



KERNFORSCHUNGSANLAGE JÜLICH
GESELLSCHAFT MIT BESCHRÄNKTER HAFTUNG

Institut für Technische Physik

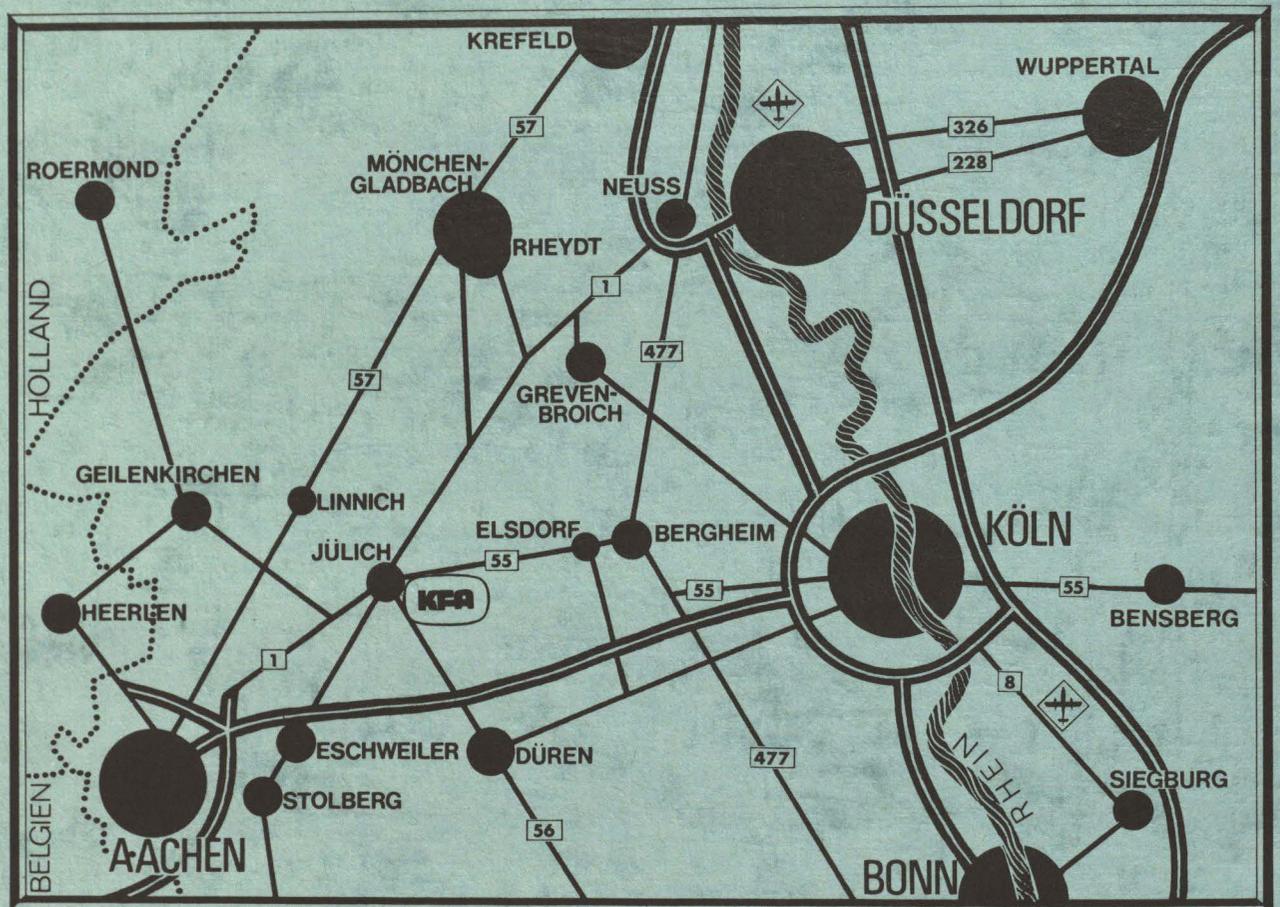
**Bestrahlungsexperimente
mit Thermionischen Brennelementen
in der Kernforschungsanlage Jülich**

von

J. Herion

Jül - 960 - TP
Juni 1973

Als Manuskript gedruckt



Berichte der Kernforschungsanlage Jülich – Nr. 960
 Institut für Technische Physik Jül - 960 - TP

Dok.: Irradiation - Incore Thermionic Reactor
 Irradiation - Thermionic Converter
 Incore Thermionic Reactor - Irradiation
 Thermionic Converter - Irradiation

Im Tausch zu beziehen durch: ZENTRALBIBLIOTHEK der Kernforschungsanlage Jülich GmbH,
 Jülich, Bundesrepublik Deutschland

**Bestrahlungsexperimente
mit Thermionischen Brennelementen
in der Kernforschungsanlage Jülich**

Zusammenfassung

Im Rahmen des ITR-Projektes wurden zwei Bestrahlungsexperimente mit thermionischen Brennelementen (Dreifachdioden) durchgeführt. Dabei ergaben sich Bestrahlungszeiten von 1545 bzw. 1466 Stunden bei einer durchschnittlichen Leistung von 32 W/cm^2 Emitteroberfläche. Nach einer kurzen Beschreibung der Experimentiereinrichtung werden die Zeitverläufe der wesentlichen Parameter und die beim zweiten Experiment aufgenommenen Strom-Spannungs-Kennlinien dargestellt. Die Experimente mußten aus Sicherheitsgründen abgebrochen werden, da Lecks der Spaltgasräume auftraten.

Zur Beurteilung des technologischen Stands der Brennelemententwicklung sind künftig mehr quantitative Aussagen über die Intensität und den Einfluß der thermischen Wechselbelastungen erforderlich. Zur Zeit kann nur vermutet werden, daß sie bei den Bestrahlungsexperimenten im Vergleich zum voraussichtlichen Anwendungsfall stark sind.

INHALT

- 1 Einleitung
- 2 Thermionische Brennelemente
- 3 Experimentiereinrichtung
- 4 Bestrahlungsbetrieb
 - 4.1 Erstes Bestrahlungsexperiment
 - 4.2 Zweites Bestrahlungsexperiment
- 5 Kennlinien
- 6 Schluß
- 7 Literatur, Tabellen, Erklärung der Abkürzungen

1 EINLEITUNG

Direkte Stromerzeugung durch thermionische Dioden im Core eines kleinen, kompakten Reaktors war das Ziel des Incore-Thermionik-Reaktor-Projekts der BRD. Ähnliche Projekte bestehen in den USA, in Frankreich und in der UdSSR, wo bereits 1971 ein Versuchsreaktor dieses Typs in Betrieb genommen wurde.⁺⁾

Die Anwendungsmöglichkeiten solcher Reaktoren liegen bei Vorhaben, die langlebige und wartungsfreie Energiequellen mit niedrigem Leistungsgewicht zwischen 10 kW und 1 MW erfordern, z.B. bei Satelliten, Raumstationen, elektrischen Antrieben von Raumfahrzeugen und in der Meerestechnik. [1]

Im folgenden soll über die ersten beiden Bestrahlungsexperimente im Rahmen des ITR-Projekts mit thermionischen Brennelementen, d.h. Serienschaltungen thermionischer Dioden, berichtet werden. Sie erstreckten sich von Dezember 1971 bis November 1972 und wurden im FRJ-1 der Kernforschungsanlage Jülich durchgeführt. Die Experimente wurden vom Zentralen Forschungslabor der Firma BBC in Heidelberg konzipiert und aufgebaut. Dabei waren vor allem die Herren W. Haar, H. Holick, A. Jester und R. Krapf beteiligt. Die Betreuung während des Bestrahlungsbetriebs und die Koordinierung der zu den Experimenten in Beziehung stehenden KFA-Aktivitäten lagen beim Autor dieses Berichts. Herr K.G. Tschersich übernahm vertretungsweise diese Aufgaben.

⁺⁾ Das bundesdeutsche ITR-Projekt wurde im September 1972 aus wirtschaftlichen Gründen eingestellt. Entsprechende Maßnahmen wurden neuerdings auch aus den USA bekannt.

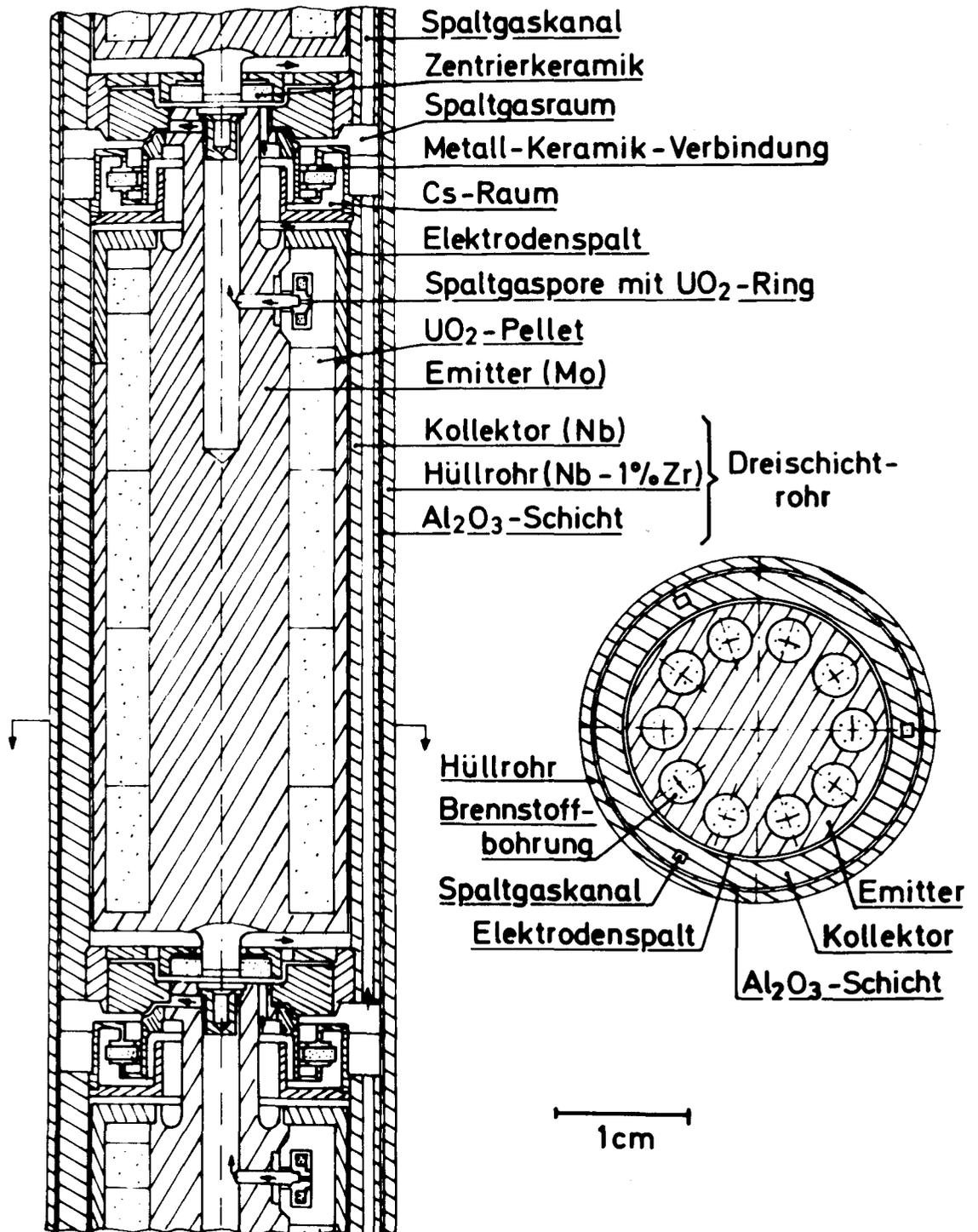


Bild 1: Ausschnitt aus einem thermionischen Brennelement mit einer Diode und den Serienschaltungselementen zu den benachbarten Dioden. Querschnitt durch eine Diode.

2 THERMIONISCHE BRENNELEMENTE

Ein Ausschnitt aus einem thermionischen Brennelement vom ITR-Typ ist in Bild 1 dargestellt. Da diese Konstruktion bereits mehrfach in der Literatur beschrieben wurde (z.B. [2]), sollen hier nur ihre wichtigsten Charakteristika zusammengefaßt werden: der Emitter besteht aus Mo und hat Revolvergeometrie, d.h. der Brennstoff ist in 10 symmetrisch zur Mittelachse liegenden axialen Bohrungen untergebracht; der Nb-Kollektor ist zugleich das innere Rohr eines Dreischichtrohrs bestehend außerdem aus einem Nb-1%Zr-Hüllrohr und einer Al_2O_3 -Zwischenschicht; Spaltgase und Cs-Dampf werden durch getrennte, ultrahochvakuumdichte Räume geleitet, die zwischen aufeinanderfolgenden Dioden durch zylindrische Metall-Keramik-Verbindungen abgeschlossen sind.

Der Bau thermionischer Brennelemente setzt hochentwickelte Technologien und große praktische Erfahrung voraus. Schlüsseltechnologien sind die Herstellung hochwertiger Metall-Keramik-Verbindungen, stabiler Brennstoff-Emitter-Systeme, Dreischichtrohre für hohe Wärmeflußdichten und Emitter-Zentrier-Systeme. Schließlich erfordert der Zusammenbau der einzelnen Komponenten eine ausgefeilte Elektronenstrahl-Schweißtechnik. Der Stand der Entwicklung Mitte 1972 ist in [3] zusammengefaßt.

Gegenwärtig wird vor allem die Emitterentwicklung diskutiert. Die Entscheidung zugunsten des Mo-Revolver-Emitters war aus Gründen der Neutronenabsorption durch das Konzept eines stark moderierten Reaktors bedingt. Nach [4] sollte für diesen Fall die Revolvergeometrie wegen ihrer hohen Formstabilität eine optimale Lösung sein. Inzwischen endeten zwei Bestrahlungsversuche mit Einzeldioden, die diese Emitter enthielten, durch Kurzschluß zwischen den Elektroden nach 3130 bzw. 3550 Stunden [2] [5] . Für den ersten Versuch zeigten die Nachuntersuchungen, daß das Schwellen des Emitters um maximal 200 μm die Ursache für den Kurzschluß war, für den zweiten Fall liegen noch keine Ergebnisse vor.

Es stellt sich jetzt die Frage, ob im Hinblick auf diese Ergebnisse eine Änderung des Emitterkonzepts notwendig ist. Ist es z.B. erforderlich, zur Wolframtechnologie und damit zu einem schwach moderierten Reaktorkonzept überzugehen, um die angestrebten Betriebsdauern in der Gegend von 20.000 Stunden zu erreichen?

Für das Schwellen der Emitter kommen zwei verschiedene Typen von Ursachen in Betracht: 1. solche, die im wesentlichen nur von der Bestrahlungszeit und der Leistung abhängen, 2. solche, die zusätzlich von Leistungsänderungen beeinflusst werden. Für den ersten Typ ist das Schwellen durch den Aufbau eines Spaltgasdrucks ein Beispiel, für den zweiten Typ die Verformung durch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Brennstoff und Emittermaterial.

Aufgrund erster quantitativer Überlegungen, die von Laborversuchen ergänzt wurden, erscheint es möglich, daß Ursachen des zweiten Typs für die Kurzschlüsse verantwortlich sind [4] [5]. In diesem Fall wären zur Beantwortung der gestellten Frage Informationen über die im Anwendungsfall zu erwartenden Leistungsvariationen und die bei den Bestrahlungsexperimenten tatsächlich aufgetretenen Leistungsvariationen erforderlich. Zur Zeit kann man nur vermuten, daß die Dioden bei den bisherigen Bestrahlungsexperimenten im Vergleich zum Anwendungsfall sehr harten Betriebsbedingungen ausgesetzt waren.

Natürlich können die beiden erwähnten Typen von Ursachen auch beim Versagen anderer Komponenten eines thermionischen Brennelements unterschieden werden. Die kritischen Stellen wurden bei der Aufzählung der Schlüsseltechnologien bereits genannt: Metall-Keramik-Verbindungen, Dreischichtrohre und Schweißnähte.

3 EXPERIMENTIEREINRICHTUNG

Die in diesem Bericht beschriebenen Bestrahlungsversuche wurden mit Dreifachdioden durchgeführt, die einschließlich der gesamten Experimentiereinrichtung vom Zentralen Forschungslabor der Firma BBC in Heidelberg geliefert wurden. Die Konstruktion und der Zusammenbau der ersten Dreifachdiode, des Strahlrohrs und der zugehörigen Versorgungs-, Meß- und Kontrolleinrichtungen ist in [6] beschrieben. Die beiden Dreifachdioden unterscheiden sich konstruktiv nur durch die Position des Cs-Reservoirs, die bei der ersten oberhalb, bei der zweiten unterhalb der Dioden ist. Bei der zweiten Dreifachdiode wurde zusätzlich ein Mo-Re-Thermoelement zur Messung der Emittertemperatur der obersten Diode eingebaut. Am oberen Ende einer Dreifachdiode ist die Emitterzuleitung durch eine große Metall-Keramik-Verbindung gegen das Hüllrohr isoliert. Durch sie ist der Spaltgasraum vom Außenraum getrennt. Bild 2.

Die drei Kollektortemperaturen werden mit Thermoelementen gemessen, die durch axiale Bohrungen in den Kollektoren geführt werden. Die Mäntel der Thermoelemente werden als Potentialabgriffe für die Kollektorpotentiale benutzt. Meßgrößen sind außerdem die Cs-Badtemperatur, die Temperatur der großen Metall-Keramik-Verbindung und das Emitterpotential der oberen Diode. Der Diodenstrom wird vom Kollektor der unteren Diode durch eine flexible Leitung auf das Strahlrohr geleitet, der Emitterstrom der oberen Diode wird durch Rohre innerhalb des Strahlrohrs transportiert.

Ein Schema der Experimentiereinrichtung zeigt Bild 3. Die Dreifachdiode befindet sich zusammen mit dem Spaltgasadsorber im untersten 2 Meter-Teilstück des Strahlrohrs. Unterhalb des Tankwasserspiegels ist ein 1.8 Meter langer Abschirmstopfen mit einer Blei-Araldit-Füllung angebracht. Das Strahlrohr ist am oberen Ende vakuumdicht verschlossen. Um die Leistung zu variieren, kann das Strahlrohr um eine in der Höhe der Zwischenbühne im Reaktortank liegende Achse geschwenkt werden.

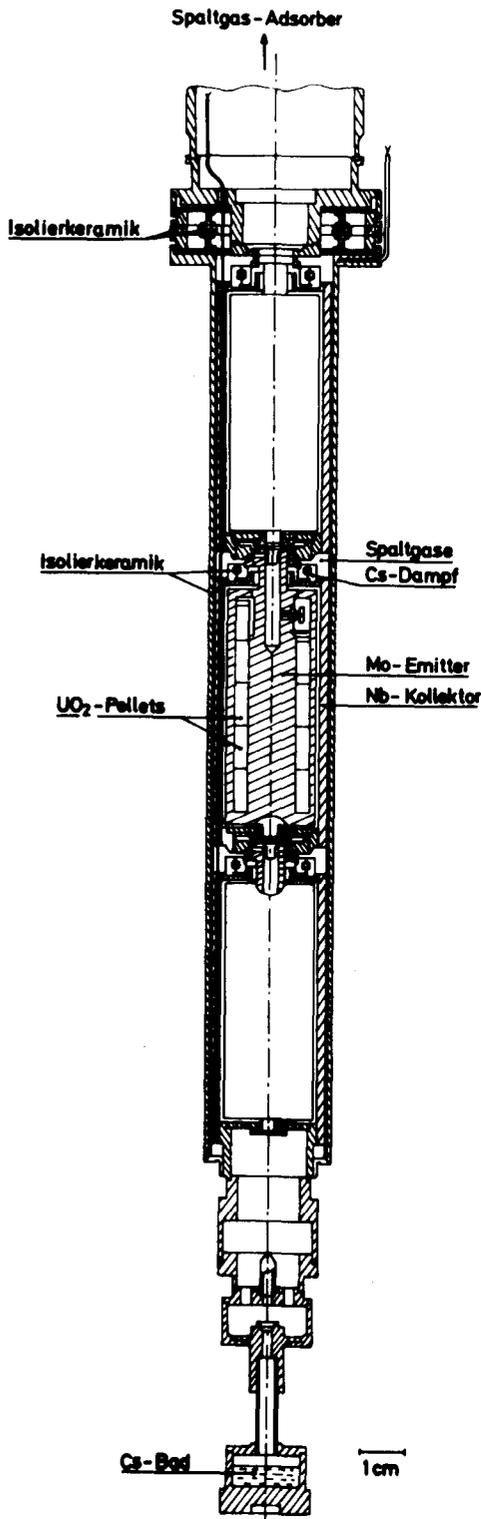


Bild 2: Längsschnitt durch eine Dreifachdiode. Durch die Isolierkeramik am oberen Ende wird der Spaltgasraum v. Heliumraum (Außenraum) getrennt u. d. Kollektorpotential führende Hüllrohr v.d. Emitterzuleitung (Spaltgasrohr) elektrisch isoliert. Daten siehe Tabelle 2.

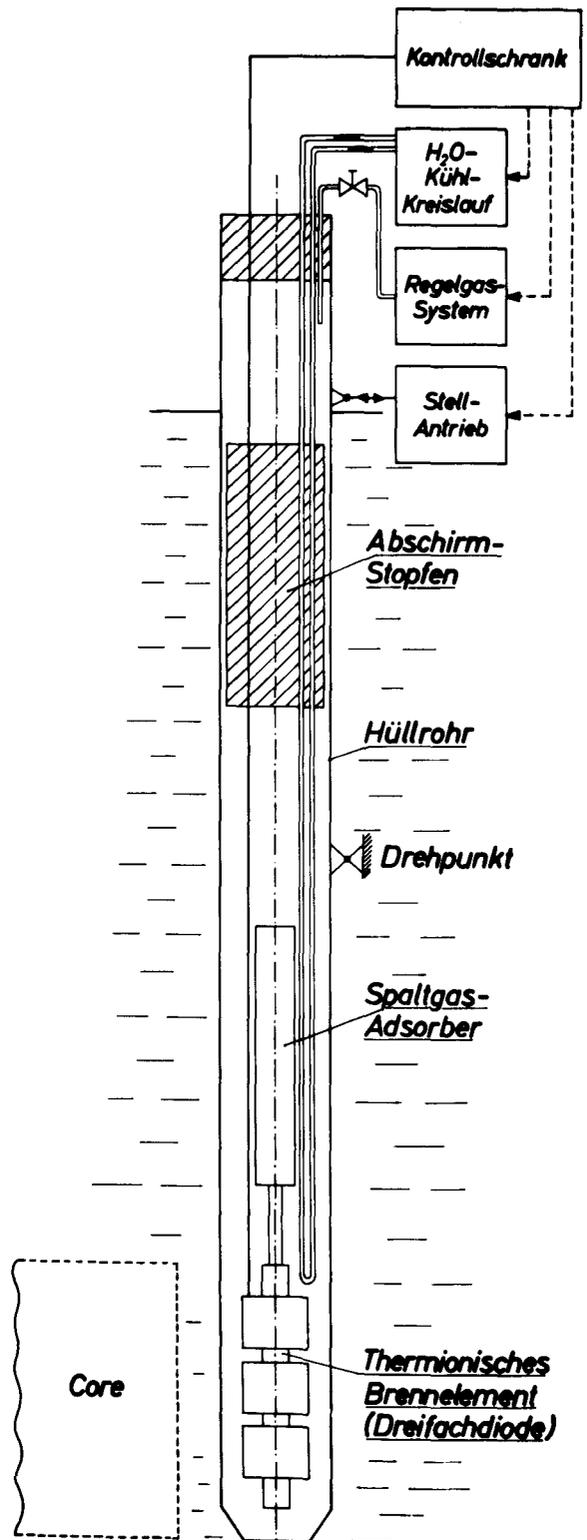


Bild 3: Schema der Experimentiereinrichtung. Das Strahlrohr kann mit Hilfe eines Stellantriebs bezüglich des Reaktorcores geschwenkt werden. Abmessungen siehe Tabelle 2.

Dadurch ist eine Bewegung relativ zum Core um drei Positionen der Gitterplatte möglich (= 140 mm). Dazu wird der Strahlrohrkopf mit Hilfe einer motorgetriebenen Spindel bewegt. Der Fuß des Strahlrohrs gleitet dabei zwischen Führungsblechen, die auf der Gitterplatte befestigt sind. Durch das Einrasten der Schwenkachse in übereinander angeordnete Schlitze am Tragarm ist eine Höhenverstellung des Strahlrohrs möglich.

Die Verlustwärme der Dioden wird über zwei Helium-Spalte, die durch einen Finnenkörper getrennt sind, an die Hülle des Strahlrohrs abgegeben. Bild 4. Durch diese Anordnung kann die Kollektor-Temperatur mit Hilfe des Heliumdrucks verändert werden. Der Vorteil dieser Anordnung liegt darin, daß der Wärmeübergang nicht so stark von der Zentrierung im Strahlrohr abhängt wie bei einem Ringspalt. Außerdem ergibt sich die Möglichkeit, aus den Temperaturen der Finnenkörper, der Kollektoren und der Strahlrohrhülle eine Wärmebilanz aufzustellen.

Zur Kühlung des Spaltgasadsorbers, des Emitterkopfes der oberen Diode und des Cs-Bades bei der ersten Dreifachdiode steht ein entsalzter Wasserkreislauf zur Verfügung. Die Kühlleitung wird innerhalb des Strahlrohrs zugleich als Stromleitung für den Emitterstrom benutzt.

Die elektrischen Einrichtungen zusammen mit der Kühlwasser- und der He-Versorgung sind in 5 Schränken auf dem Boden der Reaktorhalle untergebracht. Die Meßwerte werden analog angezeigt und durch untere und obere Grenzwertkontakte überwacht. Zusätzlich ist eine digitale Anzeige vorhanden, die auf die einzelnen Meßstellen umgeschaltet werden kann. Den Grenzwerten der Meßgrößen sind über einen programmierbaren Kreuzschienenverteiler bestimmte Reaktionen zugeordnet, z.B. automatisches Zurückfahren des Strahlrohrs, Ausschalten der Cs-Badheizung und der Treiberspannung. Zusätzlich werden alle Meßgrößen dauernd durch zwei 12-Punkt-Drucker registriert. Zur Aufnahme von Strom-Spannungs-Kennlinien steht ein X-Y-Schreiber zur Verfügung.

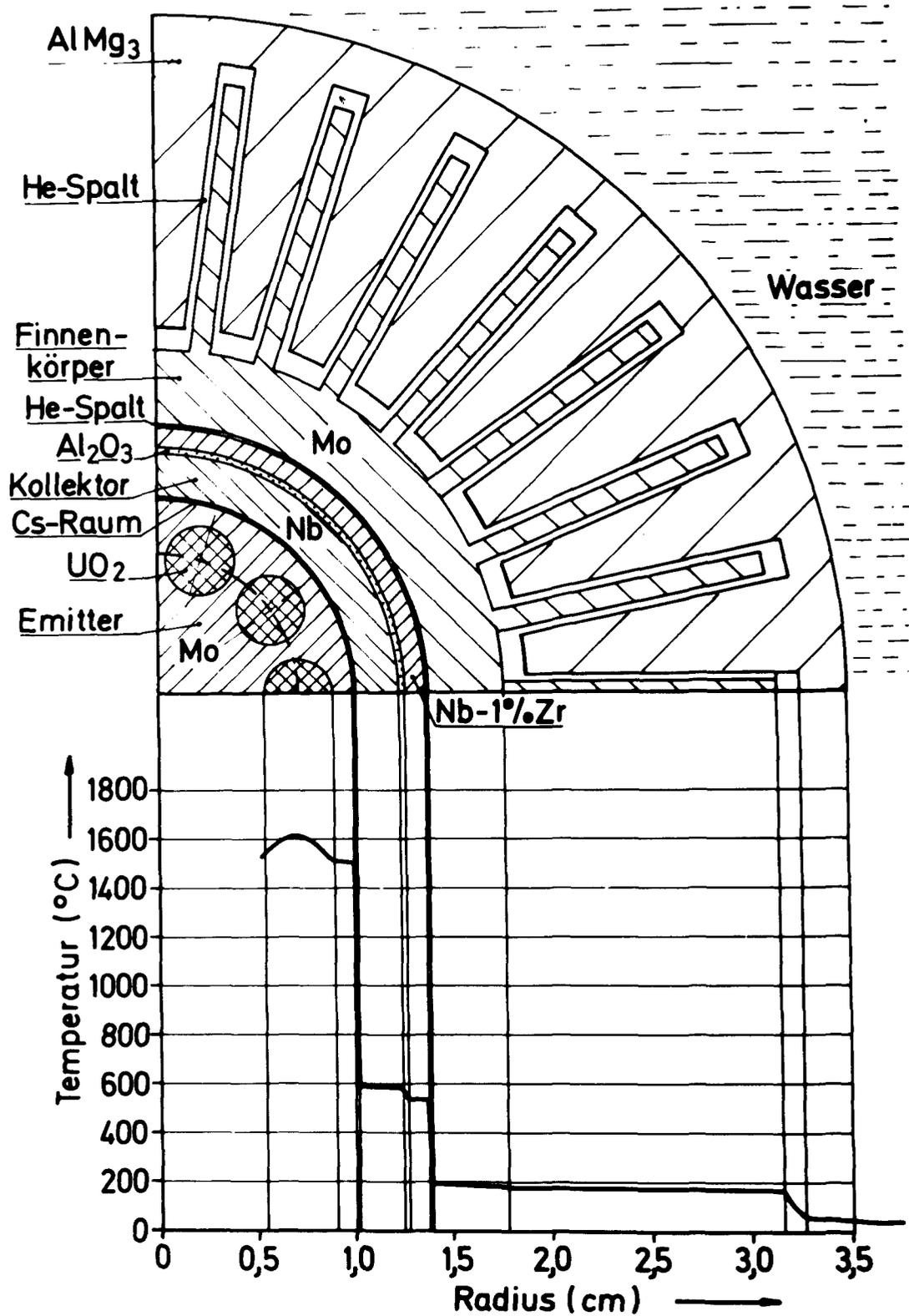


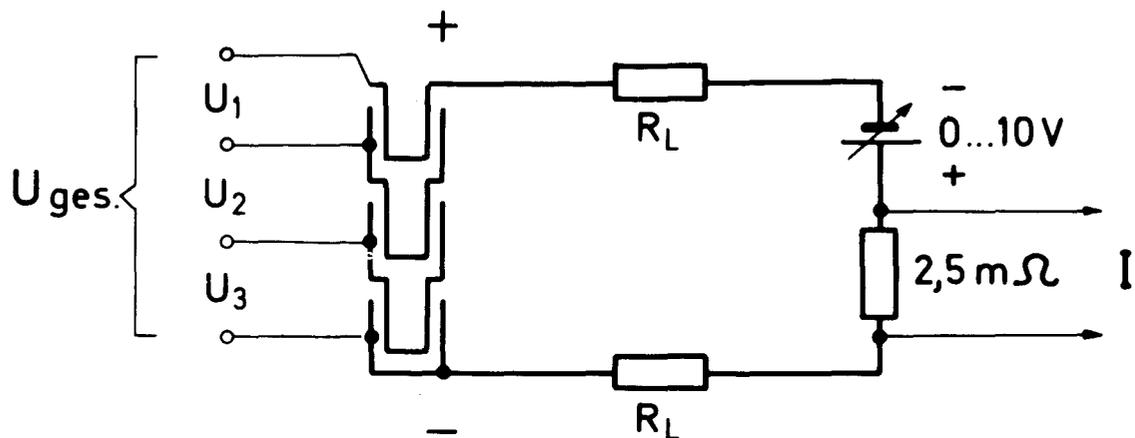
Bild 4: Wärmeübertragung in radialer Richtung und Temperaturverlauf unter typischen Betriebsbedingungen.

Der Arbeitspunkt der Dreifachdiode wird durch eine äußere Treiberspannung eingestellt. Bild 5. Der Diodenstrom wird durch den Spannungsabfall an einem Shunt gemessen.

Die Temperatur des Cs-Bades wird durch eine elektrische Zusatzheizung und einen stetigen Regler konstant gehalten.

Die im FRJ-1 benutzten Positionen sind aus Bild 6 ersichtlich. Meßdaten für die Flußdichten thermischer und schneller Neutronen zur Zeit des Bestrahlungsbeginns sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Mit zunehmender Entfernung vom Core nimmt die Flußdichte stark ab, was zur Variation der Leistung ausgenutzt wird. In vertikaler Richtung ändert sich der Fluß ebenfalls, so daß die Leistungserzeugung in der Dreifachdiode in axialer Richtung nicht konstant ist. Diese Flußprofile sind zeitlich nicht konstant. Im Verlauf einer Bestrahlungsperiode wird der Fluß oberhalb der Coremitte im Vergleich zu dem Bereich unterhalb der Coremitte etwas größer.

Die wichtigsten Daten der Experimentiereinrichtung sind in Tabelle 2 zusammengefaßt.



U_1, U_2, U_3 Diodenspannungen
 $U_{ges.}$ Gesamtspannung
 I Strom
 R_L Zuleitungswiderstände

Bild 5: Schema des Stromkreises der zweiten Dreifachdiode. Der Arbeitspunkt wird durch eine äußere Treiberspannung (0... ± 10V) eingestellt.

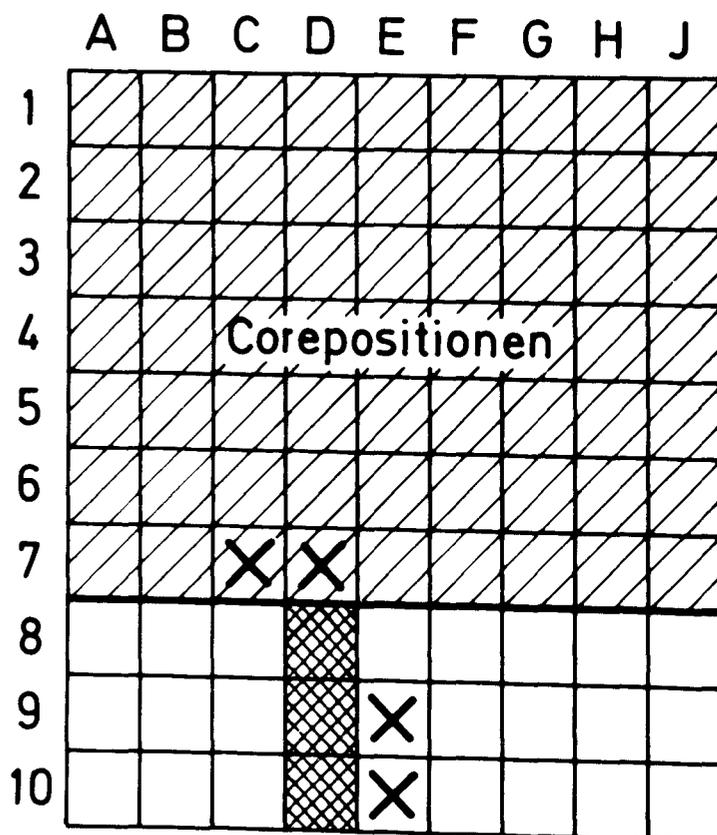


Bild 6:
Gitterplatte im FRJ-1.
Positionen des Bestrahlungsexperimentes: D8, 9, 10. x Positionen, an denen die Neutronenflußdichten gemessen wurden (s. Tabelle 1).

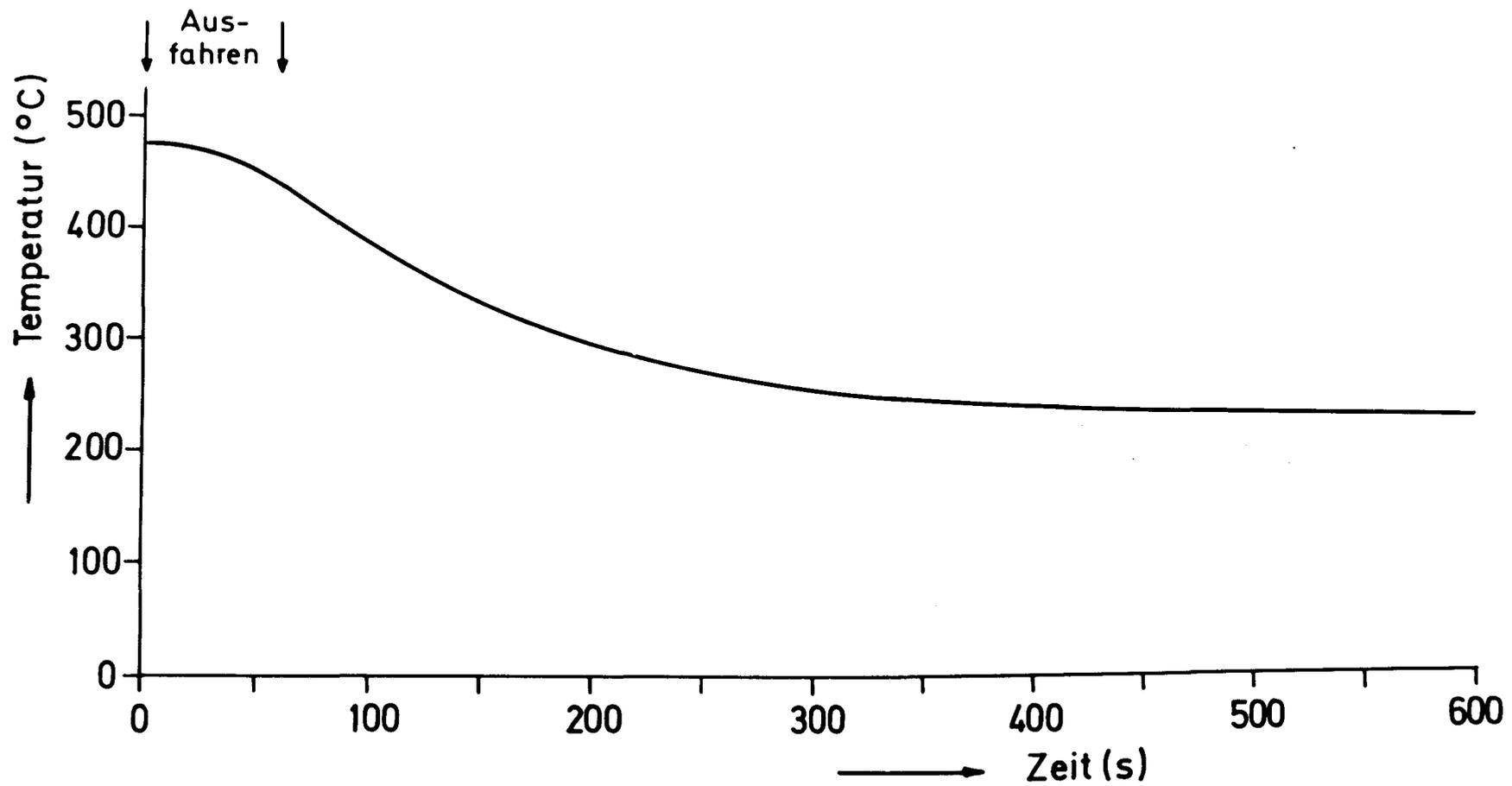
4 BESTRAHLUNGSBETRIEB

Nach dem Einschalten des Reaktors wurde durch stufenweise Annäherung des Strahlrohrs an das Core die Leistung erhöht. Bei diesem Vorgang waren folgende Gesichtspunkte zu berücksichtigen: 1. das Cs-Bad muß die kälteste Stelle in der Dreifachdiode sein; die äußere Saugspannung darf erst dann versuchsweise eingeschaltet werden, wenn keine Cs-Bedeckung der Isolierkeramiken mehr vorhanden ist; 2. der He-Druck und damit die Kollektortemperatur ist so einzustellen, daß der Wärmefluß über die Metall-Keramik-Verbindung am oberen Ende der Dreifachdiode möglichst klein bleibt, 3. damit keine zu großen Temperaturdifferenzen an kritischen Stellen auftreten, wird die Einfahrtiefe in 5%-Schritten erhöht und jeweils stationäre Verhältnisse abgewartet. Bei 10 Einfahrtritten dauert der ganze Vorgang mindestens etwa eine Stunde.

Leistungssenkungen können im Gegensatz zu Leistungserhöhungen wesentlich schneller erfolgen, da hierbei die Änderungsgeschwindigkeit der Temperaturen begrenzt ist. In Bild 7 ist z.B. die Abnahme der Keramiktemperatur mit der Zeit bei automatischem Ausfahren des Strahlrohrs dargestellt. Praktisch die gleiche Abhängigkeit gilt auch für eine Reaktorabschaltung.

4.1 Erstes Bestrahlungsexperiment

Das fertig montierte Strahlrohr wurde in einem Transportgestell durch einen LKW von Heidelberg nach Jülich transportiert. Dichtigkeitsprüfungen des He-Raums ergaben bessere Werte als 10^{-8} Torr l/s. Es zeigte sich allerdings, daß beim Transport ein Kurzschluß zwischen der Emitterstromzuführung und dem Strahlrohrmantel aufgetreten war. Offenbar war die Isolierung zwischen dem stromführenden Abschirmstopfen und dem Hüllrohr beschädigt worden. Glücklicherweise lag der resultierende Lastwiderstand bei 9 m Ω , war also nur wenig größer als optimal und war zeitlich stabil. Die Experimentiermöglichkeiten waren durch



6.11.1972

Bild 7: Änderung der Temperatur der oberen Isolierkeramik mit der Zeit bei automatischem Zurückfahren des Strahlrohrs (Reaktor eingeschaltet).

den Kurzschluß eingeschränkt, da keine Kennlinien aufgenommen werden konnten.

In Tabelle 3 ist der Zeitverlauf des ersten Bestrahlungsexperiments dargestellt. Insgesamt gab es während der drei Bestrahlungsperioden 6 Reaktorabschaltungen, bei denen das Experiment bei voller Leistung betrieben wurde. In allen Fällen fuhr das Strahlrohr anschließend automatisch in die Position kleinster Leistung zurück. Zusätzlich gab es 8 weitere Fälle, in denen dem Zurückfahren keine Reaktorabschaltung vorausging, davon waren 3 durch Defekte im Versorgungssystem des Strahlrohrs verursacht. Insgesamt wurde die Leistung der Dreifachdiode 14 mal von etwa 10 % auf 100 % des Dauerbetriebswerts erhöht.

Nach einer Bestrahlungsdauer von 1545 Stunden mußte das Experiment aus sicherheitstechnischen Gründen wegen eines Lecks zwischen dem Spaltgas- und dem He-Raum beendet werden. Im Laufe einer Stunde nahm der He-Druck um 4 % ab, was etwa der Volumenvergrößerung um das Volumen des Spaltgasadsorbers entspricht, und die γ -Dosisleistung am Kopf des Strahlrohrs stieg an. Während der He-Druck danach konstant blieb, stieg die γ -Dosis weiter auf Werte über 100 mrem/h an. Um eine Kontamination der He-Versorgung zu vermeiden, wurde das Strahlrohr mit He geflutet und das Ventil am Kopf des Strahlrohrs geschlossen.

Zwar war zu diesem Zeitpunkt die Dreifachdiode in elektrischer Hinsicht noch intakt, doch stellte das Leck ein Sicherheitsrisiko dar, da die doppelte Einschließung des Kernbrennstoffs nicht mehr gegeben war.

In Bild 8 sind die wichtigsten Temperaturen und die Ausgangsspannungen der Dreifachdiode in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Dabei wurden die Meßgrößen über einen Tag gemittelt. Die Schwankungen der Temperaturen kommen durch Schwankungen der Reaktorleistung zustande, während die Variationen der Spannungen zusätzlich durch die unvollkommene Regelung der Cs-Badtemperatur verursacht wird. Am Beginn der Bestrahlung trat eine Abnahme der Spannungen auf, die wahrscheinlich auf eine Veränderung der Elektrodenoberflächen zurückzuführen ist.

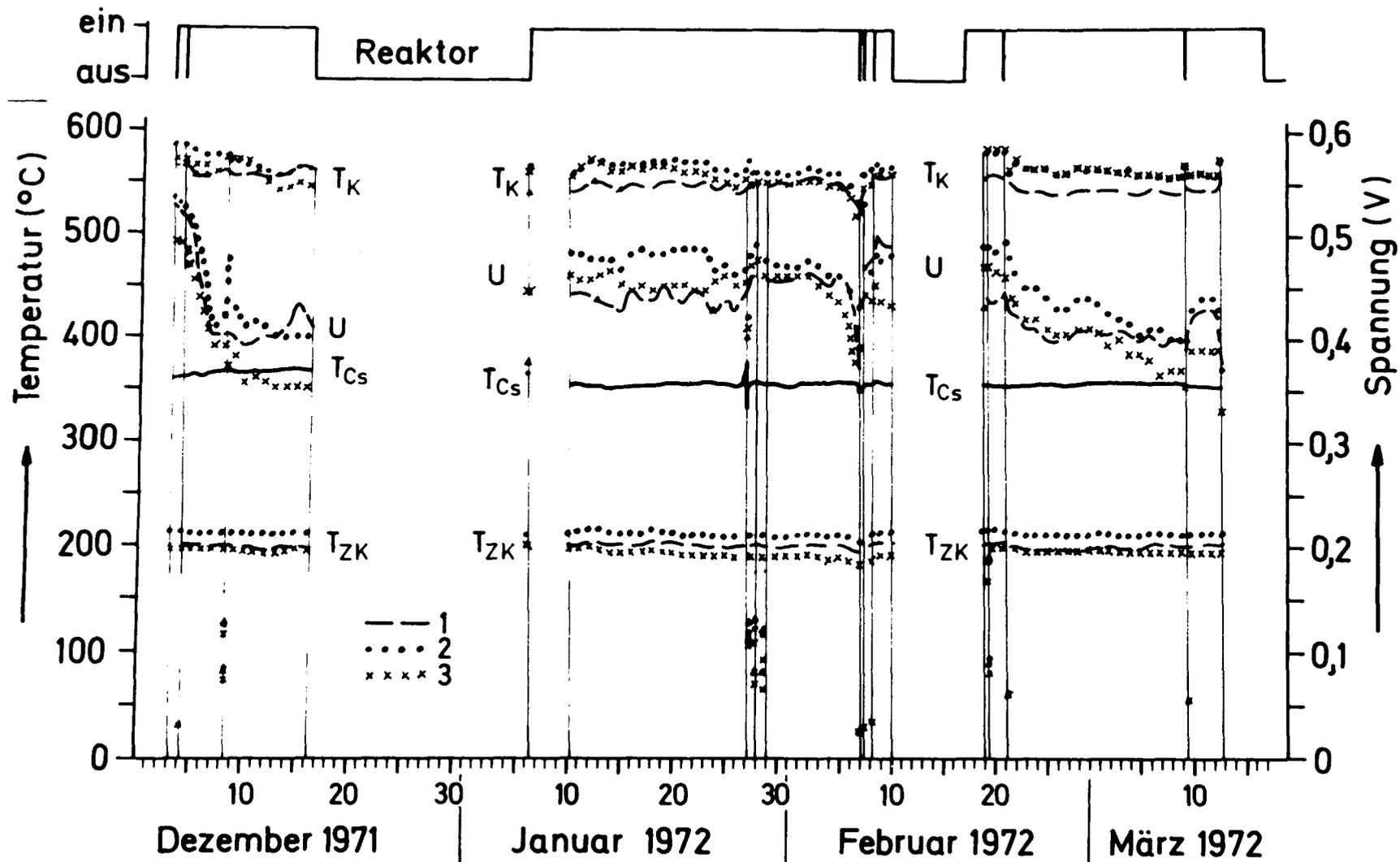


Bild 8: Kollektortemperaturen T_K , Diodenspannungen U , Cs-Badtemperatur T_{Cs} und Zwischen-Finnenkörpertemperaturen T_{ZK} in Abhängigkeit von der Zeit für das erste Cs Bestrahlungsexperiment (1,2,3, obere, mittlere, untere Diode).

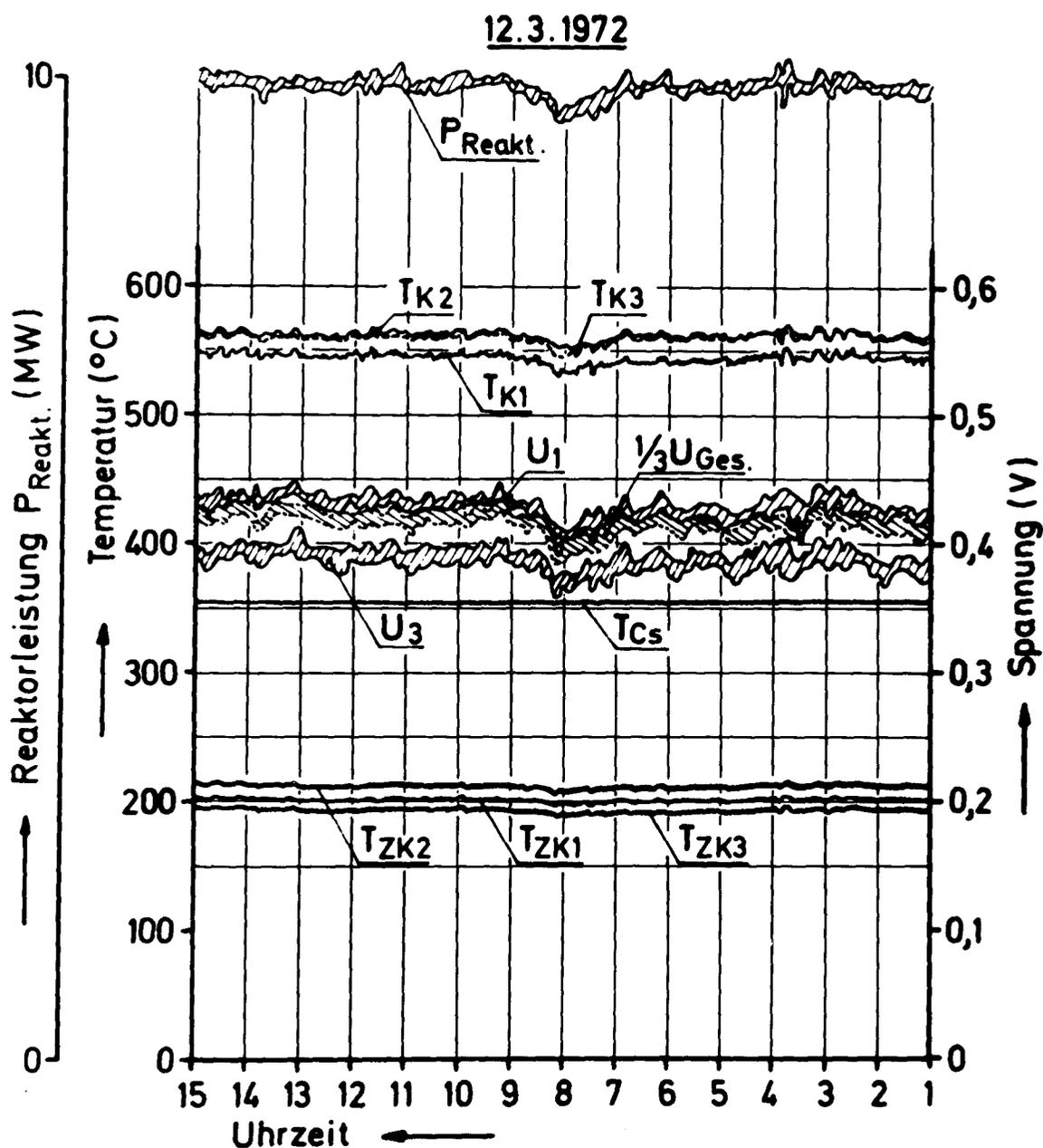


Bild 9: Ausschnitt aus einer Druckerregistrierung: Auswirkung einer Leistungsschwankung des Reaktors auf die Temperaturen und Ausgangsspannungen einer Dreifachdiode (bei konstantem Lastwiderstand). (Die schraffierten Gebiete geben den Streubereich der Registrierungen an)

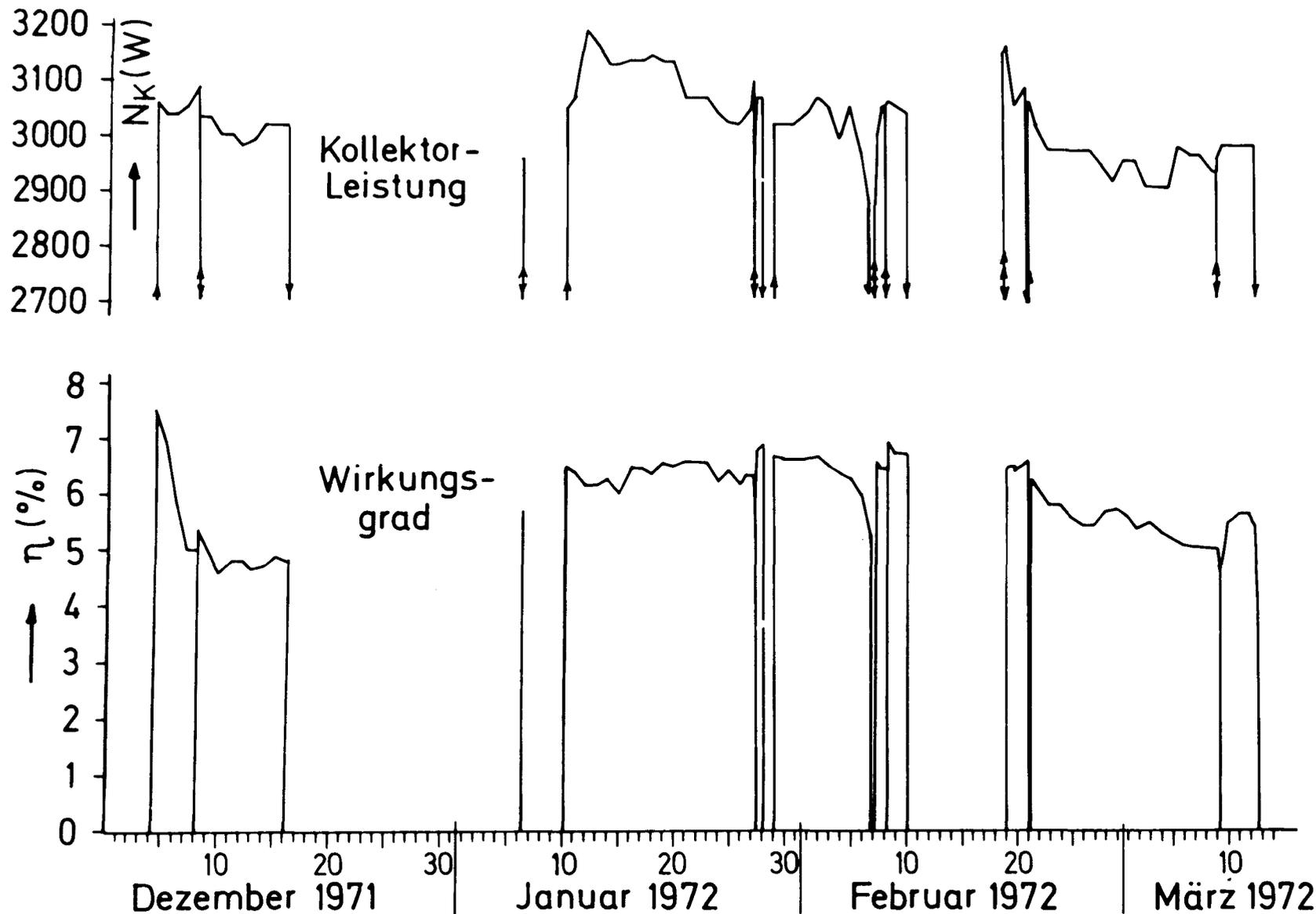


Bild 10: Gesamter in die Kollektoren fließender Wärmestrom für die erste Dreifachdiode (abgek: Kollektorleistung) und Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Zeit. Lastwiderstand: 9 m Ω .

Die Cs-Badtemperaturen waren in der ersten Bestrahlungsperiode $360 \pm 2^\circ\text{C}$, in der zweiten Bestrahlungsperiode $350 \pm 3^\circ\text{C}$ und in der dritten $351 \pm 1,5^\circ\text{C}$. Da die Cs-Badtemperatur größer als optimal war, hatte ihre Verkleinerung eine Erhöhung der Ausgangsleistung zur Folge.

Während der ersten Bestrahlungsperiode traten bei der unteren Diode Spannungseinbrüche bis zu 100 % und der Dauer von einigen Sekunden auf. Nach der Verkleinerung der Cs-Badtemperatur auf 350°C waren sie jedoch verschwunden.

Die Auswirkungen einer Schwankung der Reaktorleistung bei konstantem Lastwiderstand und konstanter Cs-Badtemperatur sind in Bild 9 dargestellt, das einen Ausschnitt aus der Druckerregistrierung zeigt. Die Ausgangsspannungen ändern sich relativ etwa doppelt so stark wie die Reaktorleistung, d.h., die Ausgangsleistung ändert sich 4 mal so stark wie die Eingangsleistung.

Aus den gemessenen Werten der Kollektortemperaturen, der Finnenkörpertemperaturen und der Hüllrohrtemperatur läßt sich die Wärmestromdichte an der Kollektoroberfläche berechnen. Dazu wurde das Wärmeübertragungsverhalten der Heliumspalte in Laborversuchen (BBC) bestimmt. Die Ergebnisse dieser Rechnungen sind in Bild 10 dargestellt. In demselben Bild ist der Wirkungsgrad der Dreifachdiode in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen. Der Wirkungsgrad ist definiert als das Verhältnis Ausgangsleistung/Ausgangsleistung+Kollektorleistung. Für den Lastwiderstand wurden $9\text{ m}\Omega$ zugrunde gelegt.

Wie bei den Spannungen zeigt sich auch beim Wirkungsgrad eine Abnahme während der ersten Bestrahlungstage. Die höheren Werte in der zweiten und der dritten Bestrahlungsperiode sind durch die höheren Cs-Badtemperaturen bedingt. Insgesamt zeigt sich bis zum Ende der Bestrahlungszeit keine Verschlechterung des Verhaltens der Dreifachdiode.

4.2 Zweites Bestrahlungsexperiment

Beim zweiten Strahlrohr war die Emitterpotential führende Lei-

tung elektrisch gegen den Abschirmstopfen isoliert worden, wodurch die Gefahr eines Kurzschlusses wie beim ersten Experiment vermieden wurde. Dadurch konnte außerdem die Breite des Ringspalts zwischen Abschirmstopfen und Hüllrohr verkleinert werden, was zu einer Verbesserung der Abschirmwirkung führte.

Wie beim ersten Experiment wurden vor dem Einbau Dichtigkeitsprüfungen durchgeführt, die einen Zulauf unter 10^{-8} Torr l/s ergaben. Am 6. 5. 1972 wurde das zweite Strahlrohr in dieselbe Position wie das erste eingebaut.

In Tabelle 4 ist der Zeitverlauf für das zweite Bestrahlungsexperiment zusammengestellt. Während der Bestrahlungszeit gab es 4 Reaktorabschaltungen, bei denen das Experiment bei voller Leistung betrieben wurde. Zusätzlich fuhr das Experiment 5 mal aus unterschiedlichen Gründen automatisch in die Position kleinster Leistung zurück. In 4 Fällen wurde das Strahlrohr von Hand zurückgefahren.

Nach Reaktorabschaltungen fuhr das Strahlrohr automatisch in die Position kleinster Leistung zurück. Eine Ausnahme trat am 5. 7. 1972 auf. Die Gründe, aus denen zu diesem Zeitpunkt die Verfahreinrichtung nicht funktionierte, ließen sich nachträglich nicht mehr mit Sicherheit feststellen. Grundsätzlich kommen zwei Ursachen in Betracht: 1. die Verfahreinrichtung ließ sich mit Hilfe eines Kippschalters auf der Frontseite des Bedienungschranks außer Betrieb setzen, ohne daß eine Warnung erfolgte; 2. die Verfahreinrichtung konnte klemmen oder aus anderen technischen Gründen vorübergehend nicht zur Wirkung kommen.

Da die Verfahreinrichtung nicht funktionierte und das Nichtfunktionieren nicht bemerkt wurde, trat eine für die Dreifachdiode gefährliche Situation ein. Das Abschalten der Cs-Badheizung und der Treiberspannung war mit dem unteren Grenzwert der Positionsanzeige verkoppelt, und so blieb beides eingeschaltet,

als der Reaktor außer Betrieb war und wieder eingeschaltet wurde.

Nachdem der Reaktor ausgeschaltet war, wurden die Temperaturen in der Diode kleiner als die Cs-Badtemperatur. Dies hatte das Überdestillieren des Cs in den Elektrodenraum zur Folge. Unter dem Einfluß der Treiberspannung konnte ein auf einer Isolierkeramik kondensierter Cs-Film lokal erhitzt werden, verdampfen und Bogenentladungen verursachen, was schließlich zur Bildung von Rissen führen konnte. Außerdem ist es denkbar, daß das Hochfahren des Reaktors in ca. 10 Minuten bei eingefahrenem Strahlrohr zu gefährlich hohen Wärmespannungen führte.

Zusammenfassend kann über den Vorgang am 5. 7. 1972 folgendes gesagt werden: zu diesem Zeitpunkt trafen mehrere Umstände zusammen, die in ihrer Summe zu einer Gefährdung des Experimentes führten, wobei jeder für sich wahrscheinlich ohne Auswirkung geblieben wäre. Die Konsequenzen aus diesem Ereignis lauten: Erhöhung der Redundanz beim Einleiten wichtiger Reaktionen und bei der Überwachung wichtiger Zustandsgrößen; Vermeidung von Einrichtungen, durch die die Automatik wirkungslos gemacht werden kann.

Die ersten Auswirkungen dieses Vorfalls zeigten sich unmittelbar danach, als im Verlauf von 30 Stunden der Heliumdruck um etwa 4 % zurückging. Daraus kann auf ein Leck zwischen dem Heliumraum und dem Spaltgasraum geschlossen werden, das jedoch wesentlich kleiner war als das Leck, das am Ende der Lebensdauer der ersten Dreifachdiode aufgetreten war. Gleichzeitig machte sich ein Anstieg der Dosisleistung an der Heliumleitung bemerkbar, die jedoch den Bestrahlungsbetrieb zunächst nicht beeinträchtigte.

Die Temperaturen der Dreifachdiode und ihre Ausgangsspannungen sind in Bild 11 in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Der Bestrahlungsbetrieb war während des Sommers durch häufige Leistungssenkungen des Reaktors wegen zu hoher Kühlwassertemperaturen behindert. Da die Dreifachdiode möglichst bei konstanter Leistung betrieben werden sollte, wurde das Strahlrohr in den

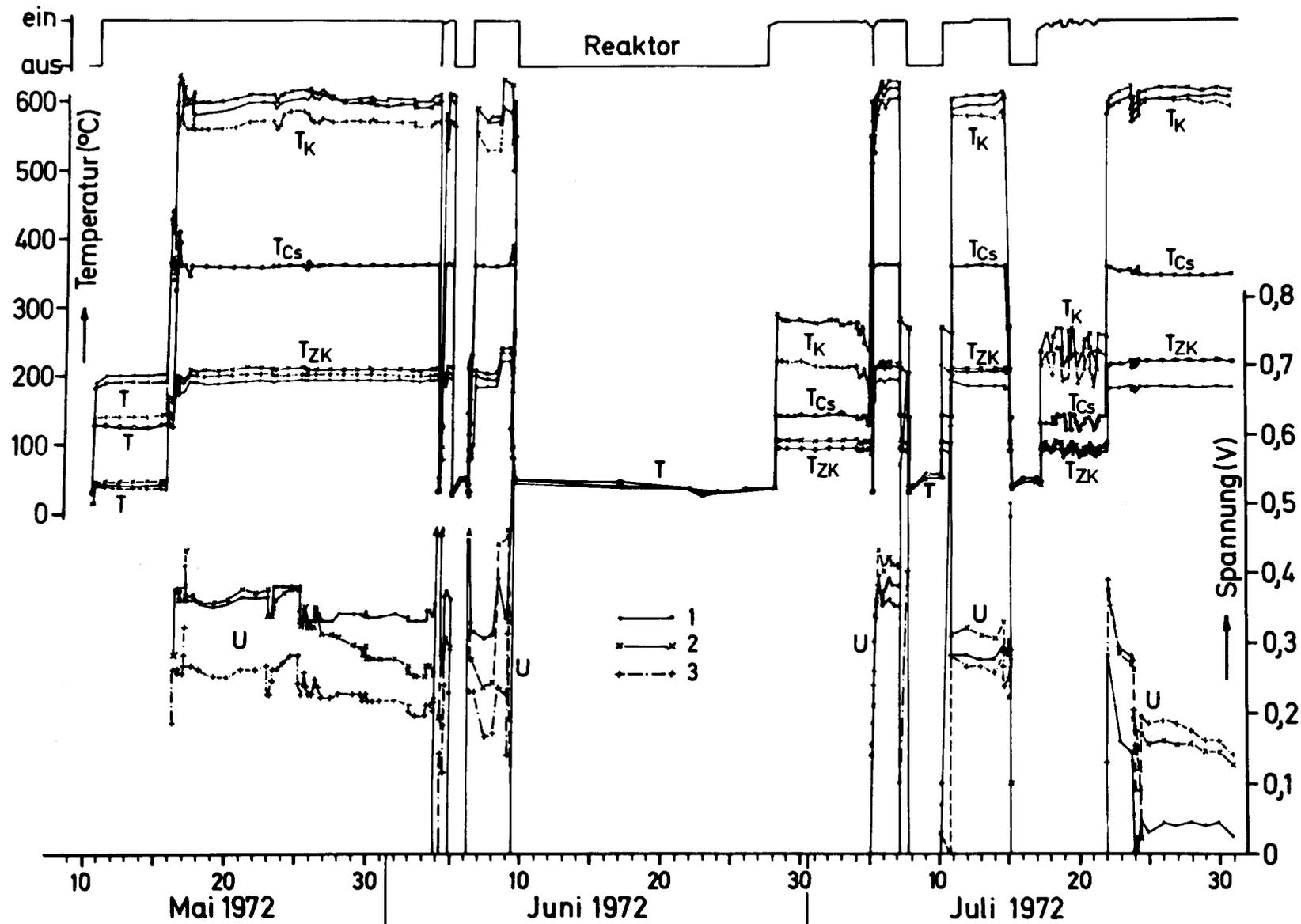


Bild 11: Kollektortemperaturen T_K , Cs-Badtemperatur T_{Cs} , Zwischenfinnenkörpertemperaturen T_{ZK} , Diodenspannungen U in Abhängigkeit von der Zeit für das zweite Bestrahlungsexperiment.

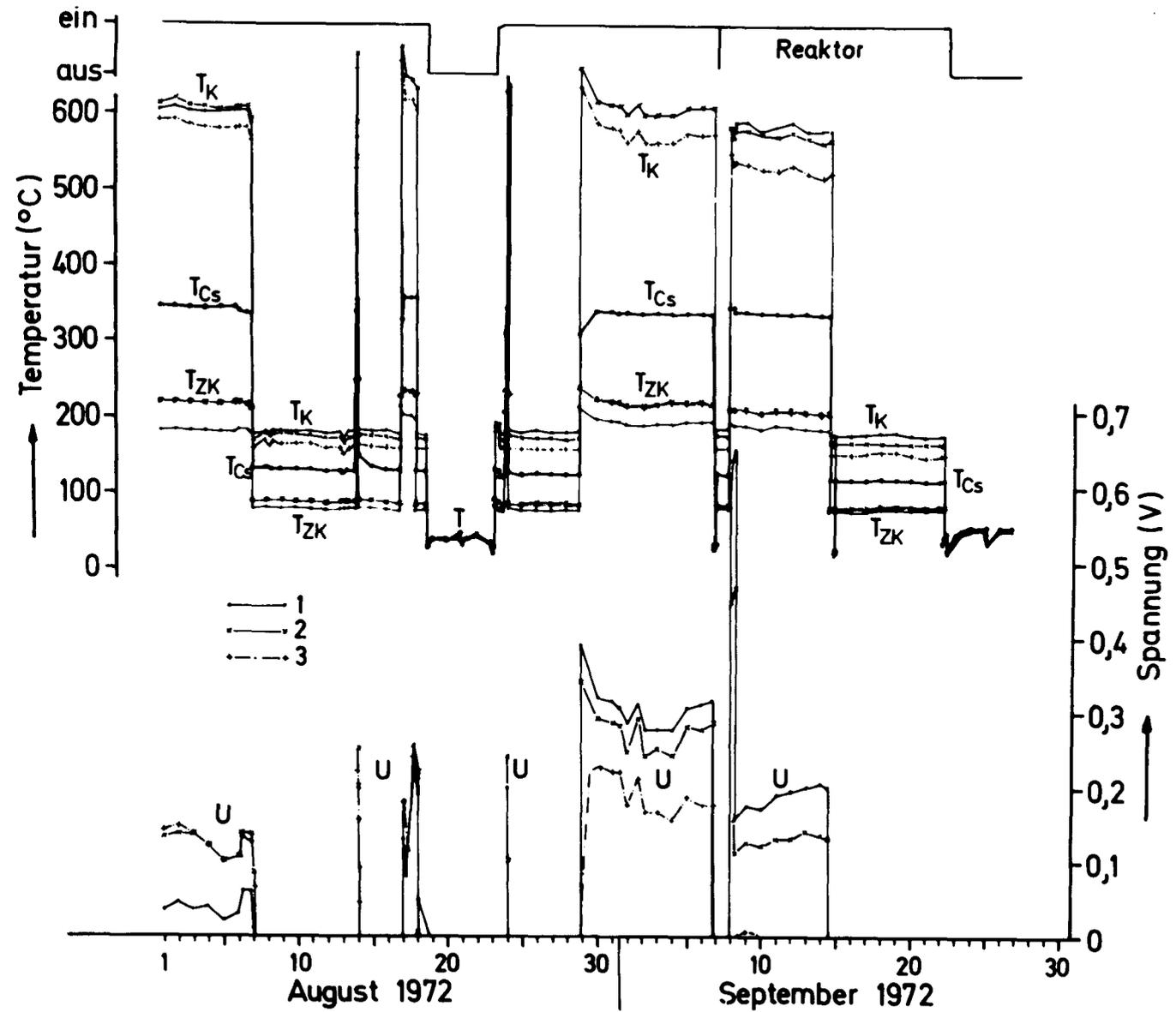


Bild 11: Fortsetzung

Perioden besonders starker Schwankungen der Reaktorleistung in der äußeren Position belassen.

Vom 22. 7. an machte sich eine Abnahme der Ausgangsspannungen bemerkbar, die nur durch das Eindringen von Helium in den Elektrodenraum zu erklären ist. Die höheren Ausgangsspannungen im August und im September entsprechen kleineren Strömen, wobei die Ausgangsleistung klein blieb.

In Bild 12 ist die Kollektor-Eingangsleistung und der Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Die Abnahme der Ausgangsleistung vom 22. 7. an ist mit einer entsprechenden Abnahme des Wirkungsgrades gekoppelt. Dagegen war die Kollektorleistung während des Leistungsbetriebes im Mittel etwa 3100 W. Die Vorstellung, daß die Abnahme des Wirkungsgrades durch das in den Elektrodenraum eingedrungene Helium verursacht wurde, wird durch folgende Beobachtung erhärtet: während normalerweise die Ausgangsleistung synchron mit der Eingangsleistung anwächst, erreichte sie z.B. am 29. 8. erst 10 Stunden nach Beginn des Leistungsbetriebes einen stationären Wert. Diese Beobachtung kann leicht durch das Ausströmen von Helium durch das Leck bis zum Druckausgleich erklärt werden. Am Ende der Bestrahlungszeit hatte sich das Leck zwischen dem Heliumraum und dem Elektrodenraum soweit vergrößert, daß keine Zeitverschiebung zwischen der Eingangs- und der Ausgangsleistung mehr zu beobachten war.

Nach dem Ausbau wurden die beiden Strahlrohre in Absetzpositionen im Reaktortank gebracht. Anfang April 1973 schließlich wurden die untersten 2 m - Teilstücke mit Hilfe einer hydraulisch betätigten Schere abgetrennt und unter Verwendung einer Abschirmflasche in die Heißen Zellen transportiert. Um Kontaminationen zu vermeiden, waren die Strahlrohre vor dem Abschneiden mit Helium gespült worden.

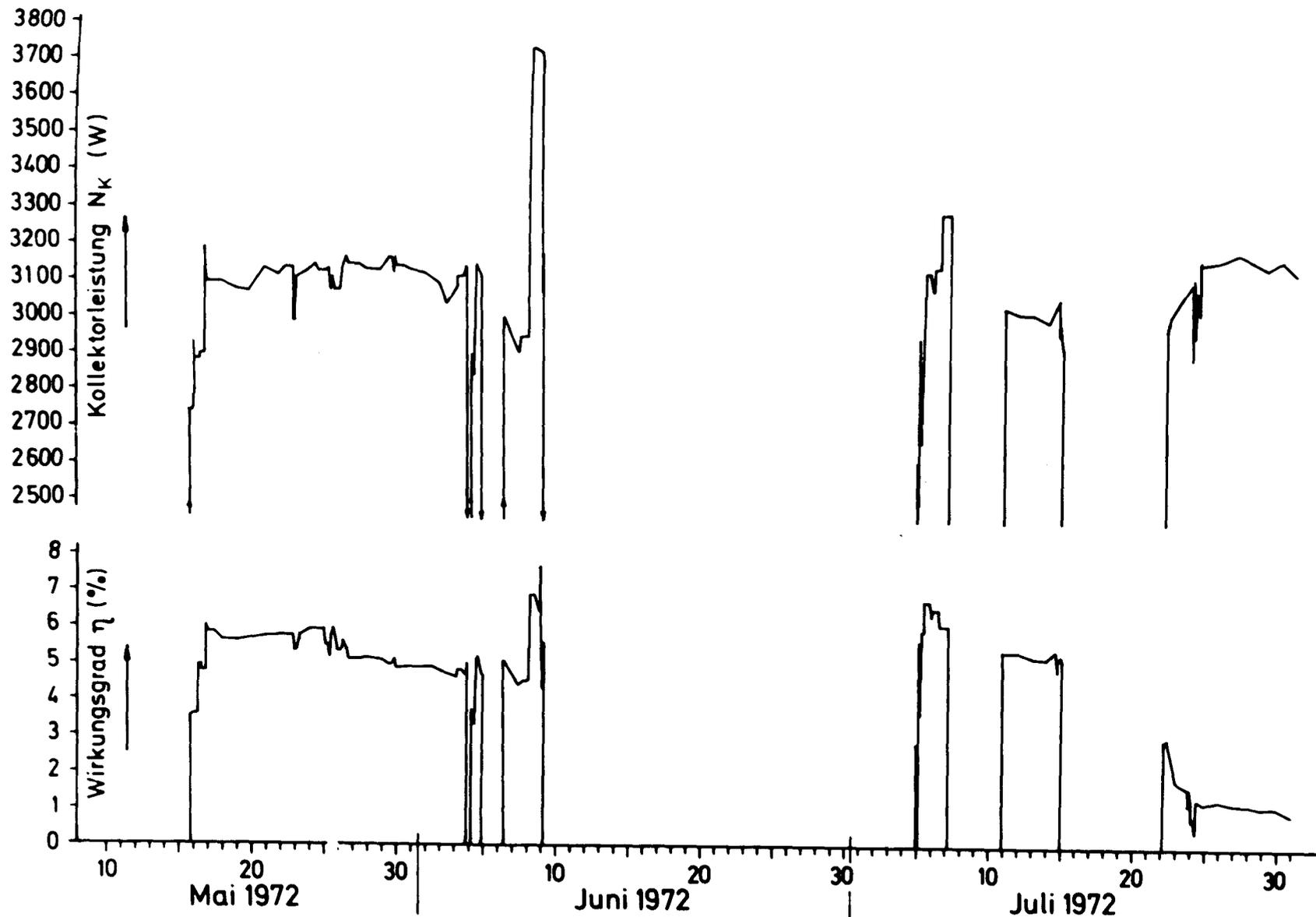


Bild 12: Gesamter in die Kollektoren fließender Wärmestrom (abgek.: Kollektorleistung) und Wirkungsgrad für die zweite Dreifachdiode in Abhängigkeit von der Zeit. (Der Arbeitspunkt wurde in diesem Fall durch die Treiberspannung vorgegeben.)

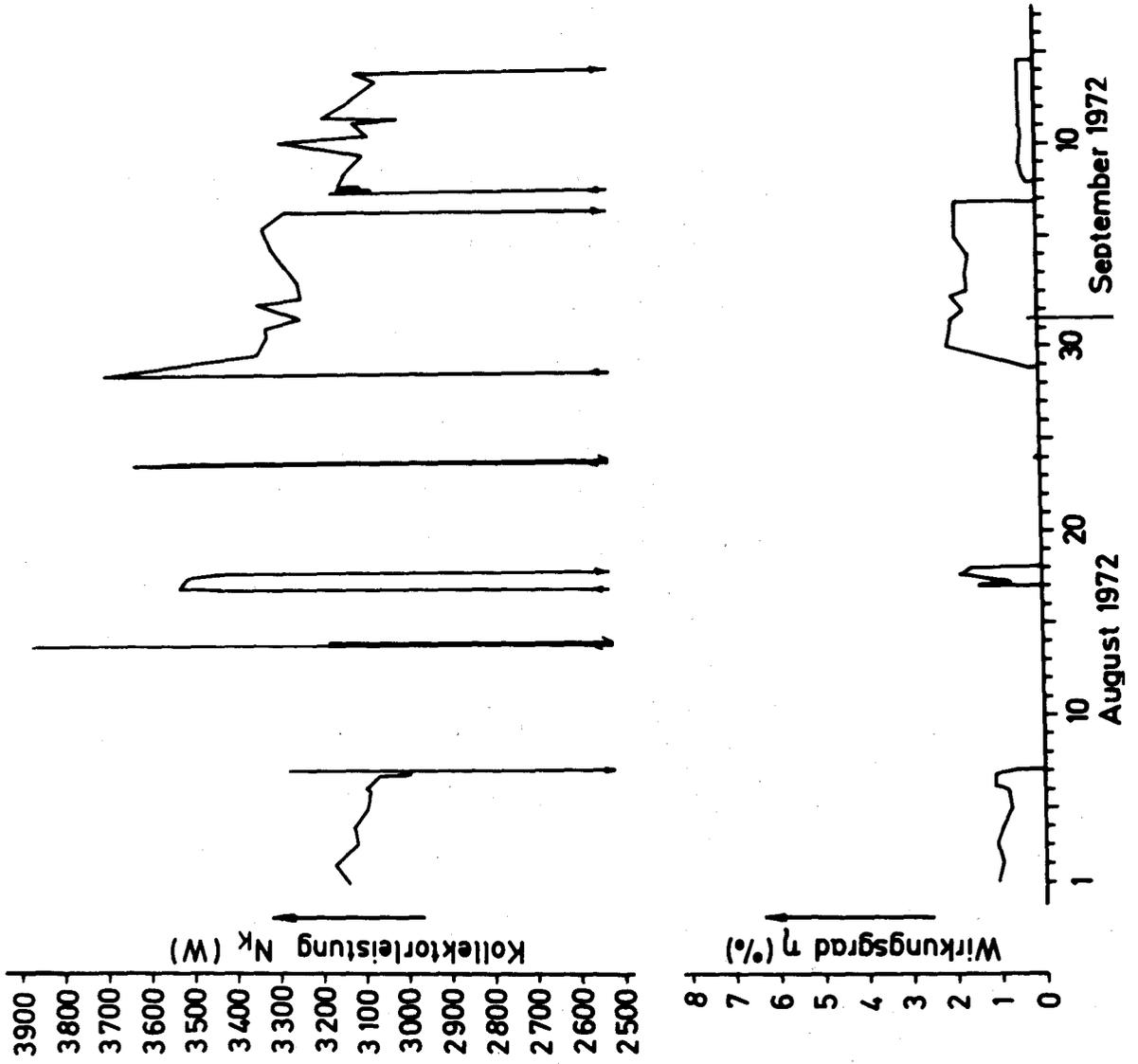


Bild 12: Fortsetzung

5 KENNLINIEN

Strom-Spannungs-Kennlinien gehören zu den wichtigsten Charakteristika thermionischer Dioden. Ihre Interpretation ist jedoch bereits bei Labordioden nicht einfach, da sich Plasma- und Elektrodeneffekte überlagern und beeinflussen. Bei in-pile-Experimenten werden die Schwierigkeiten durch die eingeschränkten Meßmöglichkeiten noch größer. Aus geometrischen Gründen ist es z.B. schwierig, die Emittertemperaturen zu messen. Der Temperaturverlauf in axialer Richtung ist zeitlich und räumlich nicht konstant. Die Umlagerung des Brennstoffs in axialer Richtung, die zu einer Einebnung des Temperaturprofils führen würde, findet bei der Revolvergeometrie zu langsam statt, um während der Bestrahlungszeit wirksam zu werden. [4].

Zur Aufnahme der Kennlinien wurde die Treiberspannung ausgehend vom Arbeitspunkt in 0.5 s auf Null geregelt und die Strom-Spannungs-Abhängigkeit registriert. Die Treiberspannung wurde anschließend in derselben Zeit wieder bis zu ihrem Wert im Arbeitspunkt erhöht. Sinngemäß wurde bei dem oberhalb des Arbeitspunkts liegenden Teil der Kennlinien verfahren.

Die zu verschiedenen Zeitpunkten des zweiten Bestrahlungsexperiments aufgenommenen Kennlinien sind in den Bildern 13 bis 17 dargestellt. Jeweils wurde bei sonst möglichst konstanten Bedingungen die Cs-Badtemperatur verändert. Die zu den einzelnen Kennlinien gehörenden Daten sind in Tabelle 5 zusammengestellt. In den Kennlinienbildern sind als dünne, durchgezogene Linien optimierte Kurven konstanter Emittertemperatur für eine Labordiode vom gleichen Typ eingezeichnet (nach BBC-Unterlagen). [7]

Für die Interpretation der gemessenen Kurven ist folgendes zu beachten: nur die in den Bildern 13 und 14 dargestellten Kurven gelten für die unversehrte Dreifachdiode; als die übrigen Kennlinien aufgenommen wurden, befand sich bereits Helium im Elektrodenraum; die Kollektortemperaturen sind alle kleiner als

optimal mit Ausnahme der Kennlinien vom 17. 8. (Bild 15).

Eine ungefähre Vorstellung über das elektrische Verhalten der Dreifachdiode gibt Bild 18, in dem die Einhüllenden der Kennlinien für die Gesamtspannung dargestellt sind, die aus den Bildern 13 bis 17 bestimmt wurden. Aus diesen Kurven erhält man die maximal erreichbare Leistung bei den angegebenen Kollektor- und Emittertemperaturen, wobei die Cs-Badtemperatur optimal einzustellen ist. Es ist zu beachten, daß die angegebenen Emittertemperaturen die mit dem Thermoelement gemessenen Werte der oberen Diode darstellen, während als Kollektortemperaturen die über alle Dioden gemittelten Werte angegeben sind. Die Kurven für den 25. 5. und den 9. 6. beziehen sich auf die intakte Dreifachdiode, während am 17. 8., 30. 8. und 6. 11. der Elektrodenraum mit Helium gefüllt war. Die Kurven vom 30. 8. und 6.11. entsprechen Gleichgewichtsbedingungen, d.h., Helium war bereits bis zum Druckausgleich durch das Leck eingedrungen, während am 17. 8. die Heliummenge in der Dreifachdiode dem Gleichgewicht bei zurückgefahrenem Strahlrohr entspricht.

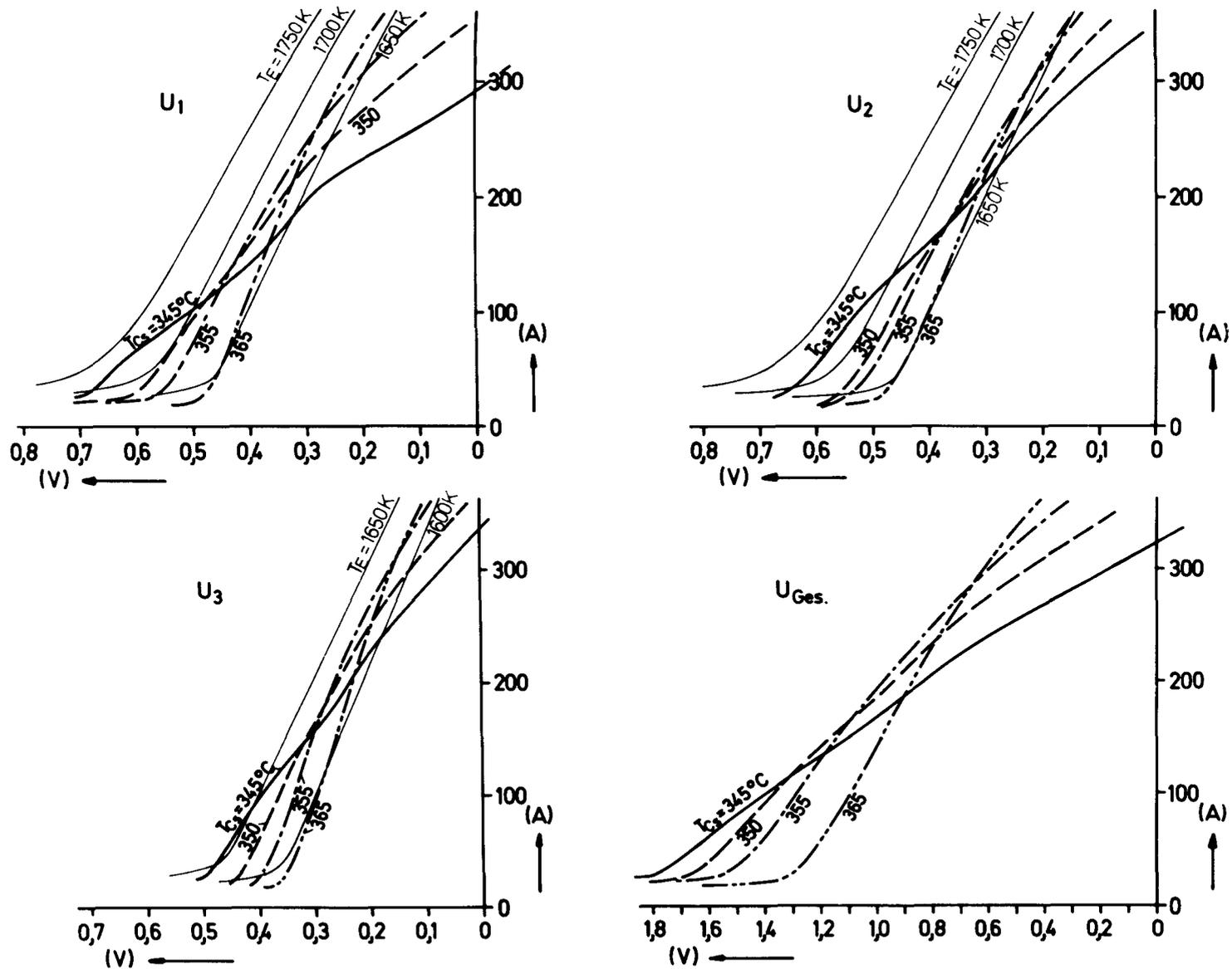


Bild 13: Strom-Spannungs-Kennlinien der zweiten Dreifachdiode für verschiedene Cs-Badtemperaturen vom 25. 5. 1972. Dünne durchgezogene Linien stellen optimale Grenzkurven konstanter Emittertemperatur für eine baugleiche Labordiode dar. Meßdaten: siehe Tabelle 5.

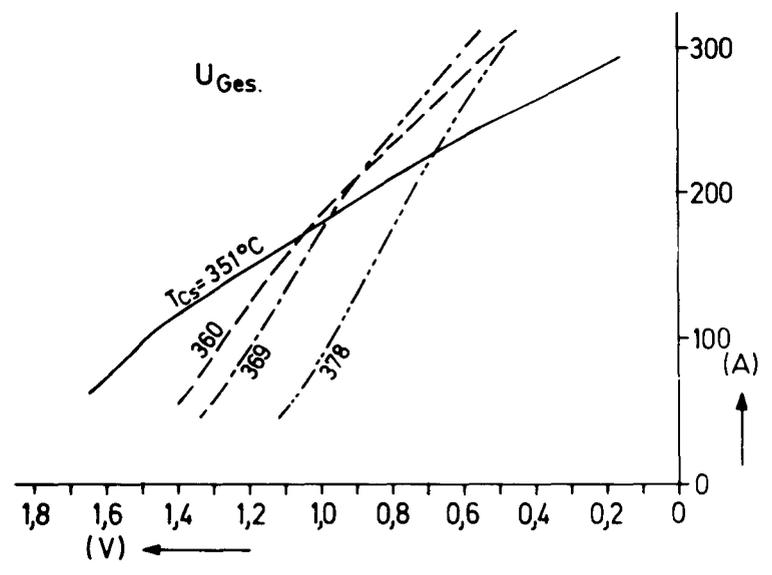
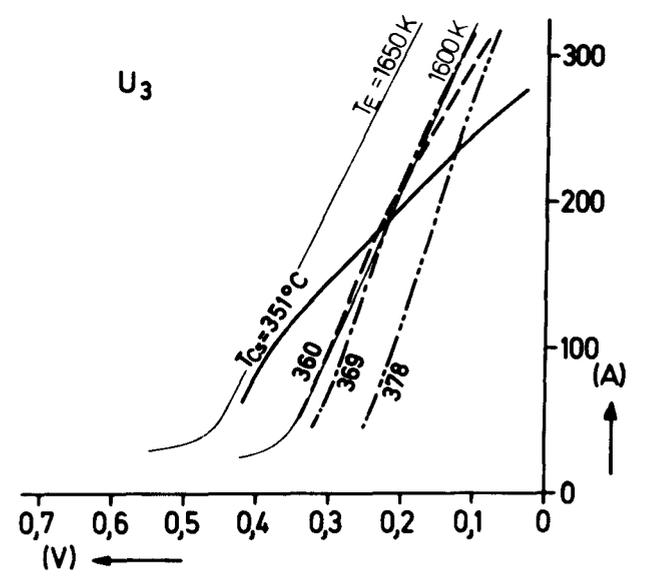
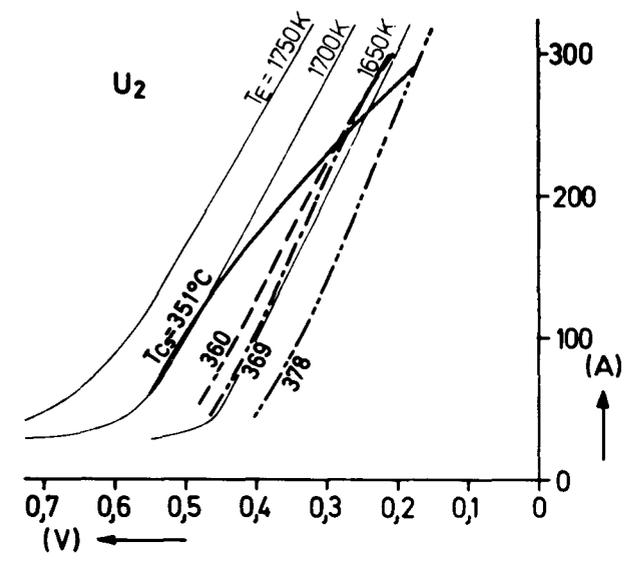
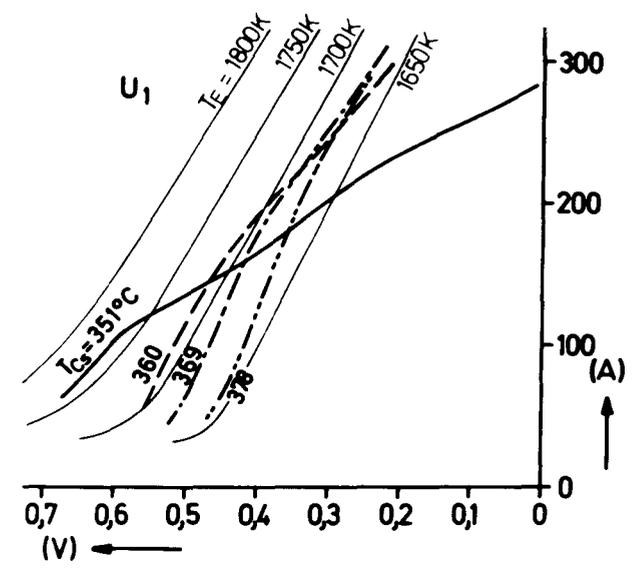


Bild 14: Strom-Spannungskennlinien vom 9. 6. 1972. Sonstige Angaben wie Bild 13.

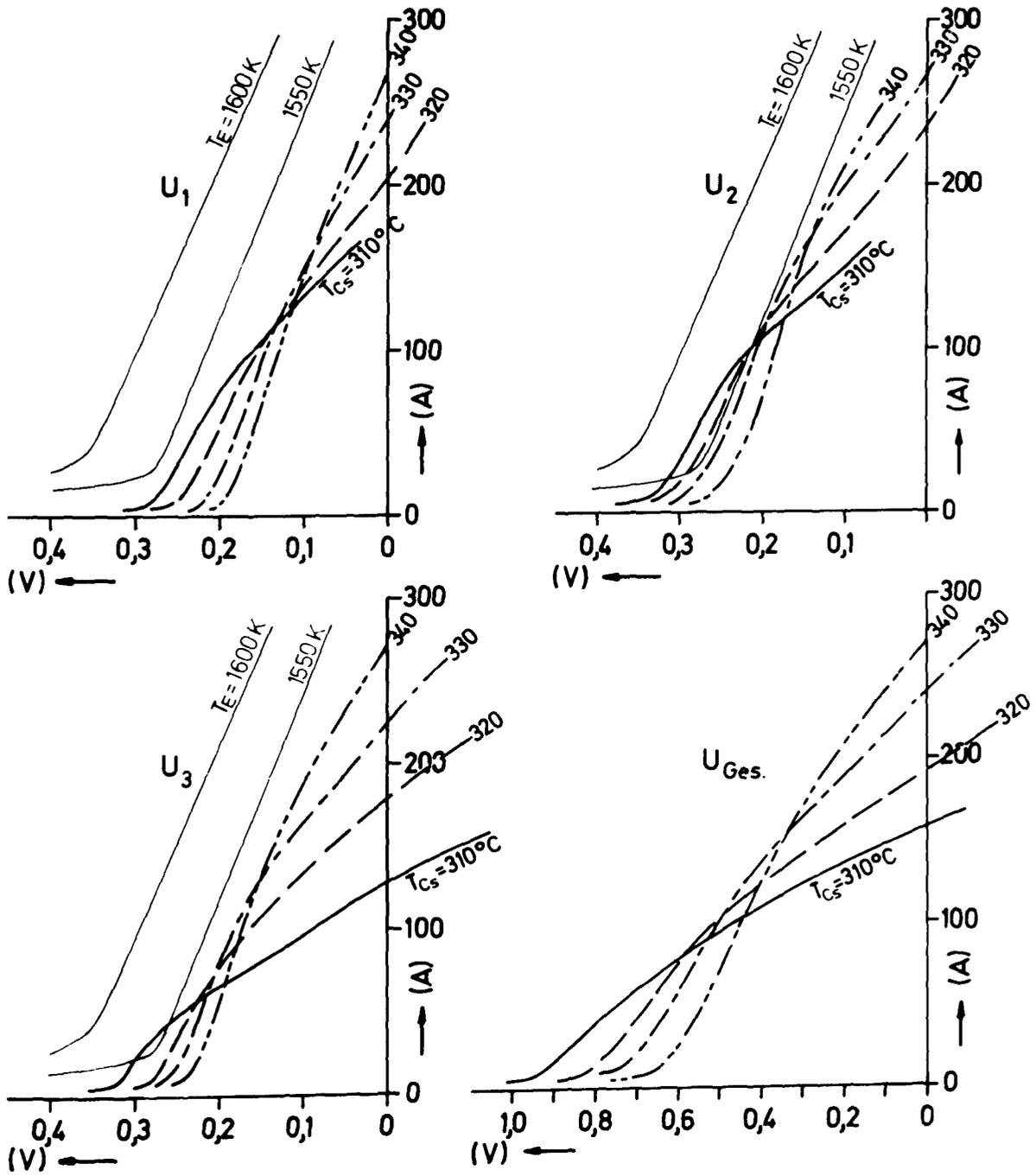


Bild 15: Strom-Spannungs-Kennlinien vom 17. 8. 1972.
 Sonstige Angaben wie Bild 13.

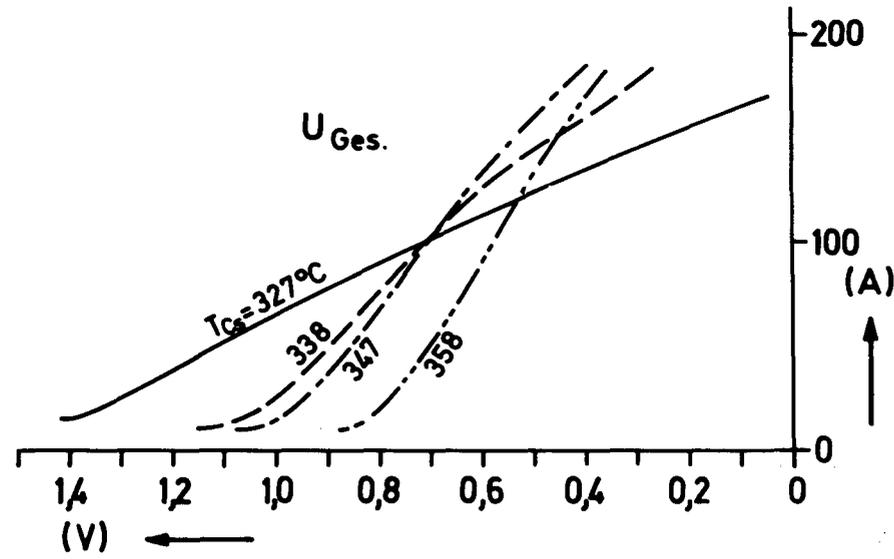
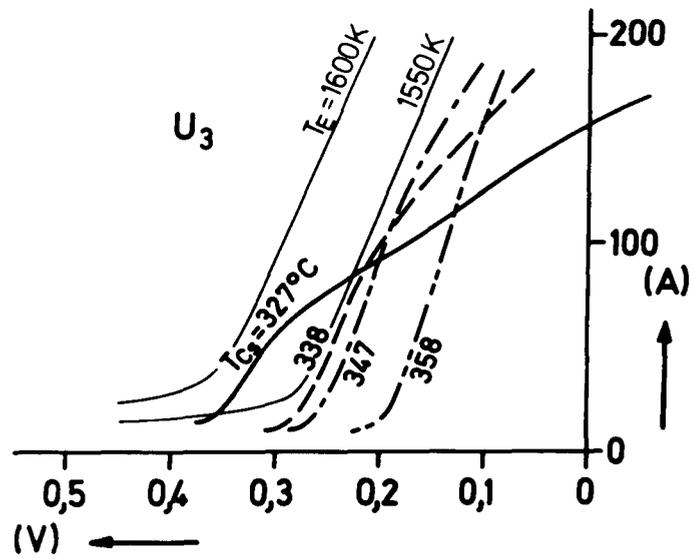
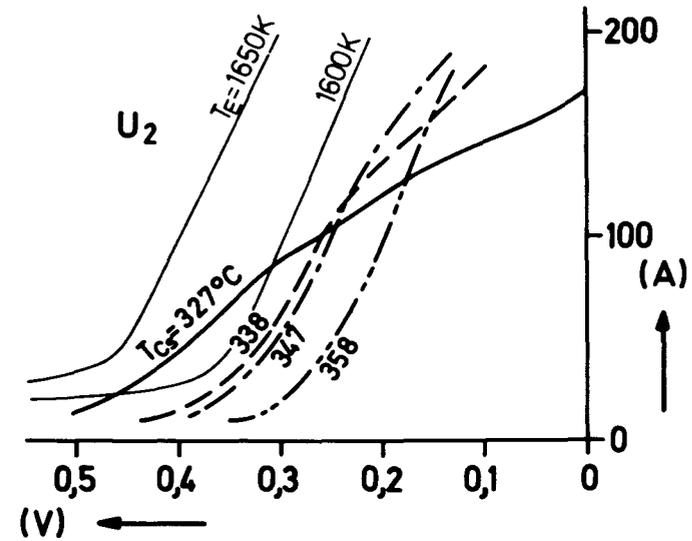
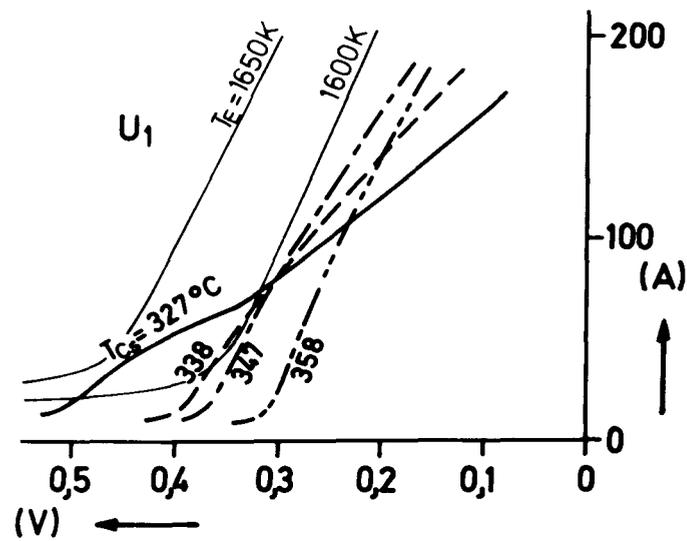


Bild 16: Strom-Spannungs-Kennlinien vom 30. 8. 1972. Sonstige Angaben wie Bild 13.

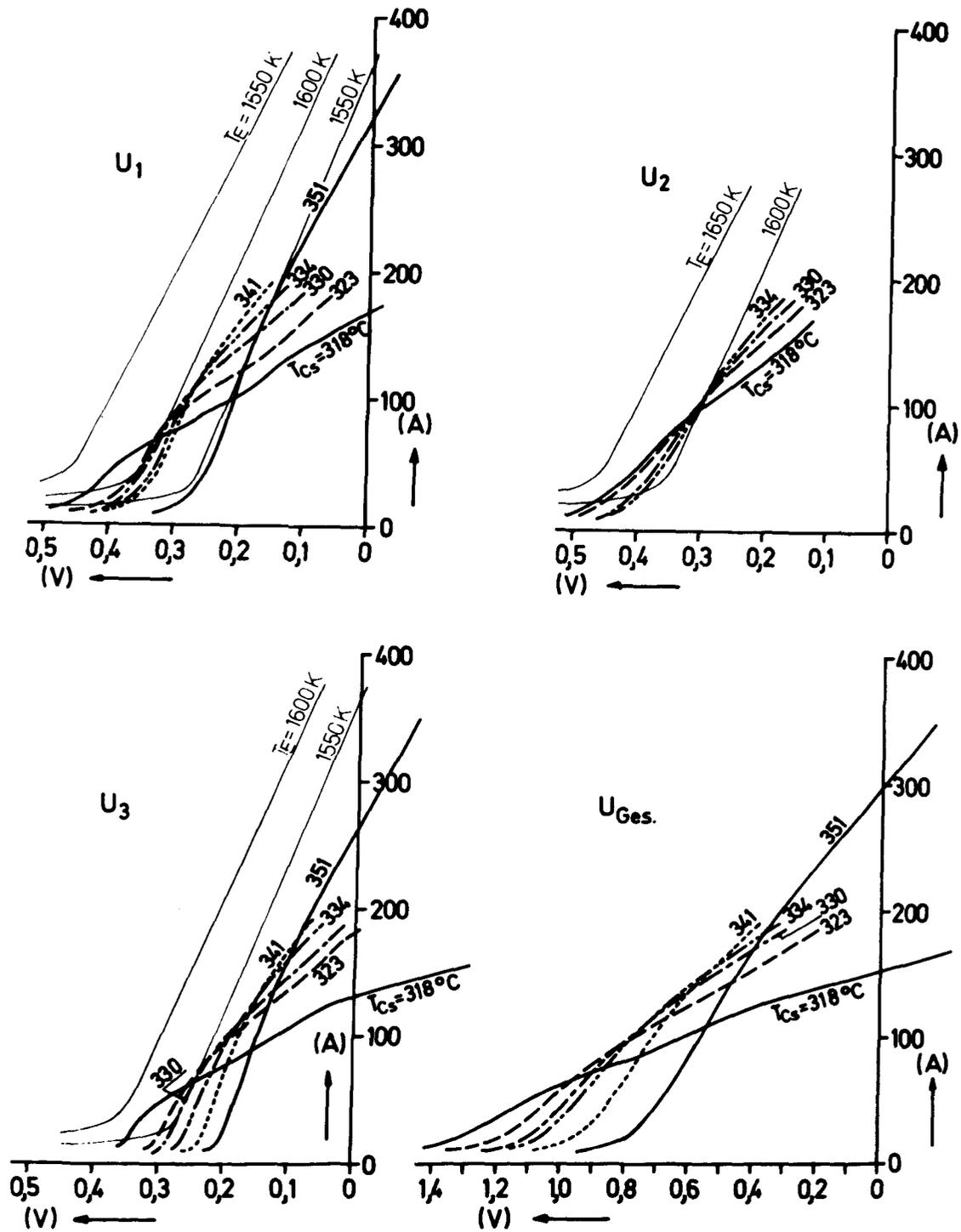


Bild 17: Strom-Spannungs-Kennlinien vom 6. 11. 1972.
Sonstige Angaben wie Bild 13.

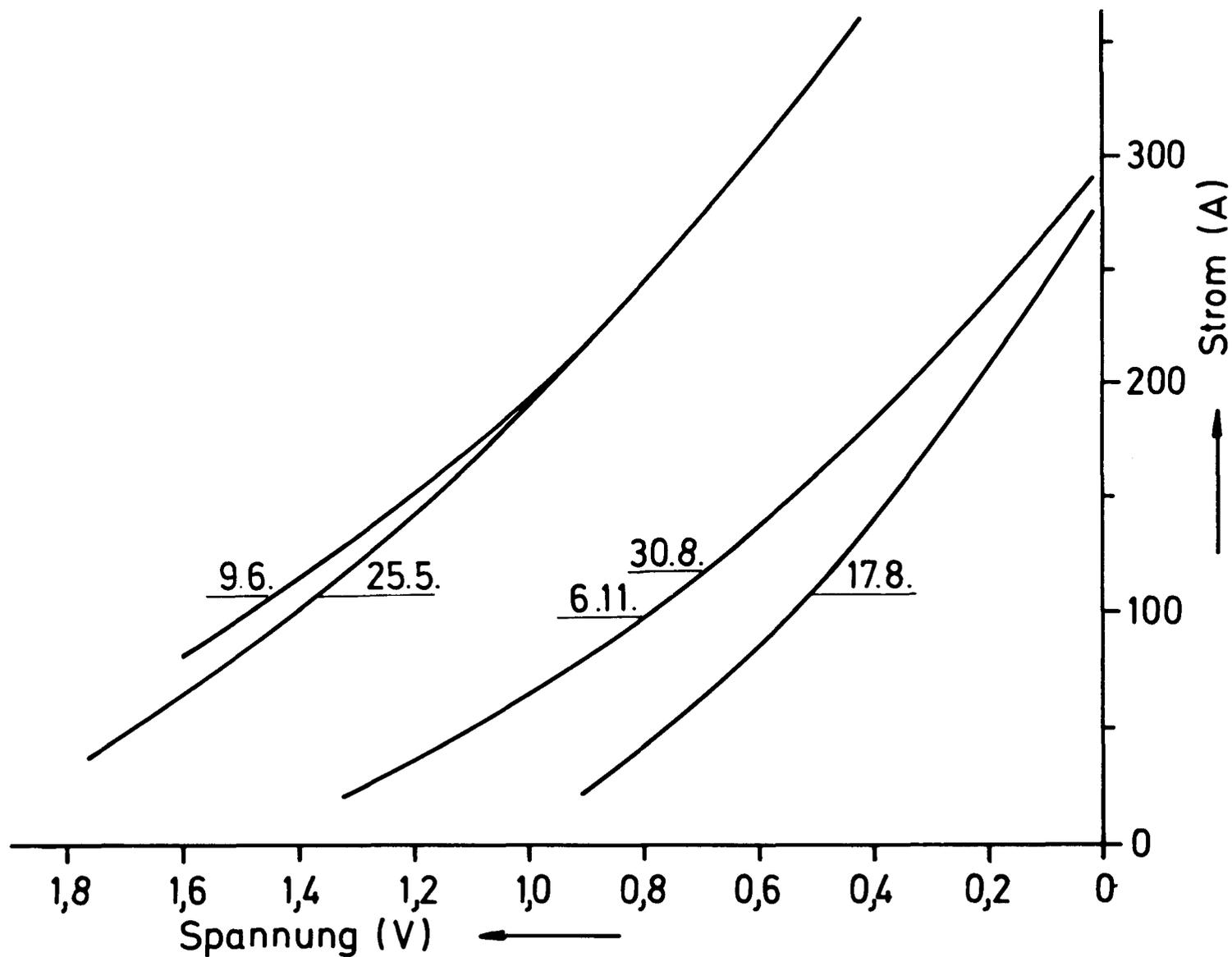


Bild 18: Optimierte Strom-Spannungs-Kennlinien für die zweite Dreifachdiode. Diese Kurven ergeben sich als Einhüllende der Kennlinien für verschiedene Cs-Badtemperaturen aus den Bildern 13 bis 17. Die Kurven vom 25. 5. und vom 9. 6. beziehen sich auf die intakte die übrigen auf die mit Helium gefüllte Dreifachdiode.

6 SCHLUSS

Beide Bestrahlungsexperimente mußten aus Sicherheitsgründen in einem Stadium abgebrochen werden, in dem ein weiterer Betrieb noch zusätzliche Informationen geliefert hätte. Bei der ersten Dreifachdiode trat am Ende der Bestrahlungszeit ein Leck zwischen dem Spaltgas- und dem Heliumraum auf, während das elektrische Verhalten nicht beeinträchtigt war. Bei der zweiten Dreifachdiode war zusätzlich ein Leck des Cs-Raums vorhanden, so daß allmählich das Cs aus dem Elektrodenraum herausdestillierte. Auch in diesem Fall wäre ein weiterer Betrieb noch sinnvoll gewesen, da er z.B. Informationen bezüglich der Brennstoff-Emitter-Technologie geliefert hätte.

Um bei weiteren Experimenten den Abbruch aus Sicherheitsgründen zu vermeiden, sollte auf die Dichtigkeit des Spaltgasraumes gegenüber dem Heliumraum besonders Wert gelegt werden. Da das Leck vermutlich an der großen Metall-Keramik-Verbindung am oberen Ende der Dreifachdiode aufgetreten ist, sollte diese in kältere Zonen verlegt werden.

Es wurde bereits in Abschnitt 2 darauf hingewiesen, daß die Lebensdauer der Dioden möglicherweise durch die Summe der thermischen Wechselbelastungen begrenzt wird. In diesem Fall müßten bei Bestrahlungsexperimenten neben den üblichen Versuchsdaten auch die thermischen Wechselbelastungen näher spezifiziert werden. Die Darstellung von Temperatur-Zeit-Verläufen ist nur ein erster Schritt in dieser Richtung. Für eine quantitative Auswertung sollte eine Frequenzanalyse dieser Abhängigkeiten durchgeführt werden, zusätzlich müßte in Laborversuchen das Kriechverhalten der Diodenmaterialien näher untersucht werden.

Falls sich herausstellen sollte, daß bei einem Incore-Thermionik-Reaktor mit wesentlich geringeren thermischen Wechselbelastungen zu rechnen ist, so müßten auch die Bestrahlungsexperimente unter entsprechenden Bedingungen durchgeführt werden. Z.B. finden in den USA die Bestrahlungsexperimente mit thermio-

nischen Brennstäben in einem speziell für diesen Zweck verwendeten Testreaktor statt, dessen Core Brennelemente mit einer Brenndauer von 3 bis 4 Jahren enthält. [9] . Zwar fehlen quantitative Daten, doch deuten die veröffentlichten Kurven auf eine geringere thermische Wechselbelastung der Brennstäbe hin. [10] .

Für die große Unterstützung bei der Vorbereitung und der Durchführung der Bestrahlungsexperimente danke ich den Herren J. Loevenich und E. Broun von der Zentralabteilung Forschungsreaktoren und den Herren W. Haar, H. Holick, A. Jester und R. Krapf vom Zentralen Forschungslabor der Firma BBC in Heidelberg. Fräulein G. Flentje danke ich für ihre Hilfe bei der Auswertung und Herrn K.G. Tschersich für die zeitweise Betreuung der Bestrahlungsexperimente.

7.1 Literaturhinweise

- [1] E.A. Niekisch:
Nationale und Internationale Interessen auf dem Gebiete
der thermionischen Energiewandlung,
Institut für Technische Physik der Kernforschungsanlage
Jülich,(1971).
- [2] W. Haar, H. Holick, A. Jester, R. Krapf, A. Minor:
Der Entwicklungsstand von thermionischen Brennstäben,
BBC-Nachrichten, Jahrgang 54, S. 45 (1972).
- [3] 3rd International Conference on Thermionic Electrical
Power Generation,
Proceedings Vol. 2, Jülich, (1972).
- [4] K. Janner, M. Peehs:
11. Sitzung des ITR Austauschgremiums, 13. 1. 1972,
Erlangen.
- [5] R. Zöllner, A. Jester:
IEEE Conference Record 1971 Thermionic Conversion Special-
ist Conference, San Diego,
S. 323.
- [6] W. Haar, H. Holick, K. Jester, R. Krapf, J. Herion:
3rd International Conference Thermionic Electrical Power
Generation,
Proceedings Vol. 2, Jülich, 1972, S. 581.
- [7] W. Haar, H. Holick:
IEEE Conference Record 1971 Thermionic Conversion Special-
ist Conference, San Diego,
S. 258
- [8] G. Borchardt:
Flußmessungen durch Sondenaktivierung im FRJ-1, 29. 11. 71,

Bericht des Zentralinstituts für Reaktorexperimente der Kernforschungsanlage Jülich.

- [9] M.K. Yates, J.W. Holland, D.T. Allen, G.O. Fitzpatrick, J.C. Grebetz, M.H. Horner:
IEEE Conference Record 1971 Thermionic Conversion Specialist Conference, San Diego,
S. 68
- [10] M.K. Yates, G.O. Fitzpatrick, D.E. Schwarzer:
3rd International Conference Thermionic Electrical Power Generation,
Proceedings Vol. 2, Jülich, 1972, S. 479.

7.2 TabellenTABELLE 1

Thermische und schnelle Neutronenflußdichten
an den Bestrahlungspositionen C7, D7, E9 und
E10 vom 29. 11. 1971 [8]

Neutronenflußdichte (Neutronen/cm²s)

Position	Core-Mitte			
	- 30 cm	± 0 cm	+ 30 cm	
C7	th.	$3,64 \cdot 10^{13}$	$7,05 \cdot 10^{13}$	$2,77 \cdot 10^{13}$
	sch.	$4,24 \cdot 10^{12}$	$1,05 \cdot 10^{13}$	$3,05 \cdot 10^{12}$
D7	th.	$4,61 \cdot 10^{13}$	$9,25 \cdot 10^{13}$	$3,01 \cdot 10^{13}$
	sch.	$4,58 \cdot 10^{12}$	$1,04 \cdot 10^{13}$	$2,79 \cdot 10^{12}$
E9	th.	$7,05 \cdot 10^{12}$	$1,29 \cdot 10^{13}$	$4,46 \cdot 10^{12}$
	sch.	$3,71 \cdot 10^{11}$	$6,87 \cdot 10^{11}$	$2,47 \cdot 10^{11}$
E10	th.	$2,24 \cdot 10^{12}$	$3,08 \cdot 10^{12}$	$1,08 \cdot 10^{12}$
	sch.	$1,14 \cdot 10^{11}$	$2,04 \cdot 10^{11}$	$6,77 \cdot 10^{10}$

T A B E L L E 2

Daten der Experimentiereinrichtung

<u>Dreifachdiode</u>		<u>Strahlrohr</u>	
Dreischichtrohr:		Länge	757,7 cm
Innendurchmesser	2,04 cm	Durchmesser	7,5 cm
Wandstärke Kollektorrohr	0,2 cm	Wandstärke	0,3 cm
Dicke Al ₂ O ₃ -Schicht	0,02 cm	Entfernung Mitte Dreifachdiode -	
Wandstärke Hüllrohr	0,1 cm	Strahlrohrende	30,8 cm
		Entferng. Schwenkachse -	
Emitter:		Mitte Dreifachdiode	311,4 cm
Durchmesser	2,01 cm	Verschiebungsbereich auf der	
Mantellänge	5,4 cm	Gitterplatte	14,2 cm
Durchmesser Brennst.bohrng.	0,36 cm		
Entferng. Mittelachse-		Abschirmstopfen:	
Achse Brennst.bohrng.	0,72 cm	Länge	177 cm
Gesamtlänge	6,75 cm	Durchmesser	6,7 cm
UO ₂ -Gehalt	133,4 g	Fülldichte: Blei + Araldit	5 g/cm ³
Urangehalt	117,6 g		
Anreicherung	19,3 %	Spaltgasadsorber:	
		Volumen	1100 cm ³
		Füllung mit Aktivkohle	400 g

tt

T A B E L L E 3

Zeitverlauf des 1. Bestrahlungsexperimentes mit
einer thermionischen Dreifachdiode (LV 36.1)

Datum	Uhrzeit	Ereignis	Betriebs- stunden
1971 /			
1972			
27. 11.		Einbau des Strahlrohrs;	
2. 12.	18.00	Bestrahlungsbeginn;	
3. 12.	ab 17.45	Leistungsbetrieb;	0
4. 12.	15.40	Reaktorabschaltung; Zurückfahren des Strahlrohrs;	22
	ab 19.30	Leistungsbetrieb;	
8. 12.	13.30	Automatisches Zurückfahren des Strahlrohrs; Ursache: Leistungsschwankung d. Reaktors;	112
	ab 15.30	Leistungsbetrieb;	
16. 12.	16.05	Reaktorabschaltung; automatisches Zurückfah- ren des Strahlrohrs;	305
6. 1.	ab 17.30	Leistungsbetrieb;	
	21.20	Automatisches Zurückfahren des Strahlrohrs; Fehler am Cs-Badtemperaturregler;	308
10. 1.	ab 18.00	Leistungsbetrieb;	
27. 1.	21.00	Automatisches Zurückfahren d. Strahlrohrs; Ausfall der Wasserkühlung;	719
	ab 23.00	Leistungsbetrieb;	
28. 1.	12.00	Ausfall der Wasserkühlung; Zurückfahren des Strahlrohrs von Hand;	732
29. 1.	ab 12.00	Leistungsbetrieb;	
7. 2.	7.05	Reaktorabschaltung; automatisches Zurück- fahren des Strahlrohrs;	943
	ab 15.00	Leistungsbetrieb;	
	16.30	Reaktorabschaltung	945
	ab 21.50	Leistungsbetrieb;	
8. 2.	18.50	Reaktorabschaltung;	966
	ab 21.00	Leistungsbetrieb;	
10. 2.	14.20	Zurückfahren des Strahlrohrs von Hand;	1007
19. 2.	ab 13.15	Leistungsbetrieb;	

Datum 1971 / 1972	Uhrzeit	Ereignis	Betriebs- stunden
19. 2.	14.30	Automatisches Zurückfahren des Strahlrohrs; Ursache: zu knappe Einstellung eines Grenzwerts;	1008
19. 2.	ab 17.00	Leistungsbetrieb;	
21. 2.	15.00	Zurückfahren des Strahlrohrs von Hand;	1054
	ab 17.00	Leistungsbetrieb;	
9. 3.	19.40	Netzausfall; Reaktorabschaltung; automatisches Zurückfahren des Strahlrohrs;	1465
	ab 22.30	Leistungsbetrieb;	
13. 3.	3.30	Abnahme des Helium-Drucks um 4 %; Abnahme	
	bis 4.30	der Diodenspannungen und Anstieg der Kollektortemperaturen;	
	ab 5.00	Anstieg der γ -Dosisleistung am Reaktortop;	
	6.10	Automatisches Zurückfahren des Strahlrohrs; γ -Dosisleistung an der Heliumleitung: 20 mrem/h;	1545
21. 3.		Ausbau des Strahlrohrs.	

T A B E L L E 4

Zeitverlauf des 2. Bestrahlungsexperiments mit einer
thermionischen Dreifachdiode
(LV 36.2)

Datum 1972	Uhrzeit	Ereignis	Betriebs- stunden- zahl
6. 5.		Einbau des Strahlrohrs; Mitte der Dreifachdiode 80 mm unterhalb Core-Mitte;	
15. 5.	21.50	Bestrahlungsbeginn;	
16. 5.	ab 16.00	Leistungsbetrieb;	0
4. 6.	7.50	Kurze Reaktorabschaltung wegen Netzausfall;	447
	ab 17.00	Leistungsbetrieb;	
5. 6.	9.40	Reaktorabschaltung; Strahlrohr fährt automatisch zurück; Strahlrohrposition wird um 1 Stufe (=40mm) erhöht;	464
6. 6.	ab 20.30	Leistungsbetrieb;	
9. 6.	17.00	Zurückfahren des Strahlrohrs von Hand;	532
27. 6.		Strahlrohrposition um 40 mm erhöht;	
5. 7.	ab 12.00	Leistungsbetrieb;	
	14.00	Reaktorabschaltung; Strahlrohr fährt nicht zurück;	
	14.30	Einschalten des Reaktors; Strahlrohr bleibt in der alten Position;	
7. 7.	16.15	Zurückfahren des Strahlrohrs von Hand;	585
11. 7.	ab 10.50	Leistungsbetrieb;	
15. 7.	11.30	Zurückfahren des Strahlrohrs von Hand;	681
18. 7.	9.15	Erfolgreicher Anfahrversuch; Schwankungen der Reaktorleistung wegen zu hoher Außentemperaturen; keine sichere Einstellung möglich;	
	bis 10.55		
22. 7.	ab 15.00	Leistungsbetrieb;	
7. 8.	14.15	Strahlrohr fährt automatisch zurück; Ursache: Leistungssenkung d. Reaktors;	1065

Datum 1972	Uhrzeit	Ereignis	Betriebs- stunden- zahl
14.8.	10.30 bis 15.00	Anfahrversuch; trotz ausreichender thermischer Leistung ist die Ausgangsleistung klein;	
17.8.	ab 16.30	Leistungsbetrieb; bei konstanter thermischer Leistung ist die Ausgangsleistung zunächst klein und steigt nach 10 h auf 65 W an;	
18.8.	11.45	Strahlrohr fährt automatisch zurück; Ursache: γ -Dosis an der He-Leitung erreicht 20 mrem/h; Strahlrohr wird um 1 Stufe (40 mm) abgesenkt;	1084
24.8.	8.30 bis 11.00	Anfahrversuch; Ausgangsleistung: 0 W;	
24.8.	12.15	Automatisches Zurückfahren des Strahlrohrs; Ursache: γ -Dosis an der He-Leitung erreicht 20 mrem/h;	1085
29.8.	ab 10.00	Leistungsbetrieb; Ausgangsleistung steigt innerhalb von 10 h von 0 W auf 65 W an; Dosimetergrenzwert auf 90 mrem/h erhöht;	
4.9.	13.00	Dosimeteranzeige: 70 mrem/h;	
7.9.	9.00	Reaktorabschaltung; automatisches Zurückfahren des Strahlrohrs;	1300
8.9.	ab 10.00	Leistungsbetrieb; langsamer Anstieg der Ausgangsleistung auf 10 W;	
15.9.	1.00	Automatisches Zurückfahren des Strahlrohrs; Ursache: Dosimeteranzeige: 90 mrem/h;	1459
6.11.	ab 12.00	Leistungsbetrieb; Dosimeteranzeige um 12.00 Uhr: 20 mrem/h; nach 3,5 h wird stationäre Ausgangsleistung von 20 W erreicht;	
6.11.	19.30	Dosimeteranzeige: 170 mrem/h; Anstiegsrate: 25 mrem/h ² ; Zurückfahren des Strahlrohrs	1466
4.12.		Ausbau.	

T A B E L L E 5

Meßdaten zu den Bildern 13 bis 17

	Bild 13				Bild 14				Bild 15				Bild 16				Bild 17					
T_{Cs} (°C)	345	350	355	365	351	360	369	378	310	320	330	340	327	338	347	358	318	323	330	334	341	351
I(A)	199	202	202	197	201	205	204	205	100	100	100	100	83	83	81	75	75	78	76	77	69	70
U_{ges} (mV)	840	933	925	882	889	940	894	741	506	567	513	474	864	784	804	598	864	881	895	852	796	622
T_{Ker} (°C)	498	499	498	498	503	500	501	500	481	481	478	482	483	480	483	483	473	471	470	470	471	470
T_{HR} (°C)	55	55	55	55	53	54	56	54	64	65	64	63	59	61	59	61	58	61	58	58	63	58
P_{He} (Torr)	16	16	16	16	18	18	18	18	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20
U_1 (mV)	289	335	343	328	322	385	391	344	174	178	152	129	308	308	315	246	305	311	315	308	293	219
T_{K1} (°C)	590	595	594	599	589	593	599	605	671	674	677	688	611	613	624	626	589	587	588	591	590	592
T_{ZK1} (°C)	194	193	192	191	196	194	194	193	221	222	219	220	202	202	201	201	195	195	193	194	197	195
T_E (°C)	1540	1540	1530	1540	1620	1600	1600	1600	1410	1400	1400	1420	1500	1480	1490	1490	1470	1450	1450	1450	1440	1440
U_2 (mV)	321	345	338	317	366	335	309	247	234	231	202	179	325	283	278	205	369	340	328	326	318	254
T_{K2} (°C)	596	603	606	614	592	594	598	602	690	691	687	695	619	616	622	614	608	603	604	607	605	607
T_{ZK2} (°C)	206	207	207	207	210	211	212	213	247	247	245	249	225	225	227	227	220	220	219	220	223	221
U_3 (mV)	237	262	252	234	203	223	205	153	112	174	177	170	238	218	216	146	209	236	234	226	209	151
T_{K3} (°C)	562	567	566	567	544	547	550	552	671	672	670	674	589	585	591	582	576	578	579	581	578	575
T_{ZK3} (°C)	200	201	201	201	203	203	205	206	252	251	250	252	224	225	226	226	220	221	219	220	222	221

7.3 Erklärung der Abkürzungen:

T_{Cs}	Cs-Badtemperatur
I	Strom
U_{ges}	Gesamtspannung
T_{Ker}	Temperatur der großen Isolierkeramik
T_{HR}	Temperatur der Strahlrohrwand
P_{He}	Heliumdruck
P_{Reakt}	Reaktorleistung
$U_{1,2,3}$	Diodenspannungen (1 obere Diode)
$T_{K1,2,3}$	Kollektortemperaturen
$T_{ZK1,2,3}$	Zwischenfinnenkörper-Temperaturen
T_E	Emittertemperatur der oberen Diode