

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

Juni 1966

KFK 463

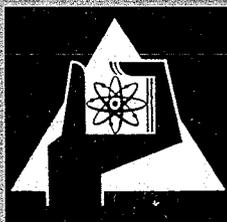
Tiefemperatur-Bestrahlungsanlage am Karlsruher Forschungsreaktor FR 2

W. Decker, J. Diehl, Ch. Leitz

Max-Planck-Institut für Metallforschung, Stuttgart

K. Hain, H. Katheder

Abteilung Reaktorbetrieb, Kernforschungszentrum Karlsruhe



GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.

KARLSRUHE

Low-temperature irradiation facility at the Karlsruhe Research Reactor FR 2

Von W. Decker¹, J. Diehl¹, K. Hain², H. Katheder² und Ch. Leitz¹

¹ Max-Planck-Institut für Metallforschung, Stuttgart; ² Abteilung Reaktorbetrieb, Kernforschungszentrum Karlsruhe

1. Aufgabenstellung; Strahlenschädigung bei tiefen Temperaturen

Viele Eigenschaften kristalliner Festkörper, so z. B. die mechanischen, elektrischen, magnetischen und optischen, werden sehr stark durch Unregelmäßigkeiten des Atomgitters, wie Atome auf Zwischengitterplätzen und Lücken im Gitter, sog. Zwischengitteratome und Leerstellen, beeinflusst. Durch die Bestrahlung von Festkörpern mit schnellen Neutronen in einem Reaktor werden in relativ großen Konzentrationen und (makroskopisch) sehr homogen solche Defekte laufend erzeugt. Die erzeugten Fehlstellen entziehen sich allerdings in vielen Fällen der physikalischen Messung, da sie infolge der thermischen Energie des Gitters in diesem wandern können und durch Rekombination oder Ausscheidung teilweise oder völlig ausheilen. Nur durch Bestrahlung bei tiefer Temperatur, bei der die thermische Gitterenergie klein ist, können die Defekte eingefroren und damit für spätere Untersuchungen hinsichtlich ihrer Art, Zahl und räumlichen Verteilung im Gitter sowie bezüglich der Kinetik ihres Ausheilens bei höheren Temperaturen konserviert werden.

Für die Durchführung grundsätzlicher festkörperphysikalischer Untersuchungen über die Strahlenschädigung war es daher erforderlich, eine Vorrichtung am Reaktor zu bauen, die es ermöglicht, Versuchsproben bei tiefen Temperaturen einer möglichst intensiven Neutronenbestrahlung auszusetzen und nachfolgende physikalische Messungen an diesen Proben ohne zwischenzeitliches Aufwärmen vorzunehmen. Die andernorts gewonnenen Erfahrungen haben gezeigt, daß dabei Temperaturen von etwa 10°K oder weniger wünschenswert sind.

Anlagen ähnlicher Art wurden bisher in Oak Ridge [1], Grenoble [2] und München [3] errichtet.

2. Allgemeine Anforderungen an die Tieftemperatur-Bestrahlungsanlage

Infolge der besonderen Eigenschaften von Kernreaktoren werden an eine derartige Tieftemperatur-Bestrahlungsanlage (TT-Anlage) spezielle Anforderungen kälte- und sicherheitstechnischer Natur gestellt.

2.1 Kältetechnische Anforderungen

Im Reaktorkern des FR 2 wird in eingebrachten Materialien, hauptsächlich durch Absorption von Gammaquanten, bei 44 MW Reaktorleistung eine spezifische Wärmeleistung von maximal 0,5 W/g freigesetzt. Da die Proben im Maximum der Neutronenflußdichte bestrahlt werden sollten, d. h. in der Mittelebene des Kerns, war der Einbau eines Versuchseinsetzes erforderlich, von dem etwa 3,5 m kalte Rohrleitungen mit etwa 1 kg Material in den Kern hineinragen. In dieser Rohrleitung sowie in der Probe entsteht eine Wärmeleistung von 300 bis 400 Watt, die durch die eigentliche Kälteanlage der TT-Anlage abzuführen ist. Neben der Beschaffung einer unkonventionell großen Kältemaschine führte diese Anforderung auch zum Bau eines wirkungsvollen, relativ großen Wärmeaustauschers sowie zur Anschaffung eines leistungsstarken Kompressors mit großem Durchsatz. Die kalten

Anlagenteile mußte man, um die Wärmeleitungsverluste an den kalten Rohrleitungen klein zu halten, möglichst nahe am Reaktor installieren, die Leitungen und kalten Anlagenteile selbst in ein ausreichend gutes Hochvakuum bringen und mit Strahlungsschilden gegen unerwünschte Wärmestrahlung schützen.

Die Anordnung der TT-Anlage und die Größenverhältnisse ihrer Teile waren damit weitgehend festgelegt.

2.2 Sicherheitstechnische Anforderungen

Über die in den Reaktorkern hineinreichenden Rohrleitungen der TT-Anlage können bei Druck- oder Temperaturüberschreitungen im Anlagensystem der Reaktor und damit auch seine Umgebung gefährdet werden. Signal- und Sicherheitsschaltungen entsprechend den an Reaktoren üblichen Sicherheitsanforderungen müssen deshalb das Funktionieren der Anlage überwachen und bei Gefahr diese und ggf. auch den Reaktor abschalten.

Die aus dem Reaktorkern längs der Rohrleitungen des Versuchseinsetzes möglicherweise austretenden Gamma- und Neutronenstrahlen müssen durch geeignete Einbauten abgeschirmt werden. Ebenso müssen die nach der Bestrahlung radioaktiven Versuchsproben abgeschirmt werden; sie sind dadurch dem Experimentator manuell nicht mehr direkt zugänglich, und der gesamte Meßvorgang an der Probe muß ferngesteuert sein.

Die Forderung nach der Messung tiefer Temperaturen im Strahlungsfeld des Reaktors führt zur Verwendung von Thermoelementen, da deren Anzeige durch die Bestrahlung praktisch nicht verändert wird. Da die differentielle Thermospannung von Thermoelementen bei tiefer Temperatur aber sehr klein und herstellungsabhängig ist, bedarf eine genaue Temperaturmessung einer individuellen und ziemlich aufwendigen Eichung.

3. Der Kühlkreislauf

3.1 Funktionsprinzip

Bei der notwendigen großen Kälteleistung und den erforderlichen tiefen Temperaturen kommt nur eine im geschlossenen Kreislauf mit Helium arbeitende Anlage in Frage. Wir bauten deshalb unter Verzicht auf die tiefsten praktisch noch zu erreichenden Temperaturen einen Helium-Gas-Kreislauf, der gegenüber mit flüssigem Helium arbeitenden Anlagen den Vorzug hat, daß die Arbeitstemperatur ohne Schwierigkeit verändert und leicht einreguliert werden kann. Das Prinzip des Kreislaufes zeigt Fig. 1: Gasförmiges Helium wird im geschlossenen Kreislauf von einem Kompressor gefördert und dabei komprimiert. Das Hochdruck-Helium durchströmt einen Gegenstrom-Wärmeaustauscher und wird dort von dem rückströmenden kalten Niederdruck-Helium vorgekühlt. In der Kältemaschine wird das Gas adiabatisch entspannt und dabei weiter abgekühlt. Anschließend wird es über die Probe im Kryostaten, der in den Reaktorkern ragt, geleitet und strömt von dort über die Niederdruckseite des Wärmeaustauschers zum Kompressor zurück.

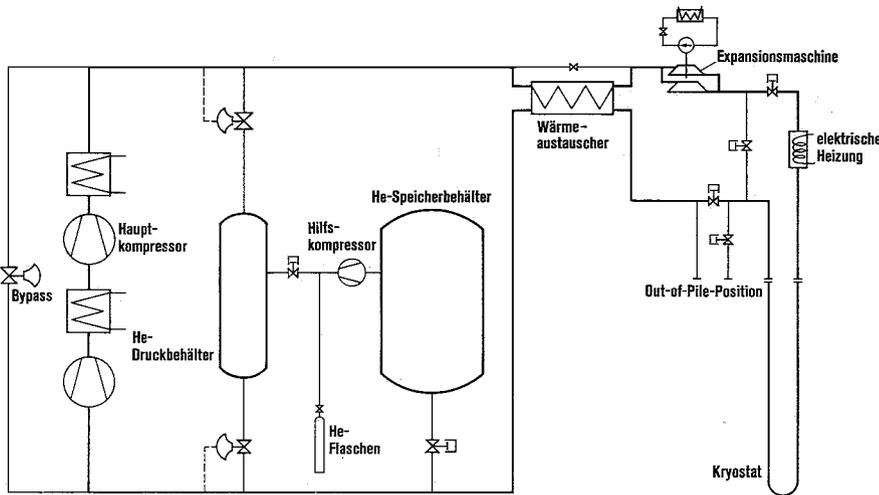


Fig. 1: Vereinfachtes Kreislaufschema
Fig. 1: Schematic flow diagram

Durch geeignete Gasführung und elektrische Heizung lassen sich beliebige Zwischentemperaturen an der Probe erreichen. Mit einem Teilgasstrom wird die Meßtemperatur im oberen Teil des Versuchseinsatzes, dem sog. Meßkryostaten, eingestellt. Die Gasdrücke am Kompressor werden mittels einer Gasdruckregelung mit Gasdruckspeicherbehälter konstant gehalten. Die kalten Teile der Anlage befinden sich in Vakuumbehältern, die von einem gemeinsamen Pumpstand evakuiert werden. Dem Kreislauf angeschlossen ist eine Out-of-Pile-Position, die die Vorerprobung von Experimentiereinrichtungen unter ähnlichen Bedingungen wie im Reaktor gestattet.

3.2 Baugruppen

3.21 Expansionskältemaschine

Als Kältemaschine wird eine einstufige, zweizylindrige Kolbenexpansionsmaschine der Fa. A. D. Little, Cambridge, Massachusetts, USA, mit einem Hubraum von 360 cm³ verwendet. Das vom Kompressor kommende, vorgekühlte Hochdruck-Helium treibt diese Maschine an, wird von etwa 21 auf 3,5 at weitgehend adiabatisch expandiert und kühlt sich dabei ab.

Die Zylinder bestehen aus innen chromplattierter Spezialbronze, die in ihnen laufenden Kolben sind mit einer faserverstärkten Kunststoff-Oberflächenschicht versehen. Die Ventile werden mechanisch gesteuert und dichten mit Teflonscheiben. Nominell hat die Maschine bei 320 U/min einen Norm-Gasdurchsatz von maximal 550 m³/h und liefert ohne Wärmebelastung bei einer Gaseintrittstemperatur von 20 °K eine Temperaturdifferenz von 7,2 grd, d. h. eine Gasaustrittstemperatur von 12,8 °K. Dabei wird eine Leistung von etwa 1 kW abgegeben. Die dem Gas entzogene Arbeit wird über Kolbenstangen und ein Kurbelgetriebe an einen Olmotor abgeführt. Dieser fördert Öl in einem kleinen Kreislauf über ein regelbares Drosselventil. Die hier als Reibungswärme in Erscheinung tretende Expansionsarbeit wird in einem Wärmetauscher an Kühlwasser abgegeben.

3.22 Gegenstromwärmeaustauscher

Es wurden Austauscherrohre der Fa. Joy Manufacturing Company, New York, USA, verwendet, deren grundsätzlicher Aufbau auf Collins [5] zurückgeht. Sie bestehen aus drei ineinandergesteckten, konzentrischen Kupferrohren von 126, 88 und 50 mm Durchmesser, die einen Rohr- und zwei Ringräume miteinander bilden. Das warme Hochdruckgas strömt über den mittleren Ringraum in die eine Richtung und das kalte Gas durch den inneren und äußeren Raum in die andere Richtung. Vier Rohrlängen von je 7 m hängen nebeneinander und sind durch Umlenkköpfe, in denen die beiden Niederdruck-Teilgasströme gemischt werden, hintereinander

zu einer Gesamtlänge von 28 m verbunden. Der gute Wärmeübergang von einem Gasstrom über die Kupferrohrwand zum anderen Gasstrom wird durch mehrere Lagen von in die Ringräume wendelförmig eingelöteten Kupferlocken mit großer wirksamer Oberfläche (etwa 400 m²) und guten Wärmeübergangseigenschaften erreicht. Einen Längsschnitt durch die verwendeten Rohre zeigt Fig. 2. Das Verfahren zur Berechnung des Wärmeübergangs in solchen Rohren ist im Anhang erläutert.

Die Hochdruckseite des Wärmeaustauschers ist mit einem regelbaren Bypass überbrückt, mit dem man warmes Gas hinter dem Wärmeaustauscher zumischen kann. Diese Maßnahme ermöglicht es, zusammen mit einer elektrischen Heizung beliebige Zwischentemperaturen im Kryostaten einzustellen (vgl. Abschnitt 3.5).

Der gesamte Wärmeaustauscher hat eine Masse von 1 t Kupfer. Seine einzelnen Rohrteile hängen zur Kompensation der auftretenden Wärmedehnungen an Tellerfedern mit einer Kraft-Dehnungs-Charakteristik, die einen fast horizontalen Teil aufweist (Pipe-Hanger-Prinzip).

Der Gegenstromwärmeaustauscher sowie die Expansionsmaschine sind in Vakuumbehältern untergebracht und mit mehreren (bis zu 5) Lagen aluminiumbeschichteter Polyesterfolie umwickelt, deren einzelne Lagen durch ein grobmaschiges Glasfasergewebe voneinander getrennt werden. Diese Anordnung reflektiert die von den warmen Wänden der Behälter herkommende Wärmestrahlung und reduziert so die Kälteverluste durch Zustrahlung von etwa 30 W je m² Oberfläche auf weniger als 1 W/m². Die Isoliereigenschaften derartiger Folien und Folien-Gewebe-Kombina-

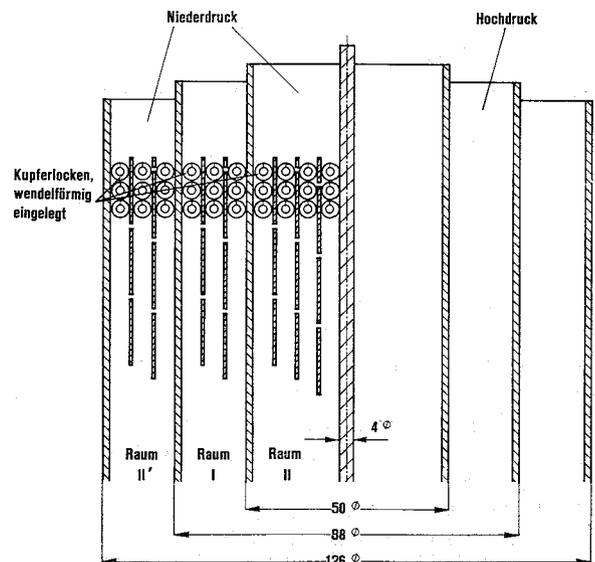


Fig. 2: Schnitt durch die Wärmeaustauscherrohre
Fig. 2: Cross section of the heat-exchanger tubes

fionen sowie ihr Gasabgabeverhalten im Hochvakuum wurde mit einem selbstgebauten Verdampfungs kalorimeter mit ähnlicher Geometrie untersucht. Die Rolle des Wärmeaustauschers übernahm hierbei ein folienumwickeltes zylindrisches Gefäß im Vakuum, das mit flüssigem Stickstoff gefüllt war. Die gasvolumetrisch gemessene Verdampfungsrate des Stickstoffs ist ein Maß für die nicht reflektierte Wärmestrahlung und damit auch für die Isoliereigenschaft des Strahlungsschildes.

3.23 Kompressor

Entsprechend der Auslegung der Expansionsmaschine wurde ein zweistufiger Kompressor der Fa. Sulzer, Winterthur, Schweiz, mit einer Norm-Förderleistung von maximal 780 m³/h zwischen 3,2 und 22 at gewählt. Um das Kreislaufhelium nicht durch Öl zu verunreinigen, das beim Ausfrieren im Wärmeaustauscher dessen Wirksamkeit verschlechtern würde, hat dieser Kompressor gasgeschmierte Labyrinthdichtungen am Kolben.

Der Kompressor steht zusammen mit den nachgeschalteten Rohrbündel-Gaskühlern auf einem Betonfundament (20 t) und einer Mafund-Gummimatte, die die Übertragung störender Schwingungen auf das Reaktorgebäude verhindern. Ein 135-kW-Asynchron-Drehstrommotor treibt den Kompressor direkt über eine Welle mit Schwungrad an.

3.24 Gasdruckregelung

Der Gasdurchsatz der Expansionsmaschine und der Gasbedarf von Kryostat und Wärmeaustauscher sind über die Dichte des Heliums abhängig von deren Temperatur, ändern sich also beispielsweise während des Kaltfahrens der vorher warmen Anlage sehr stark. Da der Kompressor einen konstanten Gasstrom liefert, müssen der Gasstrom zur Maschine und die Gasdrücke im Kreislauf geregelt werden. Die verwendete Regelung besteht aus zwei pneumatischen Regelventilen mit dem großen Regelbereich von 1:50 und zwei zugehörigen pneumatischen PID-Reglern sowie einem Gasdruckspeicherbehälter von 1,8 m³ Inhalt.

Die Regelventile öffnen bei Über- bzw. Unterschreitung der Gasdruck-Sollwerte auf der Hoch- bzw. Niederdruckseite, und es strömt Gas aus der Hochdruckleitung in den Behälter oder aus diesem auf die Niederdruckseite. Im Betrieb sind die beiden Regelventile dauernd etwas geöffnet, so daß der Gaspfad über diese und den Behälter als variabler Bypass dient, über den der überschüssige Gasstrom fließt.

Zur Entlastung der automatischen Regelung wird ein Teil des Gasstromes über ein weiteres, gelegentlich von Hand zu regulierendes Bypass-Ventil parallel zum Kompressor geführt, das auch zum Anfahren und Warmlaufen des Kompressors verwendet wird.

Die beim Abfahren der Anlage anfallenden Gasmengen werden in einem 5-m³-Niederdruckbehälter aufgefangen. Von hier können sie mittels eines zweistufigen Membrankompressors der Fa. Corblin, Paris, wieder in den Hochdruckspeicher zurückgepumpt oder auf Flaschen gedrückt werden.

3.25 Versuchseinsatz

Zur Bestrahlung stand ein vertikaler exzentrischer Prüfkanaal mit einer zylindrischen Öffnung von 120 mm Durchmesser im Reaktorabschirmdeckel zur Verfügung. In diese Öffnung wurde der Versuchseinsatz (Fig. 3 und 4), ein zylindrischer, 4 m langer Stopfen mit Edelstahlhülle, eingebaut.

In diesem Stopfen führen innerhalb eines ovalen Vakuümhüllrohres zwei dünnwandige Edelstahlrohre nach unten, wo sie unterhalb der Kernmitte durch einen U-Bogen verbunden sind. Sie führen das kalte, von der Expansionsmaschine kommende Helium zur Probe, die sich während der Bestrahlung im Kryostaten, d. h. im Zuleitungsrohr kurz oberhalb des U-Bogens, befindet, und von dort zurück zum Wärmeaustauscher (vgl. Fig. 3). Das im Kernbereich direkt ins D₂O des Reaktors eintauchende ovale Vakuümhüllrohr ist dort von einem Bleimantel umgeben, der die Probe und

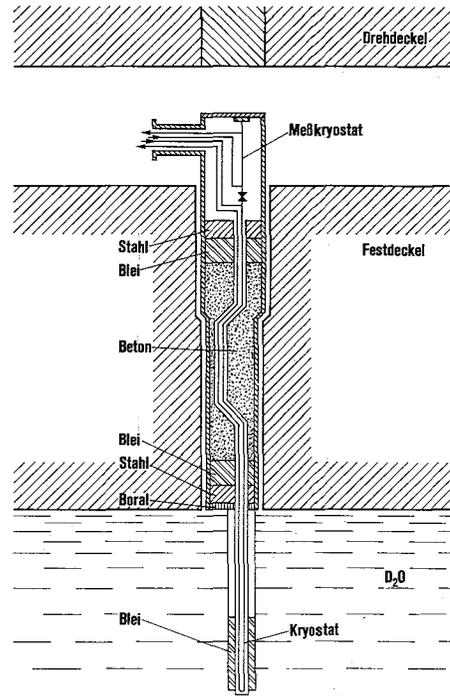


Fig. 3: Versuchseinsatz Fig. 3: In-pile assembly

die kalten Rohrleitungen gegen einen Teil der Gamma-Aufheizung abschirmt¹. Die freien Räume des Versuchseinsatzes sind mit Abschirmmaterial ausgefüllt.

Die Versuchsprobe wird durch das Gaszuführungsrohr über ein kaltes Schloosenventil im Oberteil des Versuchseinsatzes in den Kryostaten auf die Bestrahlungsposition eingeführt. Nach der Bestrahlung kann sie, ähnlich wie in der TT-Anlage am Forschungsreaktor München (FRM) [3], in eine Position oberhalb des Ventils hochgezogen und dort im sogenannten Meßkryostaten durch einen regel- und heizbaren Teilgasstrom verschiedenen Temperaturbehandlungen unterzogen werden. Auf dem oberen Ende des Versuchseinsatzes, d. i. im Deckelzwischenraum des Reaktors (Fig. 4) können Meßanordnungen angeflanscht werden, die in den Meßkryostaten hineinragen und dort physikalische Messungen an der bestrahlten kalten Probe ermöglichen (s. a. Abschnitt 4).

3.26 Vakuumanlage

Zur Kälteisolierung sind Wärmeaustauscher und Expansionsmaschine in Vakuümbehälter eingebaut; alle kalten Rohrleitungen, die kalten Ventile und sonstigen Tieftemperatur-einrichtungen sind von einem Vakuüm mantel umgeben. Ein gemeinsamer Vakuümpumpstand mit einer Pumpleistung von etwa 600 l/s erzeugt und hält über eine Leitung von NW 250, in die eine mit flüssiger Luft gekühlte Dampfsperre ragt, ein Vakuum von weniger als $5 \cdot 10^{-5}$ Torr in diesen Räumen. Der Pumpstand besteht aus zwei zweistufigen Drehschieberpumpen und zwei wassergekühlten Oldiffusionspumpen.

Die Verbindungsstellen des Vakuümsystems wurden einzeln einem Heliumlecktest mit einem Lecksuchgerät unterzogen, damit die höchstzulässige Gesamtleckrate von etwa 10^{-2} Torr l/s nicht überschritten wird.

¹ Die in der Bleiabschirmung freigesetzte Gamma-Heizleistung beträgt bei 44 MW Reaktorleistung etwa 12 kW. Sie wird an das umgebende D₂O durch natürliche Konvektion abgeführt. Wie 1:1-Vorversuche mit einem direkt elektrisch geheizten Rohrstück in Wasser ergeben haben, wird die Wand dabei auf maximal 96 °C erwärmt.

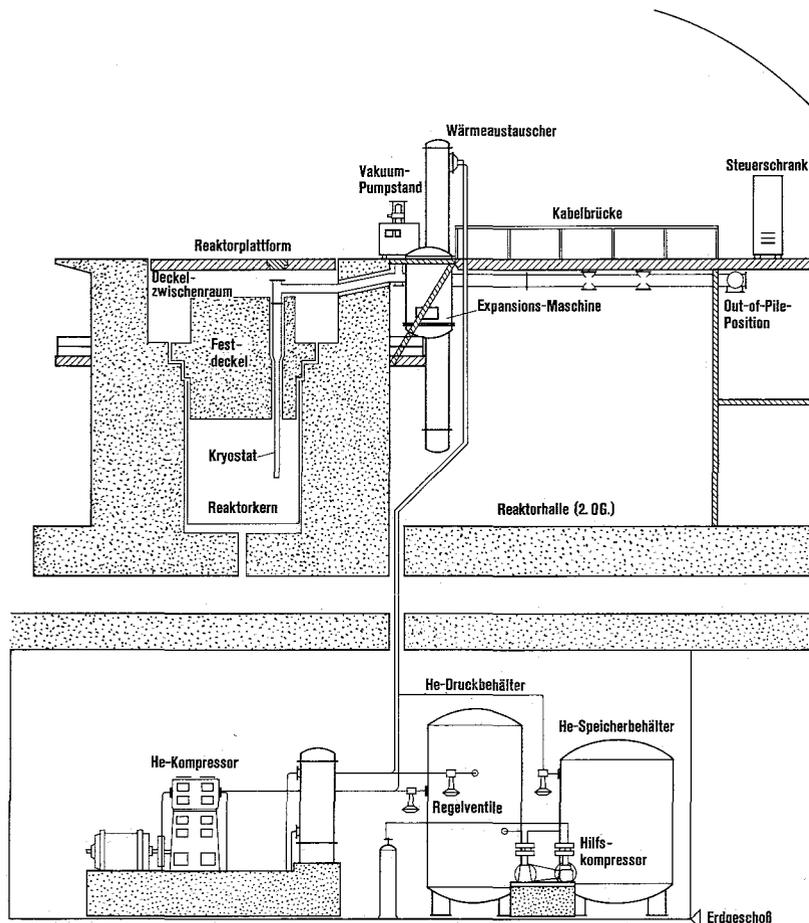


Fig. 4: Anordnung der Anlage am Reaktor

Fig. 4: Assembly of the main components in the reactor building

Der Vakuumraum des Versuchseinsatzes im Reaktor wird bei Ausfall der Kühlleistung vom übrigen Vakuumssystem getrennt und mit Helium geflutet. Die im Kryostat entstehende Gamma-Heizleistung wird dann durch Wärmeleitung über das Helium abgeführt; damit wird eine möglicherweise gefährliche Temperaturerhöhung vermieden.

3.3 Anordnung am Reaktor

Den räumlichen Aufbau der Anlage am Reaktor zeigen Fig. 4 und 5. In einem Raum im Erdgeschoß sind Kompressor, Hilfskompressor, die beiden Gasspeicherbehälter und die Heliumflaschenbatterie aufgestellt. Von hier führen die Hoch- und Niederdruckleitung zum Wärmeaustauscher, der ebenso wie die Expansionsmaschine (beide in ihren Vakuumbehältern) an der Außenwand des biologischen Schirms am Reaktor hängt. Durch den Deckelzwischenraum verbinden kalte Rohrleitungen den Ausgang der Expansionsmaschine mit dem Versuchseinsatz in dem vertikalen Prüfkanal des Reaktors. Zur Out-of-Pile-Position am Umgang der Reaktorhalle führt unterhalb einer Kabelbrücke ebenfalls eine kalte Rohrleitung. Die Kabelbrücke nimmt die elektrischen Meß- und Steuerleitungen zum zentralen Steuerschränk auf, der auf dem Reaktorumfang aufgestellt ist. Von dort aus besteht ein guter optischer Kontakt zwischen dem Operateur am Steuerschränk und den Experimentatoren auf dem Reaktordrehdeckel und am Meßtisch, der ebenfalls auf dem Umgang steht. Der Vakuumzustand ist der Kürze der Saugleitung wegen nahe an den Vakuumkesseln auf der Reaktorplattform installiert (Fig. 5).

3.4 Steuer- und Sicherheitsanlagen

Alle zur Überwachung und Steuerung notwendigen Bedienungselemente, Meßinstrumente, Störsignale und elek-

trischen Sicherheitsschaltungen sind in einem zentralen Steuerschränk für den Kreislauf und in einem Vakuumsteuerschränk untergebracht.

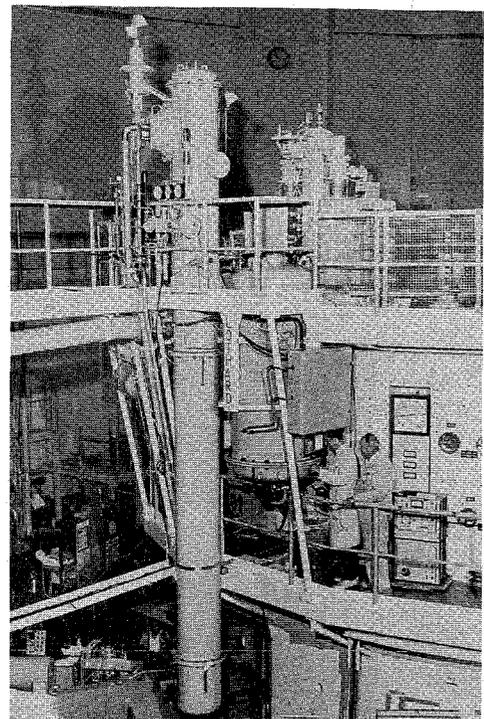


Fig. 5: Wärmeaustauscher, Expansionsmaschine und Vakuumzustand am Reaktor

Fig. 5: View of heat exchanger, expansion engine shells, and vacuum pump

Neben der konventionellen, direkten Absicherung aller Anlagenteile nach den Regeln der Technik sind zusätzlich die in den Reaktorkern führenden Rohrleitungen des Kryostaten durch zwei unabhängige Schaltkreise gegen Druck- und Temperaturüberschreitung geschützt. Eine Temperaturüberschreitung im Kryostaten führt zum Reaktorschnellschluß, um mit Sicherheit das Abschmelzen von Kryostatteilen zu verhindern.

Eine zusätzliche Gefährdung des Reaktorkerns könnte durch eine Luft-eisexplosion am Kryostaten erfolgen [1, 2]. Dabei handelt es sich um folgenden Vorgang: Bei der Bestrahlung von fester, ausgefrorener Luft im Strahlenfeld eines Reaktors entstehen offensichtlich Radikale, wie O oder N, oder unbeständige Verbindungen mit diesen, wie z. B. O₃, die nur bei tiefen Temperaturen stabil sind. Beim Aufwärmen können solche Gebilde explosionsartig reagieren. Es kann zunächst nicht ausgeschlossen werden, daß bei kaltem Kryostaten durch ein Leck im oberen, nicht von D₂O umgebenen Teil des Vakuummantelrohres Luft an die kalten Rohrleitungen im Reaktorkern gelangt und dort ausfriert. Nach dem Abschalten der Anlage im Anschluß an einen Dauerbetrieb wäre dann eine Explosion möglich. Nach einem Vorschlag von Schilling und Meißner [4] wurden deshalb an zwei geeigneten Stellen Metallspiegel gut wärmeleitend mit kalten Rohrleitungen verbunden, so daß an den Leitungen- und Spiegeln ausfrierende Luft die Spiegeloberfläche trüben müßte. Die Reflektivität der Spiegel wird optisch-elektronisch überwacht und führt bei Unterschreitung eines Grenzwertes zum Abschalten der Anlage und zu einem Reaktorschnellschluß. Auf diese Weise wird ein Eindringen und Ausfrieren von Luft im Spaltzonenbereich des Versuchseinsatzes rechtzeitig erkannt und eine Explosion verhindert.

Eine Gefährdung von Personen durch im Heliumkreislauf bei Bestrahlung im Kryostaten erzeugtes radioaktives Tritium ist denkbar. Es konnte jedoch nach einem Dauerbetrieb von 3 Wochen, übereinstimmend mit den Erfahrungen am FRM [3] und offenbar aus den in [3] dargelegten Gründen, praktisch kein aktives Tritium im Kreislauf-Helium nachgewiesen werden. Trotzdem wird die Aktivität des Kreislauf-Heliums turnusmäßig kontrolliert.

Die nach der Bestrahlung stark radioaktive Meßprobe wird beim Experimentieren durch eine Bleiflasche auf dem Reaktordeckel abgeschirmt. Nach Abschluß der Versuche wird die Probe in eine transportable Bleiflasche gezogen. Beim Steckenbleiben der Probe können Versuchseinsatz und Meßeinrichtung in eine große Abschirmflasche gezogen und entfernt werden.

3.5 Kälteleistung der Anlage

Folgende Temperaturen werden laufend gemessen: Ein- und Auslaßtemperatur der Expansionsmaschine (Gasthermometer und Widerstandsthermometer), Temperatur der Probe, des aus dem Kryostaten rückströmenden Gases und Temperaturverteilung am Wärmeaustauscher (Thermoelemente). Die Anlage erreicht bei abgeschaltetem Reaktor etwa 15 h

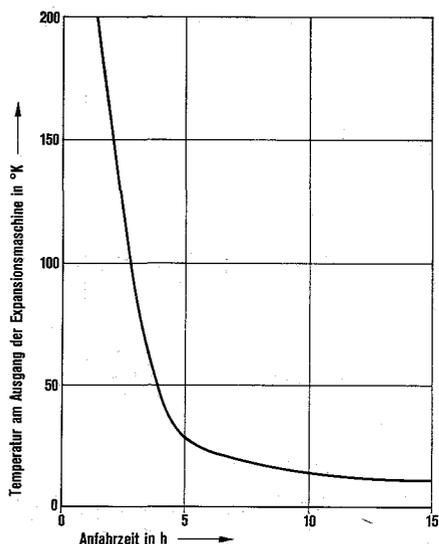


Fig. 6: Zeitlicher Temperaturverlauf beim Anfahren der Anlage

Fig. 6: Time-temperature dependence after start-up of the refrigerator

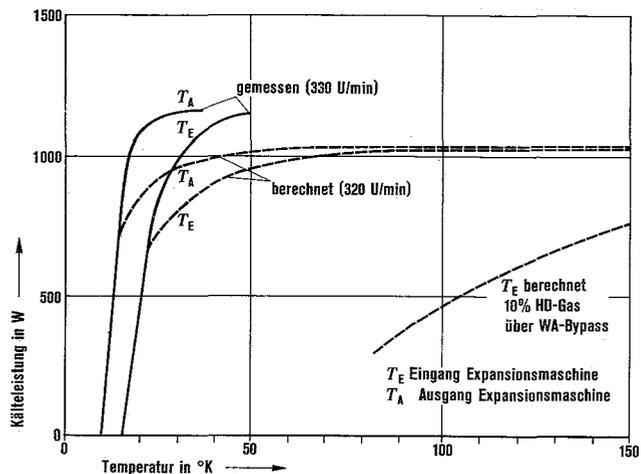


Fig. 7: Kälteleistung der Anlage bei verschiedenen Temperaturen

Fig. 7: Cooling power of the facility as a function of temperature

nach Anfahren der Expansionsmaschine die tiefste Temperatur von 11 °K am Ausgang der Expansionsmaschine. Den Temperaturverlauf während dieser Zeit zeigt Fig. 6. Die sich einstellenden Endtemperaturen an der Expansionsmaschine bei verschiedenen elektrisch eingeleiteten Leistungen zeigt im Vergleich zur theoretischen Leistungs-Temperatur-Kurve Fig. 7. In das Diagramm eingezeichnet ist noch der Temperatur-Leistungs-Verlauf beim Zumischen eines bestimmten warmen Heliumgasstromes hinter dem Wärmeaustauscher bei geöffnetem Wärmeaustauscher-Bypass. An der Probe im Reaktorkern wurde bei 12 MW Reaktorleistung eine Temperatur von 12 °K gemessen. Im Meßkryostaten ließen sich durch Regeln des Gasstromes und elektrisches Einheizen Temperaturen zwischen 12 °K und 250 °K mit Einstellzeiten zwischen 1 und 10 min und einer Genauigkeit von etwa 1% einstellen und halten.

4. Experimente

Auf den Versuchseinsatz kann man, wie erwähnt, oberhalb des Meßkryostaten verschiedene Meßeinrichtungen zur Untersuchung der bestrahlten Probe im Meßkryostaten anflanschen. Im ersten durchgeführten Experiment wurde hier eine Zugprüfmaschine aufgesetzt. Es handelt sich dabei um eine zweispindlige Zugmaschine mit elektronischer Kraftmessung in einem heliumdichten Gehäuse. Die Maschine ist, vom Flansch aus gemessen, 28,5 cm hoch; sie wird von einem Motor mit Getriebe von außen angetrieben. Die Probe wird mittels einer Edelstahl-Kapillare (3 mm × 0,1 mm) von oben durch die Maschine eingeführt und in die Bestrahlungs- oder die Meßposition geschoben. Bei den ersten Versuchen wurde die kritische Schubspannung von Metall-Einkristallen als Funktion der Neutronenfluenz und nach dem Ausheilen bei verschiedenen Anlaßtemperaturen gemessen². Die längste Bestrahlungszeit betrug dabei 122 h. Insgesamt ist die Anlage über mehrere Wochen störungsfrei gelaufen. Zur Erweiterung der Untersuchungsmöglichkeiten ist eine Entnahmeverrichtung in Vorbereitung, die eine Entnahme und Überführung der kalten Probe in flüssiges Helium gestattet, so daß nach der Bestrahlung auch Messungen durchgeführt werden können, die eine höhere Temperaturkonstanz verlangen, als sie im Gasstrom zu erreichen ist.

² Ein ausführlicher Bericht über Einzelheiten der Versuchsanlage und die Ergebnisse dieser Versuche erfolgt an anderer Stelle.

Anhang: Berechnungsverfahren für den Gegenstromwärmeaustauscher

Berechnungsunterlagen für Wärmeaustauschrohre des hier verwendeten Typs lagen bisher nur für relativ einfache Rohre mit zwei Ringräumen mit jeweils nur einer Lage von Kupferwendeln vor. Unsere Berechnungen für die in Abschnitt 3.2.2 erläuterten und in Fig. 2 dargestellten Rohre schließen sich eng an diese in [5] veröffentlichten Unterlagen an.

1. Verteilung des Niederdruckgasstroms auf die Ringräume II und II'

Die Aufteilung des Niederdruckgasstroms in die beiden Räume II und II' richtet sich nach dem Strömungswiderstand. Der Druckabfall Δp über die Länge Δx folgt der allgemeinen Beziehung

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} = \psi(Re) \frac{\rho w^2}{2 d_g} \quad (1)$$

wobei ρ die Dichte des Gases, w die Strömungsgeschwindigkeit und d_g der gleichwertige hydraulische Durchmesser ist. Dieser wird, wie üblich, aus dem freien Volumen des Gasraums pro Längeneinheit V und der ebenfalls auf die Längeneinheit bezogenen benetzten Oberfläche F nach der Beziehung $d_g = 4V/F$ ermittelt. Die Widerstandszahl ψ ist eine Funktion der Reynoldsschen Kenngröße

$$Re = \rho w d / \eta \quad (2)$$

(η dynamische Viskosität). Für $\psi(Re)$ gilt für den vorliegenden Rohrtyp empirisch [5]

$$\psi(Re) = 1,904 Re^{-0,20} \quad (3)$$

Berücksichtigt man, daß der Druckabfall in den beiden Teilgasströmen derselbe sein muß und daß die Materialkenngrößen des Gases in beiden Teilströmen dieselben sind, so erhält man aus Gl. (1), (2) und (3) das Verhältnis der Strömungsgeschwindigkeiten und daraus auch das für den Massendurchsatz $W = \rho w V$ in den beiden Gasräumen:

$$\frac{W_{II}}{W_{II'}} = \frac{V_{II} w_{II}}{V_{II'} w_{II'}} = \frac{V_{II}}{V_{II'}} \left(\frac{d_{gII}}{d_{gII'}} \right)^{0,67} \quad (4)$$

Die Indices I, II und II' bezeichnen hier und im folgenden stets die in den entsprechend gekennzeichneten Gasräumen (Fig. 2) geltenden Größen.

Die Aufspaltung der Teilgasströme ist somit durch die geometrischen Abmessungen der Rohre gegeben. Im vorliegenden Falle ergab sich $W_{II}/W_{II'} = 0,31$.

2. Wärmeübergangszahlen

Zur Ermittlung der Wärmeübergangszahlen α zwischen Gas und Rohrwand für die drei Gasräume wurde in Anlehnung an [5] von der vereinfachten Nusselt-Gleichung

$$Nu = m Re^n Pr^{1/3} \quad (5)$$

mit

$$Nu = \alpha d_g / \lambda, \quad (6)$$

$$Pr = c_p \eta / \lambda \quad (7)$$

(λ Wärmeleitfähigkeit des Gases, c_p spezifische Wärme bei konstantem Druck) ausgegangen. Die Konstanten wurden für die vorliegende Geometrie aus Experimenten zu $m = 0,118$ und $n = 0,70$ bestimmt [5]. Mit diesen Konstanten, den Strömungsgeschwindigkeiten nach Gl. (4), den bekannten geometrischen Daten der Rohre und den aus der Literatur [6-9] entnommenen Materialkennwerten λ, η und c_p für die beiden Drücke im interessierenden Temperaturbereich von 15°K bis 300°K wurden die Übergangszahlen α_I, α_{II} und $\alpha_{II'}$ in Abhängigkeit von der Temperatur T nach Gl. (5) berechnet.

3. Wärmedurchgangszahlen und Rippenwirkungsgrad

Die für den Wärmeaustausch zwischen den Gasräumen maßgebenden, auf die Flächeneinheit der glatten Trennwände bezogenen Wärmedurchgangszahlen k erhält man bei Vernachlässigung des Widerstandes der Rohrwände aus der Summe der »Widerstände« beim Wärmeübergang auf beiden Seiten der Trennwände. Für den Wärmedurchgang von I nach II gilt

$$\frac{1}{F_{I/II} k_{I/II}} = \frac{1}{F_I \eta_{RI} \alpha_I} + \frac{1}{F_{II} \eta_{RII} \alpha_{II}} \quad (8)$$

Dabei bezeichnen $F_{I/II}$ die Oberfläche der (glatten) Trennwand zwischen den Kanälen I und II pro Längeneinheit des Rohres, F_I bzw. F_{II} wie oben die gesamten benetzten Oberflächen der Gasräume und η_R den jeweiligen Rippenwirkungsgrad. Für den Wärmedurchgang durch die Trennwand zwischen den Kanälen I und II' gilt ebenfalls Gl. (8), wobei lediglich Index II durch II' zu ersetzen ist.

Zur Berechnung der Rippenwirkungsgrade denkt man sich die Blechwendeln durch stegförmige gerade Rippen ersetzt, die die gleiche Dicke a und die gleiche »Breite« h (vgl. Fig. 8) wie die Wendeln haben und deren Länge b gleich dem halben mittleren Umfang der Wendeln mal der Anzahl der Wendelagen im Ringraum ist (Fig. 8). Die »Ersatzrippen« in den Ringräumen II und II' werden wie »freie« rechteckige Rippen behandelt, die nur von der Trennwand zum Ringraum I hin durch metallische Leitung Wärme aufnehmen. Hierfür ergibt sich als Rippenwirkungsgrad [10]

$$\eta_{RII,II'} = \frac{\tanh \mu b}{\mu b} \quad (9)$$

mit

$$\mu = \sqrt{\frac{2 \alpha (h + a)}{\lambda_R \cdot a \cdot h}} \quad (10)$$

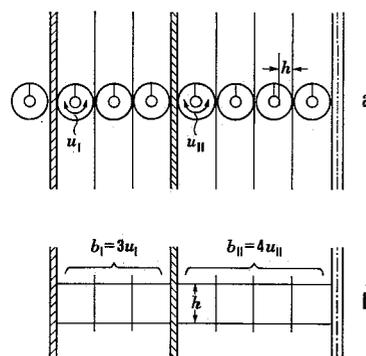


Fig. 8: Zur Berechnung des Rippenwirkungsgrades. a) Schnitt durch die tatsächliche Anordnung, b) Schnitt durch die Ersatzanordnung

Fig. 8: Schematic diagram used for calculating the fin efficiency. a) Actual fin assembly, b) equivalent bar fins

λ_R ist dabei die Wärmeleitfähigkeit des Rippenmaterials. Den Rippen des Ringraumes I wird durch beide Trennwände Wärme entzogen. Berücksichtigt man das dadurch veränderte Temperaturprofil in den Rippen, so erhält man

$$\eta_{RI} = \frac{2}{\mu b} \left(\frac{\cosh \mu b - 1}{\sinh \mu b} \right) \quad (11)$$

mit μ nach Gl. (10). Der Tatsache, daß bei symmetrischer Temperaturverteilung in den Rippen des Raums I die eine Hälfte der benetzten Oberfläche die von ihr aufgenommene Wärme zum Kanal II, die andere Hälfte zum Kanal II' abführt, trägt der Faktor $1/2$ im ersten Glied der rechten Seite von Gl. (8) Rechnung.

Um zu berücksichtigen, daß keine durchgehenden Kupferrippen vorhanden sind, sondern die Rippen mehrfach durch die Löt-schichten zwischen den einzelnen Wendeln und den Wänden unterbrochen sind, wurde für λ_R in Gl. (10) ein nach der Beziehung

$$\frac{1}{\lambda_R} = \frac{1}{\lambda_W} + \frac{0,06}{\lambda_{Lot}} \quad (12)$$

gemittelter Wert eingesetzt.

4. Temperaturverlauf im Wärmeaustauscher

Der Berechnung des Temperaturverlaufs wurden aus der Literatur zusammengestellte Diagramme über den Verlauf der spezifischen Enthalpie i von Helium für die beiden verwendeten Drücke zugrundegelegt. Da die beiden Kurven nicht parallel verlaufen (Abweichungen vom idealen Gasgesetz) kann die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Gasströmen am Tieftemperaturende (auch bei unendlich langem Wärmeaustauscher) nicht beliebig klein gewählt werden. Der verwendete Wärmeaustauscher wurde für eine Temperaturdifferenz am kalten Ende

$$T_I - T_{II} = T_I - T_{II'} = 3,9 \text{ grad}$$

berechnet, was einer Temperaturdifferenz am warmen Ende von 1,5 grad entspricht.

Unter Vernachlässigung von Verlusten durch Wärmeabstrahlung nach außen und durch Wärmeleitung längs des Wärmeaustauschers erhält man aus der Bilanz der Wärmeströme die Enthalpieänderung, die entlang der Strecke dx (x Längskoordinate am Wärmeaustauschrohr) in den Teilgasströmen eintritt:

$$di_I = \frac{1}{W_I} [k_{I/II} F_{I/II} (T_{II} - T_I) + k_{I/II'} F_{I/II'} (T_{II'} - T_I)] dx, \quad (13)$$

$$di_{II} = \frac{1}{W_{II}} k_{I/II} F_{I/II} (T_I - T_{II}) dx, \quad (14)$$

$$di_{II'} = \frac{1}{W_{II'}} k_{I/II'} F_{I/II'} (T_I - T_{II'}) dx. \quad (15)$$

Die gekoppelten Differentialgleichungen (13) bis (15) wurden schrittweise numerisch gelöst. Ausgehend von $T_I = 20^\circ\text{K}$ und $T_{II} = T_{II'} = 16,1^\circ\text{K}$ wurden für kleine Intervalle Δx nach Gl. (13) bis (15) jeweils die zugehörigen Werte für Δi_I , Δi_{II} und $\Delta i_{II'}$ berechnet und aus den i, T -Kurven die Temperaturen T_I , T_{II} und $T_{II'}$ am Ende des Intervalls ermittelt. Mit diesen Temperaturwerten wurden sodann die Enthalpieänderungen im nächsten Intervall der Länge Δx berechnet. Dieses Verfahren wurde bis $T_I = 295^\circ\text{K}$ fortgesetzt. Die Summe aller Δx -Intervalle gibt dann die Gesamtlänge des Wärmeaustauschers, im vorliegenden Fall 22 m.

Die Richtigkeit der Berechnungen wurde nicht durch Messungen im einzelnen nachgeprüft. Die Tatsache, daß die gemessene Kälteleistung der

gesamten Anlage höher ist als die berechnete (Fig. 7), spricht jedoch für die Zuverlässigkeit des Berechnungsverfahrens für den Wärmeaustauscher. (Eingegangen am 21. 1. 1966)

Literatur

- [1] Coltman, R. R., T. H. Blewitt und T. S. Noggle: Rev. Sci. Instr. **28**, 375 (1957)
- [2] Bochirol, L.: Les irradiations neutroniques à basse température au Centre d'Études Nucléaires de Grenoble. Bericht bei IAEA-Tagung, Bukarest 1964
- [3] Doll, R., H. Meißner u. a.: Zeitschr. angew. Physik **17**, 321 (1964)
- [4] Schilling, W., und H. Meißner: Kerntechnik **5**, 252 (1963)
- [5] Trumpler, P. R., und B. F. Dodge: Trans. Am. Inst. Chem. Eng. **43**, 75 (1947)
- [6] Keesom, W. H.: Helium. Amsterdam, London, New York, Princeton: Elsevier Publ. Comp. 1942
- [7] Scott, R. B.: Cryogenic Engineering. Princeton: D. van Nostrand 1959
- [8] S-T-Diagramm des Institut International de Froid, Leiden 1941
- [9] Chelton, D. B., und D. B. Mann: Cryogenic Data Book. Boulder, Colorado: National Bureau of Standards, Cryogenic Engineering Laboratory 1956
- [10] Hausen, H.: Wärmeübertragung im Gegenstrom, Gleichstrom und Kreuzstrom. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer-Verlag 1950