

Kriterien der Modellwahl in anwendungsdominierter Forschung

Torsten Wilholt

1. Die Privatisierung der Wissenschaft

Ein häufig festgestellter gegenwärtiger Entwicklungstrend der Wissenschaftslandschaft ist eine zunehmende Privatisierung. Abbildung 1 zeigt die Entwicklung des Anteils der Industriefinanzierung im Vergleich zum (bundes-)staatlichen Anteil der Gesamtausgaben für Forschung und Entwicklung der letzten 50 Jahre in den USA. Die Industrie hat die staatlichen Ausgaben etwa seit den 1980er Jahren überflügelt.¹

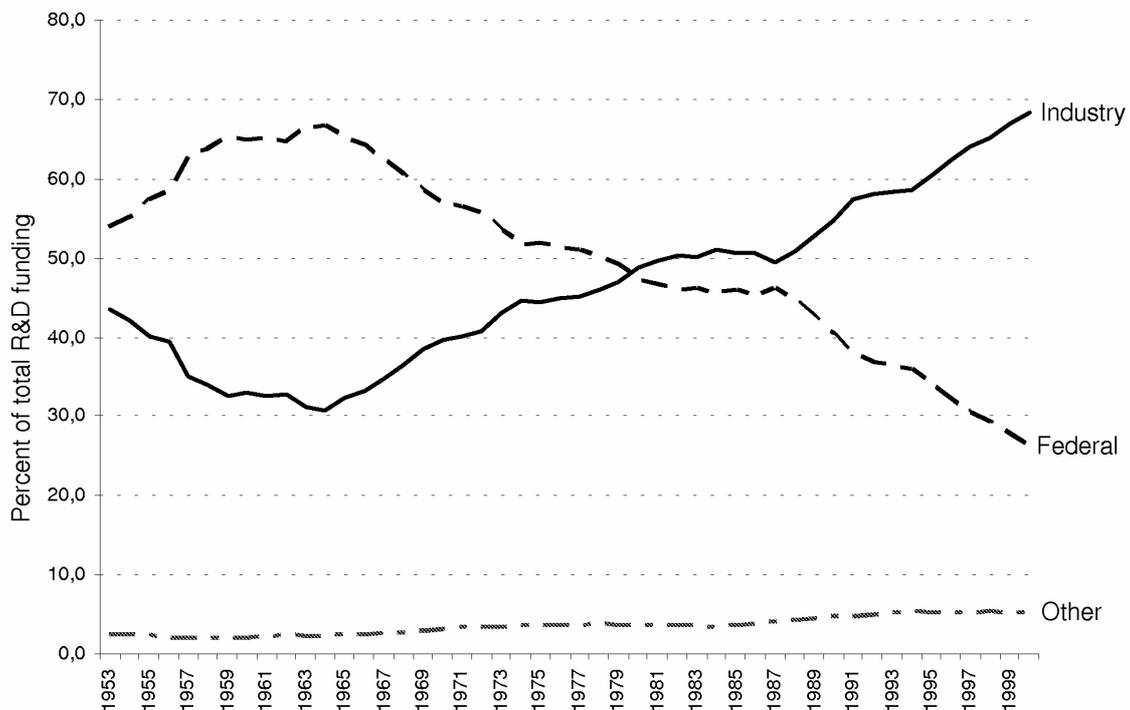


Abb. 1: Anteile der nationalen Ausgaben für Forschung und Entwicklung in den USA nach Finanzierungsquellen; 1953–2000. Nach National Science Board 2002, Fig. 4-3.

Diese Daten sollen die Tendenz zur Privatisierung der Wissenschaften nur illustrieren; es geht mir natürlich nicht darum, diese Entwicklung zu belegen oder zu analysieren.² Vielmehr möchte ich mich einem Bedenken zuwenden, das im Kontext dieser Tenden-

¹ Auch bei den europäischen und anderen Industriestaaten lässt sich diese Entwicklung beobachten. Vgl. OECD 2002, Tafeln 11–14.

² Bei genauerer Interpretation solcher Forschungsdaten ergibt sich z. B. das Problem, dass nicht klar ist, welcher Anteil von „R&D“ jeweils auf „R“ (Forschung) und auf „D“ (Entwicklung) fällt.

zen oft geäußert wird und zu dem die Wissenschaftstheorie etwas zu sagen haben sollte. Das in Rede stehende Bedenken ist die Befürchtung, *dass die epistemischen Standards der privatisierten Wissenschaft* (d. h. einer zukünftigen, im großen Stile privatisierten Wissenschaftslandschaft, vielleicht sogar schon diejenigen der gegenwärtigen Unternehmensforschung) *gegenüber den zur Zeit noch vorherrschenden akademisch geprägten Wissensstandards einen Rückschritt bedeuten*.

Ich möchte mit dieser Formulierung einen Grundtenor auffangen, der sich aus zahlreichen öffentlichen Auslassungen zur Privatisierungstendenz herauslesen lässt – insbesondere aus Stellungnahmen der Wissenschaftslobby, aber nicht ausschließlich: Aus einer überraschenden (und traditionell nicht eben der Wissenschaftslobby zuzurechnenden) Quelle stammt die folgende, ungewöhnlich deutliche Erklärung:

Aus einem anderen Blickwinkel gesehen, bedeutet die Vorherrschaft des ökonomischen Aspekts in der Forschung letztlich, daß die Wissenschaft ihres epistemologischen Charakters beraubt wird, dem zufolge ihr erstes Ziel die Entdeckung der Wahrheit ist. Wenn die Wissenschaft sich auf den Weg des Utilitarismus begibt, besteht die Gefahr, daß ihre spekulative Dimension, in der die innere Dynamik des intellektuellen Fortschreitens des Menschen besteht, vermindert oder ganz ausgelöscht wird.³

Autor dieser Zeilen ist Papst Johannes Paul II (in einem offenen Brief an seinen Nuntius in Polen vom 25. 3. 2002).

Um dieses öffentlich verhandelte Bedenken zu erfassen, habe ich es zunächst sehr vage formuliert. Im folgenden will ich zeigen, dass es eine spezifische wissenschaftstheoretische Interpretation der These gibt, die auf einige hochinteressante wissenschaftstheoretische Besonderheiten von bestimmten Typen von Forschung unter Verwertungsdruck hinweist.

Dabei denke ich nicht in erster Linie an solche Sorgen um die epistemischen Standards, die befürchten, die wissenschaftliche Unparteilichkeit könnte angesichts der vielfältigen ökonomischen Abhängigkeiten und der wachsenden Bedeutung der Expertisefunktion der Wissenschaft, etwa bei Zulassungsverfahren, aber auch schlicht bei der Vermarktung wissenschaftlich-technologischer Produkte, auf der Strecke bleiben. (Es gibt allerdings durchaus Anzeichen dafür, dass diese Sorgen sehr ernst genommen werden sollten.⁴) Ein weiteres wichtiges Thema im Zusammenhang mit der Ökonomisierung von Wissenschaft ist die Macht über die wissenschaftliche Tagesordnung: Ganz abgesehen von einem noch zu diskutierenden Einfluss auf Methoden, Strategien und Qualität der Wissenserzeugung verändert natürlich die Privatisierung die Schwerpunkte bei der Festlegung davon, mit *welchen Fragen* sich das Gesamtunternehmen Wissenschaft überhaupt beschäftigt. Doch auch dieser wichtige Zusammenhang ist hier nicht mein Thema. Ich möchte mich einer anderen, stärker erkenntnistheoretisch geprägten Art von Besorgnis

³ Johannes Paul II 2002, vgl. Horton 2004, von dem der Hinweis auf dieses Dokument stammt. Für ein Beispiel einer weltlicheren, aber ebenfalls sehr deutlichen Formulierung derselben Bedenken vgl. die Stellungnahme des Physikers und langjährigen Wissenschaftsfunktionärs John Ziman (2002, insb. 399).

⁴ Vgl. etwa Brown 2003 und die Beiträge im *British Medical Journal* 326 (2003), Heft 7400.

zuwenden, die nicht nur die wissenschaftliche Expertise oder die Festlegung der Wissenschaftsagenda, sondern die theoretisch innovative Forschung selbst betrifft.

Dies bedarf vermutlich einiger Erläuterung. Denn theoretisch innovative Forschung dient dort, wo sie überhaupt in den Dienst marktwirtschaftlicher Interessen gestellt wird, vermutlich in der ganz überwiegenden Zahl der Fälle der Erforschung und Entwicklung neuer technologischer Möglichkeiten. Und hier bietet sich ein ganz einfaches Argument für einen erkenntnistheoretischen Optimismus die privatisierte Forschung betreffend an: Es ist im Interesse der Unternehmen, dass die neue Technik funktioniert; ergo muss es auch im Interesse der Unternehmen sein, die verlässlichsten Erkenntnisstrategien zur Gewinnung desjenigen Wissens anzuwenden, das der neuen Technik zugrunde liegen soll; die verlässlichste Erkenntnisstrategie ist aber nach unserem besten Wissen, sich an die ehrwürdigen epistemischen Standards unserer reifen Naturwissenschaften zu halten. Diese sollten demnach kaum in Gefahr sein, durch ökonomistische Instrumentalisierung korrumpiert zu werden. Doch, wie ich zeigen möchte, ist diese einfache Argumentation irreführend. Sie ist zu holzschnittartig, um einen erkenntnistheoretischen Optimismus für die Unternehmensforschung begründen zu können. Tatsächlich lassen sich Befürchtungen um ein Nachgeben wissenschaftlicher Beurteilungskriterien unter Anwendungsdruck nicht leicht von der Hand weisen. Im folgenden werde ich ein Argument für einen erkenntnistheoretischen Pessimismus skizzieren, der eine bestimmte Art von Forschung unter Anwendungsdruck betrifft.

2. Modellwahl in anwendungsdominierter Forschung

Die in Rede stehende Art von Forschung ist die *anwendungsdominierte Forschung* (ADF), über die es eine beginnende wissenschaftstheoretische Diskussion gibt.⁵ Anwendungsdominanz definiert man m. E. am besten durch die folgenden zwei jeweils notwendigen und gemeinsam hinreichenden Bedingungen. Erstens: ADF ist wissenschaftliche Forschung, bei deren Durchführung die wirksamen Erfolgskriterien an die Entwicklung eines vermarktbareren Produktes oder Verfahrens geknüpft sind. Mit „wirksamen“ Erfolgskriterien sind diejenigen Kriterien gemeint, die dort den Ausschlag geben, wo über Sein oder Nichtsein des Projektes entschieden wird. Der ausschlaggebende Unterschied zwischen akademischer Forschung und ADF ist, dass ein Projekt in ADF, bei dem die Chancen schwinden, zu Erfolg in Form eines Produktes zu führen, damit rechnen muss, als Fehlschlag zu gelten und eingestellt zu werden. Zweitens: Im Gegensatz zu den meisten typischen Fällen von ingenieursmäßiger Technologieentwicklung ist ADF theoretisch innovativ, d. h. sie beschäftigt sich mit der Erzeugung neuer Theorien oder neuartiger Modelle. Das erste Kriterium grenzt ADF gegen rein akademische Forschung, das zweite gegen rein ingenieursmäßige Technologieentwicklung ab. ADF kann wahlweise als Zwischenbereich oder als Überlappung dieser beiden Typen epistemischer Praktiken betrachtet werden.

⁵ Vgl. Carrier (im Druck) und die Beiträge von Matthias Adam, Carsten Köllmann und Michael Stöltzner in diesem Band.

Ich werde nun die These zu untermauern versuchen, dass in ADF die herkömmlichen Beurteilungskriterien für Theorien und Modelle, die jedenfalls von der Wissenschaftstheorie der akademischen Forschung zugeschrieben werden, durch andere, technologisch-ökonomisch geprägte Kriterien ausgehebelt werden können.

Die darin implizit enthaltene Unterstellung, die Wissenschaftstheorie habe sich im Falle der herkömmlichen akademischen Forschung auf einen Kanon von Beurteilungskriterien geeinigt, ist natürlich eine Idealisierung. Einigkeit besteht wohl nur darin, dass das Maß, in dem konkurrierende Theorien oder Modelle *durch empirische Ergebnisse bestätigt* sind, eine zentrale Rolle bei der Theorie- oder Modellwahl spielt. Allerdings ist inzwischen weitestgehend anerkannt, dass dieses empirische Kriterium alleine nicht ausreicht, um Auswahlentscheidungen in den Wissenschaften zu verstehen, weshalb Wissenschaftstheoretikerinnen weitere epistemische Tugenden von Theorien und Modellen diskutieren müssen. Beispiele sind: Kohärenz mit anderen gegenwärtig anerkannten Theorien, Genauigkeit, Reichweite, Einfachheit und Fruchtbarkeit (d. h. das Potential, neue Phänomene oder Verbindungen zwischen bereits bekannten aufzudecken)⁶.

Die traditionelle Diskussion dieser Beurteilungskriterien steht unter dem Vorzeichen der Annahme, dass das Kriterium der empirischen Bestätigung alleine die Wahlentscheidung unterdeterminiert. Bei großem Anwendungsdruck ist es im Gegenteil plausibel, anzunehmen, dass ganz andere Modellcharakteristika schon das empirische Kriterium und erst recht die übrigen epistemischen Werte aushebeln können.

Um dies zunächst abstrakt zu zeigen, schlage ich vor, eine Entscheidung zwischen zwei Modellen A und B zu betrachten. Angenommen wird, dass Bedingungen der Anwendungsdominanz vorliegen und dass zwei Optionen zur Disposition stehen: Die gesamten Ressourcen des Forschungsprojektes sollen in Zukunft entweder Forschungen zugeführt werden, denen die Annahmen von Modell A zugrunde liegen, oder solchen, die auf Modell B aufbauen.

Der Erfolg, den eine Entscheiderin im Kontext ADF anstrebt, ist nicht ein gut bestätigtes Modell, sondern ein vermarktbare Produkt. A und B können unterschiedlich gut geeignet sein, sich in eine vermarktbare Technologie umsetzen zu lassen. Die Proposition, dass sich auf der Grundlage eines Modells eine vermarktbare Technologie entwickeln lässt, symbolisiere ich im Folgenden durch T_A bzw. T_B . Dann spielt bei der Entscheidung unter Anwendungsdominanz sicher der folgende Vergleich von Wahrscheinlichkeiten eine Rolle:

$$P(T_A) \cong P(T_B).$$

Ein weiterer, möglicherweise weniger offensichtlicher Faktor muss in Betracht gezogen werden. Auch wenn das Projekt an der Lösung *eines* klar definierten technologischen Problems arbeitet, müssen die *Lösungen*, die A und B jeweils versprechen, nicht dieselben sein und können sich daher auch hinsichtlich des prospektiven Gewinns im

⁶ Vgl. Kuhn 1977, 321f.

Fälle einer erfolgreichen Vermarktung unterscheiden. Der ökonomische Nutzen der jeweils erwartbaren technologischen Lösungen muss also ebenfalls verglichen werden:

$$u_{\text{ök}}(T_A) \cong u_{\text{ök}}(T_B).$$

(Es wäre beispielsweise möglich, dass A und B für verschiedene Materialien unterschiedlich aussagekräftig sind, die ganz verschiedene Herstellungskosten implizieren. Oder die jeweils auf A und B basierenden technischen Lösungen könnten verschieden große Anwendungsbereiche und deshalb verschiedene Marktchancen haben.) Insgesamt geht es also bei der Entscheidung um den Vergleich

$$P(T_A) \cdot u_{\text{ök}}(T_A) \cong P(T_B) \cdot u_{\text{ök}}(T_B).$$

Eine Abschätzung der Wahrscheinlichkeit von T_A simpliciter, d. h. ohne Voraussetzungen über den Wahrheitsgehalt von den Modellannahmen in A , dürfte im Normalfall nicht möglich sein. Daher wäre es vernünftig, eine Abschätzung der Wahrscheinlichkeit von T_A gegeben zutreffende Modellannahmen zu versuchen. Dann muss die Überlegung natürlich um eine Abschätzung der Wahrscheinlichkeit des Zutreffens der Modellannahmen selbst (gegeben alle zur Verfügung stehenden relevanten empirischen Belege E) ergänzt werden. Der entscheidende Vergleich ist demnach

$$(V) \quad P(A/E) \cdot P(T_A/A) \cdot u_{\text{ök}}(T_A) \cong P(B/E) \cdot P(T_B/B) \cdot u_{\text{ök}}(T_B).$$

(Zur Vereinfachung der Notation erlaube ich mir eine strenggenommen ambivalente Verwendung von „ A “ und „ B “, die sich einmal auf Modelle und einmal auf die Propositionen, dass die entsprechenden Modellannahmen zutreffen, beziehen.) Die Behauptung, dass (V) der entscheidende Vergleich sei, beruht auf einer Näherung. Denn die Abschätzung der Wahrscheinlichkeit von T_A mit Hilfe der empirischen Belege E ist hier strenggenommen unvollständig integriert. Vollständig müsste eingehen

$$P(T_A/E) = P(A/E) \cdot P(T_A/A) + P(\neg A/E) \cdot P(T_A/\neg A).$$

Die vereinfachte Form oben drückt natürlich die Vermutung aus, dass die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Umsetzung in vermarktbare Technologie auf der Grundlage eines Modells mit unzutreffenden Modellannahmen, $P(T_A/\neg A)$, gleich Null oder doch vernachlässigbar klein ist. Gewissermaßen steckt in dieser Vereinfachung der Ansatz des im vorigen Abschnitt angedeuteten optimistischen Arguments, auch die ADF müsse doch an funktionierenden Modellen, und ergo an zutreffenden Modellannahmen interessiert sein. Dagegen und gegen die in Rede stehende Vereinfachung könnte man Einspruch erheben, da ja in den Natur- und Ingenieurwissenschaften oft Modelle mit bekanntermaßen falschen Annahmen Anwendungserfolge gefeiert haben. Doch der entscheidende Punkt gegen den allzu blauäugigen Optimismus ist m. E. ein anderer, weswegen ich die

genannte Vereinfachung der Übersichtlichkeit halber als Idealisierung akzeptieren will: Entscheidend ist, dass sogar im optimistisch vereinfachten (V) die Faktoren $P(T_A/A)$ und $u_{ök}(T_A)$ den Faktor $P(A/E)$ aushebeln können.

Ich möchte natürlich nicht behaupten, dass die wirklichen Menschen, die in Einrichtungen, in denen ADF betrieben wird, über Beibehalten oder Auswechslung der ihrer Arbeit zugrunde liegenden Modelle zu entscheiden haben, *homines oeconomici* sind. Jedoch ist nicht von der Hand zu weisen, dass (V) in guter Näherung angibt, welche Entscheidung aus Sicht des Vorstandes eines die Forschung finanzierenden Unternehmens die wünschenswerte wäre. Gemeinsam mit einigen plausiblen Annahmen über Entscheidungsstrukturen in der Privatwirtschaft folgt, dass man einen starken (wenn auch vielleicht nicht ausschließlichen) Einfluss der in (V) ausschlaggebenden Faktoren auf Modellwahlentscheidungen in ADF erwarten darf.

Im Einzelfall kann das bedeuten, dass ein Modell A , das empirisch besser bestätigt ist als sein Konkurrent,

$$P(A/E) > P(B/E),$$

dennoch insgesamt einen geringeren Erwartungsnutzen hat,

$$P(A/E) \cdot P(T_A/A) \cdot u_{ök}(T_A) < P(B/E) \cdot P(T_B/B) \cdot u_{ök}(T_B),$$

wenn die technische Umsetzbarkeitswahrscheinlichkeit $P(T_B/B)$ und/oder der prospektive ökonomische Nutzen $u_{ök}(T_B)$ bei B so viel größer sind, dass sie B s Nachteil in Sachen empirischer Bestätigung mehr als aufwiegen. Es ist nicht zu erwarten, dass diejenigen Charakteristika, die für große technische Umsetzbarkeitswahrscheinlichkeit und hohen prospektiven Gewinn verantwortlich sind, direkt mit den herkömmlichen epistemischen Tugenden wie Kohärenz, Genauigkeit, Reichweite, Einfachheit oder Fruchtbarkeit korreliert sind. Es steht daher zu befürchten, so die pessimistische Konklusion dieses abstrakten Arguments, *dass technische Umsetzbarkeitswahrscheinlichkeit und prospektiver ökonomischer Nutzen bei Modellwahlentscheidungen in ADF all diese epistemischen Werte (einschließlich der empirischen Bestätigung) übertrumpfen können.*

Es ist noch darauf hinzuweisen, dass diese Abwägungen nicht mit der entscheidungstheoretischen Rekonstruktion von Theoriewahl als Maximierung eines Erwartungsnutzens verwechselt werden dürfen, wie sie zuerst von Isaac Levi vorgeschlagen und unter anderem von Patrick Maher wieder aufgegriffen wurde.⁷ Bei allen Ähnlichkeiten geht es in den von Levi und Maher beschriebenen Entscheidungen um die Maximierung einer *kognitiven* Nutzenfunktion u_{kog} (die der Theorie zufolge ausschließlich den Wert der verschiedenen möglichen Entscheidungsergebnisse für unsere *kognitiven* Ziele reflektieren soll und deshalb von einer allgemeinen, praktischen Nutzenfunktion abweichen kann).⁸ Etwas plakativ gesprochen, könnte man im Anschluss an die Levi-Maher-

⁷ Levi 1967, Maher 1993.

⁸ Vgl. Maher 1993, 149 f.

Theorie sagen, dass die von mir hier behandelten Bedenken in der Sorge bestehen, in ADF würde $u_{ök}$ und nicht wie in der akademischen Forschung u_{kog} die Modellwahlentscheidungen regieren und dies könnte der Verfolgung unserer kognitiven Ziele schaden.

3. Modellwahl in der Industrieforschung zum Riesenmagnetowiderstandseffekt

So weit die Erläuterung der These in abstracto. Ein Beispiel aus der Magnetelektronik soll nun illustrieren, dass die bisher theoretisch angenommenen Umstände, Einflüsse und Entscheidungszwänge keine philosophischen Hirngespinnste sind. Das Beispiel stammt aus der Industrieforschung am so genannten Riesenmagnetowiderstandseffekt. Der Riesenmagnetowiderstand (*giant magnetoresistance*, GMR) ist ein vergleichsweise junger physikalischer Effekt: Er wurde erst 1988 entdeckt. Es handelt sich um einen magnetoelektrischen Effekt an bestimmten Systemen aus sehr dünnen Schichten.⁹

Der Effekt besteht im Kern darin, dass der elektrische Widerstand dieser Systeme großen („riesigen“) Schwankungen unterliegt, abhängig von der relativen Orientierung der Magnetisierungsrichtungen der einzelnen ferromagnetischen Schichten in diesen Systemen zueinander. Nachdem die Entdeckung des GMR zunächst in öffentlichen Forschungseinrichtungen stattgefunden hatte,¹⁰ stiegen die Forschungsabteilungen zahlreicher Unternehmen sehr schnell in großem Stil in die Untersuchung des Effektes ein. Der Grund für dieses Engagement liegt im technischen Potential des GMR.

Die Magnetisierungsrichtung der ferromagnetischen Schichten in einem GMR-System, und somit der elektrische Widerstand, kann durch ein von außen angelegtes magnetisches Feld beeinflusst werden. Damit eignen sich solche Systeme grundsätzlich als Sensor für magnetische Felder – nämlich dann, wenn man in einer der Schichten die Magnetisierungsrichtung technisch fixiert und nur die andere sich nach äußeren Magnetfeldern richtet. Solche Systeme werden „Spin-valve“ (Spinventil) genannt.

Die besonderen Eigenschaften des GMR-Effektes machten vor allem auch eine spezielle Anwendung attraktiv: Leseköpfe für magnetische Speichermedien, insbesondere Computer-Festplatten. Denn auch ein Lesekopf ist im Grunde nichts anderes als ein magnetischer Sensor. Eine mögliche GMR-Technologie versprach, hinsichtlich ihres Miniaturisierungspotentials und ihrer Sensibilität den Vorgängertechnologien in diesem Bereich weitaus überlegen zu sein. Tatsächlich konnte IBM bereits 1997 die erste serienreife GMR-Festplatte vorstellen. Der Einsatz der GMR-Leseköpfe hat inzwischen zu einer großen Steigerung der Datendichte geführt.

Daran, dass die Industrieforschung am GMR-Effekt unter hohem Anwendungsdruck stand, dürfte angesichts des gigantischen Marktpotentials für magnetische Speichermedien mit hoher Datendichte kein Zweifel bestehen.¹¹ Auch das zweite Merkmal anwen-

⁹ Zur Einführung siehe z. B. Grünberg 2001.

¹⁰ Der Effekt wurde unabhängig von Peter Grünberg und seinen Mitarbeitern im Forschungszentrum Jülich und einer Gruppe um Albert Fert an der Université Paris-Sud entdeckt.

¹¹ Zum Zeitpunkt der Serienreife ging man von einem Marktumfang von weltweit insgesamt 180 Mio. Leseköpfen pro Jahr aus. Vgl. Mengel 1997, 49.

bedingungsdominierter Forschung ist in diesem Fall erfüllt: Physikalische Modelle zur Beschreibung des Effekts lagen zu Anfang nur im Ansatz vor; das für eine erfolgreiche Produktentwicklung erforderliche theoretische Wissen mussten die Industrieforscher parallel zur ingenieurmäßigen Entwicklungsarbeit selbst mitgestalten.

Dabei ist der Ausgangspunkt aller Modellierungsarbeiten zunächst ein *semiklassisches Grundmodell*, das den Effekt qualitativ gut erklärt. Ursache für den Effekt ist demnach Spin-abhängige Streuung von Transportelektronen. Streuereignisse sind der Grund für elektrischen Widerstand, und in ferromagnetischen Medien hängt die Streuwahrscheinlichkeit für jedes Transportelektron von der Richtung seines Spins relativ zur lokalen Magnetisierungsrichtung ab. (Streuereignisse sind – besonders nahe der Schichtgrenzen – viel wahrscheinlicher für Elektronen, die entgegen der lokalen Magnetisierungsrichtung spin-polarisiert sind.) Das Grundmodell nimmt an, der Strom durch das GMR-System sei aus zwei parallel geschalteten Strömen zusammengesetzt, einem Spin-up-Strom und einem Spin-down-Strom. Beide fließen durch zwei ferromagnetische Schichten. Wenn diese parallel magnetisiert sind, wird damit quasi ein Kanal für einen der beiden Ströme geöffnet – nämlich denjenigen, der in dieselbe Richtung spin-polarisiert ist. Das bedeutet einen niedrigeren Gesamtwiderstand als im Falle der antiparallelen Magnetisierung, wo beide Ströme denselben mittleren Widerstand erfahren.

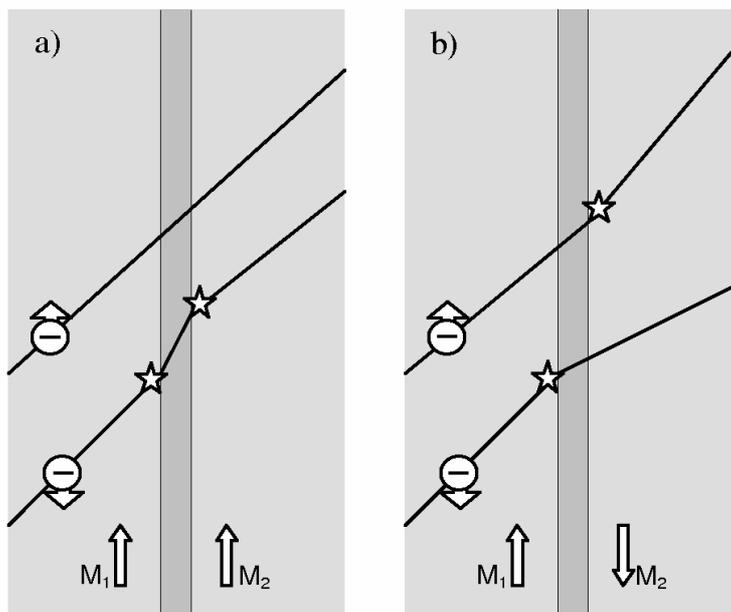


Abb. 2: Schematische Darstellung des Zwei-Ströme-Modells: Zwei spin-polarisierte Ströme von Transportelektronen (symbolisiert durch Kreisscheiben mit Pfeil, der die jeweilige Spin-Polarisierung angibt) schwirren durch ein GMR-Sandwich. Sterne stehen für die wahrscheinlichsten Streuereignisse. Die fetten Pfeile M_1 und M_2 zeigen die lokalen Magnetisierungsrichtungen in den ferromagnetischen Schichten an. Bei antiparalleler Ausrichtung b) haben beide Ströme denselben Widerstand, bei paralleler a) erfährt der Spin-down-Strom einen erhöhten, der Spin-up-Strom einen entsprechend reduzierten Widerstand. Nach Grünberg 2001, 36.

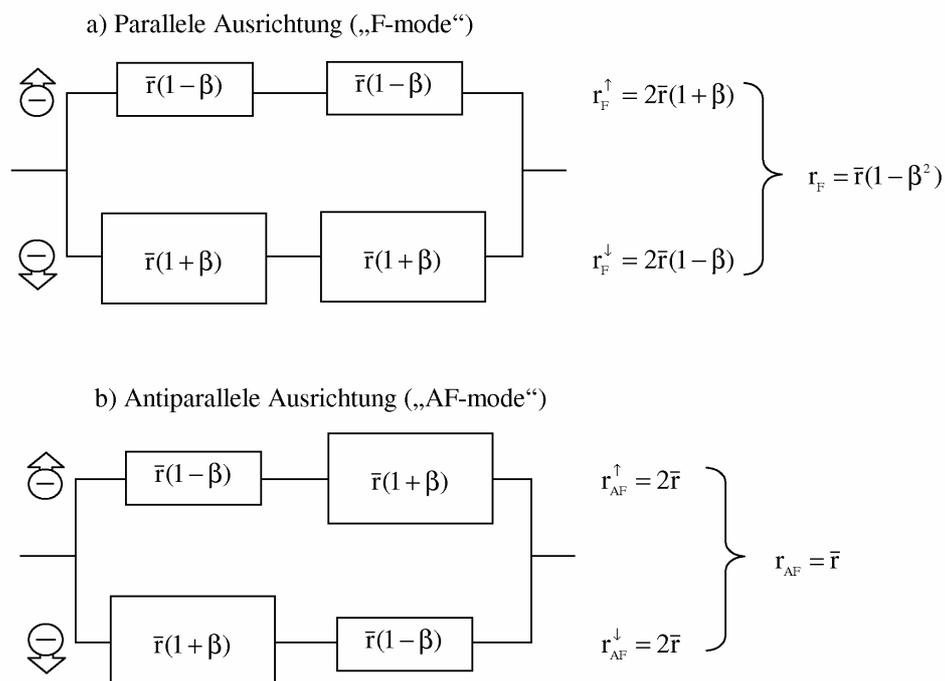


Abb. 3: Die verschiedenen Widerstände bei a) addieren sich zu einem insgesamt etwas geringeren Widerstand als die gleichen Widerstände bei b).

Das Grundmodell nach diesem Schema heißt semiklassisch, weil es einerseits die Transportelektronen wie punktartige Partikel mit bestimmten Trajektorien behandelt, andererseits aber die Streuwahrscheinlichkeiten quantenmechanisch berechnet werden. Es liefert die bis heute anerkannte qualitative Erklärung des Effekts, jedoch in seiner Grundform zunächst keine brauchbaren quantitativen Vorhersagen. Aus der Perspektive einer auf Anwendungen bedachten Forscherin ist dies ein erhebliches Manko, denn für ihre Arbeit stellt sich zentral ein *quantitatives Maximierungsproblem*: nämlich ein GMR-System zu designen, das (neben anderen für den praktischen Einsatz erforderlichen Eigenschaften) auf verschiedene Magnetisierungsrichtungen mit einer möglichst starken Widerstandsveränderung reagiert – im technischen Jargon: ein möglichst großes *magneto-resistive ratio* (MR) aufweist.

Im Ringen um quantitative Adäquatheit setzt schnell (Anfang der 1990er Jahre) eine groß angelegte Erzeugung von partiellen Deidealisationen des semiklassischen Grundmodells ein. Beispiele für solche partiellen Deidealisationen sind: Berücksichtigung der Bandstruktur der ferromagnetischen Materialien, Unterscheidung zwischen Streueignissen innerhalb der Schichten und an Schichtgrenzen, Berücksichtigung von diffuser Streuung an nichtidealen Schichtgrenzen, Berücksichtigung zusätzlicher Streueignisse an den äußeren Grenzen der Schichten bis hin zur Berücksichtigung der vom Strom durch das System erzeugten Magnetfelder.¹²

¹² Vgl. Coehoorn 1999, 89–97.

Ein genauer Blick auf diese partiell deidealisierten Varianten des semiklassischen Modells lässt Charakteristika des Modellbildungsprozesses erkennen, die an Modellierungen in den Wirtschaftswissenschaften erinnern. Ein Großteil der Arbeit ist Parameter-Fitting. Der folgende Abschnitt stammt aus der Veröffentlichung, in der der französische Physiker B. Dieny, der in enger Kooperation mit den IBM Laboratorien in Almaden an der Modellierung des GMR Effektes arbeitete, 1992 eine ad hoc Erweiterung des semiklassischen Modells vornimmt. Er führt einen zusätzlichen Parameter ein: anisotropische mittlere freie Weglängen, die durch anisotropische Streueffekte wegen polykristalliner Korngrenzen gerechtfertigt sein *könnten*:

With a single set of parameters, we have been able to fit the variation of the sheet conductance and of the MR [...] with the thickness of the NiFe and Cu layers. [...] [W]e first found that if the mean free paths are adjusted to fit the sheet conductance, the calculated MR is somewhat smaller than the measured one (by about 20% in relative value). However by introducing an anisotropy in the mean free paths which is relevant in these polycrystalline sputtered samples, we show that the MR can also be very well fitted.¹³

Der Wert des neuen Parameters wird danach bestimmt, dass seine Integration in das Modell die erforderliche Erhöhung des MR um etwa 20% leistet. Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis von Dienys Parameter-Fitting: Die gepunktete Linie ist die Abhängigkeit der Effektstärke (MR) von der Dicke der Permalloy-Schicht im Grundmodell vor Dienys ad hoc Erweiterung, die durchgezogene zeigt die Übereinstimmung nach der Erweiterung mit den Messwerten (Dreiecke).

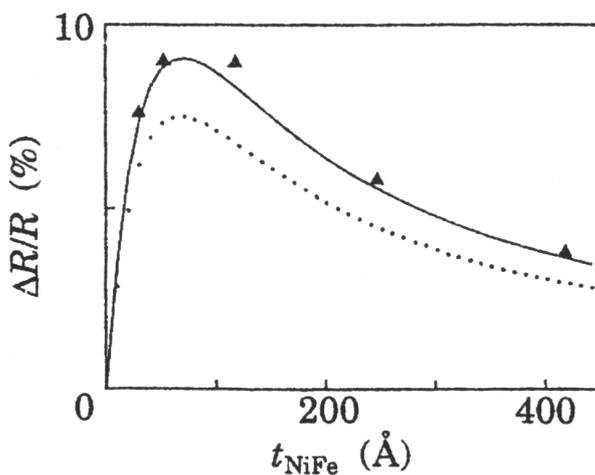


Abb. 4: Aus Dieny 1992, 263. Übereinstimmung mit den Messwerten vor und nach Dienys Erweiterung.

¹³ Dieny 1992, 262.

Zeitlich parallel zu den Entwicklungen von Varianten des semiklassischen Modells wurden auch erste Modelle entwickelt, die auf einer vollständigeren quantenmechanischen Beschreibung des Elektronentransports beruhen.¹⁴ Interessanterweise lässt sich aber beobachten, dass sich die Forscher von IBM und Philips, die von den Industrieforschern am deutlichsten in der Forschungslandschaft vertreten sind, in ihren Veröffentlichungen ganz überwiegend weiterhin an den semiklassischen Modellen und ihren partiellen Deidealisierungen hängen – obwohl quantenstatistische Modelle klarerweise realistischere Modellannahmen machen. In ihren Schlüsselpublikationen über das Design von GMR-Leseköpfen kommen quantenstatistische Modellierungen nicht vor, wohl aber die semiklassischen Modelle.¹⁵ Letztere sind zwar gut handhabbar, aber ansonsten epistemisch deutlich weniger ambitioniert als die quantenstatistischen. Es kommt bei ihnen weder auf eine gute Passung mit dem, was die fundamentalen Theorien über die Natur von Elektronen zu sagen haben, an, noch wirklich auf empirische Adäquatheit in einem umfassenden Sinn: Denn Beachtung findet hier nur kleiner, klar definierter Ausschnitt der beobachtbaren Konsequenzen der Modellannahmen. Dienys Beispiel macht dies sehr sinnfällig: Der in Rede stehende Ausschnitt ist genau der in Abb. 4 dargestellte. Am traditionellen Methodenideal der empirischen Adäquatheit, der Übereinstimmung *aller* beobachtbarer Konsequenzen mit den verfügbaren empirischen Belegen, besteht in dieser Modelltradition schlichtweg kein Interesse.

Ich möchte eine versuchsweise Erklärung dafür anbieten, warum die Industrieforscher das semiklassische Modell mit Parameter-Fitting à la Dieny bevorzugen. Wie gesehen, gelingt es diesen Modellen von vornherein gut, den Zusammenhang zwischen Schichtdicken und MR zu beschreiben. Deshalb sind sie für die Lösung des vorhin genannten Maximierungsproblems gut geeignet, vor dem die anwendungsorientierte GMR-Forscherin steht. Dienys Grafik (Abb. 4) ist augenfällig geradezu auf dieses Maximierungsproblem zugeschnitten. Die Modelle beschreiben den Zusammenhang zwischen einem technisch relativ leicht beeinflussbaren Parameter und einem erwünschten Effekt gut. Außerdem sind sie leichter zu handhaben als quantenstatistische Modelle. Die quantitative Adäquatheit der Beschreibung des Zusammenhangs zwischen einem technisch gut beeinflussbaren Parameter (hier der Schichtdicke) und einer erwünschten Eigenschaft des Systems ist ausreichend, um die Wahrscheinlichkeit, dass sich auf der Grundlage des Modells eine vermarktbar Technologie entwickeln lässt, in die Höhe zu treiben. Da die GMR-Industrieforscher ihre Modellwahlentscheidungen unter Bedingungen der Anwendungsdominanz treffen, kann diese ihre Präferenz für das weniger realistische Modell begründen.

Zwingend lässt sich natürlich durch eine bloße Betrachtung der veröffentlichten Modelle nicht nachweisen, dass genau dies die richtige Erklärung für die Modellwahl der Industrieforscher ist. In jedem Fall scheint mir das Beispiel aber eine gute Illustration

¹⁴ Vgl. Coehoorn 1999, 97f.

¹⁵ Siehe dazu exemplarisch Heim u.a. 1994, Tsang u.a. 1998 (für IBM) und Coehoorn u.a. 1998 (für Philips).

für Modellwahl in ADF zu sein und sehr plausibel zu machen, dass diese ihren eigenen Gesetzen folgt.

4. Der erkenntnistheoretische Pessimismus: Wiedervorlage

Ich denke, dass das Beispiel aus dem vorhergehenden Abschnitt eine vergleichsweise starke Illustration des an die Ökonomisierung der Wissenschaft geknüpften erkenntnistheoretischen Pessimismus ist, wie ich ihn zu Beginn vorgestellt habe: Der ökonomische Druck ist ohne Zweifel enorm. Die Komplexität und Neuartigkeit des Phänomens zwingt die Technologen zur theoretisch innovativen Erforschung des Gebiets. Und tatsächlich finden wir bei den dabei produzierten Modellen einen Hang zum Phänomenologischen, zum Parameter-Fitting, eine Präferenz für handhabbare Modelle statt für realistische.

Und dennoch ist dasselbe Beispiel geeignet, zugleich Zweifel an der pessimistischen Schlussfolgerung zu nähren. Zwar modelliert Dieny das Phänomen semiklassisch über mittlere freie Weglängen von Transportelektronen, aber natürlich steht er deshalb nicht etwa in Verdacht, zu glauben, einzelne Elektronen besäßen bestimmte Trajektorien. Auch wenn wir an Stelle des individuellen Wissenschaftlers eine ganze *community* von Industrieforschern betrachten: Es scheint intuitiv von den semiklassischen Modellierungen des GMR keine Gefahr auszugehen, dass sie die quantenphysikalische Einsicht in die Unbestimmtheit der raumzeitlichen Lokalisierung mikrophysikalischer Objekte verdrängen könnten. Warum nicht?

Offenbar machen wir bei der Bewertung dieser Situation eine implizite Unterscheidung zwischen der Entscheidung, mit einem Modell zu arbeiten und der Entscheidung, die Modellannahmen zu glauben. Wenn die Modellwahlentscheidungen in ADF ausschließlich Entscheidungen der erstgenannten Art sind, dann sind sie für die Wissensdynamik nicht unmittelbar relevant. Sie können trotzdem mittelbar erkenntnistheoretisch relevant werden, wenn eine Entscheidung, mit einem Modell zu arbeiten, mittelbar auch Einfluss darauf hat, welche wissenschaftlichen Überzeugungen sich langfristig in der *community* durchsetzen. Es gilt also, die Frage zu beantworten: Lassen sich die erkenntnistheoretischen Vorbehalte gegen ADF durch eine Unterscheidung zwischen der Entscheidung, mit einem Modell zu arbeiten und der Entscheidung, die Modellannahmen zu glauben, ausräumen? Im Grunde geht es dabei um drei Fragen. (i) Lässt sich die Unterscheidung zwischen den beiden Typen von Modellwahlentscheidungen auf solide Weise treffen? (ii) Handelt es sich bei den inkriminierten Modellwahlentscheidungen in ADF bloß um Entscheidungen, mit einem Modell zu arbeiten? (iii) Sind diese Entscheidungen für die echte Modell- und Theoriendynamik (d. h. die Dynamik der geglaubten Modelle und Theorien) ohne Einfluss? Dreimal „Ja“ hieße Entwarnung.

Eine (oberflächlich) ähnliche Unterscheidung hat es in der wissenschaftstheoretischen Diskussion der 1980er Jahre zu einiger Prominenz gebracht: Die Unterscheidung zwischen dem Glauben (*belief*) und dem Akzeptieren (*acceptance*) einer Theorie. Eine Theorie zu akzeptieren bedeutet hier, ihre beobachtbaren Konsequenzen zu glauben und die Theorie als Ganzes dazu zu verwenden, Vorhersagen zu machen, Erklärungen zu

geben, Experimente zu machen – kurz: all das zu tun, was man mit ihr machen würde, wenn man sie als Ganzes glauben würde.¹⁶ Die Unterscheidung ist im Kontext der Debatte um den wissenschaftlichen Realismus diskutiert worden: Nach Bas van Fraassens Version des Instrumentalismus macht all der Erklärungs-, Vorhersage- und sonstige Erfolg einer Theorie es nicht rational, sie zu glauben, sondern nur, sie zu akzeptieren. (Keine Sorge: Die Debatte soll hier nicht neu aufgerollt werden. Aber ein Aspekt der Diskussion wird sich für unseren Kontext nutzen lassen.)

Allerdings fällt die bei uns zur Diskussion stehende Unterscheidung nicht genau mit der 80er-Jahre-Unterscheidung von Glauben und Akzeptieren zusammen. Die Modellannahme, Transportelektronen in ferromagnetischen Materialien seien Ladungs- und Massepunkte, die von Streuereignis zu Streuereignis sausen, hat selbstverständlich viele Konsequenzen, von denen kein GMR-Forscher je intendierte, dass sie von irgend jemandem geglaubt werden sollten – und dies beschränkt sich nicht nur auf unbeobachtbare Konsequenzen. Die Modelle sind vielmehr der Art, dass nur ein ganz bestimmter, abgegrenzter Bereich ihrer beobachtbaren Konsequenzen geglaubt werden soll (zum Beispiel der Zusammenhang zwischen Schichtdicke und MR). Diese Einstellung zu einem Modell nenne ich seinen „rein instrumentellen Gebrauch“. Ein Modell rein instrumentell zu gebrauchen, ist also noch bedeutend schwächer, als es zu akzeptieren, denn letzteres schließt ein, *all* seine beobachtbaren Konsequenzen zu glauben.¹⁷

Die Unterscheidung zwischen der Entscheidung, ein Modell rein instrumentell zu gebrauchen und der Unterscheidung, die Modellannahmen zu glauben, läuft deshalb nicht Gefahr, als sinnvolle Unterscheidung *per se* in Frage gestellt zu werden wie seinerzeit die Glauben-Akzeptieren-Unterscheidung. Dieser war vorgeworfen worden, zum Zwecke der Aufrechterhaltung empiristischer Glaubenssätze die Zahl der zu unterscheidenden doxastischen Einstellungen unnötig zu vermehren: Arthur Fine sprach von *epistemological inflation*.¹⁸ In Anlehnung an Paul Horwich ließe sich diese Kritik wie folgt ausbuchstabieren: Wenn wir charakterisieren wollen, was Überzeugungen eigentlich sind, würden wir sie plausiblerweise als Zustände mit einer bestimmten kausalen Rolle spezifizieren, die z. B. darin bestünde, zu bestimmten Vorhersagen und Äußerungen zu führen, von bestimmten Beobachtungen verursacht zu werden, auf charakteristische Weise in inferenzielle Beziehungen einzugehen usw. Aufgrund genau dieser Charakterisierung ließe sich aber Glauben von Akzeptieren gar nicht unterscheiden.¹⁹

Eine entsprechende Kritik ist auf die Unterscheidung zwischen rein instrumentellem Gebrauch eines Modells und dem Glauben der Modellannahmen nicht anwendbar. Denn da beim rein instrumentellen Gebrauch nur ein definierter Ausschnitt der beobachtbaren Konsequenzen geglaubt wird, ist er schon allein über bestimmte Elemente seiner kausalen

¹⁶ Vgl. van Fraassen 1980, 12f.

¹⁷ Die Idee zu genau dieser Unterscheidung zwischen Akzeptanz und rein instrumentellem Gebrauch entstammt ebenfalls der Realismus-Instrumentalismus-Debatte, nämlich von Paul Horwich (1992, 4f.).

¹⁸ Fine 1986.

¹⁹ Horwich 1992, 3.

Rolle (z. B. inferenzielle Relationen) von echter Überzeugung unterscheidbar. Wir sollten daher Frage (i) bejahen.

Auch die Frage (ii), ob Modellwahlentscheidungen in ADF typischerweise Entscheidungen zu rein instrumentellem Gebrauch eines Modells sind, scheint auf den ersten Blick und aufgrund unseres Beispiels positiv zu bescheiden zu sein. Sicher wollen die GMR-Forscher nur einen bestimmten Ausschnitt der beobachtbaren Konsequenzen ihrer Modelle geglaubt wissen. Es geht ihnen dabei nicht anders, als einer langen Tradition von Ingenieuren, die immer wieder Modelle gewählt haben, die die folgende Annahme enthalten:

(K) Die Masse fester Körper ist kontinuierlich über ihre räumliche Ausdehnung hinweg verteilt.

Natürlich hat sich (K) als Überzeugung mit all seinen beobachtbaren und unbeobachtbaren Konsequenzen deshalb weder in der Wissenschaftsgemeinde insgesamt noch bei Ingenieuren ausgebreitet – womit auch gleich die Frage (iii) mitbeantwortet scheint: rein instrumentell verwendete Modelle sind erkenntnistheoretisch harmlos.

Doch muss, was für diese Beispiele gilt, auch auf Modellwahl in der ADF allgemein übertragbar sein? Werden auch zukünftige Modellannahmen in geeigneter Weise wie (K) sein, so dass sie ohne Schaden für die Wissenschaftsdynamik ihren instrumentellen Nutzen entfalten können? Es gibt einen Aspekt der ADF, der Zweifel daran aufkommen lässt. Eingangs erklärte ich, dass ADF theoretisch innovativ ist. Sie wird immer dort angestrengt, wo die bestehenden Wissensbestände den Bedarf für die dringende Lösung eines technologischen Problems nicht bedienen können (wie zum Beispiel im Falle der GMR-Forschung, bei der das theoretische Verständnis des Effekts zunächst nicht ausreichte, um für das Design eines vermarktbaren Lesekopfes hilfreich zu sein). Und in dieser Hinsicht können die Modellannahmen der ADF entscheidend anders sein als beispielsweise (K): sie bewegen sich auf Gebieten, auf denen es noch keine etablierten Theorien und Modelle für die behandelten Phänomene gibt. Im Falle der Kontinuumsmechanik wird der Kontrast zu den fest etablierten Modellen, die sich auf Atome und Kräfte berufen, stets sicherstellen, dass Anwenderinnen diejenigen Modelle, die auf Spannungen in kontinuierlichen Medien aufbauen, als rein instrumentell nützliche Fiktionen auszeichnen. Doch ist diese Unterscheidbarkeit auch gewährleistet, wenn die Modelle wissenschaftliches Neuland betreten?

Die Frage ist spekulativ, denn selbst bei vergleichsweise starken Beispielen von ADF wie der GMR-Forschung kann von wissenschaftlichem Neuland kaum die Rede sein. Auch wenn der GMR ein neuartiger Effekt war, gab es natürlich schon lange Theorien über den Elektronentransport in ferromagnetischen Materialien, die Spinabhängigkeit von Streueignissen usw. Trotz ihres spekulativen Charakters möchte ich der Frage noch einen Moment lang nachgehen, denn sie zeigt die Bedingungen und Grenzen einer Entwarnung vor dem erkenntnistheoretischen Pessimismus gegenüber ADF auf. Beim Betreten wissenschaftlichen Neulandes kann das oben stark gemachte Kriterium zur

Unterscheidung von Glauben und rein instrumentellem Gebrauch – nämlich ob das Modell so verwendet wird, dass man alle oder nur einen Ausschnitt der beobachtbaren Konsequenzen glauben soll – leicht versagen. Denn beim Betreten wissenschaftlichen Neulandes ist ja jedes Modell vorläufig und tastend und es ist nicht immer klar, welchen seiner Konsequenzen man Glauben schenken soll. Vielleicht werden die Forscherinnen dann einfach konsequenterweise zunächst alle Modelle als rein instrumentell ansehen (womöglich sogar, weil sie sich bewusst sind, dass sie unter Bedingungen ökonomischen Verwertungsdrucks arbeiten)? Auch dies ist nicht mehr plausibel, sobald die versuchsweise Erschließung des Neulandes sich zu einer funktionierenden Modellfamilie, einem Paradigma ausgewachsen hat. Wollen wir Thomas Kuhn Glauben schenken, dann schließt das Arbeiten innerhalb eines Paradigmas ein, dass die betreffenden Wissenschaftlerinnen die Modellfamilie dazu benutzen, all ihre Wahrnehmungen und Erwartungen zu strukturieren – so sehr, dass das Paradigma für diejenigen, die innerhalb seiner Grenzen arbeiten, typischerweise unsichtbar ist.²⁰

Das Paradigma, innerhalb dessen sowohl GMR-Forscher als auch Kontinuumsmechanik anwendende Ingenieure arbeiten, ist durch die Gesamtheit der Theorien und Modelle der modernen Physik definiert. Die instrumentellen anwendungsbezogenen Modelle bilden nur einen kleinen Bereich, der sich eben gerade im Kontrast zum Rest des Paradigmas mit seinen fundamentalen Theorien und Standardmodellen als bloß instrumentell abgrenzen lässt. Dagegen würde in dem (extremen) Fall, dass eine aus ADF hervorgegangene Modellfamilie auf längere Zeit ein *eigenes* Paradigma bilden würde, die These der Unsichtbarkeit des Paradigmas plausiblerweise bedeuten, dass die Grundannahmen der das Paradigma definierenden Modellfamilie auf Dauer auch unbemerkt zu Überzeugungen der Wissenschaftsgemeinde würden, so dass die Modelle im Bewusstsein der Forscher nicht als bloß instrumentelle Modelle markiert blieben. Für diesen Fall wäre Frage (iii) zu verneinen: Die Modellentscheidungen, selbst wenn sie zunächst als instrumentell angesehen würden, könnten unter diesen Extrembedingungen auf Dauer einen entscheidenden Einfluss auf die Theoriendynamik haben.

Wir haben oben gesehen, dass sich für weniger extreme Fälle die Bedenken, die Ökonomisierung der Wissenschaft könnte ihre epistemischen Standards korrumpieren, entschärfen lassen. Zwar können die veränderten Entscheidungsbedingungen (regiert von technischer Umsetzbarkeitswahrscheinlichkeit und ökonomischer Nutzenfunktion) tatsächlich zur Bevorzugung anderer Modelle innerhalb der ADF führen, als dies in akademischer Forschung zu erwarten wäre. Doch handelt es sich bei solchen Modellwahlentscheidungen um Entscheidungen zum rein instrumentellen Gebrauch. Sofern die Forschungspraxis in ein umfassendes wissenschaftliches Paradigma eingebettet ist, ist nicht zu erwarten, dass die instrumentellen Modelle einen Einfluss auf die Theoriendynamik nehmen.

Eine (spekulative) Grenze hat diese Entwarnung allerdings: Wenn ADF ein neues Forschungsgebiet mit einer Modellfamilie besetzen würde, die sich selbständig zum gültigen Paradigma auswüchse, ohne in ein umfassendes Paradigma eingebettet zu sein,

²⁰ Vgl. Kuhn 1996, insb. Kap. X u. XI.

könnte tatsächlich die Entwicklung der in der Wissenschaftsgemeinde anerkannten Überzeugungssysteme unter die Herrschaft der vom ökonomischen Nutzen diktierten Dynamik fallen. Allerdings sind diese Voraussetzungen in der Tat extrem. Sie würden wohl nur in einer Welt zum Tragen kommen, in der es ausschließlich Wissenschaft unter Bedingungen der Anwendungsdominanz gäbe. Von dieser Welt sind wir noch weit entfernt, wenn auch nicht mehr so weit wie vor 20 Jahren. Solange dies so ist, muss das Phänomen ADF eine optimistische Haltung gegenüber den epistemischen Standards der Wissenschaft nicht beeinträchtigen. Über andere Gefahren der Privatisierung der Wissenschaft, z. B. im Zusammenhang mit der Unparteilichkeit der Wissenschaft als Expertisegeberin oder der Frage, wer Macht über die wissenschaftliche Tagesordnung besitzen sollte und wer sie tatsächlich besitzt, ist damit allerdings noch nichts gesagt.

Literatur

- Brown, J.R. (2003): „Funding, Objectivity and the Socialisation of Medical Research“, *Science and Engineering Ethics* 8, 295–308.
- Carrier, M. (im Druck): „Knowledge and Control: On the Bearing of Epistemic Values in Applied Science“, in: *Science and Values*, hrsg. v. P. Machamer & G. Wolters, Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.
- Coehoorn, R. (1999): „Giant Magnetoresistance in Exchange-Biased Spin-Valve Layered Structures and its Application in Read Heads“, in: *Magnetic Multilayers and Giant Magnetoresistance*, hrsg. v. U. Hartmann, Berlin etc.: Springer, 65–127.
- Coehoorn, R. u.a. (1998): „Giant Magnetoresistance Materials for Read Heads“, *Philips Journal of Research* 51 (1), 93–124.
- Dieny, B. (1992): „Quantitative Interpretation of Giant Magnetoresistance Properties of Permalloy-Based Spin-Valve Structures“, *Europhysics Letters* 17 (3), 261–267.
- Fine, A. (1986): „Unnatural Attitudes: Realist and Instrumentalist Attachments to Science“, *Mind* 95, 149–179.
- Grünberg, P. (2001): „Layered Magnetic Structures: History, Highlights, Applications“, *Physics Today* 54, 31–37.
- Heim, D.E. u.a. (1994): „Design and Operation of Spin Valve Sensors“, *IEEE Transactions on Magnetics* 30 (2), 316–321.
- Horton, R. (2004): „The Dawn of McScience“, *The New York Review of Books* 51 (4), 11.3.2004.
- Horwich, P. (1992): „On the Nature and Norms of Theoretical Commitment“, *Philosophy of Science* 58, 1–14.
- Johannes Paul II (2002): „Schreiben an den apostolischen Nuntius in Polen anlässlich der internationalen Konferenz zum Thema ‚Der Interessenkonflikt und seine Bedeutung in Wissenschaft und Medizin‘“, http://www.vatican.va/holy_father/john_paul_ii/letters/2002/documents/hf_jp-ii_let_20020411_conference-poland_ge.html (aufgerufen 8.3.2004).

- Kuhn, T.S. (1977): „Objectivity, Value Judgement and Theory Choice“, in: ders., *The Essential Tension: Selected Studies in Scientific Tradition and Change*, Chicago & London: University of Chicago Press, 320–339.
- (1996): *The Structure of Scientific Revolutions*, 3. Aufl., Chicago & London: University of Chicago Press.
- Levi, I. (1967): *Gambling with Truth*, New York: Knopf.
- Maher, P. (1993): *Betting on Theories*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Mengel, S. (1997): *XMR-Technologien: Technologiefrüherkennung*, Düsseldorf: VDI-Technologiezentrum (*Technologieanalyse Magnetismus 2*).
- National Science Board 2002: *Science and Engineering Indicators – 2002*, hrsg. v. d. National Science Foundation. <http://www.nsf.gov/sbe/srs/seind02/start.htm> (aufgerufen 4.3.2004).
- OECD (2003): *Main Science and Technology Indicators (MSTI)*, 2003/2 edition, Paris: OECD.
- Tsang, C.H. u.a. (1998): „Design, Fabrication, and Performance of Spin-valve Read Heads for Magnetic Recording Applications“, *IBM Journal of Research and Development* 42, 103–116.
- Van Fraassen, B. (1980): *The Scientific Image*, Oxford: Clarendon.
- Ziman, J. (2002): „The Continuing Need for Disinterested Research“, *Science and Engineering Ethics* 8, 397–399.