen, Zenerdioden, sind oberhalb dieser Zenerspannung sehr niederohmig. Daher verwendet man sie im allgemeinen im Gegensatz zu einer normalen Diode nicht zur Gleichrichtung, sondern zur Stabilisierung von Gleichspannungen gegenüber Schwankungen. Denn große Änderungen des Diodenstroms haben oberhalb der Zenerspannung nur kleine Spannungsänderungen zur Folge.²⁸⁰

Die von *Intermetall* produzierten Zenerdioden waren legierte Silizium-Flächendioden und Anfang 1957 zunächst in drei Ausführungen mit unterschiedlichen Zenerspannungen zwischen 6 und 9 Volt lieferbar.²⁸¹ „Das ist das Charakteristische an der praktischen Verwendbarkeit der Zenerdioden: sie sind nicht auf eine beliebige Spannung einstellbar, sondern entsprechen einem bestimmten Wert, der vom Material und der Herstellung abhängt und durch Auslese festgestellt wird.“²⁸²

²⁷⁷ Vergleiche die Datenblätter von *Intermetall* und *Clevite* in Ordner: „Intermetall Prospekte und Werbeprospekte bis 1957“, Aktenbestand „Technische Dokumentation“, Intermetall.

²⁷⁸ Zenerdioden finden sich erstmals in einem „Preisblatt“ mit Gültigkeit ab dem 1. Feb. 1957. Ordner: „Intermetall Prospekte und Werbeprospekte bis 1957“, Aktenbestand „Technische Dokumentation“, Intermetall.

²⁷⁹ Seiler-Interview 1982, Band 1, Seite 2.

²⁸⁰ Zener, *Electrical Breakdown*, 1934; McAfee u.a., *Zener Current*, 1951.

Eine Erklärung des Zenerdurchbruchs findet sich beispielsweise in Seiler, *Physik und Technik*, 1964, S. 128-130 oder Jungclaus/Neukamm, *Bauelemente*, 1980, S. 83-86. Für Schaltbeispiele siehe Dobrinski u.a., *Silizium-Zenerdiode*, 1957.

²⁸¹ Dobrinski u.a., *Silizium-Zenerdiode*, 1957.

²⁸² 1961 standen Zenerdioden in einem Spannungsbereich von 1 bis 33 Volt zur Verfügung.

Rost, *Silizium*, 1966.

Mit den Silizium-Transistoren und den Silizium-Zenerdioden hatte *Intermetall* Ende der 1950er Jahre auch wirtschaftlich Erfolg. Zu dieser Zeit zeichnete sich der Übergang von den Germanium-Bauteilen, die zwar auch weiterentwickelt und verkauft wurden, zu einer stärkeren Konzentration auf Silizium ab.

Doch auch in anderen Bereichen erweiterte *Intermetall* seine Produktpalette beständig. Neben Halbleiterbauelementen auf Silizium- und Germaniumbasis führte *Intermetall* bald auch Piezokristalle im Angebot und entwickelte unter anderem Tonabnehmersysteme für Plattenspieler, da das zur *Clevite Corporation* gehörige amerikanische Unternehmen *Clevite-Brush Development* auf diesem Sektor tätig war.²⁸³

Übersiedlung der Firma *Intermetall* nach Freiburg

Diese Ausweitung der Produktion war so erfolgreich, daß bald die Erweiterungsmöglichkeiten in Düsseldorf erschöpft waren und eine neue Produktionsstätte gesucht werden mußte. Erste Pläne, sich in der Umgebung von Düsseldorf neu anzusiedeln, wurden bald zugunsten des Planes aufgegeben, das in Deutschland existierende Lohngefälle auszunutzen. Ein deutsches „Niedriglohngebiet“ war damals unter anderem auch der südbadische Raum. So schloß Seiler im Mai 1958 einen für *Intermetall* günstigen Ansiedlungsvertrag mit der Stadt Freiburg ab, in dem sich *Intermetall* gegen Überlassung eines städtischen Industriegeländes verpflichtete, den Gesamtbetrieb bis zum 30. Juni 1960 nach Freiburg zu verlegen. Diesen Vorgaben folgend war die Übersiedlung der Firma bis Frühjahr 1960 abgeschlossen. Bis dahin war der Personalstand auf 730 Mitarbeiter angewachsen.²⁸⁴

Zur gleichen Zeit hatte die *Clevite* auch die *Shockley Transistor Corporation* gekauft und so intensive Beziehungen nach Palo Alto in Kalifornien geschaffen, in dessen Umkreis sich gerade das berühmte *Silicon Valley* entwickelte. Als mögliche Folge davon hatte *Intermetall* ab 1961 unter anderem PNP-Silizium-Vierschicht-Dioden im Programm, deren Entwicklung das Lieblingsprojekt von William Shockley gewesen war. Aber auch sonst blieb *Intermetall* technisch nicht stehen und griff Anfang der 1960er Jahre zunächst das Diffusionsverfahren und dann das Planarverfahren auf. Zur Hannovermesse 1962 wurden beispielsweise diffundierte Dioden und „Silizium-Epitaxial-Planar-Schalttransistoren“ angeboten.²⁸⁵

Aufgrund des vergrößerten Angebots und der steigenden Qualität der Produkte wurde *Intermetall* in den 1960er Jahren auch von den größeren Konkurrenten wie *Siemens* und *Telefunken* als Hersteller von Halbleiterbauelementen akzeptiert, hatte Vertreter in Ausschüssen des Verteidigungsministeriums und im Fachnormenausschuß und schrieb ab ca. 1961 auch erstmals schwarze Zahlen.²⁸⁶ 1965 trennte sich *Clevite* allerdings von ihren Halbleiteraktivitäten, und *Intermetall* wurde an die *ITT Industries*

²⁸³ Firmenprospekte von *Intermetall*, Ordner: „Archiv 1958-1963“, Aktenbestand „Technische Dokumentation“, *Intermetall*.

Darüber hinaus hatte man ca. 1957 bei *Intermetall* auch darüber nachgedacht, eigene Meßgeräte und ähnliches, angelehnt an Brush-Instruments in den USA, herzustellen. Daraus ist aber nichts geworden (Knabe-Interview 1992, S. 37).

²⁸⁴ Ansiedlungsvertrag, Aktenbestand Geschäftsführung, *Intermetall*; „Die Geschichte von *Intermetall*“, Ordner: „*Intermetall*-Chronik“, *Intermetall*.

Während die in Freiburg neu eingestellten Mitarbeiter zum ortsüblichen Tarif bezahlt werden konnten, wurden denjenigen, die von Düsseldorf mitkamen, zumindest das vorherige Gehalt bezahlt. (Knabe-Interview 1992, S. 42).

²⁸⁵ Riordan/Hodesson, *Crystal Fire*, 1997, S. 269; Ordner: „Archiv 1958-1963“, Aktenbestand „Technische Dokumentation“, *Intermetall*.

²⁸⁶ Knabe-Interview 1992, S. 45-46.

Europe verkauft.²⁸⁷ *Intermetall* hieß jetzt „INTERMETALL - Halbleiterwerk der Deutschen ITT Industries GmbH“.²⁸⁸

Seiler verließ daraufhin *Intermetall* und wechselte in die Geschäftsführung von *Heraeus* nach Hanau, wo er die Leitung der Heraeus-Schott-Quarzschmelze übernahm. Mit diesem Rückzug von der Halbleiterentwicklung stellte er auch seine Lehrtätigkeit an der TH Stuttgart ein. Zuvor hatte Seiler auch in seiner gesamten Zeit bei *Intermetall* 1956 bis 1965 weiterhin Abschlußarbeiten an der TH Stuttgart betreut und Vorlesungen zur „Physik und Technik der Halbleiter“ gehalten. Aus diesen Vorlesungen ist 1964 ein Lehrbuch hervorgegangen, das große Verbreitung erlangte und lange Jahre ein Standardwerk darstellte. In der Vorbemerkung betonte Seiler den Modellcharakter des Germaniums, das „ein Schulbeispiel für die Erläuterung der Wirkungsweise der Gleichrichter und Transistoren ist.“ Aber direkt anschließend wies er auf Silizium hin, das „von immer noch wachsender Bedeutung als technischer Halbleiter“ sei.²⁸⁹

So hatte sich gegen Ende von Seilers Zeit bei *Intermetall* das Silizium als der überlegene Halbleiterstoff für Gleichrichter- und Transistoren-Anwendungen erwiesen. Seiler, der schon seit seinen Kriegsforschungen von der Überlegenheit des Siliziums für die meisten technischen Anwendungen überzeugt gewesen war, urteilte rückblickend über seinen Eintritt bei *Intermetall*:

„Ist ja ein Witz, daß ich Direktor von Intermetall geworden bin, wo ich von intermetallischen Verbindungen gar nichts gehalten habe.“²⁹⁰

Welchem Halbleitermaterial gehört die Zukunft? (ca. 1957)

Im Jahre 1950 hatte sich das Germanium als das hauptsächlich beachtete Halbleitermaterial international durchgesetzt, da es sowohl günstige physikalische als auch technologische Eigenschaften aufwies und die ersten Transistoren auf Germaniumbasis hergestellt werden konnten. Teilweise wurde in deutschen Fachzeitschriften die Überzeugung geäußert, daß „die Überlegenheit des Germaniums“ schon erwiesen sei und man „in neuester Zeit nur noch mit diesem Kristall“ arbeiten würde.²⁹¹

So kamen dann auch die ersten industriell gefertigten Germaniumdioden und -transistoren Anfang der 1950er Jahre auf den Markt und demonstrierten trotz einiger anfänglicher Schwierigkeiten die großen Möglichkeiten der Halbleitertechnik. Bei der Produktion war zu diesem Zeitpunkt sowohl in den großen Firmen als auch bei kleinen Diodenherstellern das Germanium das Halbleitermaterial der Wahl. Selbst von der Überlegenheit von Silizium grundsätzlich überzeugte Persönlichkeiten wie Karl Seiler beschäftigten sich von 1948 bis ca. 1952 vornehmlich mit Germanium.

Doch seit im Jahr 1950 auf einer Konferenz in Reading (England) auch Bleisulfid-Transistoren demonstriert worden waren, war klar, daß sich auch andere Materialien für Halbleiteranwendungen eigneten. Durch die theoretischen und experimentellen Untersuchungen Welkers gelang es, eine ganze Materialklasse als Halbleiter zu klassifizieren, die möglicherweise technisch interessante Eigenschaften haben würden.

²⁸⁷ Übertragung (3. August 1965), Aktenbestand Geschäftsführung Intermetall.

²⁸⁸ Gleichzeitig übernahm die ITT auch die Halbleiteraktivitäten der "Standard Elektrik Lorenz AG" (SEL) in Nürnberg. Auf die weitere Entwicklung von *Intermetall* kann hier nicht eingegangen werden.

²⁸⁹ Seiler, *Physik und Technik*, 1964, S. 3

Die RWTH Aachen hat überzählige Exemplare erst 1997 aus der Lehrbuchsammlung ausgesondert.

²⁹⁰ Seiler-Interview 1982, Band 1, S. 2.

²⁹¹ Büll, *Kristalldioden*, 1950.

Besonders eine große Bandlücke bei niedrigen Schmelzpunkten versprach, technische Beherrschbarkeit bei der Herstellung mit Einsatzmöglichkeiten bei hohen Temperaturen zu vereinbaren. Die teilweise extrem hohen Elektronenbeweglichkeiten ermöglichten weitere bisher unmögliche Anwendungen. Die Erwartungen an diese neuen Halbleiter waren hoch.

Nach Ansicht der Firmenleitung der *Siemens-Schuckertwerke* sollten III-V-Verbindungen baldmöglichst für Leistungsanwendungen bereitstehen und dann auch eingesetzt werden. Erste Experimente in Pretzfeld brachten 1953 aber nicht den gewünschten Erfolg. Statt dessen wurden in Pretzfeld Forschungen an Silizium aufgenommen, die damals allerdings als riskant eingeschätzt wurden, da keineswegs klar war, welches Halbleitermaterial sich für Leistungsanwendungen durchsetzen würde.

Bei *Intermetall* wurde mit ähnlich negativem Ergebnis auch die Einsatzmöglichkeit von III-V-Halbleitern in Hochfrequenzdioden erforscht und getestet. Doch die Möglichkeit, Ersatzstoffe für das teure und seltene Germanium zu finden, die sowohl billiger als auch besser geeignet wären, übte auch für die praktischen Anwender weiterhin eine große Faszination aus. In einer Fachzeitschrift hieß es 1954 zu diesem Thema:

„Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Grundlagenforschung zur Schaffung neuer Halbleiter bereits erheblich vorwärtsgekommen ist und man in späterer Zeit damit rechnen kann, Stoffe zu erhalten, die neben den elektrischen Vorteilen den Vorzug haben, sich leichter verarbeiten zu lassen und billiger zu sein.“²⁹²

Silizium wurde wegen seiner ungünstigen technologischen Eigenschaften in den Jahren bis 1954 national und international nur von wenigen beachtet, da die Einschätzung vorherrschte, daß es mindestens genau so schwierig zu bearbeiten sein würde, wie die III-V-Halbleiter. Im selben Jahr wurde aber nicht nur der erste Siliziumtransistor in den USA vorgestellt, sondern es wurden auch neue Verfahren zur Reinstdarstellung von Silizium eingeführt. Diese ermöglichten es bald, Silizium so schnell und einfach wie Germanium zu verarbeiten und daraus Bauteile herzustellen, die die spezifischen Vorteile des Siliziums nutzten.

Der Siegeszug von Silizium in Deutschland begann damit, daß die *Siemens-Schuckertwerke* 1956 einen störungsfreien Siliziumleistungsgleichrichter vorstellten und *Intermetall* im gleichen Jahr den ersten deutschen Siliziumtransistor auf den Markt brachte. Zwei Jahre später urteilte Spenke über Siliziumgleichrichter für Leistungsanwendungen im Vergleich zu anderen Materialien, insbesondere Verbindungshalbleitern:

„Vorläufig ist also diese schwierige Entwicklung von Galliumarsenid- und Siliziumkarbid-Gleichrichtern ein ausgesprochenes Sondergebiet, das für die allgemeine Elektrotechnik kaum Bedeutung hat. Es ist auch nicht sehr wahrscheinlich, daß sich daran etwas ändern wird. ...

Sperrverluste stören aber bei Silizium schon nicht mehr, wenn man bei Betriebstemperaturen von unter 200 °C bleibt. Der Übergang zu Betriebstemperaturen von 350°C [GaAs] oder 500 °C [SiC] würde ... nur die Zahl der benötigten Elemente gegenüber dem Silizium noch einmal um einen Faktor von 0,75 bis 0,5 herabsetzen.“²⁹³

Aber auch im Bereich der Transistoren und Dioden konnten sich keine anderen Materialien als Germanium und Silizium etablieren. Während Germanium noch bis in die 1960er Jahre mit dem Silizium konkurrierte, kam mit der weltweiten Verbreitung der Integrierten Schaltkreise der endgültige Durchbruch des Siliziums als vorherrschendem Halbleitermaterial. Alle anderen Materialien spielten in den folgenden Jahren zunächst nur noch in Spezialanwendungen eine gewisse Rolle.²⁹⁴

²⁹² Büll, *Entwicklung neuer Halbleiter*, 1954.

²⁹³ Spenke, *Leistungsgleichrichter*, 1958, S. 874-875.

²⁹⁴ Heute, 1999, zählt auch die Produktion von III-V-Halbleitern zum „Big Business“. Beispiele hierfür sind Magnetfeld sensoren aus (InSb/GaAs) und die Optoelektronik (LED und Laser).

Epilog

Mitte der 1950er Jahre hatte die deutsche Halbleiterindustrie trotz schwieriger Startbedingungen den Anschluß an die internationale Konkurrenz geschafft. *Siemens* erreichte mit der Reinstdarstellung von Silizium eine weltweit führende Position und brachte 1956 die ersten Siliziumleistungsgleichrichter auf den Markt. Im gleichen Jahr konnte *Intermetall* mit nur zwei Jahren Abstand zu *Texas Instruments* und damit als eines der ersten Unternehmen der Welt Siliziumtransistoren anbieten. Die deutsche Halbleiterindustrie schien sich fest etabliert zu haben, als sich zur Mitte der 1950er Jahre langsam das Silizium als das kommerziell wichtigste Halbleitermaterial gegen Germanium durchsetzte. Die ebenfalls in Deutschland unter internationaler Anerkennung erforschten neuen III-V-Halbleiter konnten zwar zu keiner Zeit auf dem Gebiet der Anwendung in Dioden, Transistoren und Leistungsgleichrichtern mit den Elementhalbleitern konkurrieren, doch fanden die Forschungsergebnisse als herausragende Leistungen deutscher Industrieforschung international große Anerkennung.

Nur etwas mehr als ein Jahrzehnt später, im Jahre 1970, beurteilten führende Persönlichkeiten auf dem Gebiet der Halbleitertechnik die Situation der deutschen Halbleiterindustrie als fast hoffnungslos, sprachen von „zehn Jahren Rückstand“ auf die Amerikaner, beklagten die Schwerfälligkeit der deutschen Industrie und den lange Zeit fehlenden Markt für Halbleiterprodukte.¹

Was war passiert?

Zwischenzeitlich war der Integrierte Schaltkreis erfunden worden und hatte die Halbleitertechnik während der 1960er Jahre revolutioniert. Waren vorher lediglich einzelne Bauelemente (Dioden, Transistoren) durch die unterschiedlichen Methoden der Halbleitertechnik hergestellt und anschließend zu Schaltungen verdrahtet worden, wurden nun elektrische Schaltungen direkt aus einem Material monolithisch hergestellt. Diese Idee war 1958/59 unabhängig von Jack Kilby bei *Texas Instruments* und Robert Noyce bei *Fairchild Semiconductors* entwickelt worden. Die ersten Realisierungen in den Labors wurden sowohl mit Germanium (Kilby) als auch mit Silizium (Noyce) erprobt. Der Durchbruch zur Massenproduktion von Integrierten Schaltkreisen kam mit der Kombination der Idee des Integrierten Schaltkreises mit dem Planarverfahren nach Jean Hoerni und der damit verbundenen Festlegung auf Silizium.²

Das Planarverfahren hatte seinen Ursprung im Bedürfnis, das Halbleitermaterial von Transistoren und Dioden gegen Umwelteinflüsse zu schützen. Das geschah Mitte der 1950er Jahre sowohl bei Silizium als auch bei Germanium üblicherweise durch Lackierung mit unterschiedlichen hochwertigen Lacken, durch Glasverkapselungen und andere aufwendige Methoden. Keine der Methoden war gleichzeitig billig und auf lange Jahre hin zuverlässig. Eine mit diesem Problem befaßte und nach Lösungsansätzen suchende Arbeitsgruppe der Bell Laboratorien fand 1957, daß sich auf Silizium thermisch eine dünne Schicht von Siliziumdioxid aufwachsen ließ, die am Silizium fest haftet und zu den besten bekannten elektrischen Isolatoren gehörte. Dadurch wurde es zunächst möglich, Siliziumtransistoren in einem einfachen und billigen Verfahren von Umwelteinflüssen abzukapseln. Wenig später wurde dieser Prozeß angewandt, um massenweise Integrierte Schaltkreise herzustellen. Dies stellt in einem gewissen Sinn den eigentlichen Ausgangspunkt der Mikroelektronik dar, die unsere Gesellschaft in den letzten Jahrzehnten so tiefgreifend verändert hat.³

¹ Siebertz, *Bericht zur Halbleiterentwicklung*, 1970, S. 7, SAA 35-78 Lc 403, S. 7-8.

² Die Erfindung des Integrierten Schaltkreises beschreiben Kilby, *Invention*, 1976; Wolff, *Integrated Circuit*, 1976; Kirpal, *Siliziumzeit*, 1993 und Morris, *Semiconductor Industry*, 1990, S. 45-51.

³ Seidenberg, *Germanium to Silicium*, 1997, S. 54-59; Kaiser, *Mikroelektronik*, 1996.

Die Erfindung des Integrierten Schaltkreises in den 1960er Jahren markiert aber auch noch einen weiteren tiefgreifenden Umbruch in der Halbleitertechnik. Die anfänglich dominierenden und auf grundlegende physikalische Materialeigenschaften konzentrierten Physiker wurden abgelöst durch auf die Produktionsverfahren orientierte Ingenieure (und Physiker), die ihre Erkenntnisse nicht mehr in den traditionellen wissenschaftlichen Zeitschriften der Physik veröffentlichten, sondern auf Pressekonferenzen bekannt gaben und die technischen Details zunächst in Patentstreitigkeiten diskutierten. Im Gegensatz dazu waren die grundlegenden Arbeiten zum Transistor, zu den Eigenschaften von Germanium und Silizium und sogar zum tiegelfreien Zonenziehverfahren in Zeitschriften wie *The Physical Review* und *Zeitschrift für Naturforschung* an die Öffentlichkeit gelangt.

Für ihre Halbleiterforschungen und die Entdeckung und Erklärung des Transistoreffekts waren John Bardeen, Walter Brattain und William Shockley 1956 sogar mit dem Physiknobelpreis ausgezeichnet worden, da ihre Arbeiten grundlegend neue Erkenntnisse über Leitungsvorgänge in festen Körpern erbracht hatten. Im Gegensatz dazu stellte die Erfindung des Integrierten Schaltkreises eine Konstruktionsleistung dar, die auf die Funktion des Schaltkreises und nicht auf die physikalischen Eigenschaften des Bauteils ausgerichtet war. Sie war verbunden mit einer produktionstechnischen Innovation - dem Planarverfahren, das sich direkt wirtschaftlich umsetzen ließ.

Die Festlegung auf das Planarverfahren war auch eine Festlegung auf das Halbleitermaterial Silizium, die hauptsächlich durch die Möglichkeit zur Herstellung einer gut isolierenden Oxidschicht auf der Siliziumoberfläche motiviert war. Die in den 1940er und 1950er Jahren diskutierten grundlegenden Materialeigenschaften wie Größe der Bandlücke, Elektronenbeweglichkeit und Höhe des Schmelzpunktes waren in den 1960er Jahren zu wissenschaftlich gut bekannten Materialparametern geworden, die technisch beherrscht wurden. Die Entscheidung für Silizium war daher nicht mehr physikalisch, sondern produktionstechnisch bestimmt und wurde zur Grundlage der Mikroelektronik.

Die wissenschaftlichen Voraussetzungen zur Etablierung der Mikroelektronik bildeten erstens die Klassifizierung der Halbleiter als eigenständige Materialklasse zwischen Metallen und Isolatoren zu Beginn der 1930er Jahre und die Durchsetzung der dazugehörigen Erkenntnis, welche Materialien als Halbleiter zu bezeichnen seien. Zweitens waren die theoretischen Fortschritte bedeutend, die im Zusammenhang mit der Transistorerfindung eindringlich auf die Unzulänglichkeiten der allzu vereinfachenden Schottky-Theorie hinwiesen und zu Erkenntnissen über die Struktur der pn-Übergänge führten. Als dritte wichtige physikalisch-technische Voraussetzung zur Produktion von Integrierten Schaltkreisen sind die Kristallzieh- und Materialreinigungsverfahren zu nennen, die im Laufe der 1950er Jahre zu einer technischen Beherrschung des Materials Silizium geführt haben.

Alle drei genannten physikalisch-technischen Vorbedingungen waren in der Bundesrepublik Deutschland, den USA und Japan gleichermaßen gegeben. Bei der Reinstdarstellung von Silizium hatten die *Siemens-Schuckertwerke* Ende der 1950er Jahre sogar eine internationale Führungsposition inne.. Die Produktion und der Verkauf von Integrierten Schaltkreisen setzte aber in der BRD auf niedrigem Niveau und viele Jahre später als in den USA ein.

Dies wird häufig damit erklärt, daß die Erfindung des Integrierten Schaltkreises besonders in der sich in den 1950er und 1960er Jahre entwickelnden Computerindustrie auf fruchtbaren Boden gefallen sei. Dort war die Anzahl der benötigten Einzelbauteile (Transistoren und Dioden) extrem angestiegen, so daß die Integration von mehreren Bauteilen in einen Chip eine Lösung für der Produktion von zuverlässigen

Computern mit vielen logischen Funktionen darstellte.⁴ Dies war zunächst für die amerikanische Rüstungs- und später auch Raumfahrtindustrie von größtem Interesse. So wurden in den USA zwischen 1959 und 1965 große finanzielle Mittel für Forschung und Entwicklung von Integrierten Schaltkreisen von staatlicher Seite gewährt. Andererseits investierten die amerikanischen Halbleiterhersteller ebenfalls sehr stark in die Entwicklung von Integrierten Schaltkreisen, da sie sich eine schnelle Amortisation ihrer Investitionen durch das florierende Rüstungsgeschäft erwarteten.⁵

Warum sich aber die japanische Halbleiterindustrie nach dem Aufkommen der Integrierten Schaltkreise so anders als die bundesdeutsche entwickelte, läßt sich mit diesem Argument nicht erklären. Hierzu könnten zum Beispiel die Mentalitäten der großen bundesdeutschen Elektronikkonzerne näher untersucht werden. So hat schon der Leiter der Münchner Halbleiterfabrik von *Siemens & Halske*, Karl Siebertz, in einem im August 1970 abgegebenen Bericht zur Halbleiterentwicklung bei *Siemens* auf die Hemmnisse in der bürokratischen Struktur der Forschungen bei *Siemens* hingewiesen, die in den 1960er Jahren keine gezielte Forschung an Integrierten Schaltkreisen ermöglicht hatten.⁶

Siebertz erklärte diese Situation mit einer „charakteristische Schwäche“ von *Siemens*, nämlich daß „immer wieder schwergefallen [ist], neben den gut eingefahrenen, erfolgreichen Gebieten neue Aufgaben frühzeitig und entschlossen in die Massenfertigung überzuführen.“⁷ Noch wenige Jahre zuvor war es allerdings als eine Stärke von *Siemens* angesehen worden, nur ausgereifte Techniken auf den Markt zu bringen und über Jahre hinweg Produkte mit gleichbleibenden Eigenschaften und hoher Qualität anzubieten. Dies galt insbesondere für die Röhrenproduktion vor dem Krieg und in den ersten Nachkriegsjahren, war aber auch beim Erfolgsprodukt Germanium-Mesa-Transistor zu Beginn der 1960er Jahre noch so. Hier wurde in der Produktion hochentwickelte Feinmechanik eingesetzt und über Jahre hinaus das gleiche, hochwertige Produkt erfolgreich hergestellt und vermarktet. Damit war der Germanium-Mesa-Transistor „ein gewisser ruhender Pol“ in der für die angestrebte Massenproduktion so problematischen großen Vielfalt der unterschiedlichsten Transistor-Typen. Diese Erfahrungen ließen *Siemens* auch auf dem Halbleitergebiet lange an erfolgreichen Produkten und Technologien festhalten. Der momentane Erfolg mit einer Technologie machte blind für die rasch einsetzende Weiterentwicklung. Weiterhin versuchte man mit ausgereiften Technologien statt mit hohem Innovationstempo aufzuwarten.⁸

Warum aber auch innovative Firmen wie *Intermetall*, die über ihre Zugehörigkeit zur *Clevite Corporation* Zugang zum amerikanischen Markt hatten, bis 1966 lediglich an einem Integrierten Schaltkreis forschten und erst Ende der 1960er Jahre einen ersten Integrierten Schaltkreis auf den Markt brachten, ist noch nicht näher untersucht.

Thema dieser Arbeit war es, die „Anfänge der Halbleiterforschung und -entwicklung“ darzustellen, die mit der Etablierung der wesentlichen Erkenntnisse um die grundlegenden Materialeigenschaften von Halbleitern gegen Ende der 1950er Jahre als abgeschlossen angesehen werden können. Die erste Generation der deutschen Halb-

⁴ Kaiser, *Mikroelektronik*, 1996.

⁵ Scholz, *Technologie und Innovation*, 1974, S. 111-135; Halfmann, *Entstehung der Mikroelektronik*, 1984, S. 167-205; Morris, *Semiconductor Industry*, 1990, S. 72-94.

⁶ Siebertz, *Bericht zur Halbleiterentwicklung*, 1970, S. 7, SAA 35-78 Lc 403.

⁷ Ebenda, S. 8, SAA 35-78 Lc 403.

⁸ Fickers, *Transistor*, 1998, insb. S. 64-80.

Die bei *Siemens* eingesetzte Verschiebetechnik in der Produktion der Mesa-Transistoren konnte von keinem der Konkurrenten auf dem Halbleitergebiet (z.B. *Texas Instruments* oder *Motorola*) kopiert werden, weil sie die „dazugehörigen Mechaniker nicht haben.“ (Siebertz, *Bericht zur Halbleiterentwicklung*, 1970, S. 5, SAA 35-78 Lc 403).

Zur Produktionstechnik siehe detaillierter das Rebstock-Interview, 1995, in Fickers, *Transistor*, 1998, S. 106-109.

leiterpioniere hatte sich mit der Erforschung dieser Eigenschaften etabliert und war danach langsam von wissenschaftlichen in administrative Tätigkeiten gewechselt.

Eine gewisse Ausnahme stellt vielleicht Herbert Mataré dar, der bereits Ende 1953 in die USA gegangen war, dort in immer wieder anderen Labors beratend und forschend tätig war und noch in den 1980er und 1990er Jahren rege zum Thema Korngrenzen in Kristallen und erneuerbaren Energien publizierte. Mataré lebt heute in Malibu (Kalifornien) und in der Nähe seiner alten Heimat im Rheinland.

Eberhard Spenke, der ja schon in den 1950er Jahren über seine Arbeitsbelastung durch administrative Tätigkeiten geklagt hatte, war zu Beginn der 1960er Jahre zum Abteilungsdirektor der *Siemens-Schuckertwerke* geworden und hatte sich ab 1969 an der Gründung des Bereichs „Grundlagenentwicklung“ im Geschäftsbereich „Halbleiter“ der *Siemens AG* beteiligt. Nach seiner Pensionierung stand er der *Siemens AG* noch lange Jahre als Berater zur Verfügung, bevor er 1992 im Alter von knapp 87 Jahren verstarb.

Karl Seiler hatte sich schon mit dem Wechsel zu *Intermetall* 1956 aus der konkreten Entwicklungstätigkeit verabschiedet, aber noch weiter Lehrveranstaltungen an der TH Stuttgart durchgeführt und sich über die Betreuung von Examens- und Doktorarbeiten an der aktuellen Forschung beteiligt. Als er 1965 in die Geschäftsführung von *Heraeus* nach Hanau wechselte und die Leitung der dortigen Quarzschmelze übernahm, hat er sich von der Lehrtätigkeit zurückgezogen. Auch er stand nach seiner Pensionierung im Jahre 1973 *Heraeus* über Beraterverträge zur Verfügung und starb 1991 in Freiburg.

Heinrich Welker hatte zu Beginn der 1960er Jahre die Leitung des Forschungslaboratoriums der *Siemens-Schuckertwerke* und später der *Siemens AG* übernommen und konnte so an den konkreten Forschungen nur noch geringen Anteil nehmen. In seinem Ruhestand ab 1977 hat er noch kurz als Präsident der *Deutschen Physikalischen Gesellschaft* gewirkt, bevor er im Dezember 1981 überraschend verstarb.⁹

⁹ Als Präsident der Deutschen Physikalischen Gesellschaft setzte er sich 1978-1979 insbesondere für eine bessere Zusammenarbeit zwischen Physik und der damals neu entstehenden Informatik ein (Welker, *Neue Dimensionen*, 1978).

Literatur- und Quellenverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

AGR	Arbeitsgemeinschaft „Rotterdam“
AHQP	Archive for History of Quantum Physics, Mikrofilmsammlung, Deutsches Museum München
ASD	Arnold Sommerfeld Dokumente, Deutsches Museum, München
BA-BDC	Bundesarchiv Berlin, Unterlagen des ehemaligen Berlin Document Centers
BIOS	British Intelligence Objectives Sub-Committee
CFS	Compagnie des Freins et Signaux Westinghouse, Paris
CIOS	Combined Intelligence Objectives Sub-Committee
DBP	Deutsches Bundes Patent
DM	Deutsches Museum, München
DTM	Deutsches Technikmuseum, Berlin
DVG	Drahtlostelegraphische und luftelektrische Versuchsanstalt Gräfelfing
ESD	Eberhard Spenke Dokumente, Deutsches Museum, München (a) gibt die alte und (n) die seit Sommer 1998 gültige neue Nummerierung der Archivboxen an. Im Deutschen Museum liegt eine Liste vor, mit der die Nummern ineinander übersetzt werden können.)
FFO	Flugfunk-Forschungsinstitut Oberpfaffenhofen
FIAT	Field Information Agencies Technical
GEMA	Gesellschaft für elektro-akustische und mechanische Apparate
HMD	Herbert Franz Mataré Dokumente, Deutsches Museum, München
HWD	Heinrich Welker Dokumente, Deutsches Museum, München
IMC	Ordener „Intermetall-Chronik“, Micronas-Intermetall, Freiburg
JBD	John Bardeen Dokumente, Universitätsarchiv, University of Illinois, Urbana-Champaign, Illinois
JIOA	Joint Intelligence Objectives Agency
LMU	Ludwig-Maximilian-Universität München, Archiv
S & H	Siemens & Halske
SAA	Siemens-Akten-Archiv, München
SSW	Siemens-Schuckertwerke
WHL	Werkstoffhauptlaboratorium, Siemens & Halske, Karlsruhe
WSD	Walter Schottky Dokumente, Deutsches Museum, München

Unveröffentlichte Quellen

Archivbestände

Archiv des Deutschen Museums (DM), München

Heinrich Welker Dokumente (HWD), NL 139; Eberhard Spenke Dokumente (ESD), NL 147; Walter Schottky Dokumente (WSD), NL 100; Herbert Franz Mataré Dokumente (HMD), noch unbearbeitet im Deutschen Museum.

Interviews, die im Rahmen des Internationalen Projekts zur Geschichte der Festkörperphysik von den deutschen Teilnehmern aufgezeichnet wurden, und Korrespondenz dazu.

Archive der RWTH Aachen und der Universitäten München und Stuttgart

Materialien zum Studienverlauf und zu Berufungen von Mataré, Seiler, Welker und Klaus Clusius.

Bundesarchiv Berlin, Unterlagen des *Berlin Document Centers* (BA-BDC)

Personalunterlagen zu Seiler und Welker.

Intermetall-Micronas, Freiburg

Allgemeine noch erhaltene Firmenunterlagen und Interviews, die vor wenigen Jahren mit Beschäftigten aus der Frühzeit der Firma geführt wurden.

Public Record Office und Imperial War Museum, London

Unterlagen zu BIOS und CIOS sowie einige BIOS- und CIOS-Berichte, die in Deutschland nicht nachweisbar waren.

Siemens-Akten-Archiv (SAA), Siemens-Forum, München

Insbesondere SAA 35-46 / Ld 954; SAA 35-46 / Li 32; SAA 68 / Li 385 zum Laboratorium für Halbleiter in Pretzfeld und SAA 68/ Li 98; SAA 35-46 / Lc 375; SAA 12/Lo 496 zum zentralen Forschungslaboratorium in Erlangen.

Telefunken-AEG-Archiv, Deutsches Technikmuseum, Berlin

Insbesondere die Notizbücher von Wilhelm Runge. Die Suche nach Dokumenten zur Detektorproduktion während des Zweiten Weltkriegs verlief ergebnislos.

Unveröffentlichte Manuskripte

Bosch, Berthold (1994): Der Werdegang des Transistors 1929 -1994: Bekanntes und weniger Bekanntes. Vortrag aus Anlaß des 65. Geburtstages von Magnifizienz Prof. Dr. Eberhart Köhler, 17. Nov. 1994, *Unveröffentlichtes Manuskript*

Fischer, Hellmuth; Pfaffenberger, Joachim; Spenke, Eberhard; Siebertz, Karl (1958): Historische Übersicht über die Silizium-Entwicklung im Hause Siemens. *Unveröffentlichtes Manuskript, ca. 1958, HWD 001*

Gaudlitz, Dr. (1962): Historischer Rückblick auf die Anfänge der Halbleiterentwicklung bei Siemens & Halske bis zum Sommer 1950 (Teil 1). *Unveröffentlichtes Manuskript, SAA 35-78 Lc 403*

Gaudlitz, Dr. (1963): Historischer Rückblick auf die Anfänge der Halbleiterentwicklung bei Siemens & Halske (Teil 2, 1950-1953). *Unveröffentlichtes Manuskript, SAA 35-78 Lc 403*

Mataré, Herbert F. (1997): The lesser known history of the crystal amplifier. *Unveröffentlichtes Manuskript*

Poganski, S. (1984): Geschichtlicher Überblick über die Entwicklungs- und Forschungsarbeiten an Selengleichrichtern bei der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft (AEG). *Unveröffentlichtes Manuskript, ESD 272(a)*

Regener, Erich (1950): Memorandum betreffs einer Neuordnung des Lehrgebietes der Physik an der Technischen Hochschule Stuttgart. *Unveröffentlichtes Manuskript, Universitätsarchiv Stuttgart, Nachlaß Erwin Fues*

Schottky, Walter (1953): Entwurf Schottky für eine Einteilung und Abgrenzung der Themen des Halbleiterrausschusses der Deutschen Physikalischen Gesellschaften. *Unveröffentlichtes Manuskript*

- Siebertz, Karl (1970): Bericht zur Halbleiterentwicklung bei Siemens (ca.1952-1970). *Unveröffentlichtes Manuskript, SAA 35-78 Lc 403*
- Spandöck, Friedrich (1962): Die akustischen Laboratorien von Siemens und Halske um das Kriegsende herum. *Unveröffentlichtes Manuskript, SAA 12 / Lg 833*
- Spenke, Eberhard (1949): Die Wirkungsweise des Transistors (Referat über die amerikanischen Arbeiten). *Unveröffentlichtes Manuskript, ca. 1949, ESD 410(a)*
- Spenke, Eberhard (1951): Neuere Ergebnisse in der Physik der Kristallgleichrichter und Transistoren. *Unveröffentlichtes Manuskript, ca. 1951, ESD 410(a)*
- Spenke, Eberhard (1982): Beitrag zur Frühgeschichte der Halbleiter-Elektronik und der Kupferoxydul- und der Selen-Gleichrichterentwicklung vornehmlich im Hause Siemens. *Unveröffentlichtes Manuskript, ESD 064(a)*
- Stasek, Robert (1993): Erinnerungen an die Intermetall-Frühzeit. *Unveröffentlichtes Manuskript, Ordner Intermetall-Chronik, Micronas-Intermetall*
- Trendelenburg, Ferdinand (1952): Aufbau und Ziele des Allgemeinen Laboratoriums. *Unveröffentlichtes Manuskript, SAA 35-46 / Lc 375*
- Tschermak, Manfred (1976): Wie Siemens zu Leistungshalbleiterelementen aus Silizium kam. *Unveröffentlichtes Manuskript, ESD 017(a)*
- Welker, Heinrich J. (1940): V. Absorption dünner supraleitender Schichten. *Unveröffentlichtes Manuskript, HWD 004*
- Welker, Heinrich J. (1940): Vorschlag von Versuchen an Supraleitern mit mm-Wellen zur Erzielung höchster Empfangsempfindlichkeiten. *Unveröffentlichtes Manuskript, HWD 004*
- Welker, Heinrich J. (1942): Detektor zu Gleichrichtung von elektromagnetischen Wellen, insbesondere Zentimeterwellen. *Unveröffentlichtes Manuskript, HWD 001*
- Welker, Heinrich J. (1942): Spitzendetektor-Anordnung. *Unveröffentlichtes Manuskript, ca. 1941/42, HWD 001*
- Welker, Heinrich J. (1943): Ergebnisse der Detektorforschung. *Unveröffentlichtes Manuskript, HWD 002*
- Welker, Heinrich J. (1943): Germanium als Detektormaterial. *Unveröffentlichtes Manuskript, HWD 002*
- Welker, Heinrich J. (1945): Beeinflussung und Steuerung von elektrischen Strömen in Halbleitern. *Unveröffentlichtes Manuskript, HWD 003*
- Welker, Heinrich J. (1945): Zur Steuerung von Elektronenströmen in einem Dreielektrodenkristall I. *Unveröffentlichtes Manuskript, HWD 003*
- Welker, Heinrich J. (1948): Es ist allgemein bekannt.... *Unveröffentlichtes Manuskript, HWD 003*
- Welker, Heinrich J.; Ringer, Walter (1946): Investigations about Ge-Detektoren (Manuskript für B.I.O.S.). *Unveröffentlichtes Manuskript, HWD 002*

Interviews

- Interview mit John Bardeen geführt durch Lillian Hoddeson, 1. Dez. 1977, Transkript in der *Oral History Collection* des American Institute of Physics, College Park, Maryland, USA
- Interview mit Herbert Knabe geführt durch Claus Reuber und Reinhard Preuß, 24. März 1992, Transkript im Ordner „Intermetall Chronik“, Micronas-Intermetall GmbH, Freiburg
- Interview mit Herbert Mataré geführt durch Kai Handel, 9. Februar 1998, abgedruckt hier im Anhang ab S. 239
- Interview mit Hans Rebstock geführt durch Andreas Fickers, 16. Februar 1995, abgedruckt in Fickers, Andreas (1998): Der Transistor als technisches und kulturelles Phänomen. Die Transistorisierung der Radio- und Fernsehempfänger in der deutschen Rundfunkindustrie 1955 bis 1965. Bassum: GNT - Verlag, S. 97-112
- Interview mit Walter Rollwagen geführt durch Jürgen Teichmann, Gisela Torkar, Helmut Schubert und Michael Eckert, 1. Oktober 1981, Archiv des Deutschen Museums, München
- Interview mit Walter Rollwagen geführt durch Jürgen Teichmann, Gisela Torkar, Helmut Schubert und Michael Eckert, 12. Januar 1982, Archiv des Deutschen Museums, München
- Interview mit Karl Seiler geführt durch Jürgen Teichmann und Ernest Braun, 2. Juni 1982, Archiv des Deutschen Museums, München
- Interview mit Heinrich Welker geführt durch Jürgen Teichmann, Gisela Torkar, und Michael Eckert, 4. Dezember 1981, Transkript im Archiv des Deutschen Museums, München

Patente

- Bardeen, John; Brattain, Walter H. (1948): Elektrisch steuerbares Schaltelement aus Halbleitermaterial. *Patent DBP 9 666 492, 21g, 11/02*
- Buehler, Ernest; Teal, Gordon K. (1952): Verfahren zur Herstellung eines Kristalls aus Halbleitermaterial. *Patent DBP 894 293, 21g, 11/02*
- Clusius, Klaus; Holz, Erich; Welker, Heinrich J. (1942): Elektrische Gleichrichteranordnung mit Germanium als Halbleiter und Verfahren zur Herstellung von Germanium für eine solche Gleichrichteranordnung. *Patent DBP 966 387, 21g, 11/02*
- Emeis, Reimer (1958): Vorrichtung zum tiegelfreien Zonenschmelzen von Halbleiterstäben. *Patent DBP 1 151 669, 40d, 1/30*
- Heil, Oskar (1934): Non-contact-making relays (Abstract). *Britisches Patent 439,457*
- Heywang, Walter (1958): Anordnung zum Verstärken oder Erzeugen sehr hochfrequenter Strahlung nach dem Maserprinzip. *Patent DBP 1 248 826, 21g, 51/00*
- Hülsemeyer, Christian (1904): Verfahren, um entfernte metallische Gegenstände mittels elektrischer Wellen einem Beobachter zu melden. *Deutsches Patent 165546, 74d*
- Lilienfeld, Julius Edgar (1926): Method and Apparatus for Controlling Electric Currents (Abstract). *US Patent 1,745,175*
- Mataré, Herbert F. (1948): Push-Pull Converter of the Crystal Type for Ultra-Short Waves. *US Patent 2,552,052*
- Mataré, Herbert F.; Welker, Heinrich J. (1949): Crystal device for controlling electric currents by means of a solid Semiconductor. *US Patent 2,673,948*
- Noyce, Robert N. (1959): Semiconductor device-and-lead Structure. *US Patent 2,981,877*
- Reuschel, Konrad; Emeis, Reimer (1954): Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung eines festen Körpers aus kristallinem Stoff, insbesondere eines Halbleiterkörpers. *Patent DBP 1 068 024, 40d, 1/30*
- Seiler, Karl (1949): Verfahren zur Herstellung von Flächengleichrichtern und Kristallverstärkerschichten aus Elementen. *Patent DBP 883 784, 21g, 11/02*
- Seiler, Karl (1953): Verfahren zur Reinigung und/oder Abtragung von Halbleitermaterial, insbesondere von Germanium- und Siliziumsubstanz. *Patent DBP 966876, 21g, 11/02*
- Shockley, William B. (1948): Circuit Element utilizing Semiconductor Material (Abstract). *US Patent 2,569,347*
- Spenke, Eberhard; Welker, Heinrich J. (1960): Verfahren zur Herstellung einkristalliner flacher Halbleiterkörper. *Patent DBP 1 197 058, 12c*
- Telefunken, Gesellschaft für drahtlose Telegraphie; Braun, Ferdinand (1906): Wellenempfindliche Kontaktstelle. *Deutsches Patent 178871, 21a*
- Telefunken, Gesellschaft für drahtlose Telegraphie; Mataré, Herbert F. (1944): Kristalldetektor für hochfrequente Schwingungen. *Schweizer Patent 243490*
- Theuerer, Henry Charles (1953): Verfahren und Vorrichtung zum Kristallzüchten durch tiegellosoes Zonenschmelzen. *Patent DBP 1 014 332, 40d, 1/30*
- Welker, Heinrich J. (1944): Detektor zu Gleichrichtung elektromagnetischer Wellen, insbesondere Ultra-Kurzwellen. *Patent DBP 889 656, 21g, 11/02*
- Welker, Heinrich J. (1945): Halbleiteranordnung zur kapazitiven Steuerung von Strömen in einem Halbleiterkristall. *Patent DBP 980 084, 21g, 11/02*
- Welker, Heinrich J. (1951): Elektrisches Halbleitergerät. *Patent DBP 970420, 21g, 11/02*
- Welker, Heinrich J. (1952): Semiconductor Devices and Methods of their Manufacture. *US Patent 2,798,989*
- Welker, Heinrich J. (1952): Verfahren zur Herstellung eines Halbleiterkristalls mit Zonen verschiedenen Leitungstyps bei A III - B V - Verbindungen. *Patent DBP 976 709, 21g, 11/02*
- Welker, Heinrich J. (1952): Verfahren zur Herstellung eines Halbleiterkristalls aus einer A III - B V - Verbindung mit Zonen verschiedenen Leitungstyps. *Patent DBP 976 791, 12c, 2*
- Welker, Heinrich J.; Weiß, Herbert (1965): Leistungs-Heißleiter. *Patent DBP 1 146 171, 21c, 54/05*
- Westinghouse, Compagnie des Freins et Signaux; Welker, Heinrich J.; Mataré, Herbert F. (1948): Nouveau système cristallin à plusieurs électrodes réalisant des effets de relais électroniques. *Französisches Patent 1.010.427*

Veröffentlichte Quellen und Literatur

- Abelshausen, Werner (1983): Wirtschaftsgeschichte der Bundesrepublik Deutschland 1945 - 1980 (Neue Historische Bibliothek). Frankfurt: Suhrkamp
- Abelshausen, Werner (1986): Neuanfang oder Wiederaufbau? Zu den wirtschaftlichen und sozialen Ausgangsbedingungen der westlichen Industrie nach dem Zweiten Weltkrieg. *Technikgeschichte* 53, S. 261-276
- Adcock, W.A.; Jones, M.E.; Thornhill, J.W.; Jackson, E.D. (1954): Silicon Transistor. *Proceedings of the I.R.E.* 42, S. 1192
- Albrecht, Helmuth (1993): "Max Planck: Mein Besuch bei Adolf Hitler" - Anmerkungen zum Wert einer historischen Quelle. In: Helmuth Albrecht (Hg.)(1993): Naturwissenschaft und Technik in der Geschichte. 25 Jahre Lehrstuhl für Geschichte der Naturwissenschaft und Technik am Historischen Institut der Universität Stuttgart. Stuttgart: GNT-Verlag, S. 41-63
- Arbeitsgemeinschaft Rotterdam, AGR (1953): Sitzungsprotokolle der Arbeitsgemeinschaft Rotterdam. Herausgegeben von Leo Brandt. Düsseldorf: Als Manuskript gedruckt
- Ashcroft, Neil W.; Mermin, N. David (1976): Solid State Physics. Philadelphia: Saunders Company
- Bähr, Johannes (1997): Substanzverluste, Wiederaufbau und Strukturveränderungen in der deutschen Elektroindustrie 1945-1955. In: Wessel, Horst A. (Hg.)(1997): Demontage - Enteignung - Wiederaufbau (Teil 1. Die elektrotechnische Industrie). Berlin, Offenbach: VDE-Verlag, S. 61-81
- Banbury, P.C.; Henisch, H. K. (1950): On the Frequency Response of PbS Transistors. *Proceedings of the Physical Society B* LXIII, S. 540
- Bardeen, John (1936): Theory of the Work Function II. The Surface Double Layer. *Physical Review* 49, S. 653-663
- Bardeen, John (1947): Surface States and Rectification at a Metal Semi-Conductor Contact. *Physical Review* 71, S. 717-727
- Bardeen, John (1957): Halbleiterforschung auf dem Wege zum Spitzenkontakttransistor. *Physikalische Blätter* 13, S. 436-456
- Bardeen, John (1983): Die Frühzeit des Transistors: 1946 bis 1955. *Physik in unserer Zeit* 14:6, S. 187-192
- Bardeen, John; Brattain, Walter H. (1948): The Transistor. A Semi-Conductor Triode. *Physical Review* 74, S. 230-231
- Bardeen, John; Brattain, Walter H. (1949): Physical Principles Involved in Transistor Action. *Physical Review* 75, S. 1208-1225
- Barkhausen, Heinrich (1960): Lehrbuch der Elektronenröhren und ihrer technischen Anwendungen. 8. Auflage. 4 Bände (1921). Leipzig: S. Hirzel Verlag
- Barkhausen, Heinrich; Kurz, K. (1920): Die kürzesten, mit Vakuumröhren herstellbaren Wellen. *Physikalische Zeitschrift*, S. 1-6
- Becker, Richard (1933): Theorie der Elektrizität. Band II: Elektronentheorie. 6. Auflage. Leipzig, Berlin: Teubner
- Bertolotti, Mario (1983): Masers and Lasers. An Historical Approach. Bristol/Philadelphia: Adam Hilger
- Beyerchen, Alan (1977): Scientists under Hitler. Politics and the Physics Community in the Third Reich. New Haven, London: Yale University Press
- Biondi, F.J. (1958): Transistor Technology (Volume III). Princeton, Toronto, London u.a.: D. Van Nostrand Company
- Blank, K.; Geist, D.; Seiler, Karl (1954): Über den Einfluß spezieller Gitterstörungen auf die elektrischen Eigenschaften von Germanium. *Zeitschrift für Naturforschung* 9a: 6, S. 515-520
- Bloch, Felix (1928): Über die Quantenmechanik der Elektronen in Kristallgittern. *Zeitschrift für Physik* 52, S. 555-600
- Bloch, Felix (1931): Wellenmechanische Diskussion der Leitungs- und Photoeffekte. *Physikalische Zeitschrift* 1931, S. 881-886
- Böning, Walter (1978) (Hg.): Elektrische Energietechnik. Band 2 Geräte (Hütte. Taschenbücher der Technik). Berlin, Heidelberg, New York: Springer
- Born, Max (1915): Dynamik der Kristallgitter. Leipzig, Berlin: Teubner

- Bosch, Berthold (1991): Zum Gedenken an Dr. phil. Dr.-Ing. E.h. Karl Steimel. *Funkgeschichte* 77, S. 5-10
- Bosch, Berthold (1997): Ein Revolutionär wird 50: Happy Birthday, Transistor! *CQ DL* 68:12, S. 947-951
- Bosch, Berthold (1998): A very early RADAR pioneer: Christian Hülsmeier in 1904. *Radio Bygones* 54, S. 2-4
- Bösenberg, W. (1955): Diffusion von Antimon, Arsen und Indium in festem Germanium. *Zeitschrift für Naturforschung* 10a, S. 285-291
- Bothelo, Antonio José J. (1994): The Industrial Policy that never was: French Semiconductor Policy, 1945-1966. *History and Technology* 11, S. 165-180
- Brämer, Rainer (1983): Naturwissenschaft im NS-Staat (Reihe Soznat: Mythos Wissenschaft). Marburg: Redaktionsgemeinschaft Soznat
- Brämer, Rainer (1986): Heimliche Komplizen? Zur Rolle der Naturwissenschaften im Dritten Reich. *Aus Politik und Zeitgeschichte* 36: B12, S. 15-30
- Brandt, Leo (1944) (Hg.): Fachvorträge über Schiffsfunkortung beim Oberkommando der Kriegsmarine vom 9. - 10. 3. 1944 (Ausschuß für Funkortung. Sonderbücherreihe der Funkortung). Düsseldorf: Als Manuskript gedruckt, o.J.
- Brandt, Leo (1944): Deutsche Funkmeßtechnik 1944 (Vortrag gehalten am 8. Feb. 1944). In: Brandt, Leo (Hg.)(1962): *Forschen und Gestalten*. Opladen: Westdeutscher Verlag, S. 25-44
- Brandt, Leo (1950): Rückblick auf die deutsche Funkmeßtechnik. In: Brandt, Leo (Hg.)(1962): *Forschen und Gestalten*. Opladen: Westdeutscher Verlag, S. 53-79
- Brandt, Leo (1953): Der Stand der deutschen Zentimeterwellen-Technik am Ende des Zweiten Weltkrieges. In: Brandt, Leo (Hg.)(1962): *Forschen und Gestalten*. Opladen: Westdeutscher Verlag, S. 80-112
- Brandt, Leo (1959) (Hg.): *Deutsche Gegenmaßnahmen gegen fdl. Funk-Navigation*. Dortmund: Verkehrs- und Wirtschaftsverlag
- Brandt, Leo (1962): *Forschen und Gestalten*. Köln, Opladen: Westdeutscher Verlag
- Brattain, Walter H. (1947): Evidence for Surface States on Semiconductors from Change in Contact Potential on Illumination. *Physical Review* 71, S. 717
- Brattain, Walter H. (1957): Oberflächeneigenschaften von Halbleitern. *Physikalische Blätter* 13, S. 457-469
- Brattain, Walter H. (1968): Genesis of the Transistor. *The Physics Teacher*, S. 109-114
- Brattain, Walter H.; Bardeen, John (1948): Nature of the Forward Current in Germanium Point Contacts. *Physical Review* 74, S. 231-232
- Brattain, Walter H.; Shockley, William B. (1947): Density of Surface States on Silicon Deduced from Contact Potential Measurements. *Physical Review* 71, S. 717
- Brauer, Peter (1936): Zum elektrischen Verhalten von Cupritkristallen. *Annalen der Physik* 5. Folge 25, S. 609-624
- Braun, Ernest (1992): Selected Topics from the History of Semiconductor Physics and its Applications. In: Hoddeson, Lillian; Braun, Ernest; Teichmann, Jürgen u.a. (Hg.)(1992): *Out of the Crystal Maze*. New York, Oxford: Oxford University Press, S. 443-488
- Braun, Ernest; Macdonald, Stuart (1982): *Revolution in Miniature. The history and impact of Semiconductor electronics re-explored in an updated and revised second edition*. Cambridge, London, New York, New Rochelle, Melbourne: Cambridge University Press
- Braun, Ferdinand (1874): Ueber die Stromleitung durch Schwefelmetalle. *Annalen der Physik und Chemie. Herausgegeben von J. C. Poggendorff* 153, S. 556-563
- Braunstein, R. (1955): Radiative Transistions in Semiconductors. *Physical Review* 99, S. 1892-1893
- British Intelligence Objectives Sub-Committee, B.I.O.S. (1946): German Research on Rectifiers and Semi-Conductors. (B.I.O.S.-Final Report 725). London: Stationery Office
- British Intelligence Objectives Sub-Committee, B.I.O.S. (1948): German Research on Semi-Conductors, Metal Rectifiers, Detectors and Photocells (B.I.O.S.-Final Report 1751). London: Stationery Office
- Broszat, Martin (1986): *Der Staat Hitlers. Grundlegung und Entwicklung seiner inneren Verfassung (dtv-Weltgeschichte des 20. Jahrhunderts) (1969)*. München: dtv
- Brown, Laurie M.; Pais, Abraham; Pippard, Sir Brian (1995) (Hg.): *Twentieth Century Physics*. 3 Vol. Bristol, Philadelphia, New York: Institute of Physics Publishing, American Institute of Physics
- Brüche, Ernst (1946): 'Deutsche Physik' und die deutschen Physiker. *Physikalische Blätter* 2, S. 232-236

- Brüche, Ernst (1947): Die Arbeit der Informationsstelle Deutscher Physiker. *Physikalische Blätter* 3, S. 224-226
- Buchhaupt, Siegfried (1998): Technik und Wissenschaft: Das Beispiel der Elektrotechnik. *Technikgeschichte* 65, S. 179-206
- Buchheim, Christoph (1990): Die Wiedereingliederung Westdeutschlands in die Weltwirtschaft 1945-1958. München: Oldenbourg Verlag
- Buderi, Robert (1996): The Invention that Changed the World. How a small Group of Radar Pioneers won the Second World War and launched a Technological Revolution. New York: Simon and Schuster
- Büll, Wolfgang (1943): Die Entwicklung der Kristallgleichrichter (Detektoren) für Zentimeterwellen (Deutsche Luftfahrtforschung. Untersuchungen und Mitteilungen. Nr. 4006). Zentrale für Wissenschaftliches Berichtswesen der Luftfahrtforschung: Berlin-Adlerhof
- Büll, Wolfgang (1950): Kristalldioden. Entwicklung in Theorie und Praxis. *Funkschau* 22, S. 209-211
- Büll, Wolfgang (1951): Germanium-Foto-Transistoren. *Funkschau* 23, S. 152
- Büll, Wolfgang (1951): Neue Germanium-Kristalldioden. *Funkschau* 23, S. 274
- Büll, Wolfgang (1952): Fortschritte auf dem Gebiet der Kristalldioden und Transistoren. *Funkschau* 24, S. 153-154
- Büll, Wolfgang (1952): Neue Kleinst-Kristalldiode. *Funkschau* 24, S. 135
- Büll, Wolfgang (1953): Kristalldioden und Transistoren. Neue Ausführungsformen und Anwendungsmöglichkeiten. *Funkschau* 25, S. 271-272
- Büll, Wolfgang (1954): Über die Entwicklung neuer Halbleiter für Kristalldioden und Transistoren. *Funkschau* 26, S. 8
- Burns, Russell W. (1988): The background to the development of the cavity magnetron. In: Burns, Russell W. (Hg.)(1988): Radar Development to 1945. London: Peter Peregrinus, S. 259-283
- Callick, E. B. (1990): Meters to Microwaves. British development of active components for radar systems 1937 to 1944. London: Peter Peregrinus
- Cassidy, David C. (1994): Controlling German Science, I: U.S. and Allied forces in Germany, 1945-1947. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 24:1, S. 197-235
- Cassidy, David C. (1995): Werner Heisenberg. Leben und Werk (1992). Heidelberg, Berlin, Oxford: Spektrum Akademischer Verlag
- Cassidy, David C. (1996): Controlling German Science, II: Bizonal occupation and the struggle over West German science policy, 1946 - 1949. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 26:2, S. 197-239
- Clusius, Klaus (1932): Die Supraleitfähigkeit. Sammelreferat. *Zeitschrift für Elektrochemie* 38, S. 312-326
- Combined Intelligence Objectives Sub-Committee, C.I.O.S. (1945): Organization of Telefunken (CIOS-Report XXI-1). London: Stationery Office
- Combined Intelligence Objectives Sub-Committee, C.I.O.S. (1946): Telefunken G.m.b.H. (CIOS-Report XXXI-52). London: Stationery Office
- Combined Intelligence Objectives Sub-Committee, C.I.O.S. (1946): Institutes of the Bevollmächtigter fuer Hochfrequenzforschung (CIOS-Report XXXI-37). London: Stationary Office
- Combined Intelligence Objectives Sub-Committee, C.I.O.S. (1946): Research Work undertaken by German Universities and technical High Schools for the Bevollmächtigter fuer Hochfrequenztechnik. Independent Research on Associated Subjects (CIOS-Report XXXI-2). London: Stationary Office
- Czochralski, J. (1918): Ein neues Verfahren zur Messung der Kristallisationsgeschwindigkeit der Metalle. *Zeitschrift für Physikalische Chemie* 92, S. 219-221
- Daniel, Ute (1997): Clio unter Kulturschock. Zu den aktuellen Debatten der Geschichtswissenschaft. *Geschichte in Wissenschaft und Unterricht* 48, S. 195-218 und 259-278
- Davydov, B. (1939): On the Contact Resistance of Semi-Conductors. *Journal of Physics. Academy of Sciences of the USSR* 1, S. 167-174
- Davydov, B. (1941): Transitional resistances of Semiconductors. *Journal of Physics. Academy of Sciences of the USSR* 4, S. 335-339
- Dean, K.J.; White, G. (1973): The Semiconductor Story. 1: The new crystal Triode. *Wireless World* 79, S. 2-5
- Dehlinger, Ulrich; Fues, Erwin (1954): Das Institut für theoretische und angewandte Physik. In: Gutbier, Rolf (Hg.)(1954): Die Technische Hochschule Stuttgart 1954. Bericht zum 125jährigen Bestehen. Stuttgart: TH Stuttgart, S. 39-41

- Deichmann, Ute (1991): Biologen unter Hitler. Die Vertreibung der jüdischen Biologen und die biologische Forschung in Deutschland 1933 - 1945 (Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Köln). Köln: Hundt Druck
- Deichmann, Ute; Müller-Hill, Benno (1994): Biological Research at Universities and Kaiser Wilhelm Institutes in Nazi Germany. In: Renneberg, Monika; Walker, Mark (Hg.)(1994): Science, Technology and National Socialism. Cambridge: Cambridge University Press, S. 160-183
- Distel, Barbara; Jakusch, Ruth (1978) (Hg.): Konzentrationslager Dachau 1933-1945 (8. Auflage). Brüssel: Comité International de Dachau
- Dobrinski, P.; Knabe, Herbert; Müller, M. (1957): Die Silizium-Zenerdiode. *Nachrichtentechnische Zeitschrift* 10, S. 195-199
- Dorendorf, Heinz; Rebstock, Hans (1961): Der Germanium-Mesatransistor. *Siemens-Zeitschrift* 35, S. 602-609
- Döring, Herbert (1991): Microwave tube development in Germany from 1920-1945. *International Journal of Electronics* 70, S. 955-978
- Dosse, Joachim (1955): Der Transistor. Ein neues Verstärkerelement. München: Oldenbourg
- Dürr, W.; Jaumann, J.; Seiler, Karl (1951): Löslichkeit und Ionisierbarkeit von Fremdelementen in Germaniumeinkristallen. *Physikalische Verhandlungen* 2, S. 138
- Dürr, W.; Jaumann, J.; Seiler, Karl (1953): Löslichkeit und Ionisierbarkeit von Fremdstoffen in Germanium-Einkristallen. *Zeitschrift für Naturforschung* 8a, S. 49-46
- Eckert, Michael (1987): Propaganda in Science: Sommerfeld and the Spread of the Electron Theory of Metals. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 17:2, S. 191-233
- Eckert, Michael (1990): Sommerfeld und die Anfänge der Festkörperphysik. *Wissenschaftliches Jahrbuch des Deutschen Museums* 7, S. 33-71
- Eckert, Michael (1993): Die Atomphysiker. Eine Geschichte der theoretischen Physik am Beispiel der Sommerfeldschule. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg
- Eckert, Michael (1995): Physikgeschichte - eine Disziplin auf der Suche nach einem neuen Profil. *Wechselwirkung* 71, S. 6-11
- Eckert, Michael (1996): Theoretical Physicists at War: Sommerfeld Students in Germany and as Emigrants. In: Forman, Paul; Sánchez-Ron, J.M. (Hg.)(1996): National Military Establishments and the Advancements of Science and Technology. Studies in the 20th Century History. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, S. 69-86
- Eckert, Michael; Osietzki, Maria (1989): Wissenschaft für Macht und Markt. Kernforschung und Mikroelektronik in der Bundesrepublik Deutschland. München: Beck
- Eckert, Michael; Schubert, Helmut (1986): Kristalle, Elektronen, Transistoren. Von der Gelehrtenstube zur Industrieforschung. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt
- Eckert, Michael; Schubert, Helmut; Torkar, Gisela (1992): The Roots of Solid-State Physics Before Quantum Mechanics. In: Hoddeson, Lillian; Braun, Ernest; Teichmann, Jürgen u.a. (Hg.)(1992): Out of the Crystal Maze. New York, Oxford: Oxford University Press, S. 3-87
- Ehrenreich, Henry (1995): Strategic Curiosity: Semiconductor Physics in the 1950s. *Physics Today* Jan. 1995, S. 28-34
- Ehrenreich, Henry (1997): Halbleiterforschung in den 50er Jahren. Anwendungsorientierte Forschung und Zukunftstechnologie. *Physikalische Blätter* 53:1, S. 21-26
- Emeis, Reimer (1954): Tiegfrees Ziehen von Silicium-Einkristallen. *Zeitschrift für Naturforschung* 9a, S. 67 u. 58b
- Engel, A.; Welker, Heinrich J.; Mataré, Herbert F. (1950): Les Cristaux Détecteurs et leur Emploi en Hyperfréquences. *Bulletin de la Société française des Électriciens* 6e Série, X: 107, S. 1-18
- Engelmann, Bernt (1968): Die Macht am Rhein. Meine Freunde die Geldgiganten. Band 2. Die neuen Reichen. München: dtv
- Erker, Paul (1993): Forschung und Entwicklung in der Transistortechnologie. Entscheidungszwänge und Handlungsspielräume am Beispiel Siemens und Philips, 1947-1960. *Technikgeschichte* 60:3, S. 267-284
- Esaki, Leo (1974): Long Journey into Tunneling. *Proceedings of the IEEE* 62:6, S. 825-831
- Esaki, Leo (1976): Discovery of the Tunnel Diode. *IEEE Transactions on Electron Devices* ED-23:7, S. 644-647
- Esau, Abraham (1940): Elektrische Wellen im Zentimetergebiet (Vorträge gehalten am 10. Dezember 1937). *Schriften der deutschen Akademie der Luftfahrtforschung* 20, S. 3-14

- Ewald, Peter Paul (1969): The Myth of the Myths; Comments on P. Forman's paper. *Archives for the History of Exact Sciences* 6, S. 72-81
- Fahnestock, James D. (1953): Production Techniques in Transistor Manufacture. *Electronics* 26:10, S. 130-134
- Falter, Bernd (1998): Die "technologische Lücke" - zum Rückstand der mikroelektronischen Industrie der DDR. *Dresdner Beiträge zur Geschichte der Technikwissenschaften* 25, S. 15-38
- Feldenkirchen, Willfried (1997): Der Wiederaufbau des Hauses Siemens nach dem Zweiten Weltkrieg (1945 bis zum Beginn der 50er Jahre). In: Wessel, Horst A. (Hg.)(1997): Demontage - Enteignung - Wiederaufbau (Teil 1. Die elektrotechnische Industrie). Berlin, Offenbach: VDE-Verlag, S. 177-209
- Feldtkeller, Ernst; Goetzeler, Herbert (1994) (Hg.): Pioniere der Wissenschaft bei Siemens. Erlangen: Publicis
- Fickers, Andreas (1998): Der 'Transistor' als technisches und kulturelles Phänomen. Die Transistorisierung der Radio- und Fernsehempfänger in der deutschen Rundfunkindustrie 1955 bis 1965 (Aachener Beiträge zur Wissenschafts- und Technngeschichte des 20. Jahrhunderts, Band 1). Bassum: GNT - Verlag
- Folberth, O. G. (1955): Mischkristallbildung bei AIII BV - Verbindungen. *Zeitschrift für Naturforschung* 10a, S. 502-503
- Folberth, O. G.; Grimm, R.; Weiß, Herbert (1953): Über die elektrischen Eigenschaften von InAs. *Zeitschrift für Naturforschung* 8a, S. 826
- Folberth, O. G.; Madelung, Otfried (1953): Zur Deutung von Leitfähigkeitsmessungen an Indiumantimonid. *Zeitschrift für Naturforschung* 8a, S. 673-675
- Folberth, O. G.; Oswald, F. (1954): Über die Halbleitereigenschaften von Galliumphosphid. *Zeitschrift für Naturforschung* 9a, S. 1050-1051
- Folberth, O. G.; Weiß, Herbert (1955): Herstellung und elektrische Eigenschaften von InP und GaAs. *Zeitschrift für Naturforschung* 10a, S. 615-619
- Folberth, O. G.; Weiß, Herbert (1956): Über die elektrischen Eigenschaften von InAs III. *Zeitschrift für Naturforschung* 11a, S. 510-511
- Forman, Paul (1969): The Discovery of the Diffraction of X-Rays by Crystals; A Critique of the Myths. *Archives for the History of Exact Sciences* 6, S. 38-71
- Forman, Paul (1987): Behind quantum electronics. National security as basis for physical research in the United States, 1940-1960. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 18:1, S. 149-229
- Forman, Paul (1995): "Swords into ploughshares": Breaking new ground with radar hardware and technique in physical research after World War II. *Reviews of Modern Physics* 67:2, S. 397-455
- Frei, Norbert (1996): Vergangenheitspolitik. Die Anfänge der Bundesrepublik und die NS-Vergangenheit. München: Beck
- Friebe, Wolfram (1953): Versuche mit selbstgefertigten Bleiglanz-Transistoren. *Funkschau* 25, S. 195-196
- Fröhlich, Herbert (1936): Elektronentheorie der Metalle. Berlin: Springer Verlag
- Funke, Manfred (1986): Universität und Zeitgeist im Dritten Reich. Eine Betrachtung zum politischen Verhalten von Gelehrten. *Aus Politik und Zeitgeschichte* 36: B12, S. 3-14
- Füßl, Wilhelm; Ittner, Stefan (1998) (Hg.): Biographie und Technikgeschichte (BIOS - Zeitschrift für Biographieforschung und Oral History, Sonderheft 1998). Leverkusen: Leske + Budrich
- Gall, Alexander (1999): Von 'IBM' zu 'Silicon Valley' . Leitbilder der Forschungspolitik zur Mikroelektronik in den siebziger und achtziger Jahren. In: Ritter, Gerhard A.; Szöllösi-Janze, Margit; Trischler, Helmuth (Hg.)(1999): Antworten auf die amerikanische Herausforderung. Forschung in der Bundesrepublik und der DDR in den 'langen' siebziger Jahren. Frankfurt, New York: Campus, S. 135-155
- Gaulé, G. (1950): Der Transistor - Schriftumsübersicht. *Fernmeldetechnische Zeitschrift* 3, S. 390-400
- Gebbie, H.A.; Banbury, P.C.; Hogarth, C.A. (1950): Crystal Diode and Triode Action in Lead Sulphide. *Proceedings of the Physical Society B* LXIII, S. 371
- Gehlhoff, Georg (1921): Die Ausbildung der technischen Physiker. *Zeitschrift für Technische Physik* 2, S. 121-127
- Gehlhoff, Georg (1929): Zehn Jahre Deutsche Gesellschaft für technische Physik. *Zeitschrift für Technische Physik* 10, S. 194-198

- Geist, D.; Seiler, Karl (1951): Die elektrischen Eigenschaften von Flächengleichrichtern aus Germanium. *Physikalische Verhandlungen* 2, S. 121
- Geist, D.; Seiler, Karl (1952): Die Temperaturabhängigkeit des Sperrstroms von p-n-Übergängen in Germanium. *Die Naturwissenschaften* 39, S. 401
- Gießler, Helmuth (1944): Erprobungserfahrungen für den Ortungsdienst. In: Brandt, Leo (Hg.): Fachvorträge über Schiffsfunkortung beim Oberkommando der Kriegsmarine vom 9. - 10. 3. 1944. Düsseldorf: Als Manuskript gedruckt, o.J., S. 1-32
- Gießler, Helmuth (1944): Ortungsgeräte. In: Brandt, Leo (Hg.): Fachvorträge über Schiffsfunkortung beim Oberkommando der Kriegsmarine vom 9. - 10. 3. 1944. Düsseldorf: Als Manuskript gedruckt, o.J., S. 1-32
- Gießler, Helmuth (1958): Die Entwicklung der Funkmeßgeräte in Deutschland. Teil I: 1933-1939. *Wehrtechnische Monatshefte* 55, S. 108-114
- Gimbel, John (1990): Science, Technology, and Reparations. Exploitation and Plunder in Potsdwar Germany. Stanford: Stanford University Press
- Ginzburg, Carlo (1995): Spurensicherung. Die Wissenschaft auf der Suche nach sich selbst (1983). Berlin: Wagenbach
- Giuliani, G. (1987) (Hg.): The Origins of Solid-State Physics in Italy. 1945-1960. Bologna: Italian Physical Society
- Goetzeler, Herbert (1972): Zur Geschichte der Halbleiter-Bausteine der Elektronik. *Technikgeschichte* 39:1, S. 31-50
- Goldschmidt, Viktor Moritz (1927): Geochemische Verteilungsgesetze der Elemente. VIII. Untersuchungen über Bau und Eigenschaften von Kristallen. Oslo: Hos Jacob Dybwad
- Goldstein, Andrew (1993): Finding the Right Material. Gordon Teal as Inventor and Manager. In: Nebeker, Frederik (Hg.)(1993): Sparks of Genius. Portraits of Electrical Engineering Excellence. New York: IEEE-Press
- Goldstein, Andrew; Aspray, William (1997): Facets. New Perspectives on the History of Semiconductors. New Brunswick, New Jersey: IEEE Center for the History of Electrical Engineering
- Graf, Ludwig (1942): Zum Aufbau der Metallkristalle. *Zeitschrift für Elektrochemie* 48:4, S. 181-210
- Graf, Ludwig; Lacour, Hans-Reiner; Seiler, Karl (1953): Plastische Verformbarkeit des Germaniums bei höheren Temperaturen. *Metallkunde* 44, S. 113-114
- Gremmelmaier, Rolf (1955): GaAs-Photoelement. *Zeitschrift für Naturforschung* 10a, S. 501-502
- Gremmelmaier, Rolf (1956): Herstellung von InAs- und GaAs-Einkristallen. *Zeitschrift für Naturforschung* 11a, S. 511-513
- Gremmelmaier, Rolf; Henkel, Hans-Joachim (1965): Galliumarsenid-Laserdioden. *Siemens-Zeitschrift* 39, S. 438-441
- Gremmelmaier, Rolf; Madelung, Otfried (1953): Herstellung von Einkristallen der halbleitenden Verbindungen vom Typus AIII BV. *Zeitschrift für Naturforschung* 8a, S. 333
- Grimm, H. G.; Sommerfeld, Arnold (1926): Über den Zusammenhang des Abschlusses der Elektronengruppen im Atom mit den chemischen Valenzzahlen. *Zeitschrift für Physik* 36, S. 36-59
- Grohndahl, L.O. (1933): The Copper-Cuprous-Oxide Rectifier and Photoelectric Cell. *Reviews of Modern Physics* 5, S. 141-168
- Grüneisen, Emil (1928): Metallische Leitfähigkeit. In: Geiger, Hans; Scheel, Karl (Hg.)(1928): Handbuch der Physik, Band 13. Berlin: Julius Springer, S. 1-75
- Grüttner, Michael (1995): Studenten im Dritten Reich. Paderborn, München, Wien u.a: Ferdinand Schönigh
- Gudden, Bernhard (1924): Elektrizitätsleitung in kristallisierten Stoffen unter Ausschluß der Metalle. *Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften* 3, S. 116-159
- Gudden, Bernhard (1928): Lichtelektrische Erscheinungen. Berlin: Springer
- Gudden, Bernhard (1934): Elektrische Leitfähigkeit elektronischer Halbleiter. *Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften* 13, S. 223-256
- Gudden, Bernhard; Schottky, Walter (1935): Probleme der Ionen- und Elektronenleitung in nichtmetallischen festen Körpern. *Physikalische Zeitschrift* 36, S. 717-721
- Guerlac, Henry E. (1987): Radar in World War II. 2 Vols. New York: American Institute of Physics
- Gundlach, F. W. (1948): Laufzeitröhren. *FIAT Review of German Science, 1939-1946, Electronics* Teil 1, S. 156-217

- Halfmann, Jost (1984): Die Entstehung der Mikroelektronik. Zur Produktion technischen Fortschritts. Frankfurt, New York: Campus
- Hall, Edwin Herbert (1879): On a New Action of the Magnet on Electric Current. *American Journal of Mathematics* 2, S. 287-292
- Hall, Robert N. (1952): Power Rectifiers and Transistors. *Proceedings of the I.R.E.* 40:11, S. 1512-1518
- Hall, Robert N. (1976): Injection Lasers. *IEEE Transactions of Electron Devices* ED-23, S. 700-704
- Hall, Robert N.; Dunlap, W. C. (1950): P-N Junctions Prepared by Impurity Diffusion. *Physical Review* 80, S. 467-468
- Handel, Kai (1994): Historische Entwicklung der mikroskopischen Theorie der Supraleitung. Hamburg: Diplomarbeit am Institut für Geschichte der Naturwissenschaften, Mathematik und Technik (IGN), unveröffentlicht
- Handel, Kai (1996): Research styles in particle theory and solid state theory: The historical development of the microscopic theory of superconductivity. In: Hoffmann, Dieter; Bevilacqua, Fabio; Stuewer, Roger H. (Hg.) (1996): *The Emergence of Modern Physics*. Pavia: Università degli Studi di Pavia, S. 371-386
- Handel, Kai; Hess, Volker (1998): Sozialgeschichte der Wissenschaften - ein Abenteuer? Sherlock Holmes auf der Suche nach der eierlegenden Wollmilchsau. In: Siefkes, Dirk; Eulenhöfer, Peter; Stach, Heike; Städler, Klaus (Hg.) (1998): *Sozialgeschichte der Informatik. Kulturelle Praktiken und Orientierungen*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, S. 13-33
- Hars, Florian (1999): Ferdinand Braun (1850 - 1918). Ein wilhelminischer Physiker. Berlin, Diepholz: GNT-Verlag
- Hartel, Walter (1954): Anwendung von Hallgenerator. *Siemens-Zeitschrift* 28, S. 376-384
- Hartmann, Werner; Schottky, Walter (1936): Über den Sinn der Gleichrichterwirkung bei Überschuß und Defekt-Halbleitern. *Die Naturwissenschaften* 24, S. 558
- Haynes, J. R.; Shockley, William B. (1949): Investigation of Hole Injection in Transistor Action. *Physical Review* 75, S. 691
- Haynes, J. R.; Shockley, William B. (1951): The Mobility and Life of Injected Holes and Electrons in Germanium. *Physical Review* 81, S. 835-843
- Heger, Helene; Frommke, Manfred (1986): 50 Jahre Horten, 1936-1986. Ein Warenhauskonzern auf dem Weg in die Zukunft. Düsseldorf: Horten AG
- Heisenberg, Werner (1931): Zum Paulischen Ausschließungsprinzip. *Annalen der Physik* 5. Folge, 10, S. 888-904
- Henkel, Hans-Joachim (1963): Untersuchungen an GaAs-Laser-Dioden. *Physikalische Verhandlungen* 14, S. 162
- Henker, Heinz (1955): Siemens-Flächentransistoren. *siemens-Zeitschrift* 29, S. 29-36
- Henriksen, Paul W. (1987): Solid State Physics at Purdue. *OSIRIS* 2nd series, 3, S. 237-260
- Hentschel, Klaus (1996) (Hg.): *Physics and National Socialism. An Anthology of Primary Sources*. Basel, Boston, Berlin: Birkhäuser Verlag
- Hentschel, Klaus; Renneberg, Monika (1995): Eine akademische Karriere. Der Astronom Otto Heckmann im Dritten Reich. *Vierteljahreshefte für Zeitgeschichte* 43:4, S. 581-610
- Herf, Jeffrey (1984): *Reactionary Modernism. Technology, Culture, and Politics in Weimar and the Third Reich*. New York, Cambridge: Cambridge University Press
- Herf, Jeffrey (1984): The Engineer as Ideologue. Reactionary Modernists in Weimar and Nazi Germany. *Journal of Contemporary History* 19, S. 631-648
- Herlet, Adolf; Hoffmann, Arnulf (1965): Flächengröße und Strombelastbarkeit von Thyristoren. *Siemens-Zeitschrift* 39, S. 180-184
- Heumann, Klemens; Stumpe, August C. (1974): *Thyristoren. Eigenschaften und Anwendungen* (1968). Stuttgart: Teubner
- Heywang, Walter (1983): Memorial Address on Professor Heinrich Welker (Conference Series Number 65). In: Stillman, G. E. (Hg.) (1983): *Gallium arsenide and related compounds. Proceedings of the 10. International Symposium on Gallium Arsenide and Related Compounds, held in Albuquerque, New Mexico, 19-22 Sept. 1982*. Bristol, London: The Institut of Physics
- Heywang, Walter (1984): Die Rolle der Physik in der modernen Elektronik. *Physikalische Blätter* 40, S. 265-270
- Heywang, Walter; Ziegler, G. (1954): Zur Stabilität senkrechter Schmelzzonen. *Zeitschrift für Naturforschung* 9a, S. 561-562
- Hilsch, Rudolf (1939): Elektronenleitung in Kristallen. *Die Naturwissenschaften* 27, S. 489-492

- Hoch, Paul (1992): The Development of the Band Theory of Solids, 1933 - 1960. In: Hoddeson, Lillian; Braun, Ernest; Teichmann, Jürgen u.a. (Hg.)(1992): Out of the Crystal Maze. New York, Oxford: Oxford University Press, S. 182-235
- Hoddeson, Lillian H. (1980): The Entry of Quantum Theory of Solids into Bell Telephone Laboratories, 1925-1940. A Case Study of the Industrial Application of Fundamental Science. *Minerva* 18, S. 422-447
- Hoddeson, Lillian H. (1981): The Discovery of the Point-Contact Transistor. *Historical Studies in The Physical Sciences* 12:1, S. 41-76
- Hoddeson, Lillian H. (1994): Research on Crystal Rectifiers during World War II and the Invention of the Transistor. *History and Technology* 11, S. 121-130
- Hoddeson, Lillian H.; Baym, Gordon (1980): The development of quantum mechanical electron theory of metals: 1900-28. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences* 371, S. 8-23
- Hoddeson, Lillian H.; Baym, Gordon; Eckert, Michael (1987): The development of the quantum-mechanical electron theory of metals: 1928-1933. *Reviews of Modern Physics* 59, S. 287-327
- Hoddeson, Lillian H.; Baym, Gordon; Eckert, Michael (1992): The Development of the Quantum Mechanical Electron Theory of Metals, 1926-1933. In: Hoddeson, Lillian; Braun, Ernest; Teichmann, Jürgen u.a. (Hg.)(1992): Out of the Crystal Maze. New York, Oxford: Oxford University Press, S. 88-181
- Hoddeson, Lillian H.; Braun, Ernest; Teichmann, Jürgen; Weart, Spencer (1992) (Hg.): Out of the Crystal Maze. Chapters from the History of Solid-State Physics. New York, Oxford: Oxford University Press
- Hoddeson, Lillian H.; Schubert, Helmut; Heims, Steve J.; Baym, Gordon (1992): Collective Phenomena. In: Hoddeson, Lillian; Braun, Ernest; Teichmann, Jürgen u.a. (Hg.)(1992): Out of the Crystal Maze. New York, Oxford: Oxford University Press, S. 489-616
- Hodges, Andrew (1989): Alan Turing - Enigma (1983). Berlin: Kammer & Unverzagt
- Hoffmann, Dieter (1976): Stufen der Wechselwirkung von Wissenschaft und Produktion. Versuch einer Periodisierung am Beispiel der Geschichte der Halbleiterforschung. Berlin: Dissertation an der Humboldt-Universität zu Berlin
- Hofmeister, Ernst (1976): 50 Jahre Feldeffekttransistor. *Funkschau* 48, S. 857-860
- Hollmann, Hans E. (1928): Über den Mechanismus von Elektronenschwingungen. Darmstadt: Dissertation an der TH Darmstadt
- Hollmann, Hans E. (1933): Die ultradynamische Schwingungsanfachung durch Rückkopplung. *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften. Phys. Math. Klasse VI*, S. 294-332
- Hollmann, Hans E. (1936): Physik und Technik der ultrakurzen Wellen. 2 Bände. Berlin: Springer Verlag
- Holonyak, Nick (1992): John Bardeen and the Point-Contact Transistor. *Physics Today* 45:4, S. 36-43
- Hughes, Thomas P. (1991): Die Erfindung Amerikas. Der technologische Aufstieg der USA seit 1870. München: Beck
- Hummel, Rolf E. (1992): Electronic Properties of Materials (1985). Berlin, Heidelberg, New York u.a.: Springer-Verlag
- Hund, Friedrich (1935): Theorie der Elektronenbewegung in nicht-metallischen Kristallgittern. *Physikalische Zeitschrift* 36, S. 725-729
- Ibach, Harald; Lüth, Hans (1990): Festkörperphysik. Berlin, Heidelberg, New York u.a.: Springer-Verlag
- Jacq, François (1995): The Emergence of Research Policy: methodological and historiographical Problems (1945-1970). *History and Technology* 12, S. 285-308
- Jaeger, Wilhelm (1922): Elektrische Meßtechnik. Theorie und Praxis der elektrischen und magnetischen Messungen. 2. Auflage. Leipzig: Johann Ambrosius Barth
- Jaenichen, Willy (1914): Lichtmessungen mit Selen. Berlin-Nikolassee: Administration der Zeitschrift für Feinmechanik
- Jenny, D. A. (1955): Bemerkung zu einem von H. Welker gefundenen "Transistor-Effekt" in Indium-Phosphid. *Zeitschrift für Naturforschung* 10a, S. 1032-1033
- Joffe, A.F. (1958): Physik der Halbleiter (1957). Berlin: Akademie-Verlag
- Johnson, Brian (1983): Streng Geheim. Wissenschaft und Technik im 2. Weltkrieg. Stuttgart: Motorbuch Verlag
- Joint Intelligence Objectives Agency, J.I.O.A. (1946): Selenium Rectifier Development in Germany (JIOA-Report 56). Washington: Joint Intelligence Objectives Agency

- Jungclaus, Hans-Jürgen; Neukamm, Gerhard (1980): Bauelemente und Grundschaltungen. Stuttgart, Berlin, Köln, Mainz: Berliner Union
- Justi, Eduard (1946): Supraleitung und Perodisches System. *Physikalische Blätter* 2, S. 207-210
- Justi, Eduard (1948): Leitfähigkeit und Leitungsmechanismus fester Stoffe. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht
- Justi, Eduard; Lautz, Günter (1951): Über Störstellen- und Eigenhalbleitung intermetallischer Verbindungen I. *Zeitschrift für Naturforschung* 7a, S. 191-200
- Justi, Eduard; Lautz, Günter (1951): Über Störstellen- und Eigenhalbleitung intermetallischer Verbindungen II. *Zeitschrift für Naturforschung* 7a, S. 602-613
- Justi, Eduard; Lautz, Günter (1952): Über die Halbleitereigenschaften intermetallischer Verbindungen (CdSb). *Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft* IV, S. 107-116
- Justi, Eduard; Lautz, Günter (1953): Das elektrische Verhalten von AlSb. *Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft* V, S. 36-47
- Kaiser, Walter (1987): Early Theories of the Electron Gas. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 17, S. 271-297
- Kaiser, Walter (1994): The development of electron tubes and of radar technology: the relationship of science and technology. In: Blumtritt, Oskar; Petzold, Hartmut; Aspray, William (Hg.)(1994): Tracking the History of RADAR. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, S. 217-236
- Kaiser, Walter (1995): Die Fakultät für Elektrotechnik. In: Habetha, Klaus (Hg.)(1995): Wissenschaft zwischen technischer und gesellschaftlicher Herausforderung: die Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen 1970 - 1995. Aachen: Einhard, S. 468-493
- Kaiser, Walter (1996): A Case Study in the Relationship of History of Technology and of General History: British Radar Technology and Neville Chamberlain's Appeasement Policy. *ICON* 2, S. 29-52
- Kaiser, Walter (1996): Mikroelektronik, die verspätete Basisinnovation. In: Schinzinger, Francesca (Hg.)(1996): Unternehmer und technischer Fortschritt. München: Harald Boldt Verlag, S. 127-153
- Kaiser, Walter (1997): Wissenschaft und Technik nach 1945. In: König, Helmut; Kuhlmann, Wolfgang; Schwabe, Klaus (Hg.)(1997): Vertuschte Vergangenheit. Der Fall Schwerte und die NS-Vergangenheit der deutschen Hochschulen. München: Beck-Verlag, S. 241-256
- Kalkmann, Ulrich (1997): Die TH Aachen unter dem Nationalsozialismus. In: König, Helmut; Kuhlmann, Wolfgang; Schwabe, Klaus (Hg.)(1997): Vertuschte Vergangenheit. Der Fall Schwerte und die NS-Vergangenheit der deutschen Hochschulen. München: Beck-Verlag, S. 146-161
- Keck, Paul H.; Golay, Marcel J. E. (1953): Crystallisation of Silicon from Floating Liquid Zone. *Physical Review* 89:6, S. 1297
- Kern, Ulrich (1984): Die Entstehung des Radarverfahrens: Zur Geschichte der Radartechnik bis 1945. Stuttgart: Dissertation am Historischen Institut der Universität Stuttgart
- Kern, Ulrich (1994): Forschung und Präzisionsmessung. Die Physikalisch-Technische Reichsanstalt zwischen 1918 und 1948. Weinheim, New York, Basel u.a.: VCH Verlag
- Kern, Ulrich (1994): Review concerning the history of german radar technology up to 1945. In: Blumtritt, Oskar; Petzold, Hartmut; Aspray, William (Hg.)(1994): Tracking the History of RADAR. Piscataway: Institute of Electrical and Electronics Engineers, S. 171-183
- Kilby, Jack S. (1976): Invention of the Integrated Circuit. *IEEE Transaction on Electron Devices* ED-23:7, S. 648-654
- Kirpal, Alfred (1986): Die Entwicklung der Transistorherstellung von den Anfängen bis zur Massenproduktion. *Dresdner Beiträge zur Geschichte der Technikwissenschaften* 12, S. 3-38
- Kirpal, Alfred (1992): Die Entwicklung der Transistorelektronik. Aspekte einer militärischen und zivilen Technik. *Technikgeschichte* 59, S. 353-369
- Kirpal, Alfred (1993): Aufbruch in die Siliziumzeit. Die Entwicklung des monolithisch integrierten Schaltkreises. *Kultur & Technik* 17:1, S. 50-55
- Kleinknecht, Hans (1952): Silizium-Einkristallstäbe. *Die Naturwissenschaften* 39, S. 400-401
- Kleinknecht, Hans; Seiler, Karl (1952): Einkristalle und pn-Schichtkristalle aus Silizium. *Physikalische Verhandlungen* 3, S. 212

- Kleinknecht, Hans; Seiler, Karl (1954): Einkristalle und pn-Schichtkristalle aus Silizium. *Zeitschrift für Physik* 139, S. 599-618
- Kline, Roland R. (1987): Science and Engineering. Theory in the Invention and Development of the Induction Motor, 1880-1900. *Technology and Culture* 28, S. 283-313
- Kline, Roland R. (1992): Steinmetz. Engineer and Socialist. Baltimore: John Hopkins University Press
- Klose, Albert (1990): Auf den Spuren der Leistungselektronik. Erfinder und Erfindungen der Stromrichtertechnik. Berlin, Offenbach: VDE-Verlag
- Klumb, H. (1939): Beobachtungen und Untersuchungen an Kristalldetektoren. *Physikalische Zeitschrift* 40, S. 640-643
- Klumb, H.; Koch, B. (1939): Über das Verhalten von Kristalldetektoren bei sehr kurzen elektromagnetischen Wellen. *Die Naturwissenschaften* 27, S. 547-548
- Knowles, C.H. (1956): New Transistor Design - The "Mesa". *Electronic Industries* 17:2, S. 55-60
- König, Wolfgang (1995): Technikwissenschaften. Die Entstehung der Elektrotechnik aus Industrie und Wissenschaft zwischen 1880-1914. Chur: Verlag Fakultas
- Königsberger, Joh. (1914): Das elektrische Verhalten der variablen Leiter und deren Beziehungen zur Elektronentheorie. *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik* 11, S. 84-142
- Königsberger, Joh.; Weiss, J. (1911): Über die thermoelektrischen Effekte (Thermokräfte, Thomsonwärme) und die Wärmeleitung in einigen Elementen und Verbindungen und über die experimentelle Prüfung der Elektronentheorien. *Annalen der Physik. 4. Folge* 35, S. 1-46
- Kraus, Jerome (1968): The British Electron-Tube and Semiconductor Industry, 1935-62. *Technology and Culture* 9, S. 544-561
- Krause, Eckart; Huber, Ludwig; Fischer, Holger (1991) (Hg.): Hochschulalltag im 'Dritten Reich'. Die Hamburger Universität 1933-1945. 3 Bände. Berlin, Hamburg: Dietrich Reimer Verlag
- Krömer, Herbert (1953): Der Drifttransistor. *Die Naturwissenschaften* 49, S. 578-579
- Krömer, Herbert (1954): Zur Theorie der Diffusions- und des Drifttransistors. Teile I-III. *Archiv für Elektrische Übertragung* 8, S. 223-228 u. 363-369 u. 499-504
- Kube, Alfred (1986): Pour le mérite und Hakenkreuz. Hermann Göring im Dritten Reich (Quellen und Darstellungen zur Zeitgeschichte. Herausgegeben vom Institut für Zeitgeschichte, Bd. 24). München: Oldenbourg
- Kuhr, Friedrich (1954): Eigenschaften von Hallgeneratoren. *Siemens-Zeitschrift* 28, S. 370-376
- Kuhr, Friedrich (1956): Schwingungserzeugung mit rückgekoppelten Hall-Generatoren. *Physikalische Verhandlungen* 7, S. 105
- Kuhr, Friedrich; Brauersreuther, Eberhardt (1954): Drehmomentmessung an einem Gleichstrommotor mit Hilfe des Halleffekts. *Siemens-Zeitschrift* 28, S. 299-302
- Kuhr, Friedrich; Lippmann, Hans Joachim (1968): Hallgeneratoren. Eigenschaften und Anwendungen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag
- Lang, Jürgen K. (1996): Das Compact Disc Digital Audio System. Ein Beispiel für die Entwicklung hochtechnologischer Konsumelektronik. Aachen: Dissertation an der Fakultät für Elektrotechnik der RWTH Aachen
- Lehovec, Kurt (1949): On the Hole Current in the Germanium Transistor. *Physical Review* 75, S. 1100-1101
- Link, Werner (1978): Deutsche und amerikanische Gewerkschaften und Geschäftsleute 1945 - 1975. Eine Studie über transnationale Beziehungen. Düsseldorf: Droste Verlag
- Loebner, Egon E. (1976): Subhistories of the Light Emitting Diode. *IEEE Transactions on Electron Devices* ED-23:7, S. 675-699
- Longerich, Peter (1989): Die braunen Bataillone. Geschichte der SA. München: Beck-Verlag
- Ludwig, Karl-Heinz (1974): Technik und Ingenieure im Dritten Reich. Düsseldorf: Droste Verlag
- Ludwig, Karl-Heinz (1995): Politische Lösungen für technische Innovationen 1933-1945. Eine antitechnische Mobilisierung, Ausformung und Instrumentalisierung der Technik. *Technikgeschichte* 62, S. 333-344
- Lueder, H.; Spenke, Eberhard (1935): Über den Einfluß der Wärmeableitung auf das elektrische Verhalten von temperaturabhängigen Widerständen. *Physikalische Zeitschrift* 36, S. 767-773
- Lüke, Hans Dieter (1985): Signalübertragung. Grundlagen der digitalen und analogen Nachrichtenübertragungssysteme. Dritte, erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer

- Macrakis, Kristie (1993): *Surviving the Swastika. Scientific Research in Nazi Germany*. New York, Oxford: Oxford University Press
- Madelung, Otfried (1953): Zur Theorie der magnetische Effekte in isotropen Halbleitern hoher Beweglichkeit. *Zeitschrift für Naturforschung* 8a, S. 791-795
- Madelung, Otfried (1956): Zur Theorie der Wärmeleitfähigkeit isotroper Halbleiter im Magnetfeld. *Zeitschrift für Naturforschung* 11a, S. 478-481
- Madelung, Otfried (1964): *Physics of III-V Compounds*. New York, London, Sydney: John Wiley
- Madelung, Otfried (1983): Die III-V-Verbindungen und ihre Bedeutung für die Halbleiterphysik. *Physikalische Blätter* 39:4, S. 79-83
- Madelung, Otfried (1999): Schottky - Spenke - Welker. Erinnerungen an die "Gründerjahre" der Halbleiterphysik in Deutschland nach dem Zweiten Weltkrieg. *Physikalische Blätter* 55:6, S. 54-58
- Madelung, Otfried; Tewordt, L.; Welker, Heinrich J. (1955): Zur Theorie der magnetischen Sperrschicht in Halbleitern. *Zeitschrift für Naturforschung* 10a, S. 476-488
- Madelung, Otfried; Weiß, Herbert (1954): Die elektrischen Eigenschaften von Indium-antimonid II. *Zeitschrift für Naturforschung* 9a, S. 527-534
- Madelung, Otfried; Welker, Heinrich J. (1953): Zur Theorie der gemischten Halbleiter. *Zeitschrift für angewandte Physik* 5, S. 12-14
- Malsch, J.; Engbert, W.; Beneking, Heinz (1953): Sperrschichten in Germanium-Einkristallen. *Die Telefunkenröhre. Festschrift z. 50 Jahr-Feier*
- Mataré, Herbert F. (1942): Das Rauschen von Dioden und Detektoren im statischen und im dynamischen Zustand. *Elektrische Nachrichtentechnik* 19:7, S. 111-126
- Mataré, Herbert F. (1943): Brownsche Bewegung und Widerstandsrauschen. *Annalen der Physik* 43:4, 5. Folge, S. 271-278
- Mataré, Herbert F. (1943): Der Mischwirkungsgrad von Dioden. *Hochfrequenztechnik und Elektroakustik* 62, S. 165-172
- Mataré, Herbert F. (1943): Eingangs- und Ausgangswiderstand von Mischdioden. (Mitteilung aus dem Telefunken-Laboratorium). *Elektrische Nachrichtentechnik* 20:2, S. 48-59
- Mataré, Herbert F. (1943): Kurven konstanter Konversionsverstärkung in Richtkennlinienfeldern. *Elektrische Nachrichtentechnik* 20:6, S. 144-148
- Mataré, Herbert F. (1949): Bruit de Fond de Semiconducteurs. I. *Le Journal de Physique et le Radium VIII (X)*, S. 362-372
- Mataré, Herbert F. (1949): Der Dreielektroden-Kristall (Transistor). *Das Elektron in Wissenschaft und Technik* 7:3, S. 255-261
- Mataré, Herbert F. (1949): Methoden zur Berechnung der Empfindlichkeiten von Mischanordnungen im Dezimeter- und Zentimeterwellengebiet. *Archiv der Elektrischen Übertragung*, S. 241-248
- Mataré, Herbert F. (1950): Bruit De Fond De Semi-Conducteurs. II. *Le Journal De Physique Et Le Radium* 11, S. 130-140
- Mataré, Herbert F. (1950): Remarques concernant l'amplification observée sur des Semi-Conducteurs (Phénomènes de transistance). *L'Onde Électrique* 30, S. 469-475
- Mataré, Herbert F. (1950): Transistor-Meßtechnik. *Das Elektron in Wissenschaft und Technik* 4, S. 368-379
- Mataré, Herbert F. (1950): Von der Vakuumdiode zum Kristalldetektor. *Das Elektron in Wissenschaft und Technik* 4:7, S. 229-236
- Mataré, Herbert F. (1951): Empfangsprobleme im Ultrahochfrequenzgebiet unter besonderer Berücksichtigung des Halbleiters. München: Oldenbourg
- Mataré, Herbert F. (1952): Fortschritte auf dem Gebiet der Transistortechnik. *Das Elektron in Wissenschaft und Technik* 5:13/14, S. 411-420
- Mataré, Herbert F. (1952): Interaction de couches d'arrêts et déviations statistiques dans les cristaux à trois électrodes. *Le Journal de Physique et le Radium. Physique Appliquée* 13:7, S. 112A-127A
- Mataré, Herbert F. (1953): Oberwellenmischung und Verzerrung mit Kristalldioden. *Archiv der elektrischen Übertragung* 7, S. 1-15
- Mataré, Herbert F. (1954): Elektronisches Verhalten bestimmter Korngrenzen in perfekten Kristallen. *Zeitschrift für Naturforschung* 9a:7/8, S. 698
- Mataré, Herbert F. (1954): Möglichkeiten und Probleme in der modernen Halbleitertechnik. *radio mentor* 20, S. 262-267
- Mataré, Herbert F. (1955): Korngrenzenstruktur und Ladungsträgertransport in Halbleiterkristallen. *Zeitschrift für Naturforschung* 10a:8, S. 640-652

- Mataré, Herbert F. (1956): Korngrenzen-Transistor. *Elektronische Rundschau* 10:8-9, S. 209-211 und 253-255
- Mataré, Herbert F. (1957): Zur Herstellung hochreiner Germanium- und Silizium-Kristalle. *Elektronische Rundschau* 11:10, S. 293-296
- Mataré, Herbert F. (1998): The transistor in gestation (Leserbrief). *IEEE Spectrum* 35:10, S. 8-9
- McAfee, K. B.; Ryder, E. J.; Shockley, William B.; Sparks, Morgan (1951): Observation of Zener Current in Germanium p-n Junctions. *Physical Review* 83, S. 650-651
- Mehrtens, Herbert (1981): Social History of Mathematics. In: Mehrtens, Herbert; Bos, Henk; Schneider, Ivo (Hg.)(1981): Social History of Nineteenth Century Mathematics. Boston, Basel, Stuttgart: Birkhäuser, S. 257-280
- Mehrtens, Herbert (1994): Kollaborationsverhältnisse: Natur- und Technikwissenschaften im NS-Staat und ihre Historie. In: Meinel, Christoph; Voswinkel, Peter (Hg.)(1994): Medizin, Naturwissenschaft, Technik und Nationalsozialismus. Kontinuitäten und Diskontinuitäten. Stuttgart: GNT-Verlag, S. 13-32
- Mehrtens, Herbert (1995): Gilt das Trennungssaxiom? Zum Verhältnis von Wissenschafts- und Technikgeschichte. In: Schütt, Hans-Werner; Weiss, Burghard (Hg.)(1995): Brückenschläge. 25 Jahre Lehrstuhl für Geschichte der exakten Wissenschaften und der Technik an der Technischen Universität Berlin 1969-1994. Berlin: Verlag für Wissenschafts- und Regionalgeschichte, S. 229-251
- Mehrtens, Herbert; Mehrtens, Herbert (1996): Mathematics and War: Germany, 1900 - 1945. In: Forman, Paul; Sánchez-Ron, J.M. (Hg.)(1996): National Military Establishments and the Advancements of Science and Technology. Studies in the 20th Century History. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, S. 87-134
- Meinel, Christoph; Voswinkel, Peter (1994) (Hg.): Medizin, Naturwissenschaft, Technik und Nationalsozialismus. Kontinuitäten und Diskontinuitäten. Stuttgart: GNT-Verlag
- Meissner, Walther; Schubert, G. (1943): Zur Abgrenzung der supraleitenden reinen Metalle gegenüber den anderen Elementen. *Sitzungsberichte der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Math.-naturwiss. Abteilung* 84, S. 195-198
- Mende, Herbert G. (1953): Die Kristallodentechnik breitet sich aus. *Funkschau* 25, S. 413
- Mende, Herbert G. (1953): Die neuen Intermetall-Germaniumdioden und ihr Werdegang. *RADIO-Magazin* 9, S. 309-310
- Mende, Herbert G. (1953): Ein neuer deutscher Transistor. *Funkschau* 25, S. 4
- Mende, Herbert G. (1953): Praktischer Umgang mit Kristalloden (Teil 1 bis 8). *Funkschau* 25, S. 25-27, 43-44, 63, 77, 102, 145, 161
- Mende, Herbert G. (1959): Leitfaden der Transistortechnik. München: Franzis-Verlag
- Mende, Herbert G. (1963): Kristalldioden- und Transistoren-Taschen-Tabelle. 4. Auflage. München: Franzis-Verlag
- Meyeren, Wilhelm Albert von (1948): Elektrizitätsleitung und lichtelektrischer Effekt in Halbleitern. *FIAT Review of German Science, 1939-1946, Physics of Solids* Teil 2, S. 78-99
- Meyeren, Wilhelm Albert von (1948): Halbleiter-Gleichrichter und -Photoelemente. *FIAT Review of German Science, 1939-1946, Physics of Solids* Teil 2, S. 101-121
- Meyerhof, Walter E. (1947): Contact Potential Difference in Silicon Crystal Rectifiers. *Physical Review* 71, S. 727-735
- Misa, Thomas J. (1985): Military Needs, Commercial Realities, and the Development of the Transistor, 1948-1958. In: Smith, Merrit Roe (Hg.)(1985): Military Enterprise and Technological Change. Perspectives on the American Experience. Cambridge (Mass.), London: MIT Press, S. 253-287
- Mix & Genest (1954): 75 Jahre Mix & Genest (1879-1954). Klett: Stuttgart
- Molina, Alfonso Hernán (1989): The Social Basis of the Microelectronics Revolution. Edinburgh: Edinburgh University Press
- Möller, C. (1953): Deutsche Transistoren. *Funk-Technik* 8:21, S. 668-669
- Mommsen, Hans (1966): Beamtentum im Dritten Reich. Mit ausgewählten Quellen zur nationalsozialistischen Beamtenpolitik. Stuttgart: Deutsche Verlagsanstalt
- Mommsen, Hans (1981): Hitlers Stellung im nationalsozialistischen Herrschaftssystem. In: Niethammer, Lutz; Weisbrod, Bernd (Hg.)(1991): Der Nationalsozialismus und die deutsche Gesellschaft. Ausgewählte Aufsätze von Hans Mommsen. Zum 60. Geburtstag. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt, S. 67-101
- Mönch, Winfried (1986): On the Present Understanding of Schottky Contacts. *Festkörperprobleme* XXVI, S. 67-88

- Mönch, Winfried (1990) (Hg.): *Electronic Structure of Metal-Semiconductor Contacts* (Perspectives in condensed matter physics. Vol. 4). Mailand: Jaca Book
- Mönch, Winfried (1995): *Semiconductor Surfaces and Interfaces*. (Springer Series in Surface Sciences 26) (1993). Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag
- Morris, P. Robin (1990): *A history of the World Semiconductor Industry*. London: Peter Peregrinus
- Morris, P. Robin (1994): the Role of the Ministry of Defence (MOD) in Influencing the Commercial Performance of the British Semiconductor Industry. *History and Technology* 11, S. 181-193
- Mott, Neville F. (1938): Note on the Contact between a Metal and an Insulator or Semiconductor. *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, S. 568-572
- Mott, Neville F. (1992): Herbert Fröhlich. *Biographical Memoirs of the Royal Society* 38, S. 147-162
- Mott, Neville F.; Gurney, R. W. (1950): *Electronic Processes in Ionic Crystals* (1940). Oxford: Clarendon Press
- Mott, Neville F.; Jones, H. (1936): *The Theory of Properties of Metals and Alloys*. Oxford: Oxford University Press
- Mounier-Kuhn, Pierre-E. (1994): French Computer Manufactures and the Component Industry, 1952 - 1972. *History and technology* 11, S. 195-216
- Müller, Siegfried (1954): Siliciumreinigung durch tiegelfreies Zonenziehen. *Zeitschrift für Naturforschung* 9b, S. 504-505
- Neufeld, Michael J. (1997): *Die Rakete und das Reich. Wernher von Braun, Peenemünde und der Beginn des Raketenzeitalters* (1995). Berlin: Brandenburgisches Verlagshaus
- Osietzki, Maria (1989): *Wissenschaft in der Industrie: Frühe Halbleiterforschung bei Siemens*. In: Michael Eckert; Maria Osietzki (Hg.) (1989): *Wissenschaft für Macht und Markt. Kernforschung und Mikroelektronik in der Bundesrepublik Deutschland*. München: Beck, S. 139-160
- Pauli, Wolfgang (1927): Über Gasentartung und Paramagnetismus. *Zeitschrift für Physik* 41, S. 81-102
- Pauli, Wolfgang (1979): *Wissenschaftlicher Briefwechsel. Band I: 1919-1929*. Hg. von Armin Hermann, Karl von Meyenn und Viktor F. Weisskopf. New York, Berlin, Heidelberg: Springer
- Pauli, Wolfgang (1985): *Wissenschaftlicher Briefwechsel. Band II: 1930-1939*. Hg. von Karl von Meyenn unter Mitwirkung von Armin Hermann und Viktor F. Weisskopf. New York, Berlin, Heidelberg: Springer
- Pauli, Wolfgang (1993): *Wissenschaftlicher Briefwechsel. Band III: 1940-1949*. Hg. von Karl von Meyenn. New York, Berlin, Heidelberg: Springer
- Pauling, Linus (1948): *The Nature of the Chemical Bond and the Structure of Molecules and Crystals*. Ithaca, New York: Cornell University Press
- Pearson, Gerald L.; Brattain, Walter H. (1955): History of Semiconductor Research. *Proceedings of the IRE* 43:2, S. 1794-1806
- Pearson, Gerald L.; Sawyer, Baldwin (1952): Silicon P-N Junction Alloy Diodes. *Proceedings of the I.R.E.* 40, S. 1348-1351
- Peierls, Rudolf (1929): Zur Theorie der galvanomagnetischen Effekte. *Zeitschrift für Physik* 53, S. 255-266
- Peierls, Rudolf (1930): Zur Theorie der elektrischen und thermischen Leitfähigkeit von Metallen. *Annalen der Physik* 5. Folge, 4, S. 121-148
- Peierls, Rudolf (1932): Elektronentheorie der Metalle. *Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften* 11, S. 264-322
- Peierls, Rudolf (1980): Recollections of early solid state physics. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences* 371, S. 28-38
- Peierls, Rudolf (1993): Early work on solids, mainly in the thirties. *Reviews of Modern Physics* 65, S. 251-254
- Pfaffenberger, Joachim (1958): Die Technik des Silizium-Gleichrichters. *Siemens-Zeitschrift* 32, S. 115-122
- Pfister, Christian (1996) (Hg.): *Das 1950er Syndrom. Der Weg in die Konsumgesellschaft*. Bern, Stuttgart, Wien: Verlag Paul Haupt
- Pfister, H. (1955): Spaltbarkeit der AIII BV-Verbindungen InSb und AlSb. *Zeitschrift für Naturforschung* 10a, S. 79
- Pfisterer, Hermann (1987): Siemens Research Laboratories. (History of Research Laboratories 9). *Physics in Technology* 18, S. 32-40

- Pfisterer, Hermann (1994): Zur Geschichte des Reinst-Siliziums bei Siemens von 1951 bis 1957. In: Feldtkeller, Ernst; Goetzeler, Herbert (Hg.)(1994): Pioniere der Wissenschaft bei Siemens. Erlangen: Publicis MCD Verlag, S. 118-127
- Pippard, Sir Brian (1995): Elektrons in Solids. In: Laurie M. Brown, Abraham Pais, Sir Brian Pippard (Hg.)(1995): Twentieth Century Physics. Vol. III. Bristol, Philadelphia, New York: Institute of Physics Publishing, American Institute of Physics Press, S. 1279-1383
- Planck, Max (1947): Mein Besuch bei Adolf Hitler. *Physikalische Blätter* 3, S. 143
- Plettner, Bernhard (1994): Abenteuer Elektrotechnik. Siemens und die Entwicklung der Elektrotechnik seit 1945. München, Zürich: Piper
- Pohl, Hans (1985): Zur Zusammenarbeit von Wirtschaft und Wissenschaft im "Dritten Reich": die "Fördergemeinschaft der Deutschen Industrie" von 1942. *Vierteljahresschrift für Sozial- und Wirtschaftsgeschichte* 72, S. 508-536
- Powers, Thomas (1993): Heisenberg's War. The Secret History of the German Bomb. London: Jonathan Cape
- Queisser, Hans (1985): Kristallene Krisen. Mikroelektronik - Wege der Forschung, Kampf um Märkte. München, Zürich: Piper
- Queisser, Hans (1997): Materials Research, Basis of Modern Telecommunications. *Vortrag: 9th. Internat. Forum on the Frontiers of Telecommunications Technology, Tokyo, 10 July 1997*, S. 20
- Radkau, Joachim (1989): Technik in Deutschland. Vom 18. Jahrhundert bis zur Gegenwart (Neue Historische Bibliothek). Frankfurt/M.: Suhrkamp
- Radkau, Joachim (1993): 'Wirtschaftswunder' ohne technologische Innovation? Technische Modernität in den 50er Jahren. In: Schildt, Axel; Sywottek, Arnold (Hg.)(1993): Modernisierung im Wiederaufbau. Die westdeutsche Gesellschaft der 50er Jahre. Bonn: Dietz-Verlag, S. 129-154
- Ramsauer, Carl (1947): Eingabe an Rust. *Physikalische Blätter* 3, S. 43-47
- Ramsauer, Carl (1947): Zur Geschichte der Deutschen Physikalischen Gesellschaft in der Hitlerzeit. *Physikalische Blätter* 3, S. 110-114
- Rebentisch, Dieter (1989): Führerstaat und Verwaltung im Zweiten Weltkrieg. Verfassungsentwicklung und Verwaltungspolitik (Frankfurter Historische Abhandlungen, Bd. 29). Stuttgart: Franz Steiner Verlag
- Rebstock, Hans; Seiler, Karl (1954): Höchsthochfrequenzleitfähigkeit von hexagonalem Selen. *Zeitschrift für Naturforschung* 9a:1, S. 49-55
- Reichsluftfahrt-Ministerium, RLM (1943): Ausschreibung: Hochfrequenzfachkräfte für die Luftwaffe. *Hochfrequenztechnik und Elektroakustik* 61: Mai-Heft, S. 152
- Reimann, Bruno W. (1984): Die 'Selbst-Gleichschaltung' der Universitäten. In: Tröger, Jörg (Hg.)(1984): Hochschule und Wissenschaft im Dritten Reich. Frankfurt, New York: Campus Verlag, S. 38-52
- Reimer, Helmut (1974): 25 Jahre Transistor. Die Entwicklung der Herstellungsverfahren von Halbleiterelementen. *Wissenschaftliche Zeitschrift der technischen Hochschule Ilmenau* 20, S. 93-103
- Renneberg, Monika (1991): Die Physik und die physikalischen Institute an der Hamburger Universität im 'Dritten Reich'. In: Krause, Eckart; Huber, Ludwig; Fischer, Holger (Hg.)(1991): Hochschulalltag im 'Dritten Reich'. Die Hamburger Universität 1933-1945. Band 3. Berlin, Hamburg: Dietrich Reimer Verlag, S. 1097-1118
- Renneberg, Monika (1991): Zur Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Hamburger Universität im 'Dritten Reich'. In: Krause, Eckart; Huber, Ludwig; Fischer, Holger (Hg.)(1991): Hochschulalltag im 'Dritten Reich'. Die Hamburger Universität 1933-1945. Band 3. Berlin, Hamburg: Dietrich Reimer Verlag, S. 1052-1074
- Renneberg, Monika; Walker, Mark (1994) (Hg.): Science, Technology and National Socialism. Cambridge: Cambridge University Press
- Renneberg, Monika; Walker, Mark (1994): Scientists, Engineers and National Socialism. In: Renneberg, Monika; Walker, Mark (Hg.)(1994): Science, Technology and National Socialism. Cambridge: Cambridge University Press, S. 1-29
- Reuber, Claus (1953): 18. Große deutsche Funk-Ausstellung. *radio mentor* 19, S. 535-545
- Reuter, Frank (1971): Funkmeß. Die Entwicklung und der Einsatz des RADAR-Verfahrens in Deutschland bis zum Ende des Zweiten Weltkrieges. Opladen: Westdeutscher Verlag
- Ricking, Klaus (1995): Der Geist bewegt die Materie. Mens agit mollem. 125 Jahre Geschichte der RWTH Aachen. Aachen: Mainz-Verlag
- Riedel, Heide (1994): 70 Jahre Funkausstellung. Politik. Wirtschaft. Programm. Berlin: VISTAS Verlag

- Ringer, Walter; Welker, Heinrich J. (1948): Leitfähigkeit und Hall-Effekt von Germanium. *Zeitschrift für Naturforschung* 3a:1, S. 20-29
- Riordan, Michael; Hoddeson, Lillian H. (1997): Crystal Fire. The Birth of the Information Age. New York, London: W.W. Norton & Company
- Riordan, Michael; Hoddeson, Lillian H. (1997): Minority Carriers and the First Two Transistors. In: Goldstein, Andrew; Aspray, William (Hg.)(1997): Facets. New Perspectives on the History of Semiconductors. New Brunswick: IEEE Press, S. 1-33
- Riordan, Michael; Hoddeson, Lillian H. (1997): The origins of the pn junction. *IEEE Spectrum* 34:6, S. 46-51
- Rost, Rudolf (1952): Die Messerkristallode. *Funkschau* 24, S. 65-66
- Rost, Rudolf (1952): Temperaturfeste Kristall-Doden. *Fernmeldetechnische Zeitschrift* 5, S. 177-178
- Rost, Rudolf (1954): Kristallodentechnik. Berlin: Ernst & Sohn
- Rost, Rudolf (1956): Kristallodentechnik. 1. Ergänzungslieferung zur zweiten Auflage. Berlin: Ernst & Sohn
- Rost, Rudolf (1956): Kristallodentechnik. 2. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn
- Rost, Rudolf (1960): Kristallodentechnik. 2. Ergänzungsband zur zweiten Auflage. Berlin: Ernst & Sohn
- Rottgart, Jürgen (1938): Untersuchung an Detektoren im Gebiet sehr kurzer elektrischer Wellen. *Zeitschrift für Technische Physik* 9, S. 262-264
- Rouault, C. L.; Hall, C. N. (1952): A High-Voltage, Medium-Power Rectifier. *Proceedings of the I.R.E.* 40:11, S. 1519-1521
- Rukop, Hans (1952): Dr.-Ing. H. Rothe zum 25. Jubiläum. *Telefunken-Zeitung* 25, S. 75
- Runge, Wilhelm T. (1971): Ich und Telefunken. Erinnerungen aus 40 Jahren. o.O.: Als Manuskript gedruckt
- Runge, Wilhelm T. (1988): A personal reminiscence. In: Burns, Russell W. (Hg.)(1988): Radar Development to 1945. London: Peter Peregrinus, S. 227-228
- Sachse, H. (1948): Hochfrequenz-Oxydgleichrichter. *FIAT Review of German Science, 1939-1946, Electronics* Teil 1, S. 293-295
- Salow, Helmut; Beneking, Heinz; Krömer, Herbert; Münch, Waldemar v. (1963): Der Transistor. Physikalische und technische Grundlagen. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer
- Scaff, J. H.; Ohl, Russel S. (1947): Development of Silicon Crystal Rectifiers for Microwave Radar Receivers. *The Bell System Technical Journal* 26, S. 1-30
- Scholz, Lothar (1974): Technologie und Innovation in der industriellen Produktion. Theoretischer Ansatz und empirische Analyse am Beispiel der Mikroelektronik. Göttingen: Verlag Otto Schwarz
- Schön, Michael; Welker, Heinrich J. (1958) (Hg.): Halbleiter und Phosphore. Vorträge des Internationalen Kolloquiums 1956 "Halbleiter und Phosphore" in Garmisch-Partenkirchen. Braunschweig: Vieweg & Sohn
- Schopmann, Joop (1983): Philips' Antwort auf die neue Halbleiterära Germanium und Silizium (1947-1957). *Technikgeschichte* 50, S. 146-161
- Schopmann, Joop (1988): Industrious Science. Semiconductor research at the N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken, 1930 - 1957. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 19, S. 137-172
- Schottky, Walter (1923): Über kalte und warme Elektronenentladungen. *Zeitschrift für Physik* 14, S. 63-106
- Schottky, Walter (1938): Halbleitertheorie der Sperrschicht. (Kurze Originalmitteilungen). *Die Naturwissenschaften* 26, S. 843
- Schottky, Walter (1939): Statistik und Thermodynamik der Unordnungszustände in Kristallen, insbesondere bei geringer Fehlordnung. *Zeitschrift für Elektrochemie* 45, S. 33-72
- Schottky, Walter (1939): Zur Halbleitertheorie der Sperrschicht- und Spitzengleichrichter. *Zeitschrift für Physik* 113, S. 367-414
- Schottky, Walter (1940): Abweichung vom Ohmschen Gesetz in Halbleitern. *Physikalische Zeitschrift* 41, S. 570-573
- Schottky, Walter (1941): Ueber Sperrschichten. *Schweizer Archiv für angewandte Wissenschaft und Technik* 7, S. 20-29 und 82-86
- Schottky, Walter (1942): Vereinfachte und erweiterte Theorie der Randschichtgleichrichter. *Zeitschrift für Physik* 118, S. 539-592

- Schottky, Walter; Deutschmann, W. (1929): Zum Mechanismus der Richtwirkung in Kupferoxydulgleichrichtern. *Physikalische Zeitschrift* 30, S. 839-846
- Schottky, Walter; Spenke, Eberhard (1939): Zur quantitativen Durchführung der Raumladungs- und Randschichttheorie der Kristallgleichrichter. *Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus den Siemens-Werken* 18:3, S. 225-291
- Schramm, Percy E. (1995) (Hg.): Kriegstagebuch des Oberkommandos der Wehrmacht (1961). Bonn: Bernhard & Graefe
- Schubert, Helmut (1986): Walter Schottky und die Halbleiterphysik. *Kultur & Technik* 10:4, S. 250-258
- Schubert, Helmut (1987): Industrielaboratorien für Wissenschaftstransfer. Aufbau und Entwicklung der Siemensforschung bis zum Ende des Zweiten Weltkrieges anhand von Beispielen aus der Halbleiterforschung. *Centaurus* 30, S. 245-292
- Schultz, W. (1954): Zur Theorie der Gleichrichtung am Kontakt Metall-Halbleiter. *Zeitschrift für Physik* 138: 5, S. 598-612
- Schweber, Silvan S. (1986): The Empiricists Temper Regnat: Theoretical Physics in the United States 1920 - 1950. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* 17:1, S. 55-98
- Schweickert, Hans (1939): Über Selengleichrichter. *Verhandlungen der deutschen Physikalischen Gesellschaft* 20, S. 99-100
- Seidenberg, Philip (1997): From Germanium to Silicon. A History of Change in the Technology of the Semiconductors. In: Goldstein, Andrew; Aspray, William (Hg.) (1997): Facets. New Perspectives on the History of Semiconductors. New Brunswick: IEEE Press, S. 35-74
- Seiler, Karl (1936): Zur atomaren Dispersion und Absorption von Röntgenstrahlen nach der relativistischen Wellenmechanik von Dirac. *Annalen der Physik*, 5. Folge 27, S. 329-372
- Seiler, Karl (1941): Eine Methode zur Erzeugung von Heliumtemperaturen ohne Benutzung von flüssigem Wasserstoff. *Annalen der Physik*. 5. Folge 39, S. 129-163
- Seiler, Karl (1948): Detektoren. *FIAT Review of German Science, 1939-1946, Electronics Teil 1*, S. 272-292
- Seiler, Karl (1949): Die neuere Entwicklung der Kristallgleichrichter. *VDE Fachberichte* 13, S. 296-30301
- Seiler, Karl (1950): Die Temperaturabhängigkeit von statischen Kristallgleichrichterkennlinien und ihre theoretische Deutung. *Zeitschrift für Naturforschung* 5a, S. 393-397
- Seiler, Karl (1950): Flächengleichrichter aus Silizium. *Physikalische Verhandlungen* 1, S. 88
- Seiler, Karl (1953): Der Schichtkristall als Gleichrichter. *Archiv für Technisches Messen* Z 52-1, Lieferung 207, S. 87-90
- Seiler, Karl (1953): Halbleiter. In: Rint, Curt (Hg.) (1953): Handbuch für Hochfrequenz- und Elektrotechniker. II. Band. Berlin: Verlag für Radio-Foto-Kinotechnik, S. 117-147
- Seiler, Karl (1964): Physik und Technik der Halbleiter. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft
- Seiler, Karl; Geist, D.; Keller, K.; Blank, K. (1953): Gibt es in Germanium eine thermische Fehlordnung? *Die Naturwissenschaften* 40:2, S. 56-57
- Seiler, Karl; Wucherer, H. (1955): Die elektrische Trägheit von Halbleiterdioden. *Nachrichtentechnische Fachberichte. Beihefte der FTZ. Heft 1. Halbleiterdioden und Transistoren* In: (Hg.)0.: S. 2-10
- Seitz, Frederick (1940): The Modern Theory of Solids. New York: McGraw-Hill
- Seitz, Frederick (1995): Research on Silicon and Germanium in World War II. *Physics Today* Jan. 1995, S. 22-27
- Seitz, Frederick; Einspruch, Norman G. (1998): Electronic Genie. The Tangled History of Silicon. Urbana, Chicago: University of Illinois Press
- Serchinger, Reinhard W. (1999): Walter Schottky und die Forschung bei Siemens. In: Schneider, Ivo; Trischler, Helmuth; Wengenroth, Ulrich (Hg.) (1999): Akteure aus Naturwissenschaften und Technik auf dem Markt. (Abhandlungen und Berichte 14). München: Oldenbourg, S. im Druck
- Shive, John N. (1948): The Double-Surface Transistor. *Physical Review* 74, S. 689
- Shockley, William B. (1939): On the Surface States Associated with Periodic Potential. *Physical Review* 56, S. 317-323
- Shockley, William B. (1949): The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors. *The Bell System Technical Journal* 28, S. 435-489
- Shockley, William B. (1950): Electrons and Holes in Semiconductors. With Applications to Transistor Electronics. Princeton, Toronto, London, New York: D. Van Nostrand Company

- Shockley, William B. (1952): A Unipolar 'Field Effekt' Transistor. *Proceedings of the I.R.E.* 40, S. 1365-1376
- Shockley, William B. (1958): Transistor-Physik. *Physikalische Blätter* 14, S. 297-310
- Shockley, William B. (1958): Transistor-Technologie führt zu neuer Art Physik. *Physikalische Blätter* 14, S. 246-258
- Shockley, William B. (1972): How we invented the Transistor. *New Scientist* 21, S. 689-691
- Shockley, William B. (1976): The Path to the Conception of the Junction Transistor. *IEEE Transactions on Electron Devices* ED-23:7, S. 597-620
- Shockley, William B.; Pearson, Gerald L. (1948): Modulation of Thin Films of Semi-Conductors by Surface Charges. *Physical Review* 74, S. 232-233
- Shockley, William B.; Pearson, Gerald L.; Haynes, J. R. (1949): Hole Injection in Germanium - Quantitative Studies and Filamentary Transistors. *The Bell System Technical Journal* 28, S. 344-366
- Shockley, William B.; Sparks, Morgan; Teal, Gordon K. (1951): p-n Junction Transistors. *Physical Review* 83, S. 151-162
- Siemens-Museum (1986) (Hg.): Leistungen des Hauses Siemens. Halbleiter 1875-1983. Bearbeitet von Dr. Karl Arnold. München: Siemens-Museum
- Sigurdsson, Skúli (1996): Physics, Life and Contingency: Born, Schrödinger and Weyl in Exile. In: Ash, Mitchell G.; Söllner, Alfons (Hg.) (1996): Forced Migration and Scientific Change. Emigre German-Speaking Scientists and Scholars after 1933. Washington, Cambridge: German Historical Institute, Cambridge University Press
- Smith, Crosbie W.; Wise, M. Norton (1989): Energy and Empire. A biographical study of Lord Kelvin. Cambridge, New York, Sydney: Cambridge University Press
- Smith, Merritt Roe (1985) (Hg.): Military Enterprise and Technological Change. Perspectives on the American Experience. Cambridge (Mass.), London: MIT Press
- Smits, Friedolf M. (1976): History of Silicon Solar Cells. *IEEE Transactions on Electron Devices* ED-23, S. 640-643
- Smits, Friedolf M. (1985) (Hg.): A History of Engineering and Science in the Bell System. Electronics Technology (1925-1975). AT&T Bell Laboratories
- Söderqvist, Thomas (1994) (Hg.): The Historiography of Contemporary Science and Technology. Amsterdam: Harwood Academic Publishers
- Sommerfeld, Arnold (1927): Zur Elektronentheorie der Metalle. *Die Naturwissenschaften* 15, S. 825-833
- Sommerfeld, Arnold; Bethe, Hans (1933): Elektronentheorie der Metalle. In: Geiger, Hans; Scheel, Karl (Hg.) (1933): Handbuch der Physik, Band 24, Zweiter Teil. Berlin: Springer, S. 333-622
- Spenke, Eberhard (1929): Beitrag zur Formbestimmung mikroskopischer und ultramikroskopischer Objekte. *Annalen der Physik*, 5. Folge 1, S. 829-890
- Spenke, Eberhard (1936): Zur technischen Beherrschung des Wärmedurchschlages von Heißeleitern. *Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus den Siemens-Werken* 15:1, S. 92-121
- Spenke, Eberhard (1937): Die Frequenzabhängigkeit des Schroteffektes. *Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus den Siemens-Werken* 16:3, S. 128-136
- Spenke, Eberhard (1937): Die Raumladungsschwächung des Schroteffektes. II. Durchführung der Theorie für ebene Anordnungen. *Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus den Siemens-Werken* 16:2, S. 19-41
- Spenke, Eberhard (1941): Berechnung der Randschichtkapazitäten im Rahmen der Raumladungstheorie der Trockengleichrichter. *Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus den Siemens-Werken* 20:1, S. 41-67
- Spenke, Eberhard (1956): Elektronische Halbleiter. Eine Einführung in die Physik der Gleichrichter und Transistoren (1955). Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag
- Spenke, Eberhard (1956): Siliziumleistungsgleichrichter. In: Schön, Michael; Welker, Heinrich J. (Hg.) (1958): Halbleiter und Phosphore. Braunschweig: Vieweg, S. 630-640
- Spenke, Eberhard (1958): Leistungsgleichrichter auf Halbleiterbasis. *Elektrotechnische Zeitschrift* A 79, S. 867-875
- Spenke, Eberhard (1958): Silizium als Baustoff für Leistungsgleichrichter. *Siemens-Zeitschrift* 32, S. 110-115
- Spenke, Eberhard (1965): Elektronische Halbleiter. Eine Einführung in die Physik der Gleichrichter und Transistoren (1955). Berlin, Heidelberg, New York: Springer
- Spenke, Eberhard (1965): Versuchsausführung eines Thyristors für 700 A. *Siemens-Zeitschrift* 39, S. 253

- Spenske, Eberhard; Heywang, Walter (1981): Silizium - Werkstoff der Elektronik. 25 Jahre Siliziumentwicklung bei Siemens. *Siemens-Zeitschrift* 55:1, S. 7-12
- Spenske, Eberhard; Heywang, Walter (1982): Auf die Reinheit kommt es an. Silizium - wichtigster Werkstoff der modernen Halbleitertechnik. *Umschau* 82:5, S. 162-165
- Steinle, Friedrich (1997): Entering New Fields: Exploratory Uses of Experimentation. *Philosophy of Science (Proceedings)* 64, S. 65-74
- Steinle, Friedrich (1998): Exploratives vs. theoriebestimmtes Experimentieren: Ampères erste Arbeiten zum Elektromagnetismus (ZIF - Interdisziplinäre Studien, Band 3). In: Heidelberg, Michael; Steinle, Friedrich (Hg.)(1998): *Experimental Essays - Versuche zum Experiment*. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft, S. 272-297
- Stokes, Raymond G. (1991): Technology and the West German 'Wirtschaftswunder'. *Technology and Culture* 32:1, S. 1-22
- Strömer, Rudolf (1935): Beiträge zum Verhalten elektrolytischer Oxydschichten. *Zeitschrift für technische Physik* 16, S. 508-513
- Stuke, Joseph (1947): Zur Eigenleitung elektronischer Halbleiter. Göttingen: Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
- Sueur, R. (1949): Le Transistron Triode Type P.T.T. 601. *L'Onde Électrique* 29, S. 389-397
- Swinne, Edgar (1992): Richard Gans. Hochschullehrer in Deutschland und Argentinien (Berliner Beiträge zur Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik 14). Berlin: ERS-Verlag
- Tamm, Igor (1932): Über eine mögliche Art der Elektronenbindung an Kristalloberflächen. *Zeitschrift für Physik* 76, S. 849-850
- Tamm, Igor (1932): Über eine mögliche Art der Elektronenbindung an Kristalloberflächen. *Physikalsiche zeitschrift der Sowjetunion* 1, S. 733-746
- Teal, Gordon K. (1976): Single Crystals of Germanium and Silicon - Basic to the Transistor and the Integrated Circuit. *IEEE Transactions on Electron Devices* ED-27:7, S. 621-639
- Teal, Gordon K.; Little, J. B. (1950): Growth of Germanium Single Crystals. *Physical Review* 78, S. 647
- Teal, Gordon K.; Sparks, Morgan; Buehler, Ernest (1951): Groth of Germanium Single Crystals Containing p-n Junctions. *Physical Review* 81, S. 637
- Teichmann, Jürgen (1987): The concept of Color Center till 1940. Bologna: Editrice Compositori, In: G. Giuliani (Hg.)(1987): *The Origins os Solid-State Physics in Italy: 1945-1960*. Bologna: Editrice Compositori, S. 269-274
- Teichmann, Jürgen (1988): Zur Geschichte der Festkörperphysik. Farbzentrenforschung bis 1940 (Boethius-Texte und Abhandlungen zur Geschichte der exakten Naturwissenschaften, Band XVII). Stuttgart: Franz Steiner
- Teichmann, Jürgen; Szyborski, Krzysztof (1992): Point Defects and Ionic Crystals: Color Centers as the Key to Imperfections. In: Hoddeson, Lillian; Braun, Ernest; Teichmann, Jürgen u.a. (Hg.)(1992): *Out of the Crystal Maze*. New York, Oxford: Oxford University Press, S. 443-488
- Tietze, Ulrich; Schenk, Christoph (1978): Halbleiterschaltungstechnik. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag
- Torrey, Henry C.; Whitmer, Charles A. (1948): *Crystal Rectifiers*. New York, London: McGraw-Hill Book Company
- Trendelenburg, Ferdinand (1953): Aus der Arbeit des Forschungslaboratoriums der Siemens-Schuckertwerke. *Siemens-Zeitschrift* 27, S. 391-399
- Trendelenburg, Ferdinand (1957): Aus der Arbeit des Forschungslaboratoriums der Siemens-Schuckertwerke (2. Mitteilung). *Siemens-Zeitschrift* 31, S. 45-58
- Trendelenburg, Ferdinand (1962): Aus der Arbeit des Forschungslaboratoriums der Siemens-Schuckertwerke (3. Mitteilung). *Siemens-Zeitschrift* 36, S. 423-439 und 502- 515
- Trendelenburg, Ferdinand (1975): *Aus der Geschichte der Forschung im Hause Siemens*. Düsseldorf: VDI-Verlag
- Trenkle, Fritz (1979): *Die deutschen Funkmeßverfahren bis 1945*. Stuttgart: Motorbuch-Verlag
- Trenkle, Fritz (1987): *Die deutschen Funklenkverfahren bis 1945 (1982)*. Heidelberg: Alfred Hüthig Verlag
- Trischler, Helmuth (1992): *Luft- und Raumfahrtforschung in Deutschland 1900-1970*. Frankfurt, New York: Campus-Verlag
- Trischler, Helmuth (1994): Self-mobilization or Resistance? Aeronautical Research and National Socialism. In: Renneberg, Monika; Walker, Mark (Hg.)(1994): *Science, Technology and National Socialism*. Cambridge: Cambridge University Press, S. 72-87

- Trischler, Helmuth (1998): Im Spannungsfeld von Individuum und Gesellschaft. Aufgaben, Themenfelder und Probleme technikkbiographischer Forschung. In: Füßl, Wilhelm; Ittner, Stefan (Hg.)(1998): Biographie und Technikgeschichte. (BIOS - Zeitschrift für Biographieforschung und Oral History, Sonderheft 1998). Leverkusen: Leske + Budrich, S. 42-58
- van Arkel, A. E. (1939): Reine Metalle. Herstellung, Eigenschaften, Verwendung. Berlin: Julius Springer Verlag
- Vogel, Barbara (1991): Anpassung und Widerstand. Das Verhältnis Hamburger Hochschul-lehrer zum Staat 1919 bis 1945. In: Krause, Eckart; Huber, Ludwig; Fischer, Holger (Hg.)(1991): Hochschulalltag im 'Dritten Reich'. Die Hamburger Universität 1933-1945. Band 1. Berlin, Hamburg: Dietrich Reimer Verlag, S. 3-83
- Voigt, Johannes H. (1981): Universität Stuttgart - Phasen ihrer Geschichte. Stuttgart: Wittwer
- Walk, Joseph (1996) (Hg.): Das Sonderrecht für die Juden im NS-Staat. Eine Sammlung der gesetzlichen Maßnahmen und Richtlinien - Inhalt und Bedeutung. (Uni-Taschenbücher 1889). Heidelberg: C. F. Müller
- Walker, Mark (1990): Die Uranmaschine. Mythos und Wirklichkeit der deutschen Atombombe (1989). Berlin: Siedler
- Walker, Mark (1995): Nazi Science. Myth, Truth and the German Atomic Bomb. New York, London: Plenum Press
- Walker, Mark (1997): Twentieth-Century German Science. Institutional Innovation and Adaption. In: Krige, John; Pestre, Dominique (Hg.)(1997): Scienc in the Twentieth Century. Amsterdam: Harwood, S. 796-819
- Warnow-Blewett, Joan; Teichmann, Jürgen (1992): Guide to Sources for History of Solid State Physics. New York: American institute of Physics
- Weart, Spencer (1992): The Solid Community. In: Hoddeson, Lillian; Braun, Ernest; Teichmann, Jürgen u.a. (Hg.)(1992): Out of the Crystal Maze. New York, Oxford: Oxford University Press, S. 617-669
- Weidel, J. (1954): Tellur-Einkristalle nach dem Czochralski-Verfahren. *Zeitschrift für Naturforschung* 9a, S. 697
- Weier, Sigfrid von (1983) (Hg.): Männer der Funktechnik. 70 Lebenswerke deutscher Pioniere von Frid, Rundfunk und Fernsehen. Berlin, Offenbach: VDE-Verlag
- Weiner, Charles (1973): How the transistor emerged. A technical invention was aided by social inventions, which translated basic physics into practice. *IEEE Spectrum* 10:1, S. 24-33
- Weiß, Herbert (1953): Über die elektrischen Eigenschaften von InSb. *Zeitschrift für Naturforschung* 8a, S. 463-469
- Weiß, Herbert (1957): Die magnetische Widerstandsänderung in InAs. *Zeitschrift für Naturforschung* 12a, S. 80
- Weiß, Herbert (1965): Neue Halbleiterwerkstoffe und -bauelemente. *Siemens-Zeitschrift* 39, S. 433-438
- Weiß, Herbert (1969): Physik und Anwendung galvanomagnetischer Bauelemente. Braunschweig: Vieweg-Verlag
- Weiß, Herbert (1975): Steuerung von Elektronenströmen im Festkörper. *Physikalische Blätter* 31, S. 156-165 und 209-212
- Weiß, Herbert; Welker, Heinrich J. (1954): Zur transversalen magnetischen Widerstandsänderung von InSb. *Zeitschrift für Physik* 138, S. 322-329
- Weißhaar, E. (1955): Magnetische Sperrschichten in Germanium II. *Zeitschrift für Naturforschung* 10a, S. 488-495
- Weißhaar, E.; Welker, Heinrich J. (1953): Magnetische Sperrschichten in Germanium. *Zeitschrift für Naturforschung* 8a, S. 681-686
- Welker, Heinrich J. (1936): Allgemeine Koordinaten und Bedingungsgleichungen in der Wellenmechanik. *Mathematische Annalen* 113, S. 304-319
- Welker, Heinrich J. (1938): Über ein elektronentheoretisches Modell des Supraleiters. *Physikalische Zeitschrift* 39, S. 920-925
- Welker, Heinrich J. (1938): Über ein elektronentheoretisches Modell des Supraleiters. *Zeitschrift für technische Physik* 19, S. 606-611
- Welker, Heinrich J. (1938): Über ein elektronentheoretisches Modell des Supraleiters. *Sitzungsberichte der Bayerischen Akademie der Wissenschaften. Math.-naturwiss. Abteilung* 79, S. 115-138
- Welker, Heinrich J. (1939): Supraleitung und Magnetische Austauschwechselwirkung. *Zeitschrift für Physik* 114, S. 525-551

- Welker, Heinrich J. (1941): Über den Spitzendetektor und seine Anwendung zum Nachweis von cm-Wellen. *Jahrbuch 1941 der deutschen Luftfahrtforschung* III, S. 63-68
- Welker, Heinrich J. (1943): Zur Elektronentheorie der Supraleitung. *Physikalische Zeitschrift* 44, S. 134-138
- Welker, Heinrich J. (1948): Ein wellenmechanisches Modell des Supraleiters. *Zeitschrift für Naturforschung* 3a, S. 461-469
- Welker, Heinrich J. (1949): Über den Zusammenhang zwischen der Supraleitung und der gemischten Leitung. *Annalen der Physik. 6. Folge* 5, S. 1-13
- Welker, Heinrich J. (1950): Sur la théorie de l'effet hall pour le cas de conducteurs mixtes dans un champ électrique alternatif. *L'onde Electrique* 30, S. 309-316
- Welker, Heinrich J. (1951): Walter Schottky zum 65. Geburtstag. *Zeitschrift für angewandte Physik* 3, S. 280
- Welker, Heinrich J. (1951): Zur Theorie der galvanomagnetischen Effekte bei gemischter Leitung. *Zeitschrift für Naturforschung* 6a, S. 184-191
- Welker, Heinrich J. (1952): Über neue halbleitende Verbindungen. *Zeitschrift für Naturforschung* 7a, S. 744-749
- Welker, Heinrich J. (1953): Über neue halbleitende Verbindungen II. *Zeitschrift für Naturforschung* 8a, S. 248-251
- Welker, Heinrich J. (1956): Über halbleitende Verbindungen vom Typus AIII BV. *Technische Rundschau* 50, S. 1-16
- Welker, Heinrich J. (1965): Zielsetzungen und Schwerpunkte der Arbeit des Forschungslaboratoriums der Siemens-Schuckertwerke. *Siemens-Zeitschrift* 39, S. 421-427
- Welker, Heinrich J. (1974): Aspekte der industriellen Forschung. *Siemens-Zeitschrift* 48, S. 970-973
- Welker, Heinrich J. (1976): Discovery and Development of III-V Componds. *IEEE Transactions on Electron Devices* ED-23:7, S. 664-674
- Welker, Heinrich J. (1978): Neue Dimensionen der Physik durch Kommunikation und Informatik. *Physikalische Blätter* 34, S. 558-565
- Welker, Heinrich J. (1979): From Solid State Research to Semiconductor Electronics. *Annual Review of Materials Science* 9, S. 1-21
- Wellhöner, Volker (1996): 'Wirtschaftswunder' - Weltmarkt - westdeutscher Fordismus. Der Fall Volkswagen. Münster: Westfälisches Dampfboot
- Wildes, Karl L.; Lindgren, Nilo A. (1985): A Century of Electrical Engineering and Computer Science at MIT, 1882-1982. Cambridge, London: MIT-Press
- Willeke, Stefan (1995): Die Technokratiebewegung in Nordamerika und Deutschland zwischen den Weltkriegen. Frankfurt, Berlin, Bern u.a.: Peter Lang Verlag
- Williams, Kathleen Broome (1996): Secret Weapon : U.S. High-Frequency Direction Finding in the Battle of the Atlantic. Annapolis: Naval Institute Press
- Wilson, Alan H. (1931): The Theory of Electronic Semi-Conductors. *Proceedings of the Royal Society of London A* 133, S. 458-491
- Wilson, Alan H. (1931): The Theory of Electronic Semi-Conductors. II. *Proceedings of the Royal Society of London* 134, S. 277-287
- Wilson, Alan H. (1953): The Theory of Metals (1936). Cambridge: Cambridge University Press
- Wilson, Alan H. (1980): Solid State physics 1925-1933: Opportunities missed and Opportunities seized. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences* A 371, S. 39-48
- Wise, George (1985): Science and Technology. *OSIRIS, 2nd Series* 1, S. 229-246
- Wolff, G. A.; Herbert, R. A.; Broder, J. D. (1955): Electroluminescence of GaP. *Physical Review* 100, S. 1144-1145
- Wolff, Michael F. (1976): The genesis of the integrated circuit. *IEEE Spectrum* 13:8, S. 44-53
- Wolff, Stefan L. (1993): Vertreibung und Emigration in der Physik. *Physik in unserer Zeit* 24, S. 267-273
- Wolfschmidt, Gudrun (1993): Kiepenheuers Gründung von Sonnenobservatorien im Dritten Reich. Kontinuität der Entwicklung zur internationalen Kooperation. *Wissenschaftliches Jahrbuch des Deutschen Museums* 9, S. 283-318
- Wolfschmidt, Gudrun (1994): Sonnenphysik im Zweiten Weltkrieg: Wissenschaft oder Kriegsforschung? In: Meinel, Christoph; Voswinkel, Peter (Hg.)(1994): Medizin, Naturwissenschaft, Technik und Nationalsozialismus. Kontinuitäten und Diskontinuitäten. Stuttgart: GNT-Verlag, S. 152-159
- Zangwill, Andrew (1988): Physics at Surfaces. Cambridge, New York, New Rochelle u.a.: Cambridge University Press

- Zener, Clarence (1934): A Theory of the Electrical Breakdown of Solid Dielectrics. *Proceedings of the Royal Society Series A*, 145, S. 523-529
- Zenneck, Hans (1958): Erfahrungen mit Silizium-Gleichrichtern. *Siemens-Zeitschrift* 32, S. 122-128
- Zetzmann, Hans J. (1963) (Hg.): Die Flugfunkforschung im Raume München, 1908 - 1962. Oberpfaffenhofen: Flugfunk-Forschungsinstitut
- Zielaseck, Gotthold (1954): Zur Anwendung von AlSb für Kristalloden. *Archiv der elektrischen Übertragung* 8, S. 529-533
- Zierold, Kurt (1968): Forschungsförderung in drei Epochen. Deutsche Forschungsgemeinschaft. Geschichte, Arbeitsweise, Kommentar. Wiesbaden: Franz Steiner Verlag

Dank

Es ist mir eine Freude all denen zu danken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

So danke ich Prof. Dr. Walter Kaiser dafür, mein Interesse an der Technikgeschichte geweckt und mich auch in den teilweise hektischen Phasen meiner Arbeit unterstützt zu haben. Prof. Dr. Klaus Heime danke ich für die Übernahme des Koreferats, für fachliche Hinweise und für die Bereitstellung weitergehender Informationen.

Dr. Oskar Blumtritt (München), Dr. Michael Eckert (München), Dr. Michael Friedewald (Karlsruhe) und Andreas Fickers (Aachen) danke ich für anregende Diskussionen, in denen ich viel gelernt habe. Leider konnte ich nicht alles davon schon in dieser Arbeit umsetzen. Für ihre Mühe und die sprachliche und inhaltliche Unterstützung bei der Fertigstellung des Manuskripts danke ich besonders Dr. Beate Ceranski (Stuttgart).

Als Zeitzeugen und Gesprächspartner für wissenschaftliche und technische Fragen gilt mein besonderer Dank Prof. Dr. Otfried Madelung (Marburg) und Prof. Dr. Herbert Mataré (Malibu). Prof. Dr. Berthold Bosch (Bochum) bin ich für Hinweise und die Über-sendung von Material und Informationen zu Dank verpflichtet.

Für ihre Hilfsbereitschaft beim Auffinden und Heraussuchen von Archivalien danke ich stellvertretend Dr. Norbert Becker (Uni Archiv Stuttgart), Herrn Bründel (DTM), Herbert Böhner (SiemensForum), Manfred Debold (Micronas - Intermetall) und Dr. Wilhelm Füssel (DM-Archiv). Gerhard Grave und den Mitarbeitern des Bücherfahr-dienstes der RWTH Aachen sei für ihre Mühe und ihre Flexibilität bei der Handhabung von Fristüberschreitungen gedankt. Wilma Vonhoegen (Aachen) danke ich für ihre Hilfe in den vielen kleinen Details dieser Arbeit und des Büroalltags.

Ein ganz besonderer Dank geht an Dr. Nani Clow (Berlin). Sie hat mich nie die Hoffnung verlieren lassen und mit mir alle Probleme und Schwierigkeiten dieser Arbeit solange diskutiert, bis wir gemeinsam eine Lösung finden konnten.

Anhang

Interview mit Herbert Mataré

Montag, den 9. Februar 1998 bei Herrn Prof. Dr. Mataré zu Hause in Hückelhoven.
Anwesend: Prof. Dr. Herbert Franz Mataré (H.M.) und Kai Handel (K.H.)

K.H.: Guten Morgen Herr Mataré, ich würde mich gerne mit Ihnen über Ihr wissenschaftliches Leben, insbesondere die ersten 20 Jahre bis in die späten 50er Jahre, unterhalten.

Sie sind in Aachen aufgewachsen und haben in Aachen an der Technischen Hochschule angefangen zu studieren? Was haben Sie genau studiert und bei wem?

Studium

H.M.: Ich habe mit technischer Physik begonnen und habe mein Vordiplom in technischer Physik gemacht, was auch Chemie einschloß damals. Und zwar übersprangen wir so ein paar Experimental-Semester und hatten eigentlich das selbe nachher an analytischer Chemie zu machen, Elektrochemie usw. und Quantitative Chemie wie die Chemiker. Und später ging ich dann in die Vorlesungen bei Kraus in höherer Mathematik und bei Fuchs in Atomphysik. Dort habe ich die ersten Einführungen gehört, auch in die Festkörperphysik bei Seitz. Auch in Aachen gab es einen Seitz, der war sehr gut in theoretischer Physik. Dann habe ich mein Diplom gemacht, indem ich zusätzlich bei dem Institut für Auslands-Ingenieure, technisches Französisch und technisches Englisch gemacht habe, was mir sehr zu gute gekommen ist. Ich habe da mit eins abgeschlossen in Französisch und Englisch. Ich habe das auch auf dem Diplomzeugnis gehabt.

Ja, ich wollte meinen Doktor erst noch in Aachen machen. Ich bekam von Herrn Professor Starke eine Arbeit über atmosphärische Gasabsorption. Ich fand auch die Rohrleitung von Mannesmann aufgebaut oben im Institut, da war das Institut noch in der Schinkelstraße, wo auch Rogowski war. Ich hatte gerade aufgebaut, das war Anfang 1939, und angefangen zu messen, hatte atmosphärische Gase eingefüllt in lange Rohrleitungen, weil die Absorption sehr gering ist. Da hieß es Aachen wird geräumt. Das war Anfang des Krieges, so im August 1939. Das war also so kritisch mit der Arbeit, daß ich mir dachte, ich komme hier doch nicht zu Ende. Dann habe ich mein Zeugnis, mein Diplomzeugnis, nach Berlin zu *Telefunken* geschickt und hab' auch sofort ein Angebot bekommen, ins Laboratorium von *Telefunken* zu kommen, wegen der Arbeiten auf dem Radargebiet. Ich bin dann nach Berlin gefahren und hab' gleich da angefangen. Ich erinnere mich noch, wie ich gerade zu Beginn meiner Arbeiten im September im Restaurant in Berlin saß und hörte wie Hitler sagte, wir schießen jetzt zurück in Polen. Ja, das war meine Begrüßung in Berlin.

K.H.: Kann ich ihnen noch kurz eine Frage zu Aachen stellen? Sie sagten Aachen wird geräumt, das bedeutete, daß die Technische Hochschule geschlossen wurde, oder?

H.M.: Das konnte man sich denken ja, das wurde ja auch nachher gemacht, leider Gottes.

K.H.: Und noch eine Frage zu den Studienbedingungen, wie war das mit den nationalsozialistischen Studenten an der Technischen Hochschule in Aachen?

H.M.: Das ganze war folgende Situation: Ich habe 1932 die französische Weltausstellung besucht. Ich wurde eingeladen von meinem Onkel, ich habe mein Studium am Gymnasium für 1 Jahr unterbrochen, ich war in Genf, und ich habe nachher in

Genf studiert. Und da kam ich dann auf diese Ausstellung durch meinen Onkel, der in Genf beim Völkerbund war. Hab' mich da eingetragen für verschiedene Literatur, die man mir nachher schickte, und hab' auch Journale mitgebracht, ganz harmlos im Prinzip. Da kommt mit einmal eine Gruppe der Gestapo ans Haus und fragt: „Ist hier der Herbert Mataré?“

Ich sagte, ich habe meine Stube hier oben. Sie kamen dann mit herauf. Zwei, drei Leute so privat, nicht in Uniform, kommen als Kriminalbeamte von der Gestapo, wiesen sich ja auch aus als Gestapoleute. Sie haben dann mein ganzes Zimmer durchsucht. Es war voller Bücher in meinem Raum. Sie haben alles auseinandergepult. Und haben alle französische Literatur, die ich da hatte, mitgenommen, als ob ich als Spion in Frankreich gewesen wäre, so ungefähr. Das war der erste Eindruck vom Nationalsozialismus.

K.H.: In welchem Jahr war das, erinnern Sie das noch?

H.M.: Ja es war knapp nach 1933. Es war ganz am Anfang. Ich habe also schon manchmal meinen jüdischen Freunden in USA erzählt, wenn sie so Vorwürfe machten: „Sie sind doch in Deutschland gewesen und haben für Hitler gearbeitet“. Da habe ich gesagt, hören Sie mal, bei mir wurde schon Haussuchung gehalten, als noch meine jüdischen Freunde Schlange standen, um in die Partei zu kommen. Damals waren die Juden noch sehr optimistisch, die wollten alle in die Partei. Anfang 1933 war ja noch gar keine Judenverfolgung und ich hatte aber schon meine großen Schwierigkeiten, ich war schon denunziert worden.

K.H.: Aber die Juden wurden doch schon an den Hochschulen sehr früh Anfang 1933 aus allen Ämtern enthoben.

H.M.: Ja das fing schon sehr bald an, aber ich weiß noch, daß sie am Anfang gerne in die Partei gekommen wären.

K.H.: Haben Sie was von Entlassungen von Professoren an der RWTH mitbekommen? Können Sie sich erinnern? Auch an Ihre Studienkollegen?

H.M.: Es waren einige Herren, die waren sehr eingeschüchtert, ich glaube nicht, daß sie direkt entlassen waren, aber ich weiß, nur im Bergmännischen war ein Professor der war auf der schwarzen Liste. Der war derjenige der eigentlich im Anfang, es war noch vor der Zeit etwa 1932, der genehmigen mußte, wenn einer ins Ausland zum Studieren ging. Ich war bei dem und wollte im Ausland studieren. Der sagte zu mir: „Herr Mataré, da haben Sie gar keine Chancen mehr, denn Sie sind ja nicht Parteimitglied, Sie haben nichts mit der SS zu tun und Sie sind also eigentlich als Gegner bekannt, also, das geht gar nicht.“ Der wurde auch später seines Amtes enthoben. Ich hab' den Namen vergessen.

Da waren natürlich auch Studenten, die sich frei über Hitler geäußert und ihn verhöhnt haben. Die sind dann von der Gestapo auch verhört worden, so wie ich. Ich mußte da zum Polizeipräsidium und dann wurde mir gesagt: „Ihre Unterlagen werden vernichtet, sind Sie einverstanden?“ Was soll ich dagegen sagen, ich mußte unterschreiben, daß die Unterlagen vernichtet wurden, damit bin ich Gott sei Dank herausgekommen.

Während der Studentenführer nachher tot war, der wurde anscheinend in der Kaserne vom Fenster in den Hof hinausgeworfen. Und vorher bei einer Schlägerei, der war also ziemlich brutal, der wehrte sich und wenn man diesen Leuten so begegnete, dann war sehr schnell Schluß. Ich weiß, ich hab' den Namen vergessen, das war der Studentenführer in Aachen, der wurde also dann als Tod erklärt. Aus dem Fenster gefallen, das war die offizielle Darstellung. Geht der einfach und fällt aus dem Fenster.

H.M.: Ja ich hatte noch mehr Probleme, ich wurde später noch mal denunziert, zweimal. Als ich in Berlin war, mußte ich zur Gestapo. Da wurde ich verhört und der SS-Mann sagte: „Hier ist ein Brief, da schreibt mir einer, ein gewisser Wichura aus

Altenburg, da war meine Frau einquartiert in Altenburg bei Kassel und da war ein Althändler, der war aus Südafrika und der wollte sich da beliebt machen. Der schreibt, Sie hätten gesagt, Hitler müsste umgebracht werden, es wäre höchste Zeit, daß der Krieg beendet würde usw. ganz grob.“ Ja, ich sagte nur: „Was soll ich dazu sagen, so, wie der sich ausdrückt habe ich mich nicht ausgedrückt.“ Ich habe aber nicht gesagt, ich habe es nicht gesagt und Gott sei Dank hatte ich einen sympathischen SS-Mann vor mir, das kam auch vor. Ein sehr vernünftiger und kluger Mann, und der hat die Sache einfach dadurch in den Griff gekriegt, daß er gesagt hat, das ist ein Südafrikaner, der will sich hier beliebt machen. Aber was mir geholfen hat, war, daß Dr. Rothe mich als U.K., als wichtig hinstellte in seiner Liste, der mußte ja eine Liste machen und ich hatte dasselbe Problem, daß Sie von Welker beschreiben, daß ich also UK gestellt wurde oder nicht.¹ Rothe hat mich dauernd U.K. gestellt, der hat immer gesagt, ich wäre entscheidend wichtig für die Radarentwicklung. Dadurch bin ich durch den ganzen Krieg durchgekommen.

Sogar als der Volkssturm eingezogen wurde, hatte ich einen offiziellen Zettel, daß ich meine Arbeiten durchführen mußte.

Arbeit bei Telefunken

K.H.: Und damit kommen wir zur Arbeit bei *Telefunken* in Berlin. Sie haben da zunächst am Rauschen von Dioden und Detektoren gearbeitet? Damals war der Schwerpunkt sicherlich noch auf den Röhrendioden?

H.M.: Es fing mit Röhren an, wie es in meinem Buch von 1951 auch ist.² Es fing mit Röhren an, ich hatte die ganzen Aufbauten gemacht und die Rauschmessungen erst mal bestätigt, die Rothe gemacht hatte. Dann hatte ich mir dann neue Aufbauten gemacht mit einem Rauschnormal, die sehr gut gingen und dann kam die Frage: Rukop kam auch ins Labor und sagte zu uns, der war sehr gut im Besprechen von Problemen. Wir kommen ja nicht hin mit diesen Pilzdioden. Das waren also Röhren, die waren so klein wie ein Fingernagel und da waren zwei Dioden drin, auf einer Kathode waren zwei Anoden. Mit denen machte ich Kompensation. Das Problem war, wenn Sie einen Superheterodyn machen im Mikrowellengebiet, dann können Sie nicht cm-Wellen direkt verstärken. Sie müssen also heruntertransponieren. Das machen Sie mit einem lokalen Oszillator, der in derselben Frequenzlage ist, wie dieses Signal. Und dadurch können Sie dann also die ZF, also die Zwischenfrequenz, abzweigen, die dann wesentlich niedriger ist, so daß Sie diese verstärken können. Das machte ich mit den Duodioden von Herrn Kleen, so daß ich den Oszillator in der Erdleitung hatte. Dann können Sie, weil die Ströme dann im Gegentakt in einer Gegentaktanordnung gegeneinander fließen, das Rauschen des Oszillators kompensieren und kriegen nur das Rauschen vom Signal, wenn die beiden Charakteristiken gleich sind. Das gelang nicht mal Herrn Kleen mit seinen Duo-Dioden. Aber noch weniger gelang es mir mit den Kristall-duodioden, die ich dann machte. Ich machte dann zwei Nadeln auf den Kristall und hab' die beiden Nadeln als Anoden benutzt und die Kathode war der Kristall. Ich glaub, ich hab' das auch Herrn Bosch noch mal aufgezeichnet, der hat das da in seinem Artikel publiziert.³ Naja, also wir haben dann diese Versuche gemacht und ich hab' dann manchmal auch Kompensation gehabt.

K.H.: Anfangs, also 41/42 haben Sie noch mit Pyrit gearbeitet und später dann an Silizium?

¹ Zu Welkers U.K.-Stellung siehe Handel, Kai (1999): Halbleiterforschung und Radar im Zweiten Weltkrieg. In C. Meinel (Hg.) (1999): Instrument-Experiment. Historische Studien. Bassum: GNT-Verlag.

² Mataré, Herbert F. (1951): Empfangsprobleme im Ultrahochfrequenzgebiet unter besonderer Berücksichtigung des Halbleiters. München: Oldenbourg.

³ siehe Bosch, Berthold (1997): Ein Revolutionär wird 50: Happy Birthday, Transistor! *CQ DL* 68:12, S. 947-951.

H.M.: Wir haben mit allen möglichen Materialien gearbeitet. Natürlich haben wir mit PbS (Bleisulfid) gearbeitet, Welker schickte auch schon mal ein bißchen Germanium herüber und Silizium kam dann schließlich später von Günther aus Breslau. Das hatte ich ihnen glaube ich geschrieben: unsere Messungen zeigten auch immer wieder (auch in Paris nachher) größere Kapazität und die größeren Sperrschichten. Die Ausdehnung beim Germanium war größer, weil es eben schon reiner war. Wir waren schon in der Nähe von 10^{17} ; während beim Silizium war das 10^{20} und es hat also viel länger gedauert, Silizium sauber zu bekommen als Germanium. Darum war es auch so interessant, daß wir in Paris, genau wie Bell-Labs, zur selben Zeit mit Germanium diesen Effekt hatten, weil das Germanium eben gut war. Es war eben eine brauchbare Sperrschicht größerer Type und vor allen Dingen hatten wir eben schon etwas wie Minoritätsinjektion oder eben Zonen, pn-Zonen. Aber Sie müssen bedenken, da um die Zeit, war man sich noch gar nicht so klar über den Unterschied – das Eine oder das Andere.

Schottky-Theorie

K.H.: Die Ausdehnung der Sperrschichten haben Sie nach der Schottky-Theorie berechnet. Erinnern Sie sich, wann Sie zum ersten Mal von der Schottky-Theorie gehört haben? Haben Sie in Berlin selbst mit Schottky darüber geredet?

H.M.: Schottky war gar nicht mehr in Berlin, der war auch schon von Siemens irgendwohin, in Pretzfeld und der gab dann auf unserer Tagung in Jena ein paar Bemerkungen über seine Rectifier Theorie und kriegte im wesentlichen also mit, was der Dr. Rothe erzählte über unsere Arbeit. Und dann diskutierten wir lange. Auch da wurde schon über Defektelektronenleitung viel gesprochen, Schottky hat's ja in seinem Bericht drin.

H.M.: Zum ersten Mal hörte ich von der Schottky-Theorie schon in Aachen. Der entsprechende Band der Zeitschrift für Physik kam gerade 1939 in die Bibliotheken. Dann hab' ich viel bei *Telefunken* über die Schottky-Theorie diskutiert, mit Meinke, Wallauschek usw.

K.H.: Das heißt die Schottky-Theorie war quasi die Grundlage auf der man über Detektoren nachgedacht hat.

H.M.: Ja mit der wir ausrechneten, wie groß die Sperrschichten sein könnten.

K.H.: Gut, genau, wenn wir noch kurz bei der Ausbildung bleiben. Sie haben Quantenmechanik gelernt, nehme ich an, während ihres Studiums. Und auch die Bandtheorie der Festkörper?

H.M.: Quantenmechanik ja, aber die Bandtheorie der Festkörper weniger. Die wurde mir erst klar, nachdem ich in Paris in der ersten Zeit mit Welker zusammenarbeitete und das Buch von Seitz uns in die Hände kam und wir darüber diskutierten.⁴ Da haben wir viel über die Bandtheorie diskutiert. Und da gab es noch ein paar Franzosen, über die hat der Welker sich immer amüsiert, z. B. Sueur malte immer weitere Bänder nach unten.

K.H.: Das heißt, die Bandtheorie wurde ihnen erst sehr viel später nach der Schottky-Theorie bekannt.

H.M.: Ja, Welker hatte schon eine sehr abgeklärte Einstellung zu dem Seitz-Buch. Während ich das Seitz-Buch als noch relativ neu empfand. Haben Sie eigentlich unseren Bericht, wo Welker und ich in den *Comptes Rendue* mitteilen, wo wir stehen von 1950/1951.⁵ Wo wir bei der *Société des Électriciens* in

⁴ Seitz, Frederick (1940): *The Modern Theory of Solids*. New York: McGraw-Hill.

⁵ Engel, A.; Welker, Heinrich J.; Mataré, Herbert F. (1950): *Les Cristaux Détecteurs et leur Emploi en Hyperfréquences*. *Extrait du Bulletin de la Société française des Électriciens* 6e Série, X: 107.

Paris vortrugen, Welker spricht über die Bandtheorie usw. ich spreche über die Empfindlichkeiten.

K.H.: Ja, über Welker weiß ich, daß die Bandtheorie schon seit Mitte der 30er Jahre bei Sommerfeld in München ein viel diskutiertes Thema war.

Detektormaterial Silizium?

K.H.: Können wir noch einmal kurz auf das Silizium zurückkommen? Bei *Telefunken* hat man sich ja dann auf Siliziumdetektoren festgelegt. Gab es Gründe für die Bevorzugung von Silizium gegenüber Germanium?

H.M.: Ja, die Recovery time! Es lag aber auch daran, daß Germanium schon sauberer war. Denn wenn Herr Welker eine gute Charakteristik hatte mit sauberem Sperrstrom, wie das so normalerweise ein Techniker sich sagt, dann kann das auch nur ein guter Detektor sein, wenn ich einen kleinen Sperrstrom habe. Die waren alle sehr kapazitätsreich und schalteten nicht. Wenn Sie also eine hochfrequente Welle hatten, dann kriegten Sie mit diesen Detektoren keine Recovery time, Sie wissen ja Recovery time ist ja definiert in Mikrosekunden, wie schnell der Detektor das negative Signal anzeigt, also wenn Sie einen Wechsel haben. Und diese Schnelligkeit war beim Silizium erheblich höher weil es eben höher dotiert war, war also weniger geeignet für Transistoren. Aber gut für Mikrowellen.

K.H.: D.h. Sie sagen Silizium war also weniger rein vorhanden, hat deswegen eine höhere Leitfähigkeit gehabt und war deswegen für Detektoren gut einsetzbar, da sie in der Lage waren, dann bei hohen Frequenzen mitzugehen.

H.M.: Ja das war sehr erstaunlich für die Ingenieure, da waren die Charakteristiken der Siliziumdetektoren, die waren auf dem Oszilloskop praktisch eine Linie mit einem kleinen Dip, d.h. sie hatten fast keine Sperrspannung. Die arbeiteten wesentlich besser als Germanium mit einer wunderbaren negativen Charakteristik und mit wunderbaren Sperrstrom - parallel zur X-Achse. Dazu ein sauberer Zener-Durchbruch. Das nützte gar nichts. Solche Charakteristiken, die kaum eine Sperrspannung hatten, arbeiteten hervorragend als Mikrowellen-Rectifiers.

K.H.: Können Sie noch etwas zu der Gruppe, in der Sie bei *Telefunken* gearbeitet haben sagen, wie viele Leute waren das etwa? Haben Sie mit Karl Seiler, das ist der Name der mir einfällt, zusammen gearbeitet?

H.M.: Ich fing in Berlin bei Prof. Meinke an, der nachher in München war, in seiner Gruppe meine Messungen aufzubauen. Da hatte ich die Hilfe von vielleicht 4 oder 5 Ingenieuren, die also die Hohlräume machten, und dann kam die Werkstatt dazu. Es war also eine enorme Gruppe, es waren sehr viele Leute und wir kriegten eigentlich alles, was wir wollten. Wir waren eigentlich sehr verwöhnt. Wenn wir was ausdachten, das war im Nu produziert und im Nu gemacht, und ich hab' noch nie so schön arbeiten können, wie bei der *Telefunken* im Krieg. Wenn wir etwas brauchten, gingen die Herren mit Butterpaketen in Berlin bei den Werkstätten das machen lassen, weil das Geld nichts wert war. Aber es klappte, *Telefunken* hat das immer irgendwie hingekriegt. Was störte war, von oben her die Lenkung, die so stark den „Würzburg“ bevorzugten durch Runge.

Kotowski hatte den Würzburg aufgebaut – wie hieß das – LH3 oder was, und das war 60 cm und Runge sagte, da können wir alles mit machen, was wollen wir denn mit kürzeren Wellen, das wird alles viel schwieriger. Ist ja klar, wurde alles ja viel, sehr viel schwieriger. Aber Kleen war auch noch nicht so weit, der hatte auch noch keine 3 cm-Klystrons. Das mußte ja erst gemacht werden. Darum sagte Herr Runge immer wieder, wir haben das ganze und das läuft gut und die Empfindlichkeit ist hoch usw. und dann hatte er immer irgendwelche Ausflüchte gefunden, warum man das nicht machen sollte. Bis dann aus den englischen bzw. amerikanischen Flugzeugen der „Rotterdam“ ausgeschlachtet wurde und man sah, die haben

doch ja 3 cm-Klystrons, die haben ja 3 cm-Silizium-Detektorempfänger und alles. Dann ging es ja erst richtig los. Da kam ich dann zum Zuge, weil ich mich an den Sachen hielt, die man in der Zukunft brauchte, weil ich nicht den Krieg im Moment fördern wollte. Ich hatte immer das Gefühl, ich arbeite lieber an den Sachen, die gar nicht mehr zum Zuge kommen werden. So ähnlich, wie das der Fränz auch von sich sagte, bleibt mal bei den Sachen, die nichts mit dem Krieg zu tun haben. Natürlich wurde das bald modern, da mußte ich einen Meßsender machen für 3 cm, weil nun die Empfänger gemessen wurden. Und dann hatten wir auch die Dioden, dazu die Detektoren von Seiler, und ich hab' da während der ganzen Zeit eigentlich nichts mit Germanium tun können.

K.H.: Gab es, als das „Rotterdam“-Gerät gefunden wurde, große Umstrukturierungen bei *Telefunken*, also Sie sagten ja, Sie haben vorher in der Arbeitsgruppe von Prof. Meinke gearbeitet?

H.M.: Das änderte sich im Laufe der Zeit. Prof. Meinke machte weiterhin im wesentlichen seine Ausbreitungsfragen in Hohlräumen und Hohlleitern und Dr. von Radinger, ein hervorragender Mann bei *Telefunken*, der weniger bekannt ist, machte die Praxis, also der besorgte immer die cm-Wellen-Sender oder auch Dinge, die ich zum Messen brauchte. War alles sehr gut und Rothe war auch so, daß er mich förderte ständig, weil er sah, daß also wir die Empfängerempfindlichkeit hochbrachten. Ich kam ja an theoretische Grenzen heran. Und in meinem Buch hab' ich ja auch die Messungen wiedergegeben.⁶

Und dann war ich schließlich Leiter der Empfangsabteilung in Leubus in Schlesien im neuen Labor bei Rothe. Das dauerte leider nicht sehr lange. Da hatte ich auch die Versuche mit Duodioden gemacht und hatte auch ein paar Unterlagen über Versuche, eine Sperrschicht zu steuern, wo ich auch schon ein paar Effekte hatte, aber nichts klares. Und dann kam dieses: Ich war in Berlin zufällig auf Dienstreise, da stehe ich da im Labor von Herrn Brandt und da sagt der: „Wir müssen das ganze Labor in Leubus schließen. Das hat keinen Zweck, daß Sie zurückfahren“. Da hör ich noch, wie er am Telephon sagt: „alles lähmen!“ Das hieß also zerstören. Ja ich sag: „Um Gottes Willen, wir haben die ganzen Berichte die ganzen Arbeiten, alles liegt da, nicht wahr.“ „Die russische Armee ist da vor den Toren, da können Sie gar nicht mehr hin“.

Das war so 1944. Dann bin ich nach Thüringen und hab' dann mit Seiler wieder ein Detektorlabor aufgebaut. Kaum war das fertig, kamen die Amerikaner und sagten: „Alles zumachen.“

Thüringen, Karl Seiler und das Kriegsende

K.H.: Das heißt, Sie waren für die Empfänger zuständig, für das Messen der Empfänger. Erinnern Sie sich an die Position, die Karl Seiler eingenommen hat?

H.M.: Ja, Seiler wurde von Dr. Rothe UK gestellt, er kam von der Front und wurde ins Labor gesetzt bei uns als Fachmann für Material. Das war er ja auch. Er nahm sofort den Kontakt mit Günther auf. Er lebte mit mir im Labor zusammen, ich weiß jetzt nicht mehr, was er offiziell in Bezug auf mich für eine Stellung hatte. Wir saßen beieinander. Hier war sein Büro, da war mein Büro im selben Zimmer, wir schrieben an den selben Patenten, an selben Arbeiten, es war, ich weiß es nicht mehr, es war so ein Einvernehmen, daß nachher als wir dann besetzt wurden von der amerikanischen Armee, da war Seiler da und die ganzen jungen Leute die er reklamiert (rekrutiert) hatte in der Gruppe und er hatte ja das Labor aufgebaut und ich war auch mit dazugekommen, war ich der einzige, der mit den Amerikanern sprechen konnte. Ich sprach fließend Englisch, und irgendwie - ich weiß nicht warum - also ja es kam noch dazu, daß ich als Anti-Nazi bekannt war und er hatte

⁶ Mataré, *Empfangsprobleme*, 1951, wie Anm. 2 aus S. 241.

noch sein Parteiabzeichen, der Seiler. Das hat er dann schnell weggeworfen. Und die anderen waren zum Teil nicht mit Wehrpaß, es waren also Soldaten und ich wurde von den amerikanischen Offizieren gefragt, die kamen dann zu mir und sagten: „Sagen Sie mal was sind das für Leute, das sind alles junge Leute im Alter in dem sie gezogen werden als Soldaten.“ Ich sagte, „die sind alle UK gestellt, die sind alle im Labor gewesen.“ „Ich will dann die Wehrpässe sehen.“ Ich hatte meinen Wehrpaß, da stand drin UK. Die anderen aber hatten den nicht mehr, die waren eingezogen gewesen, die waren ja nur beurlaubt, die hätten alle ins KZ gemußt oder ins Kriegsgefangenenlager. Naja, jedenfalls habe ich gesagt, nein das sind alles Ingenieure nicht wahr und er sagte: „Und Sie sind verantwortlich. Ich gebe ihnen die Binde und Sie gehen mit diesen Leuten jetzt zurück zu ihrem Labor und melden sich da“. Ja gut, da habe ich die Binde gekriegt mit Stempel vom Bürgermeister und es stand nur drauf, daß die Leute durchgehen dürfen. Da hab' gesagt: „Ich brauche aber noch einen Zettel von Ihnen.“ Sagt der: „Schreiben Sie ihn.“ So wie die Amerikaner so sind. Da schrieb ich also auf: „Herbert Mataré is entitled to bring a group of engineers back to their laboratory.“ usw. Dann hat der drunter geschrieben: „Signed and o.k. Colonel Thompson!“. Mit diesem Zettel bin ich durch den Wald von Thüringen gezogen mit der Gruppe. Immer wenn wir durch den Wald kamen, es war ja kein Mensch da, es gab ja keine Seele draußen, da kamen uns amerikanische Jeeps entgegen mit einem Maschinengewehr oben drauf. Das richteten die erst mal auf uns, weil wir durch den Wald kamen. In der Zeit war ja keine Gruppe von 20 jungen Leuten im Wald.

Ja, wir sind jedenfalls durchgekommen. Ich hab' mit denen immer gesprochen und wir kamen also glatt durch. Und dann bin ich so zurück zum Labor mit der ganzen Gruppe. Die können mir heute noch dankbar sein, daß sie so gut herüber gekommen sind. Keiner von denen ist im Kriegsgefangenenlager gelandet. Nachher sind sie alle privat verschwunden.

K.H.: Nochmal zurück zu Karl Seiler. Karl Seiler hatte den Kontakt zu Prof. Günther in Breslau hergestellt.

H.M.: Ja der war auch ein Schüler von Fues. Seiler hatte auch auf dem Tieftemperaturgebiet gearbeitet. Er hat da irgendwie Heliumverflüssigung gemacht. Seiler war dann in Breslau. Da hatte er die Aufdampfapparatur. Das war das erste Mal, daß ich was hörte von einer epitaxialen Schicht, aber die nannten das zwar noch nicht so.

Ich weiß nur, daß wir gute Resultate hatten, mit dem von Seiler mitgebrachten Silizium auf Graphit. Die Leitfähigkeit war gut, die Kristallstruktur eigentlich nicht. Aber für solche Charakteristiken, mit einer hohen Geschwindigkeit oder small recovery time war es sehr gut. Das hat Seiler auch in den Berichten von FIAT (Field Information Agencies Technical) mitgeteilt.⁷ Die Detektoren waren sauber und kapazitätsarm aufgebaut mit der Spitze. Wir haben dann auch noch Messungen am Ersatzschaltbild dieser Detektoren gemacht, die Seiler zusammenbaute.

Wie das jetzt in Breslau aussah, weiß ich nicht. Ich bin leider nie mit Günther in Kontakt gekommen, also das machte Seiler.

K.H.: Bei *Telefunken* müssen 1944 diese Siliziumdetektoren in Serie hergestellt worden sein. Wissen Sie etwas darüber?

H.M.: Mit der Produktion hatte ich nichts zu tun, die Produktion war wohl in der Röhrenabteilung. Wir haben nur die einzelnen Detektoren, wenn sie kamen, als verschiedene Typen benannt, nach verschiedenen Materialien und auch verschiedenen Herstellungsmethoden, und haben deren „Response“ und „signal to noise ratio“ mitgeteilt, daß war also unsere Funktion.

Zum Beispiel bekamen wir diese Detektoren aus München unter der Devise, daß

⁷ Seiler, Karl (1946): Detektoren. *Naturforschung und Medizin in Deutschland* 15, Teil 1, S. 272-292.

die hervorragend seien, man brauchte ja nur Charakteristiken und sie durchs Mikroskop anzuschauen. Sehr schöne Charakteristiken. Ein idealer Detektor. Da gibt es in meinem Buch glaube ich auch ein paar Beispiele, wo also die gute Charakteristik eine bessere Rolle spielt, besser benutzbar ist, als eine schlechte, aber wo es im wesentlichen darum geht, daß die Empfindlichkeit in cm-Wellen hoch ist. Und da war das Germanium eben nicht mehr „competitive“, es war nicht mehr auf der gleichen Höhe wie Silizium. Und das ist das Entscheidende und Witzige: Als wir nach Paris gerufen wurden, war das um Germanium-Detektoren zu machen, weil die Anwendung damals kurz nach dem Krieg nicht mehr so auf dem cm-Wellen-Gebiet basierte. Sondern es war ein allgemeines Prinzip, man wollte gute klare Rectifier haben.

K.H.: Ein reines Germanium das muß, so weit ich weiß, rauschfreier sein als hochdotiertes Silizium oder, irre ich mich da?

H.M.: Ja, das hängt davon ab, ob Sie das Hochfrequenzrauschen abschalten können, oder ob Sie das sogenannte Niederfrequenzrauschen, dieses flicker noise, ob Sie das abschneiden können, das war beim Germanium auch höher. Denn wenn der Innenwiderstand sehr hoch ist, kriegen Sie auch leichter höhere Rauschkomponenten im Niederfrequenzgebiet. Also es war eine sehr komplizierte Sache, das hing ganz von der Benutzung und von der Oszillatoramplitude ab, was die da kriegen in so einer Mischung. Also da müssen Sie sich schon genauer die Arbeiten angucken, die wir damals gemacht haben, um den Unterschied zu sehen, besonders wenn Sie Rauschkompensation machen wollen.

Das war beim Silizium leichter, bei 10^{20} per ccm war es leichter eine gleiche Charakteristik auf beiden Seiten zu bekommen als beim Germanium. Sie kriegen beim Germanium einen schöneren Gleichrichtereffekt, eine größere Sperrspannung, aber die Unterschiede sind viel größer.

K.H.: Sie hatten erzählt, wie Sie am Ende des Krieges die Leute wieder zurück ins Labor gebracht haben. Sie standen dann im Thüringischen Wald und wie ging es dann weiter?

H.M.: Wir waren dann zum Labor zurückgegangen aber die Amerikaner hatten das Labor definitiv verriegelt, also es durfte gar nichts mehr gemacht werden.

Erste Nachkriegszeit

K.H.: Was haben Sie dann gemacht?

H.M.: Ich hatte das Glück, daß ich in Wabern, direkt bei Kassel war, lebte da mit meiner Familie, ich hatte die Familie da und kam in Kontakt mit den Amerikanern, die überall herum waren, die Offiziere traf man in den Restaurants usw. und wir besuchten uns zu Hause. Wenn sie hörten, daß einer englisch sprach, kamen sie alle dahin. Sie waren da sehr nett und wir haben viele gute Bekannte da gehabt und darauf wurde ich eingeladen, ich soll mich an die Military Academie in Wabern wenden, die hätten Lehrer nötig. Ich weiß noch, wie ich dahinging, da saß der Sergeant da und hatte die Füße auf dem Tisch. Und murmelte da so in sich hinein und sagte: „You want to come to this College here? You would like to teach physics?“ „Yes I would like to teach physics, chemistry and mathematics. What do you need?“ „Isn't that difficult?“ Ich sagte : „No.“ Er sagte: „You start!“

Genau wie der Colonel Thompson. Das hat mir immer gefallen, die amerikanische Methode, kurze Entscheidungen. „You start!“. Dann habe ich da unterrichtet. Die meisten waren von Harvard, ein paar junge Leute, die 2. oder 3. Semester waren, und ihr Examen machen mußten. Die kriegten auch eine Bescheinigung, daß sie das Semester bei mir gehabt hatten und konnten dann eins überspringen in Harvard und zum nächsten übergehen.

Das war 1945. Ja, ja, ich hab' die ganzen Bücher noch, die hab' ich zum Teil hier, zum Teil drüben, die waren sehr anregend muß ich sagen, ein Physikbuch von Kaufmann mit Aufgaben, die hab' ich noch in der TH Aachen benutzt. Die hat Fuchs in grünen Kärtchen in einem Kasten gehabt, für Studenten für die Prüfung. Die waren sehr verhaßt. Das waren einfache Fragen aus dem amerikanischen Druck, die der Student lösen sollte im Examen. Fuchs sagte: „Ich habe die ganzen Fragen in dem Kästchen drin. Greifen Sie sich eine raus!“ Der Student mußte die Frage, die er 'rauszog, im Examen beantworten. Ja, das war also während der kurzen Zeit als ich in Aachen noch assistierte und Vorlesungen hielt.

Ja, von Wabern ging ich zurück zur Universität Aachen sowie die Universität wieder aufgemacht hatte. Und ich war dann bei Fuchs und Rogowski als Vorlesungsassistent. Dort habe ich Vorlesungen gehalten über Grundlagenphysik, das betraf auch Festkörper und das andere war über Antennen bei Rogowski.

Während der Zeit in Aachen kamen auch die Military Contactmen von der FIAT. Die kamen immer zu Hauf rauf zu mir, in meine Bude in der Normannenstraße, wo ich saß. Ich hatte dann eine Studentenbude sozusagen, es war ja alles ausgebombt und wir hatten da so vollkommen vom Nichts aufbauen müssen. Aber ich war irgendwie mit den Lieferanten in gutem Zustand, denn ich konnte die Geräte wieder kriegen. Denn ich hatte für die Schule in Wabern unter anderem bei Leybold eingekauft. Und die Amerikaner zahlten alles Cash, alles was die wollten, und die fuhren mich mit den Jeeps dahin, Ich sagte: „Hier wir richten eine Schule ein für die Amerikaner in Wabern und wir brauchen alles.“ Also alles was die Leybolds da so hatten an Hilfsmitteln für den Unterricht. Da haben wir die ganzen Jeeps vollgeladen und nach Wabern gefahren. Was daraus geworden ist und ob man die Schule wieder geschlossen hat, das weiß ich nicht. Jedenfalls hab' ich da ganz gut unterrichten können, die ganzen Unterrichtshilfen von Leybold gehabt und auch von Phywe in Göttingen. Ja da fuhren wir mal so schnell hin, haben den Jeep voll geladen.

Jedenfalls, die Engländer fragten, was ich noch an Unterlagen hätte von den Empfindlichkeitsberichten. Messungen an Detektoren, die Frage der Überlagerungsempfänger usw., und da hab' ich ihnen Kopien geben können noch von alten Berichten. Aber ich hatte nicht mehr viel, weil durch diese Flucht aus den Labors, wie in Thüringen, nichts mehr da war. Aber ich konnte viel sagen, das haben sie aufgeschrieben und mich verhört.

Paris

H.M.: Dann waren da auch Franzosen dabei und die sagten: „Wir möchten Sie nach Paris einladen. Sie kriegen einen extra Paß.“ Es gab noch keine Pässe. Keiner konnte reisen. Es gab nur Militärzüge. Ich mußte also einen Militärpaß kriegen. Von Familie war gar keine Rede. Zuerst haben die Franzosen meine Familie nach Säckingen in Baden gebracht, was die Franzosen besetzt hatten. Es sollten da auch besondere Rechte und besondere Karten existieren, was sehr lange dauerte. Und ich war in Paris inzwischen und ich hab' mich mit Welker eingerichtet, wir hatten erst im Hotel eine Wohnung und dann konnten wir uns ein Haus suchen, eine Privatwohnung, damit die Familien nachkommen konnten. Das kam erst viel später.

K.H.: Sie sagten, Sie hätten Kontakt zu den Alliierten gehabt, zu Franzosen. Aber tatsächlich gearbeitet haben Sie doch, wenn ich das richtig sehe, für die *Westinghouse Company*?

H.M.: Das muß man verstehen. *Westinghouse* hat in Paris damals von *Westinghouse Electric* einen Ableger gegründet. Dann ist das aber, wie das immer so geht in Frankreich, finanziell übernommen worden vom Staat zum Teil und von anderen privaten Firmen. Und dann hießen sie „*Westinghouse Freins et Signaux*“. Sie

hießen Freins et Signaux, also Bremsen und Signale. Und unter dieser Devise machten sie mit ein paar Physikern Selen- und „Kupferoxydulgleichrichter“. Zum Laden von Batterien usw. Also es war eine ziemlich große Abteilung und die begrüßten uns da und sagten es ist gut, daß wir mal ein paar Leute kriegen aus Deutschland, die etwa mehr wissen über Mikrowellen und über Gleichrichter im Allgemeinen. Und da haben die uns das Labor gekauft bei Aulnay-sous-Bois ein Häuschen extra eingerichtet, damit wir getrennt waren von dem Sektor aus Reinlichkeitsgründen, wir wollten nicht beim Selen sein.

Wir haben das dann so aufgebaut, mit furchtbarer Mühe haben wir gearbeitet. Sie müssen sich das so vorstellen. Welker und ich hatten das Labor von Grund auf aufzubauen. Hier ist ein leeres Gebäude. Der eine richtete die Kristallsache ein, der andere macht die Detektoren fertig für die Messungen und Lieferung. So mußten wir uns einteilen. Mehr war da nicht.

Also der Welker hat seine Bridgman-Sache mit Firmen meistens zusammen gemacht, da wurde Graphit prepariert für ihn in einer Firma, die schon mal mit Graphit arbeitete und wir hatten nicht die Einrichtungen, wir hatten eine ganz kleine Werkstatt, nur um unsere Formen zu machen, die wir brauchten für die Detektoren usw. . Und dann haben wir bei einer Radio-Firma den Sender gekauft, den er brauchte zum Schmelzen, er mußte mit Hochfrequenz arbeiten, da wollte er von vorne herein, um also das Germanium in einer Wasserstoff- oder Stickstoff-Atmosphäre zu ziehen, in Quarz. Und er hat von vornherein das so gemacht, daß es nicht wie eine ofenbeheizte Situation mit Graphit war, weil er sich sagte, da kriege ich zu viel Kohlenstoff herein.

Nun sollten wir *Sylvania*-Detektoren machen.⁸ Das waren ja die mit der scharfen Kennlinie, die mußten schon sauberer sein. Das konnten wir mit Silizium nicht. Darum nahmen wir Germanium. Das war ja auch der Grund, warum wir die Transistoren fanden. Die *Sylvania*-Detektoren waren das Vorbild, das wir produzieren sollten. Ich weiß nicht mehr wie es hieß, die waren bekannt nach Nummern konnte man das nachvollziehen. Das kriegten wir auch hin.

K.H.: D.h. Sie waren quasi gleichberechtigt mit Welker Laborleiter?

H.M.: Ja, ja wir hatten zwei Sektoren der eine machte Kristalle, der andere Bauelemente. Aber wir saßen zusammen, wir haben natürlich immer zusammen diskutiert und gemeinsam Pläne gemacht. Ich mußte ihm helfen bei seinen Problemen mit dem Hochfrequenzgenerator.

K.H.: Haben Sie auf der wissenschaftlichen Ebene mit anderen Franzosen zusammengearbeitet?

H.M.: Ja, wir hatten mit der *École Normale Supérieure* zu tun. Ich hab' Aigrain viel besucht, er hat mich auch besucht. Ich habe mit den Festkörperleuten von der *École Normale Supérieure* zusammengearbeitet, ich habe mit Guinier, dem Kristallographen, diskutiert über unsere Probleme. Mit Rocard habe ich gesprochen, der hat ja schließlich auch den *Directeur de Thèse* gemacht für den Aigrain und mich, als wir gemeinsam promovierten am Nachmittag in der *École Normale Supérieure*. Da waren wir schon in gutem Kontakt, aber im Hause hatten wir nur den Dr. Dugas, der hatte uns ständig besucht, der war immer dabei. Mit dem diskutierten wir viel. Der hat das Buch von Seitz ins Französische übersetzt.

⁸ „*Sylvania*-Detektoren“ bestanden aus Germanium und wurden während des Krieges von der *Sylvania Electric Products Company* hergestellt. Als mögliche Bezugsgröße könnte hier die Diode 1N34 gedient haben. (siehe z.B. Torrey, Henry C.; Whitmer, Charles A. (1948): *Crystal Rectifiers*. New York, London: McGraw-Hill Book Company, S. 361 ff.).

Push-Pull-Konverter

K.H.: Sie haben aus der Zeit von Paris Patent für einen „Push-Pull-Konverter“ erwirkt.⁹ Das ist doch quasi eine Duodiode, oder? Hier haben Sie die Spitzen auf zwei gegenüberliegenden Seiten einer halbleitenden Schicht angebracht und behauptet, daß man auf beiden Seiten die gleiche Charakteristik erzeugen könnte - durch einen einheitlichen Herstellungsprozeß. Das war aber sicher sehr schwierig.

H.M.: Das war sehr schwierig, das habe ich versucht ja.

H.M.: Dann hat der Welker darauf getippt, zwei verschiedene Wafer zu nehmen, während ich darauf tippte, denselben Wafer zu nehmen. Sie können das so machen, das kann ein Metall sein, wo ein Wafer einsitzt, das kann aber auch die Sperrschicht von einem großen Kristall sein. Die Frage war, was ist besser? Wie kann man leichter die gleiche Charakteristik machen? Ich habe einzelne gemacht, die funktioniert haben. Auch Rauschkompensation habe ich in Paris damit gemessen.

Ich habe es aber nicht in meinem Buch gebracht, ich glaube ich habe nur hinten den Mikrowellenaufbau gebracht und die Probleme der Hohlrohr-Leitungen, der Hohlrohr-Dosierung. Sie müssen bedenken, es war alles so an der Grenze der Meßfähigkeit, daß wie erst einmal uns den Kopf zerbrechen mußten, wie kriegen wir so kleine Leistungen zustande. Das Schwächungsglied in einem Hohlraum war das große Problem, mußte man vorausberechnen können.

K.H.: Noch mal zum Objekt. Das besteht aus einem Metallplättchen, das auf zwei Seiten quasi ein Halbleiter aufgebracht bekam. Und dann sind auf den gegenüberliegenden Seiten Punktkontakte aufgebracht. Diese Versuche müssen Sie schon Anfang 1947 gemacht haben, denn das französische Patent ist schon im Mai 1947 eingereicht. Haben Sie danach wieder versucht, wieder mit zwei Spitzen nebeneinander Versuche zu machen?

H.M.: Ja, das war parallel.

Bei *Westinghouse* fing es an damit, daß wir die Detektoren „*Sylvania*-Type“ haben machen müssen. Aber zugleich sagte der Direktor Engel zu mir: „Wenn Sie uns in den Mikrowellenbereich bringen, wie Hewlett Packard, sind wie einverstanden.“ Und sofort habe ich auch Patente angemeldet über Mikrowellenanwendungen. Z.B. das Patent über das Wellenmeßgerät. Das wurde auch in der Ausstellung gezeigt in Paris. Daraufhin bekamen wir junge Leute, die sich bei uns bewarben und sagten: „Sie fangen an, wie Hewlett Packard, wir wollen bei ihnen arbeiten.“ Aber wir hatten ja kein Geld bei *Westinghouse*, da hörte das auch wieder auf. So kam es, daß ich auf dem Mikrowellengebiet arbeitete.

Ich sagte: „Ich kann das ähnlich machen, wie Hewlett Packard, aber dann brauche ich ein größeres Atelier, ein größeres mechanisches Atelier für Hilfe. Da war der Poilleaux, das war ein Franzose, der war sehr gut als Mechaniker, der machte mir diese Sachen, aber das war nicht genug.“

Die Franzosen waren 100 % auf die Atomenergie konzentriert und alles Geld vom Staat ging in die Atomenergie. Wir kriegten in der Festkörperphysik gar nichts.

K.H.: Ja, zumindest relativ geringe Beträge. Ich hab' gelesen, daß dieses Labor mit 6 Millionen der damaligen Franc unterstützt wurde und dann noch einmal *Westinghouse* einen Vertrag über 7 Millionen alte Franc abgeschlossen hat. Das war nicht viel Geld.

⁹ Mataré, Herbert F. (1948): Push-Pull Converter of the Crystal Type for Ultra-Short Waves . *United States Patent Nr. 2,552,052*; siehe zum Herstellungsverfahren auch Telefunken, Gesellschaft für drahtlose Telegraphie; Mataré, Herbert F. (1944): Kristalldetektor für hochfrequente Schwingungen. *Schweizer Patent Nr. 243490*.

- H.M.: Ja, da lebte man doch von 30 – 40000 Franc im Monat, der alten Franc, das sind heute 300 Franc im Monat.
- K.H.: Ja klar. Dann haben Sie nach Push-Pull-Convertern dieser Art wieder angefangen zwei Spitzen nebeneinander auf einen Halbleiter aufzusetzen und Untersuchungen zu machen. Und mit den eben erwähnten kleinen Kristallnadeln, die Welker produziert hat, ließen sich damit die Versuche durchführen?
- H.M.: Da merkte ich durchaus Unterschiede, sobald ich einen großen Kristall mit im Verhältnis kleiner Oberfläche hatte, kriegte ich sofort Interaktion. D.h. Steuerung. Das war so Anfang 1948 also zur selben Zeit wie Bell Labs. Die Kristalle kamen nämlich mit einmal besser raus wir kriegten von Otavi Minen etwas besseres Material. Aber es war sehr schwierig. Ich mußte immer das Material in Deutschland holen, indem ich – wie war das eigentlich – da hab' ich Nahrungsmittel geschickt, an einen Herrn, der in Deutschland die Kristalle kaufte. Die Umwechslung von Franc in DM war nicht möglich. Es war eine verrückte Situation.
- Ich hab' dann Kristalle bekommen und Welker hat größere Boules gemacht, Gott sei Dank, und sofort haben wir diese Interaktion gemessen. Das hab' ich dem Welker auch gezeigt, der konnte das erst gar nicht glauben.
- Er hatte ja schon ein Feldeffekttransistorpatent im Kopf als er nach Paris kam.¹⁰ Wir haben uns darüber unterhalten. Da sagte er zu mir, das weiß ich noch ganz genau: „Wir haben alles mögliche probiert, aber es geht ja nicht.“
- Er hatte dann die Idee, eigentlich richtig, mit einem p-Material, also Selen oder was, auf Germanium aufzupappen. Er sagte dann noch: „Ach, warum soll man noch mal ein Patent anmelden, es sind ja schon so viele da“.
- K.H.: Das hat er ja auch in seinem Feldeffekttransistorpatent vorgeschlagen.
- H.M.: Das war an sich richtig. Die Idee. Aber Shockley hat es erst gelöst aufgrund der Überlegung der Injektion von pn-Schichten. Die ich aber auch hatte. Ich glaube aber, daß Shockley mein Patent, unsere Patentanmeldung gesehen hatte, und die wurde ja zurückgehalten in USA und er hat im Juni seine p-Injektion angemeldet.¹¹
- K.H.: Ja, ihr Patent ist vom Juli.
- H.M.: Unseres kam über Juli/August. Ich weiß jetzt nicht mehr, es war später, Shockley war sogar später, glaube ich.
- K.H.: Meines Wissens ist es im Juni, also quasi gleichzeitig mit der Veröffentlichung des Punktkontakttransistors hat Shockley schon das pn-Junction Patent eingereicht.¹²
- H.M.: Sie müssen bedenken es gab kein Internet, es gab keine Satelliten. Wir haben sehr wenig gewußt von Bell Labs.
- H.M.: Erst viel später, das kam Monate später, die Information. Auch so ein Physical Review-Artikel, das kam nicht übermorgen, da wußte man gar nichts von.

¹⁰ Welker, Heinrich J. (1945): Halbleiteranordnung zur kapazitiven Steuerung von Strömen in einem Halbleiterkristall. *Patent DBP 980 084, 21g, 11/02*.

¹¹ *Westinghouse*, Compagnie des Freins et Signaux; Mataré, Herbert F.; Welker, Heinrich J. (1948): Nouveau système cristallin à plusieurs électrodes réalisant des effets de relais électroniques. *Franz. Patent 1.010.427* (angemeldet am 13. August 1948), Mataré, Herbert F.; Welker, Heinrich J. (1949): Crystal device for controlling electric currents by means of a solid Semiconductor. *US Patent 2,673,948* (angemeldet 11. August 1949); Shockley, William B. (1948): Circuit Element utilizing Semiconductor Material (Abstract). *US Patent 2,569,347* (angemeldet am 26. Juni 1948).

¹² Shockley, William B. (1948): Circuit Element utilizing Semiconductor Material (Abstract). *US Patent 2,569,347* (angemeldet am 26. Juni 1948).

K.H.: Natürlich.

Noch mal zurück zu Welker. Welker schlägt in seinem Feldeffekttransistor vor, ein p-Material auf ein n-Material aufzubringen und durch die Schottky-Sperrschicht, die sich zwischen dem p- und dem n-Material bildet, im n-Material den Fluß zu steuern.

Das ist eben nicht die Idee einer Injektion, sondern einer Induktion, also der Strom wird kapazitiv gesteuert. In ihrem Patent von 1948 sind ja nun unterschiedliche Systeme benannt. Einerseits habe ich zwei Spitzen gefunden, die durch eine Korngrenze quasi getrennt sind und andererseits habe ich ein Germanium-Selen-System als eine mögliche Realisierung gefunden.

H.M.: Ja, ja, das eigentliche Ding das funktionierte war das mit den Spitzen, das mit den Selen funktionierte ja nicht, aber das mit den Spitzen das funktionierte.

Welker schlug ja vor das Selen, das kannte er als p-Gleichrichter, mit Germanium zu verbinden. Aber da waren die Oberflächenzustände so enorm, da gab es keine Injektionen. Nee, die Injektion kriegte ich immer nur von schön homogen im Halbleiter eingebetteten Dislocations. Da kriegte ich meine long distance injections.

Da hatten wir gute Verstärkung. Genau wie bei Bell Labs und da sagte Welker, der an den Messungen nicht teilgenommen hatte, der sagte immer, ja das muß man auch anders machen, das ist noch nicht das Wahre mit zwei Spitzen zu arbeiten, das war klar. Aber ich hatte von vornherein die Idee, wir müssen uns mal um den Kristall kümmern, da ist noch was los in dem Kristall. Und ich war eben erstaunt, daß ich über 100 μ eine Steuerung bekam. Und das hat mich immer wieder verfolgt später und da sind auch eine ganze Menge von anderen Arbeiten bei herausgekommen.

K.H.: Jedenfalls haben Sie gemeinsam ein Patent eingereicht, das ja dann auch erteilt worden ist zunächst in Frankreich und dann in den USA. Tatsächlich wurde man auf ihre Arbeiten aber erst nach der Veröffentlichung von der Bell Labs aufmerksam?

H.M.: Ja es war so, so gleichzeitig, daß wir, als die Nachrichten aus den USA 'übersickerten, da erst hat der Minister, der hieß Thomas, sich entschlossen uns zu besuchen. Mit einem mal dämmerte ihm etwas, er hatte zwar schon alles auf seinem Pult liegen, wir hatten gehofft, daß damit mehr Finanzspritzen kommen. Endlich mal eine Verstärkung hatten mit Halbleitern und dann kam er uns besuchen. Aber erst, hatte ich das Gefühl, nachdem er etwas hörte nachdem die Glocken läuteten da drüben. Denn sonst wäre Sueur auch nie auf die Idee gekommen das Ding „Transistron“ zu nennen. Wir hätten das Halbleiterverstärker genannt.

K.H.: Das Stichwort Sueur, bringt mich zur Frage, mit wem Sie zusammengearbeitet haben. Sueur hat ja eine lange Veröffentlichung über den „Transistron“ geschrieben, in der auch Sie und Welker genannt sind.¹³

H.M.: Mit Sueur haben wir nicht direkt zusammengearbeitet. Der war nur derjenige bei der Post, und beim CNET (Centre National d'Études des Telecommunication), der die Kontrakte zu *Westinghouse* gab. Der hatte mit Engel, unserem Direktor, immer gesprochen: „Wieviel Geld brauchen Sie jetzt, was können Sie machen usw.“ Das war nicht viel. Und von der Post haben wir keinerlei Unterstützung gehabt. Aber er kam sofort als wir die ersten Verstärker hatten. Da hatte ich die kleinen Keramikdinger mit zwei Nadeln. Da kam er sofort und sagte: „Die setzen wir gleich in Postverstärkern nach Algier ein.“ Und als Shockley uns besuchte 1950

¹³ Sueur, R. (1949): Le Transistron Triode Type P.T.T. 601. *L'Onde Électrique* 29, S. 389-397.

sagte der Sueur zum Shockley: „Das ist toll, telefonieren Sie mal über unsere Transistoren. Das ist ein Gespräch nach Algier.“

K.H.: D.h., die Idee wurde quasi sofort in Produkte umgesetzt.

H.M.: Ja es war klar bei *Westinghouse*, es war das Erste, was wir machten.

K.H.: Das fand ich sehr erstaunlich, als ich das gelesen habe. In Frankreich wurden 1949 schon serienmäßig Transistoren produziert, während das in Amerika noch gar nicht so der Fall war. Das dauerte noch. Bei Bell lief die Serienproduktion erst Ende 1950 / Anfang 1951 an. Weil es da natürlich auch noch Schwierigkeiten gab und die Bauteile waren ja auch noch nicht so zuverlässig.

H.M.: Ich hab' ja schon, das war ja noch später die Publikation, ich hatte ja von vornher-ein schon Phototransistoren. Wir hatten ja oben in der Keramikröhre ein Loch in das Epoxy eingefüllt wurde, nachdem die Nadeln fixiert waren. Unser Problem war ja immer hohe Verstärkung und auf dem Kristall die richtige Stelle zu finden, weil die Kristalle ja alle noch nicht so gut waren. Also wurde in einem Transistor-meßgerät festgestellt, ob die Charakteristik da war und wie gut sie war, nachdem man unter dem Mikroskop diese Nadel einstellte von der Seite. Und dann wurde der Tropfen Epoxy draufgetan und dann konnte man oben eine kleine Linse d'raufsetzen. Es waren unsere Phototransistoren. Davon hatte damals in Amerika noch kein Mensch gehört.

K.H.: D.h. die 1949 produzierten Transistoren waren Handarbeit beim Einstellen.

H.M.: Ja, da hab' ich noch Photos von *Intermetall*, wo wir da Geräte haben, mit denen wir das einstellen. Das sind die *Intermetall*-Bilder, die hab' ich irgendwo hier von der Produktion. Da wurden unter dem Mikroskop die Spitzen an die richtige Stelle gerutscht und quasi währenddessen gemessen. Das haben wir auch bei *Intermetall* so gemacht. Ja, da sehen Sie so ein Gerät mit der Transistorcharakteristik. Da wurde unter dem Mikroskop eingestellt.

K.H.: Diese Transistoren funktionierten aber dann doch wie die Punktkontakt-Transistoren oder mußte jetzt auf Korngrenzen geachtet werden.

H.M.: Nein, es waren keine Korngrenzen notwendig. Die Kristalle waren jetzt besser. Das war ja 52 ... 53, da hatten wir schon von den Otavi Minen zweimal nachgeschmolzenes Material. Also, das ging schon. Aber eben nur mit Germanium nicht mit Silizium

K.H.: Und die ersten in Paris in Serie gegangene Transistoren waren auch reine Punktkontakt-Transistoren oder waren da noch Korngrenzen vorhanden?

H.M.: Die ersten in Paris ja, ja klar. Punktkontakt.

K.H.: D.h. die in ihrem Patent von 1948 vorgeschlagenen Korngrenzen, also ein p-leitender Bereich und ein n-leitender Bereich, wurden nicht realisiert? In Ihren ersten Veröffentlichungen danach schreiben Sie aber nichts von Korngrenzen.¹⁴

H.M.: Die Korngrenzen wurden für die Produktion nicht zur Bedingung gemacht, der Text des Patents stammte ja von Anfang 1947.

H.M.: Ja, nun, da ist noch eine kritische Sache, wie es kommt, daß ich Bardeen, Brattain erwähne aber die eigenen Arbeiten nicht. Um die Zeit, müssen Sie sich mal vorstellen, das kann man heute gar nicht mehr nach vollziehen, da war noch die Frage überhaupt, geht aus einer pn-Junction eine Injektion? Ist das möglich? Und was ist überhaupt eine Injektion? Gibt es Zonen die ich durch eine Vorspannung mir selber mache? Das ist ja tatsächlich der Fall, oder kann man es nur auf Grund

¹⁴ Mataré, Herbert F. (1949): Der Dreielektroden-Kristall (Transistor). *Das Elektron in Wissenschaft und Technik* 7:3, S. 255-261; Mataré, Herbert F. (1950): Remarques concernant l' amplification observée sur des Semi-Conducteurs (Phénomens de transistance). *L'Onde Électrique* 30, S. 469-475.

einer im Kristall befindlichen Defektelektronenleitung machen. Wir waren nicht so sicher, noch nicht damals, übrigens auch Shockley, die waren auch noch nicht so sicher, ob das pn-Junction dasselbe ist wie eine einfache Injektion oder ob aus der pn-Junktion so injiziert wird, wie aus einem Metall, aus einem Metallkontakt. Also wir waren da unsicher und es gab da zwei Richtungen. Ich hatte immer für mich die Idee, ich werde meine Arbeit mal fortsetzen, denn es war mir klar, daß da Korngrenzen eine Rolle spielten, in den Transistoren, wo ich also makroskopische Distanzen von den beiden Nadeln hatte. Ich brauchte nicht wie der Bardeen und der Brattain da so eine Goldfolie zu nehmen, damit ich nur Submillimeter Kontaktdifferenzen oder -abstände hatte. Sondern ich konnte über Microns, hundert Microns konnte ich noch steuern. Das habe ich in dem französischen Papier als „interaction zones“ (Messungen für Non-Transistor und Transistor) betrachtet. Das war eigentlich die Frage, wo und wie sind diese Korngrenzen ausgedehnt und was sind sie.

K.H.: Der Frage nach den Korngrenzen sind Sie erst nach 1952, als Sie wieder nach Deutschland zurückgekehrt waren, nachgegangen. Die wesentlichen Experimente, so schreiben Sie in den Danksagungen, haben Sie schon in Amerika durchgeführt.¹⁵

H.M.: Erste Arbeiten, so möchte ich sagen, waren also schon in Paris, durch die Tatsache, daß wir Transistoren hatten, die also darauf basierten. Die zweite Arbeit war in Düsseldorf. Herr Zielasek hatte da Messungen gemacht, ich glaube ich hatte ihnen da mal einen Brief geschickt, den der Herr Zielasek mir schickte.¹⁶

Die Überlegung war, daß mit den Korngrenzen, das war klar von ganz von früh her, daß da etwas los war und das spielt noch hinein in das Patent. Und erst dann wurde uns langsam klar, genau wie drüben. Drüben war auch so erst mal die Frage, warum nicht eine pn-Schichtung und das ging ja alles nicht, mit den Oberflächenzuständen. Dann kam auch drüben erst die Idee: Es gibt doch durch das Potential die Möglichkeit einfach im Kristall selber Löcher zu injizieren, wenn er gering genug dotiert ist, so daß ein Gleichgewicht besteht zwischen Defektelektronen und Elektronen. Das hat Schottky natürlich nie betrachtet. Schottky hat immer nur entweder oder gehabt. Aber hier war das sowohl als auch, das Problem. Das wurde uns aber erst klar, nachdem ich die Korngrenzensteuerung gehabt hatte. Das war das Traurige an der Sache wiederum. Ich kam von den Korngrenzen auf die normale Injektion und hab' die Korngrenzen dann wieder auf Seite geschoben. Später, nachdem alles das klappte mit der Minoritätsinjektion bei sehr hoher Reinigung, habe ich mich wieder den Korngrenzen zugewandt, aus anderen Gründen natürlich, weil Sie eben damit ganz andere Effekte erzielen konnten. Ich hab' mit Shockley damals diskutiert. Ich hab' gesagt: „Hören Sie mal, ich hab' hier die Korngrenzen, mit Sperrschichten, die können Sie gar nicht in Germanium kriegen.“ Sagt der Shockley: „Wie hoch ist das denn?“ Sag ich: „Ja, hören Sie mal, ich hab' ihnen ein Material von 10^{18} , da hab' ich 200 Volt Sperrspannung an einer Korngrenze. Das können Sie mit der normalen Injektion gar nicht kriegen.“ Er hatte auch keine Lösung. Da hab' ich mir auch gesagt, da müssen wir noch mehr hineingucken in diese Sache. Es ist ja auch tatsächlich so, daß es erstaunliche Effekte gibt, wir haben das nachher auch am Korngrenzentransistor exerziert. Der Korngrenzentransistor der funktionierte ja tip top, bei flüssigem Helium und noch bei gepumpten Helium bei 2 Kelvin. Nichts funktionierte sonst, war alles ausgefroren. Da sind keine Ladungsträger mehr da, die Sie steuern können. Mit Korn-

¹⁵ Mataré, Herbert F. (1954): Elektronisches Verhalten bestimmter Korngrenzen in perfekten Kristallen. *Zeitschrift für Naturforschung* 9a:7/8, S. 698; Mataré, Herbert F. (1955): Korngrenzenstruktur und Ladungsträgertransport in Halbleiterkristallen. *Zeitschrift für Naturforschung* 10a:8, S. 640-652; Mataré, Herbert F. (1956): Korngrenzen-Transistor. *Elektronische Rundschau* 10:8-9, S. 209-211 und 253-255.

¹⁶ Brief von Gotthold Zielasek (Intermetall) an Herbert Mataré vom 12. Dez. 1953.

grenztransistoren machen Sie wunderbare Verstärkung bei gepumptem Helium.

K.H.: Werden die zur Zeit irgendwo praktisch eingesetzt?

H.M.: Ja, neuerdings haben wir natürlich durch die III-V so eine Beherrschung der Dotierungsunterschiede in pn-Junktion mit Weitbandinjektion, daß wir das durchaus können. Wir können Galliumnitrit und Galliumarsenid können wir mit pn-Schichten auf heteroepitaxialer Basis können wir auch bei tiefen Temperaturen noch ganz gut arbeiten. Das geht jetzt auf III-V, aber nicht mit Germanium. Da müssen Sie dann schon Korngrenzen machen, wenn Sie Germanium nehmen wollen. Mit Silizium geht das überhaupt nicht. Bei Silizium war die natürliche Härte des Gitters nicht hoch genug, um eine saubere Korngrenze wachsen zu lassen. Das ist uns nie gelungen, auch anderen Leuten nicht. Es ist immer eine Art Gitterverschiebung dann dabei, so daß Sie die starken Bindungen, die wir beim Germanium haben (denn Germanium ist ja nobler im Prinzip) gar nicht aufrecht erhalten, also Sie kriegen nicht diese überlappenden Wellenfunktionen von einzelnen dangling bonds nebeneinander. Das Silizium ist weich, Sie haben eine hohe „self diffusion“. (Also der Koeffizient für „self diffusion“.) Aber das führt zu weit weg, daß wollen Sie alles nicht wissen.

K.H.: Ich wollte noch einmal kurz zurückfragen zu den Detektoren in Paris. Ich hab' gelesen, daß zunächst das Militär mit den produzierten Detektoren nicht zufrieden war, da die ersten Detektoren ein schlechtes Hochfrequenzverhalten hatten.

H.M.: Ja, das war klar. Das lag auch daran, daß wir Germanium hatten. Sie wissen, das war so komisch die hatten gesagt, wir wollen die Germaniumdetektoren von *Sylvania* machen, aber das waren nicht die, die man in der Hochfrequenz verwendete. Ich weiß nicht warum *Westinghouse* auf Germanium tippte, vor allen Dingen auf die von *Sylvania*. Das war mir unklar. Witzigerweise war ich nachher selber bei *Sylvania* tätig. Eine ganze Weile und hab' dann da gesehen, wie sie diese Detektoren aus der Produktion rausholen.

K.H.: Das heißt Sie hatten mit der Produktion der Detektoren in Paris so viel zu tun, daß ihnen diese Beschwerden bekannt waren?

H.M.: Das war mir bekannt, ja.

K.H.: Wissen Sie etwas über tatsächlichen Produktionsablauf bei *Westinghouse*, wo dann noch 1948 ca. 30-40 Tausend Detektoren produziert wurden?

H.M.: Es wurde dann die Produktion, glaube ich, weitergeführt in dem großen *Westinghouse*-Bezirk. Das war ein großes Ding außerhalb von Paris und die hatten das übernommen, weil wir ja nun keinen Platz hatten. Wir waren ja im Labor, wir machten da andere Sachen. Ich hatte mich ja konzentriert auf die Mikrowellen.

K.H.: Auch die Transistoren wurden ja dann später von *Westinghouse* produziert. Haben Sie eine Einschätzung, warum sich *Westinghouse*-Paris, die ja nun 1949 in der Lage waren, große Mengen von immerhin halbwegs stabil funktionierenden Transistoren zu bauen, nicht zu einem großen Halbleiterkonzern entwickelt haben?

H.M.: Ja, ich führe das zurück auf die Leitung von *Westinghouse*. Sie hatten einen Wechsel vom Präsident als ich da war, da war ein Mister Brault, der plötzlich die Sache übernahm und die alte Garnitur war weg, pensioniert. Die uns eingestellt hatten, waren all fort. Es waren ältere Herren gewesen. Ich habe die Namen vergessen, also mit denen ich diskutiert hatte, die sehr nett darauf eingingen was wir machen wollten. Und dann kamen neue Präsidenten usw. und die gingen also drauf: „Wo kann man schnell Geld machen?“ Ich weiß nicht auf was die dann getippt haben. Jedenfalls nicht so sehr auf unseren Transistor. Wahrscheinlich auf die Atomenergie. Also das war eine rein politische Affäre. Da waren wir „Peanuts“, da waren wir gar nichts.

III-V-Halbleiter

H.M.: Wir im Labor wußten was wir diskutierten. Es war ja witzig, ich war auf einer Konferenz 1950 in London und die diskutierten über den Transistor, Shockley trug seinen Kram vor und Brattain und Bardeen waren auch da. Und da wurde ein Transistor mit PbS (Bleisulfid) vorgeführt. Wurde aber nicht sehr beachtet.¹⁷

Da kam ich zurück und sagte zu Welker: „Hören Sie mal es ist doch so, wir können nicht beim Germanium, bei den Elementhalbleitern, bleiben, wir müssen auch die Compounds berücksichtigen, denn da sind doch Möglichkeiten ganz anderer Art wieder mit Elektronenbeweglichkeiten. Da sagte der Welker eigentlich sehr wenig darüber über diese Sache der Compounds und das merkte ich. Es war also so, daß er seinen Eintritt bei *Siemens* gut vorbereiten wollte, und wollte da mit dem Patent gleich auf den Tisch schlagen, was er auch getan hatte. Aber es war ja so, die III-V-Verbindungen waren ja von Goldschmidt her alle bekannt. Deshalb war es so, daß wir eigentlich in der Diskussion nicht weiter gingen, als zu sagen, die Compounds müssen also gemacht werden. Und dann hat er sich auf dieses Gallium-Arsenid geworfen und hat also, wie ich höre von Bosch, hat also irgendwo mal Zusammenschmelzung gemacht und gesehen, daß das ein gutes Compound gibt, damit ist er dann losgezogen. Das hat er gut gemacht und der Justi kam zu mir, als ich bei *Intermetall* war und sagte: „Hören Sie mal, Sie wollen hier intermetallische Verbindungen machen, wissen Sie, daß der Welker mit dem Patent bei uns den Boden abgräbt, daß darf doch nicht sein.“ Und da sagte ich noch, daß zur gleichen Zeit in den USA auch eine Anmeldung war.

Naja, also jedenfalls Welker wurde stark angegriffen und die anderen hatten es vernachlässigt eigentlich zu sagen, daß das wirklich Halbleiter sind. Und Welker hatte das sehr sauber bewiesen.¹⁸

K.H.: Ja aber das Patent geht eben darum halbleitende Verbindungen als Halbleiterbauelemente einzusetzen.

H.M.: Ja das war entscheidend, ja. Aber ich meine die Idee die halbleitenden Verbindungen in den Vordergrund zu stellen, wurde in Paris schon lange diskutiert, nach der Konferenz in England 1950. Da waren wir beide noch in Paris. Aber wir dachten schon dran wegzugehen, ich hatte schon Beziehungen zu New England Industries, die den Aufbau von *Intermetall* finanzieren wollten. Und er hatte auch schon Kontakt zu *Siemens* aufgenommen, wo er auch früher Kontakt hatte.

Von Paris zu Intermetall

K.H.: Wie war die Situation in Paris? Von Welker weiß man, daß er sich darauf vorbereitet hat, aus Paris wegzugehen. Wie war das bei Ihnen? Wollten Sie auch weg?

H.M.: In Paris waren wir dahin gekommen, daß die *Westinghouse* die *Sylvania*-Dioden hatte. Ich hatte die Produktion angeworfen und Herr Welker hatte auch die Bridgeman - Ziehmethode mit den kleinen bleistiftartigen Stiften in Gang. Das

¹⁷ Wahrscheinlich handelte es sich um die folgenden Arbeiten: H.A. Gebbie, P.C. Banbury, C.A. Hogarth (1950): Crystal Diode and Triode Action in Lead Sulphide. *Proceedings of the Physical Society B* LXIII, S. 371 und P.C. Banbury, H.K. Henisch (1950): On the Frequency Response of PbS Transistors. *Proceedings of the Physical Society B* LXIII, S. 540.

¹⁸ Welker, Heinrich J. (1951): Elektrisches Halbleitergerät. *Patent DBP 970420, 21g, 11/02*; Welker, Heinrich J. (1952): Semiconductor Devices and Methods of their Manufacture. *US Patent 2,798,989*; Welker, Heinrich J. (1952): Verfahren zur Herstellung eines Halbleiterkristalls aus einer A III - B V - Verbindung mit Zonen verschiedenen Leitungstyps. *Patent DBP 976 791, 12c, 2*; Welker, Heinrich J. (1952): Verfahren zur Herstellung eines Halbleiterkristalls mit Zonen verschiedenen Leitungstyps bei A III - B V - Verbindungen. *Patent DBP 976 709, 21g, 11/02*; Welker, Heinrich J. (1952): Über neue halbleitende Verbindungen. *Zeitschrift für Naturforschung* 7a, S. 744-749; Welker, Heinrich J. (1953): Über neue halbleitende Verbindungen II. *Zeitschrift für Naturforschung* 8a, S. 248-251.

konnte von jemand anderes, nicht von ihm mehr, in Betrieb gehalten werden. Also diese Sache lief, meine Produktion der Detektoren lief auch, die Mädchen wußten, was sie machen sollten. Das Atelier überwachte das, ich hatte ein paar Physiker, die auch die Produktion überwachten, also das ging. Aber für uns als Physiker, die also jetzt in den Transistor näher hereingucken wollten und vor allem schon diskutiert hatten über intermetallische Verbindungen etwas zu machen, war das keine Situation mehr, war das einfach zu mager. Und *Westinghouse* machte keine Anstalten in das Labor mehr Geld hineinzupumpen. Und dann kam das automatisch, daß Welker sich sagte: „Ich geh jetzt zu Siemens.“

In Deutschland war es jetzt so weit, daß man was tun konnte. Aber das witzige war, *Siemens*, wo Welker hinging, die hatten noch Geld. Die waren während des Krieges nicht so dumm wie *Telefunken* und haben alles nach Osten verlagert, sondern waren in Bayern geblieben, was sehr vernünftig war. Also *Siemens* hatte noch Geld und konnte auch Welker einrichten. Während bei mir, war weder bei *Telefunken* noch sonst irgendeine Hoffnung.

Aber ich kriegte ein interessantes Angebot. Da war ein Herr Rechowsky in Paris der mich kontaktierte, der war in Kontakt mit einem Herrn Michael in New York und zwar der Präsident von der New England Industries in New York. Das waren Juden, die waren in der Lage, deutsche Sachen zurückzubekommen, die ihnen gehört hatten, die von Nazis requiriert wurden. Dazu gehörte, das deutsche Familienkaufhaus die DeFaKa. Furchtbares Wort. Das Geld, daß die DeFaKa machte, saß aber in den Banken fest in Deutschland und das konnte Herr Michael nicht bekommen nach New York. Denn die DM war nicht konvertierbar. Da sagte dieser Rechowsky zu mir: „Sie sind der richtige Mann, Sie machen da Transistoren, die schicken wir nach Amerika und dann verkaufen wir Transistoren in Amerika mit Aufpreis und dann haben wir unser Geld“. Ich sage: „Das kann ich machen, aber das kostet.“ „Oh,“ sagte der, „die DeFaKa hat Millionen.“ Ich sagte: „Gut, ich möchte das in Düsseldorf machen, da sitzt mein Onkel und da habe ich Bekannte usw.“ „Na schön, machen wir es da, wo Sie wollen, wo Sie wollen.“ Da wurde dann ein Fabrikgebäude gekauft, ich hab' noch ein Bild von der ersten Ausladung, da wurden die Hochfrequenzgeräte in Düsseldorf ausgeladen. Damals noch geknipst, wann war das? 1950/51, wie wir weggingen und da hab' ich dann eingekauft, das werden Sie auf den Bildern sehen. Da haben wir das Ganze eingerichtet. Nicht nur die Produktion der Transistoren und Dioden, die wollten auch Germaniumdioden haben, sondern ein ganzes Labor für III-V-Verbindungen. Wir fingen ja auch schon an mit Indiumantimonid und Galliumantimonid und die ganzen Dinger die dazugehörten, nämlich Anwendungen. Haben auf der Düsseldorfer Funkausstellung schon den ersten Transistor und schon das erste Transistorradio vorgeführt. Da ist das Dingelchen hier, das hatte ich da in der Hand nicht. Das war 1953 auf der Rundfunkausstellung in Düsseldorf. Das war schon mit unseren Transistoren bestückt. Hier war ein größerer Transistorempfänger, der auch gemacht wurde bei uns, das war auf der Ausstellung in Düsseldorf. Es wurde gezeigt, wie *Intermetall* die Transistoren herstellt, das Meßgerät und die Kleinpempfänger. Und dann waren dann auch schon verpackte Dioden verkauft. So ähnlich sahen auch die Transistoren aus. Und alle diese Meßgeräte wurden bei uns selbst gebaut. Es gab nichts zu kaufen. Wir kamen nach Deutschland herein und vom Hammer bis zum Hochfrequenzmeßgerät mußte man alles selber machen. Wir haben alles selber gemacht. Da war nichts zu kaufen. Na ja jedenfalls, das war also sehr interessant. Wir haben dann sehr viel Geld ausgegeben, daß muß ich schon sagen, diese DeFaKa hatte einen Geschäftsführer, ich hab' den Namen vergessen, der war sehr nett. Aber der traute der Sache nicht. Und dann sah ich einen Brief, der zeigte mir Rechowsky heimlich von diesem Geschäftsführer an den Michael in New York wo er sagte: „Also ich betrachte es als ein Faß ohne Boden.“ Was will er machen. Obschon, schrieb er dann leise drunter, Herr Mataré mir den Eindruck macht, daß er die Sache souverän beherrscht. Aber es ist

ein Faß ohne Boden. Faß ohne Boden hieß für ihn, unser Transistorverkauf war zwar da, aber es war so minimal verglichen mit unseren Unkosten. Da standen 10 Akademiker im Labor für III-V und an Weiterentwicklung. Wir waren die ersten, die Silizium im Vakuum zogen. Die Geräte sind hier abgebildet. Also das war natürlich weit über das hinaus, was der wollte. Der wollte natürlich nur Geld transferieren. Und dann kam auf einmal mir der große Stoß in die Rippen, daß die Deutsche Bank die Dollars konvertierte. Also konnte die Defaka ihr Geld sofort überweisen, ohne Transistoren. Da bekam ich sofort einen Anruf von Michael aus New York: „Bitte verkaufen Sie die Gesellschaft!“ Ich sagte: „Hören Sie mal, Sie haben mir doch 5 Jahre gegeben. Wir haben ausgemacht 5 Jahre. Geben Sie mir Zeit bis ich laufen kann.“ „Ja aber ich kann ja mein Geld sofort kriegen jetzt.“ Aus! Da fuhr ich mit diesen Bildern hier nach Amerika, ich hab' dann überall Vorträge gehalten. Da waren mehre Käufer, die haben sich an den Michael gewandt, haben ihm ein Preisangebot gemacht. Das günstigste hat er genommen, das war die *Clevite Corp.*

Die hat dann später auch Shockley Transistor Corp. gekauft. Da war er ohne Leute, denn der Noyce mit seinen ganzen Leuten war ja längst weg, die sind hingegangen zu Fairchild. Die Shockley Transistor Corp. hatte ja kaum mehr Wert.

K.H.: Sie haben dann nicht aber nicht mehr für *Clevite-Intermetall* weitergearbeitet, sondern sind dann gleich nach Amerika gegangen

H.M.: Ja da wurde sofort ein Mann namens Dr. Wiesinger, ein Anwalt, als Geschäftsführer eingesetzt. Und der hat sofort das Labor kaputt gemacht. Leute entlassen. Das Labor konnte nicht mehr finanziert werden, es wurde nur noch produziert.

Er sagte mir das auch: „Also, das Labor muß gehen. Und wir machen nur noch Transistoren und Dioden und vielleicht gucken wir mal das Silizium an.“ Da sagte ich: „Da haben Sie sich ja ungeheuer beschränkt, und ich hab' die ganzen schönen Geräte da stehen, also das ist keine Zukunft. Dann gehe ich doch lieber in die USA. Das hat keinen Zweck hier.“

Es wurde nur noch produziert und dann kam Seiler hinein durch ITT. Ich glaube, daß war der Zeitpunkt und der sagte: „Mein Gott noch mal, das Düsseldorfer Gehaltsniveau ist ja viel zu hoch, weg nach Freiburg in den Billigraum“. Er hat dann die Sache sehr schön in Freiburg da aufgebaut.

Ich hab' das nicht verfolgt, ich hab' dann nur die *Intermetall* in Paris wiedergetroffen als ich von USA einen Besuch in Paris machte, da war dann die *Intermetall* in Frankreich sehr groß vertreten. Sie kennen das, Sie haben ja auch vielleicht die Prospekte gesehen.

Ich hab' mich gewundert, was sie alles gemacht haben. Nachher hörte ich, der Trick war auf den digitalen Markt zu gehen für TV.

K.H.: Ja, zu wem in den USA sind Sie dann gegangen?

H.M.: Da war der Lieutenant Peterty, der ein paar Wissenschaftler, dabei war auch Prof. Goubeau von Jena, nach Amerika geholt hat. Beim Signal Corps fingen wir an und zwar als „consultant“, das war eine ganz gute Stellung. Ich war „consultant“ zu vier Laboratorien vom Signal Corps und zwar das reine Festkörperlaboratorium in dem sie sich also mit Kristallen befaßten, das Transistorlabor, bei dem sie pn-Junktion studierten und also Dotierungsfragen machten, dann das Mikrowellenlabor, in dem sie Mikrowellendetektoren und Mikrowellenmessungen machten und zum Schluß noch das Gerätelabor, also in dem Meßgeräte gemacht wurden. Da mußte ich überall beraten. Das war an vier verschiedenen Stellen in New Jersey. Ich saß meistens in meinem dicken Auto und fuhr irgendwo über den Freeway zu einem anderen Labor und hatte dann Besprechungen. Das war sehr interessant weil auch Leute wie Dr. Golay, der Schweizer. Dr. Zahl war noch da,

der auch mit Shockley verhandelt hatte, und damals die ersten Transistoren gebaut hatte im Signal Corps. Es war interessant da und ich arbeitete mit Dr. Keck zusammen, der erste, der floating zone gemacht hat mit Silizium, ähnlich wie der Mann bei *Siemens*, wie heißt er noch Heywang.

Keck und Heywang hatten eigentlich genau das selbe gemacht Keck in USA und Heywang bei *Siemens*. Ja und da hab' ich mich beim Signal Corps recht wohl gefühlt, muß ich sagen und kriegte dann Angebote bei Tung-Sol (Electric Corporation) wieder die Halbleiter aufzubauen, was ich auch gemacht habe. Habe aber zugleich meine Korngrenzen weiter gemacht. Und da besuchte mich auch der Dr. Read von Bell Labs, der mit Shockley zusammen die Theorie der Korngrenzen gemacht hatte. Hat bei uns einen Vortrag gehalten, dann hab' ich noch den Prof. Meixner aus Aachen eingeladen und so. Es war also sehr nett, aber es ging auch nicht sehr viel weiter, denn die Tung-Sol, das war eine alte Röhrenfabrik, die hatten nicht den Schwung und dann bin ich zur *Sylvania*, da war Keck, bei *Sylvania*. Der hat mich zur *Sylvania* geholt und dann habe ich da die ganze Siliziumsache aufgebaut, Vakuumziehen. Da haben wir die erste Apparatur von Leybold benutzt bei *Sylvania*, war witzig, nicht. Leybold hatte nämlich für uns bei *Intermetall* schon die erste Silizium-Zieh-Apparatur gebaut, mit Vakuum. Und dann sagte Dr. Oetgen, das war also der Direktor von Leybold zu mir: „Herr Mataré, das hat doch einen hohen Dampfdruck, das können wir doch nicht machen im Vakuum.“ Da sagte ich: „Das ist doch gerade der Witz, wir ziehen mit einer großen Vakuumanlage, die Sie ja gut machen können bei Leybold, ziehen wir das Vakuum ab vom Silizium, kriegen also eine Ausdampfung von allen Verunreinigungen zugleich und können trotzdem ziehen.“ Ich konnte es kaum glauben, wir haben es gemacht und es geht. Er hatte natürlich Pumpprobleme nach einer gewissen Zeit, denn den Siliziumdampf kriegte er natürlich in die Filter rein. Aber das ging eine Weile ging das und dann mußte man die Filter austauschen. Und wir haben hervorragende Kristalle gekriegt dadurch. Und da habe ich auch anfangs noch versucht Bikristalle zu ziehen mit Silizium. In USA ging das weiter, als ich drüben war, ich war also bei *Sylvania*, da haben wir das auch schon versucht. Und da gab es noch welche von *Motorola*, die kamen mich besuchen, die versuchten es auch. Und da waren das immer Zwillingengebilde. Keine „dangling bonds“ hielten sich sauber im Silizium. Das Gitter hat bei dem Abkühlen, also von hohen Temperaturen und dann beim Abkühlen, relaxed und das tat das Germanium nicht, da fror es ein. Es war erstaunlich, der Unterschied. Beim Galliumarsenid auch, wie beim Germanium, erhält man tip top hochleitende Korngrenzen-Schichten.

Ausbildung zu zwei Dokortiteln

K.H.: Zum Abschluß möchte ich Sie noch einmal zu Ihrer Ausbildung befragen. Sie haben ja zwei Dokortitel erworben, einen in Berlin und einen in Paris. Warum war das so?

H.M.: Ja, nach meinem Diplom hier in Aachen hatte ich auch in Aachen promovieren wollen. Hab' dann aber leider vollkommen neu anfangen müssen bei *Telefunken*. Aber Dr. Rothe hat mir die Chance gegeben, bei *Telefunken* zu promovieren.

K.H.: Wie ging das damals? Sie haben ihre Arbeit bei *Telefunken* gemacht und die wurde dann bei der Universität eingereicht?

H.M.: Ich hatte noch Vorlesungen zu belegen und Rigorosum mit Zusatzprüfung abzugeben. Das habe ich bei Staebelin und Zinke gemacht. Das ging ganz gut. Das war dann ein Dr.-Ing. an der TH Berlin-Charlottenburg.

K.H.: Gut, dann haben Sie in Frankreich noch mal das französische Promotionsverfahren auf sich genommen?

H.M.: Das kam so: Ich hatte Kontakt, wie ich ihnen sagte, mit Rocard, Grievet und Guinier. Grievet, das war auch ein Physiker, der sich mit Halbleitern befaßte. Guinier war Kristallograph und Rocard war eigentlich der tragende Mann an der Ecole Normale Supérieure, der die ganze Physik unter sich hatte. Und durch den Kontakt mit Aigrain hörte ich oder kam drauf, daß wenn ich Franzose sein wollte, ich spielte mit der Idee, wäre es besser, ich machte auch da ein Examen. Und der Herr Aigrain sagte: „Ich hab’ auch schon meinen Doktor vom MIT, ich mache aber hier noch einen Doktor, denn in Frankreich sitzt man besser, wenn man auch hier einen Doktor machte.“ Und da habe ich mit dem Aigrain, das war reiner Zufall, zusammen am gleichen Nachmittag promoviert. Beim selben Komitee.

K.H.: In Frankreich ist das ja so, daß man dafür zwei unterschiedliche Arbeiten einreichen muß. Mußten das selbständige wissenschaftliche Arbeiten sein?

H.M.: Ja, da wurde mir die Frage gegeben, bei der Supra-Fluidität vom Helium 4 die Tizard-Probleme usw. anzuschauen. Landau war noch nicht so bekannt, aber z.B. Fröhlich. Ich kannte die ganzen Probleme vom von Laues Seminar in Berlin her. Ich weiß jetzt nicht mehr im einzelnen, wie es in der Prüfung war, ich glaube ich wurde aber nur wenig gefragt, ich hatte ja eine dicke Arbeit über Helium 4 abgegeben.

Ich wurde mehr gefragt über die Transistor-Rauschprobleme, die ich da entwickelt hatte. Das habe ich nachher auch mal in der Zeitschrift für Physik publiziert.¹⁹

Damit habe ich den Doktor an der Ecole Normale Supérieure gemacht. Die sagten, daß wäre der höchstklassifizierte. Man konnte ihn auch noch an der Sorbonne machen. Aber der an der Ecole Normale Supérieure war das sogenannte „Docteur d’Etat“, das war noch mehr. Das machte ich mit „très honorable“. Jedenfalls war das sehr nett. Rocard, Guinier, und Grievet waren nachher sehr bekannte Leute.

K.H.: Vielen Dank für das Gespräch.

¹⁹ Mataré, Herbert F. (1951): Randschichtwechselwirkung und statistische Schwankungen beim Dreielektrodenkristall. *Zeitschrift für Physik* 131, S. 82-97.
Siehe auch Mataré, Herbert F. (1952): Interaction de couches d'arrêts et déviations statistiques dans les cristaux a trois électrodes. *Le Journal de Physique et le Radium. Physique Appliquée* 13:7, S. 112A-127A.