

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM
KARLSRUHE**

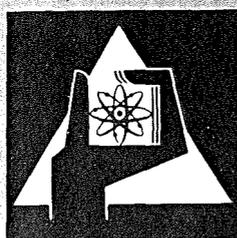
Dezember 1972

KFK 1684

Institut für Experimentelle Kernphysik

**Heliumbad-Bestrahlungsanlage für supraleitende Materialien mit
25 MeV Protonen, 50 MeV Deuteronen oder 100 MeV α -Teilchen**

H. Becker, H.K. Katheder, E. Seibt, S. Steinacker



**GESELLSCHAFT
FÜR
KERNFORSCHUNG M.B.H.**

KARLSRUHE

Als Manuskript vervielfältigt

Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor

GESELLSCHAFT FÜR KERNFORSCHUNG M. B. H.
KARLSRUHE

KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

KFK 1684

Institut für Experimentelle Kernphysik

Heliumbad-Bestrahlungsanlage für supraleitende Materialien mit
25 MeV Protonen, 50 MeV Deuteronen oder 100 MeV α -Teilchen

H. Becker, H.K. Katheder, E. Seibt, S. Steinacker

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H. Karlsruhe

Zusammenfassung

Am Karlsruher Isochronzyklotron wurde eine Heliumbad-Bestrahlungsanlage aufgebaut. Mit dieser Anlage können supraleitende und andere Materialien mit 25 MeV Protonen, 50 MeV Deuteronen oder 100 MeV α -Teilchen im flüssigen Helium (4,2 K) bestrahlt werden. Die durch strahlungsinduzierte Gitterdefekte verursachten Eigenschaftsänderungen der bestrahlten Materialien werden ohne Aufwärmung der Proben im gleichen He-Bad ausgemessen. Der Teilchenstrahl kann am Ort der Probe zwischen 3 und 10 mm Strahlfleckdurchmesser fokussiert werden. He-Verlust- und Strahlbelastungsmessungen an NbTi-Mehrkernleiterproben liefern erste Ergebnisse. Die Anlage wurde mit Strahlströmen bis zu 2 μ A Deuteronen und 1,5 μ A α -Teilchen betrieben. Die He-Verdampfungsrate für 100 MeV α -Teilchenbestrahlung beträgt mit Probe (55 ± 6) l/ μ Ah. Ein geeichtes Temperaturmeßsystem registriert während der Bestrahlung die Temperaturerhöhung des bestrahlten Probenteiles.

Abstract

"Helium-Bath Irradiation Facility for Superconducting Materials with 25 MeV Protons, 50 MeV Deuterons or 100 MeV α -Particles"

An experimental setup for helium-bath irradiation at the Karlsruhe isochronous cyclotron was built. Superconductors and other materials can be irradiated in liquid helium at 4.2 K with 25 MeV protons, 50 MeV deuterons or 100 MeV α -particles. To study the nuclear irradiation influence on the superconductor properties the specimens can be measured at 4.2 K in the same bath. The particles beam can be focussed at the position of the specimen to a beam spot area of 3 to 10 mm in diameter. Irradiation dose and He-loss measurements with NbTi multicore conductors have been performed. The apparatus ran some tests with up to 2 μ A deuteron and 1.5 μ A α -particle current. For 100 MeV α -particle irradiation the liquid helium losses come to (55 ± 6) l/ μ Ah. The temperature rise in the beam spot centre of the irradiated specimen can be recorded by a calibrated temperature measurement system.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	
1. Einleitung	1
2. Beschreibung der Heliumbad-Bestrahlungsanlage	3
2.1 Allgemeiner Überblick	4
2.2 Der Heliumbad-Bestrahlungskryostat	6
2.3 Die Helium-Rückverdichtungsanlage	9
2.4 Überwachungs- und Meßeinrichtungen	10
3. Funktionserprobung und Meßergebnisse	11
3.1 Der Bestrahlungsvorgang	11
3.2 Helium-Verlustmessungen	13
3.3 Temperaturmessungen	14
3.4 Sicherheitsvorkehrungen	16
4. Schlußbemerkungen	18
Literaturhinweise	21
Abbildungen	22

1. Einleitung

Für den Bau supraleitender Magnete für Teilchenbeschleuniger ist es nicht nur wichtig zu wissen, welche supraleitenden Materialien hohe kritische Stromdichten im Bereich hoher Magnetfeldstärken besitzen, sondern auch, welchen Einfluß spezifische Gitterstörungen durch Nuklearbestrahlung auf die Tieftemperatureigenschaften der verwendeten Supraleiter haben.

Aus zwei Gründen sind diese Untersuchungen von Kristallgitterdefekten durch Bestrahlung mit energiereichen Teilchen interessant: Erstens sollen Messungen über das Verhalten der Supraleitungseigenschaften des Magnetmaterials im Bereich hoher Strahlungsdosen bis zu 10^{12} rad Aufschluß geben über verursachte Eigenschaftsänderungen der Supraleiter, die sich ungünstig auf die Leistungsfähigkeit der aus diesem Material hergestellten Magnete auswirken könnten. Solche Strahlungsdosen sind z.B. beim geplanten 1000 GeV Protonen-Beschleunigerprojekt in CERN voraussichtlich pro Betriebsjahr zu erwarten (s. Abschnitt 4). Zweitens sollten gezielte Bestrahlungsuntersuchungen mit energievaryablen, leichten und schweren Teilchen einen neuen Weg weisen, Methoden zur Erzeugung möglichst vieler und wirksamer Haftstellen für magnetische Flußlinien zu finden, die mit den schon bekannten Methoden wie Kaltverformung von Drahtmaterialien, bestimmte Wärmebehandlungen, chemische Zusätze in Legierungen u.a. vergleichbar sind. So gibt beispielsweise eine neuere Bestrahlungsarbeit von dünnen Nb-Folien mit 10 bis 40 MeV-Schwerionen (Stickstoff-Ionen) bei Zimmertemperatur¹⁾ einen ersten Hinweis auf beträchtliche Erhöhungen der kritischen Stromtragfähigkeiten nach erfolgter Bestrahlung.

Während es viele Bestrahlungsexperimente mit schnellen Reaktor-neutronen²⁾ gibt, sind erst wenige mit Protonen³⁾, Deuteronen⁴⁾ und noch schwereren Teilchen hoher Energie bekannt. Der Vorteil der energiereichen Ionenbestrahlung liegt wegen des relativ großen Impulsübertrages an das Atomgittersystem in der hohen

Dichte der erzeugten Gitterstörungen selbst nach bereits kurzer Bestrahlungsdauer. Außerdem schafften Bestrahlungsuntersuchungen mit monoenergetischen Ionen eindeutigere Voraussetzungen für das Studium der Korrelation von strahlungsinduzierten Gitterdefekten und der zu beobachtenden Eigenschaftsänderungen an Supraleitern im Gegensatz zu Untersuchungen mit Reaktorneutronen mit breiter Energieverteilung.

Am Karlsruher Isochronzyklotron wurde eine Tieftemperatur-Bestrahlungsanlage aufgebaut, die es gestattet, supraleitende und andere Materialien mit 25 MeV Protonen, 50 MeV Deuteronen und 100 MeV α -Teilchen zu bestrahlen. Die angegebenen Energien sind Maximalenergien und können in gewissen Bereichen mittels Be-Absorber (Energievariator) variiert werden. Im Gegensatz zu anderen Bestrahlungsapparaturen⁴⁾ erfolgt die Bestrahlung der Proben direkt im He-Bad bei 4,2 K. Anschließend können - ohne vorherige Aufwärmung der Proben - ihre durch strahlungsinduzierte Gitterdefekte verursachten Eigenschaftsänderungen im gleichen Kryostat bei 4,2 K ausgemessen werden.

Mit dieser Anlage sollen zunächst Messungen folgender Kenngrößen und Eigenschaften vor und nach der Bestrahlung durchgeführt werden:

1. Elektrisch-magnetische Supraleitungsgrößen wie kritische Transportstromdichte $J_c(H)$ in Abhängigkeit von einem äußeren Magnetfeld, Magnetisierung $M(H)$, Hysteresisverluste $V_{Hy}(H)$, spezifischer elektrischer Widerstand ρ und kritische Magnetfelder H_{c1} , H_{c2} ,
2. thermische Eigenschaften von Magnetmaterialien wie die Änderung der kritischen Temperatur T_c bei Teilchenbestrahlung verschiedener Masse und Energie, ebenso die Erwärmung ΔT von Supraleitungsmaterialien (Kabelmaterialien) im flüssigen Helium unter Bestrahlungseinfluß,
3. elektrische und thermische Eigenschaftsänderungen von Matrixmaterialien wie Cu, Al, CuNi u.a., und

4. Eigenschaftsänderungen von Vergußmitteln, z.B. die beim Magnetbau verwendeten kunststoffartigen Bindemittel mit ihren Füllstoffen sowie metallische Lote.

In diesem Bericht werden im 2. Abschnitt die apparativen und experimentellen Details der Bestrahlungsapparatur und der zugehörigen He-Rückverdichtungsanlage beschrieben. Im 3. Abschnitt werden über Meßergebnisse bei der Funktionserprobung der Anlage berichtet, während der 4. Abschnitt allgemeine Schlußbemerkungen enthält.

2. Beschreibung der Heliumbad-Bestrahlungsanlage

Zur Durchführung von Bestrahlungsexperimenten an supraleitenden Materialien mit geladenen Teilchen definierter Energie und Strahlintensität wurde eine Anlage aufgebaut, die aus 3 Hauptteilen besteht:

1. Heliumbad-Bestrahlungskryostat,
2. Helium-Rückverdichtungsanlage,
3. Überwachungs- und Meßeinrichtungen.

Diese Einrichtungen sind aus Raum- und Strahlsicherheitsgründen in drei verschiedenen Räumen untergebracht. So zeigt Abb. 1 eine Teilansicht des Bestrahlungskryostaten in der Experimentierhalle des Karlsruher Zyklotrons.

Beim Aufbau der Anlage wurden zwei Funktionsmerkmale besonders berücksichtigt:

- a) Die Bestrahlung von supraleitenden Proben in dieser Anlage soll mit unterschiedlich schweren Teilchen wie Protonen, Deuteronen, α -Teilchen und evtl. sogar Li-Ionen bei Energien von 25 MeV/Nukleon möglich sein, ohne daß die Teilchen in der Probe und im flüssigen Helium vollständig absorbiert werden. Dieser für Strahltransmissions- und Ladungsmessungen wichtige Sachverhalt fordert wegen der unterschiedlichen

Reichweite der Teilchen im flüssigen Helium und im Probenmaterial ein geeignetes, leicht auswechsel- und montierbares Strahlfenstersystem im Bestrahlungskryostaten.

- b) Für gezielte Bestrahlungsmessungen hinsichtlich des Strahlortes und der Intensität wird eine genaue und kontrollierbare Strahlführung benötigt. Diese Forderung setzt eine reproduzierbare, mechanische Justierbarkeit des Bestrahlungskryostaten voraus.

Die Berücksichtigung dieser experimentellen Gesichtspunkte gestaltete den im folgenden beschriebenen Aufbau recht schwierig.

2.1 Allgemeiner Überblick

Eine schematische Übersicht der 3 Hauptteile der Bestrahlungsanlage wird in Abb. 2 gegeben. Das Isochronzyklotron liefert einen externen Strahl für Deuteronen, α -Teilchen und Protonen (hier als H_2^+ -Molekül-Ionen) bis zu einer Energie von 25 MeV/Nukleon und einer maximal extrahierbaren Intensität von 5 bis 10 μA . Die Energieschärfe beträgt etwa 0,6%. Dieser Strahl durchläuft ein Strahlführungssystem im Zyklotronbunker (Ablenkmagnet, 2 Quadrupoldupletts und Schaltmagnet) und tritt durch eine Abschirmmauer (Abb. 2, links) in die Experimentierhalle ein. Mit Hilfe der 3 Quadrupollinsen L1 bis L3 wird der Strahl entweder auf einen ZnS-Schirm KS2 zur Beobachtung bzw. Beam-stop BS zur Messung des Strahles oder auf die Probe selbst im Bestrahlungskryostaten fokussiert. Die strahldefinierende Cu-Lochblende ermöglicht dabei eine genaue Lokalisierung des Strahls auf die Probe. Die in den Strahlengang einklappbaren Szintillationsschirme KS1 bis KS3 dienen mit Hilfe von Fernsehkameras zur visuellen Einstellung und Überwachung der Strahlfokussierung. Ein fernbedienbarer Beam-stop BS erlaubt die Strahlstrommessung vor Eintritt in den Bestrahlungskryostaten. Der nichtabsorbierte Strahl wird für eine integrierende Strommessung in einem Faradaykäfig FK aufgefangen, der zur Herabsetzung der Strahlungsaktivität mit einer Schwerbetonabschirmung umgeben ist. Die Abführung der Strahlungsleistung (bis

0,1 kW) im Faradaykäfig geschieht in einem separaten Kühlkreislauf mit bidestilliertem Wasser.

Zur Evakuierung des Kryostaten (Isoliervakuum $< 10^{-6}$ Torr bei He-Betrieb) dient ein Turbo-Molekularpumpstand (TVP 250; PFEIFFER-BALZERS). Eine Vorpumpe evakuiert das vakuummäßig getrennte Strahlführungssystem soweit vor (10^{-2} Torr), daß die Verbindung zum Zyklotronvakuum hergestellt werden kann. Die Absicherung der Vakuumsysteme gegenüber Luft- oder He-Einbruch geschieht mit Hilfe von Vakuum-Meßfühlern, welche die beiden elektro-pneumatischen Ventile PV1 und PV2 steuern.

Die Flüssig-Helium-Versorgung erfolgt über eine ca. 5 m lange, teilweise flexible Kaltleitung He-KL von einem He-Aufbewahrungsgefäß (Inhalt 250 l) direkt zum Kryostaten. Die He-Einfüllung wird durch eine 2 Punkt-Füllstandsregelung automatisch gesteuert. Die Flüssig-Stickstoff-Einfüllung geschieht von einem 100 l N_2 -Kaltvergaser aus. Beide Gefäße befinden sich aus Aktivierungsgründen hinter einer weiteren Abschirmwand aus Schwerbeton.

Das im Kryostat anfallende Heliumgas wird über eine Leitung (NW 50) zu einer He-Rückverdichtungsanlage geleitet. Ein Kompressor saugt das in einem Puffervolumen (Gasblase mit $5,6 \text{ m}^3$ Inhalt) befindliche Heliumgas an und drückt es in Druckgasflaschen von je 50 l Inhalt (Kompressionsdruck 150 kp/cm^2). Mittels Gabelstaplertransport wird das komprimierte Gas zur He-Verflüssigungsanlage zurückgebracht.

Für die ständige Kontrolle des bestrahlten Heliums sorgt eine Tritium-Aktivierungsnachweisapparatur. Auch wird der Funktionsablauf der He-Rückverdichtungsanlage überwacht. Störungen werden über ein Warnsystem zur Anzeige gebracht. Ebenfalls überwacht werden das Vakuum- und Kühlwassersystem sowie die automatische He-Einfüllung. Die Meßgrößen bei Bestrahlungsexperimenten werden in verschiedenen Meßeinrichtungen registriert und ihre Meßwerte mittels Drucker und Schreiber erfaßt. Weiter ist die direkte Datenübernahme durch die Rechenmaschine CDC 3100 am Zyklotron geplant.

2.2 Der Heliumbad-Bestrahlungskryostat

Aufbau des Badkryostaten:

Der schematische Aufbau des Bestrahlungskryostaten ist in Abb. 3 dargestellt, während technische Einzelheiten in Abb. 4 und 5 gezeigt werden. Ein Vakuummantel (1) aus Aluminium (Innendurchmesser 415 mm, Wandstärke 5 mm, Höhe 1600 mm) steht fest verbunden mit einer Justierplatte (2) und 4 Stellschrauben mit Fußplatten (3) auf einem in der Höhe verstellbaren Untergestell (4). Diese Fußplatten sind nach allen Seitenrichtungen hin verschiebbar und können nach erfolgter Justierung fixiert werden. Diese Anordnung ermöglicht in einfacher Weise eine optische Einjustierung des Kryostaten auf Strahlrohrachse. Zwei am Kryostatenmantel angebrachte Wasserwaagen (5) in Strahlachse und senkrecht dazu erlauben definierte Korrekturen der Justiereinstellung nach Montagearbeiten am Kryostaten.

An einem V2A-Deckelflansch (6) befindet sich der dünnwandige He-Tank (7) ebenfalls aus V2A (Innendurchmesser 244 mm, Wandstärke 1 mm, Höhe 1540 mm). Um den He-Tank vakuumfest zu gestalten, wurden insgesamt 5 Versteifungsbänder (8) in Abständen von etwa 300 mm aufgeschweißt. Am oberen Teil des He-Tanks dient ein Kupferflansch (9) als Wärmebrücke für einen mit ca. 20 l flüssigem Stickstoff füllbaren Strahlungsschild (10). Der untere Teil des He-Tanks ist mit einem polierten, einwandigen Kupferschild (11) umgeben, der in gutem Wärmekontakt mit dem N₂-Tank (10) verbunden ist. Auf eine Bewicklung des He-Tanks mit Superisolation wurde aus folgenden Gründen verzichtet:

- a) Die statischen Verluste sind gegenüber den Verlusten bei Strahlbetrieb (dynamische Verluste) sehr gering, b) die Superisolation ist empfindlich und besonders im Strahlfensterbereich schwierig aufzubringen, wodurch Montagearbeiten am Kryostaten erschwert werden.

Im Inneren des He-Tanks befindet sich unterhalb der Strahlfenster (12) ein supraleitender Hochfeldmagnet⁵⁾ (13), der an einer justierbaren V2A-Rohr-Aufhängung (14) am Kryostatendeckel (15)

befestigt ist. In der Mitte des Kryostatendeckels kann eine bewegliche, zentrisch geführte Probenhalterung (16) eingebracht werden. Diese Halterung trägt an ihrem unteren Ende die zu bestrahlende Probe, einen ZnS-Szintillationsschirm und einen Beam-stop (17). Gleichzeitig dient die Halterung als Stromzuführung für supraleitende Proben. Transportströme bis zu 1000 A können auf diese Weise in das Innere des Kryostaten geleitet werden. Diese Probenhalterung kann je nach Strahl- oder Meßbetrieb kontinuierlich verfahren werden.

Als weitere Einrichtung am Kryostaten ist der He-Heber (18) zu nennen. Über ein Trichterrohrsystem (19) wird das flüssige Helium bis unter den Magneten geführt. Eine He-Sonde der Firma LINDE (20) dient als Standanzeige des Flüssig-Heliumspiegels. Oben im He-Tank befindet sich ein Strahlungsschild (21) zusammengesetzt aus Polysterol-Hartschaum und polierten Cu-Scheiben (22). Dieser Schild verhindert den direkten Temperatúrausgleich durch Wärmestrahlung vom warmen Kryostatendeckel (15) zum kalten Innenraum des He-Tanks. Zu den Aufbauten des Kryostatendeckels gehören weiter ein Druckanzeigegerät (23) für die Messung der Druckverhältnisse im He-Tank, die Helium-Abdampfleitung (24) und ein Sicherheitsventil (25), welches entstehenden Überdruck im He-Tank abbaut. Zum Schutz gegen Überdruck im Kryostaten ist am äußeren Vakuummantel ein weiteres Sicherheitsventil (26) angeflanscht. Die Überlegungen und Ausführungen zur Sicherheitsüberwachung der gesamten Anlage sind im Abschnitt 3.4 zusammengefaßt.

Das Strahlfenstersystem:

Für den Aufbau der Strahlfensteranordnung (12) waren zwei Gesichtspunkte mitbestimmend:

1. Die Berücksichtigung der unterschiedlichen Reichweite und des Winkelstragglings von Protonen, Deuteronen und α -Teilchen im flüssigen Helium und im Probenmaterial. Für die Konstruktion des Systems bedeutete dies leicht auswechselbare Strahlrohrfenster variabler Länge, wobei das Strahlaustrittsfenster einen der Winkelaufweitung (etwa 5° bei Deuteronen) entsprechend größeren Rohrdurchmesser hat.

2. Die Berücksichtigung der durch die Strahlenbelastung der Fenster auftretenden Gefahrenquellen wie lokale Erhitzung der Strahlfenster, Zerplatzen der Fenster durch Druckstöße, Undichtigkeiten von der flüssigen He-Seite zum Hochvakuum des Isolierraumes.

Ausgeführt wurde ein Strahlfenstersystem wie es Abb. 5 zeigt. Der Teilchenstrahl tritt links in der Abb. 5 durch ein 1. Strahlfenster SF1 (Havar-Folie, Durchmesser 30 mm, Dicke 28 μm) in den Vakuumisolierraum des Kryostaten ein und trifft auf ein 2. Strahlfenster SF2 (Havar-Folie, Durchmesser 30 mm, Dicke 28 μm), das an den Flüssig-Heliumraum grenzt. Die für den Teilchenstrahl anschließende Flüssig-Helium-Strecke beträgt 20 bis 40 mm. Mit Hilfe entsprechend langer Strahlrohreinsätze kann die Länge dieser Strecke je nach Bestrahlungsart und Probendicke eingestellt werden. Grundsätzlich wird sie minimal gehalten, um die He-Verluste nicht unnötig zu vergrößern. Ein 3. Strahlfenster SF3 (Havar-Folie, Durchmesser 40 mm, Dicke 28 μm) bildet das Austrittsfenster, durch das der Strahl den Kryostaten verläßt, um im angeflanschten Faradaykäfig aufgefangen zu werden. Die beiden letzten Folien sind mittels eines Plasma-Schweißgerätes auf elektropolierte V2A-Rohre aufgeschweißt. Ihre He-Dichtigkeit ist besser als 10^{-8} Torr·l/sec. Dagegen wird die 1. Folie zwischen zwei V2A-Flanschen mit Indium gedichtet und kann deshalb nach Alterungszeiten von etwa 20 μAh leicht ausgewechselt werden. Diese Maßnahme ist notwendig, weil dieses Strahlfenster die volle Strahlenbelastung ungekühlt zu tragen hat und die nach jeder Bestrahlung fortschreitende Alterung der Folie (z.B. sichtbare chemische Veränderungen der Folienoberflächen und damit vermutliche Reduzierung ihrer mechanischen Festigkeit) nicht kontrollierbar ist.

In Abb. 6 ist der Strahlenverlauf durch den Bestrahlungskryostaten schematisch eingezeichnet. Angegeben sind die verschiedenen Energien eines Deuteronenstrahles nach Durchtritt von Strahlfenstern bzw. Probenmaterial, hier Nb-Ti (50 Gew.% Ti) -Draht mit 0,4 mm Durchmesser. So verlieren die Deuteronen im 1. Strahlfenster SF1 praktisch keine Energie, jedoch durch die Probe etwa 32% und

ohne Probe d.h. nur im flüssigen Helium 17% ihrer Primärenergie.

Eine Cu-Lochblende (Durchmesser von 3 bis 10 mm) schneidet aus dem Strahlenbündel einen definierten Teil heraus. Durch diese Strahlbegrenzung entsteht auf der Probe ein definierter, reproduzierbarer Strahlfleck, der für bestimmte Messungen (s. Abschnitt 3.2 und 3.3) besonders wichtig ist. Angedeutet ist noch die Strahlaufweitung θ des Deuteronenstrahles, die ohne Probe mit etwa 1° noch relativ gering ist, aber mit einer NbTi-Probe bis 5° anwächst.

2.3 Die Helium-Rückverdichtungsanlage

Die Aufgabe der He-Rückverdichtungsanlage (Firma Leybold-Heraeus GmbH & Co.) ist das bei Bestrahlungsexperimenten anfallende He-Gas aufzufangen, zu komprimieren und in Druckgasflaschen (150 kp/cm^2) abzufüllen. Der hier gewählte Funktionsablauf wird in Abb. 7 dargestellt. Das den Bestrahlungskryostaten verlassende He-Gas wird zunächst über eine Leitung (NW 50) in einem Puffer- volumen (Kunststoffblase aus Copolymer J-22; ca. 1 mm dick) mit etwa $5,6 \text{ m}^3$ Inhalt gesammelt. Von dieser Gasblase führt eine weitere Leitung (NW 50) direkt zu einem lufgekühlten, vier- stufigen Kompressor (W. Poppe GmbH, Kiel-Pries), der mit einer Nennleistung von $50 \text{ Nm}^3/\text{h}$ das He-Gas über einen Ölnebel- filter in Druckgasflaschen preßt. Die Gesamtkapazität von 6 Flaschen- batterien mit je 12 Stahlflaschen beträgt bei einem maximalen Kompressionsdruck von 150 kp/cm^2 etwa 540 Nm^3 He-Gas, das ent- spricht einer Flüssigkeitsmenge von 775 l.

Diese Anlage kann vollautomatisch betrieben werden. Eine Füll- standsanzeige der Gasblase regelt das Ein- bzw. Ausschalten des Kompressors. Die elektrischen Schalt- und Kontrolleinrichtungen sind in einem Hauptbedienungs- schrank zusammengefaßt, während am Meßstand nur Überwachungseinrichtungen mit Warnsystemen instal- liert sind. Besonders geschützt gegen Überdruck wird die Gasblase durch ein Sicherheitsventil, das bei einem Überdruck von 40 mm WS eine Abblaseleistung von mehr als $50 \text{ Nm}^3/\text{h}$ Heliumgas besitzt. Der Druck in der Gasblase wird mit einem Manometer mit Fernanzeige

gemessen (Meßbereich bis 100 mm WS). Über andere Sicherheits- und Überwachungseinrichtungen, wie z.B. der Tritium-Aktivierungsnachweis des bestrahlten Heliums, wird im Abschnitt 3.4 berichtet.

2.4 Überwachungs- und Meßeinrichtungen

Im Rahmen der Tieftemperatur-Bestrahlungsexperimente fordern lange Strahlzeiten zur Erreichung von Strahldosen bis zu 10^{12} rad und mehr die Ausmessung möglichst vieler Kenngrößen an supraleitenden Materialproben. Es ist deshalb vorgesehen, verschiedene Meßeinrichtungen aufzubauen, die unabhängig voneinander die durch nukleare Bestrahlung auftretenden Eigenschaftsänderungen der Materialproben bei 4,2 K registrieren. Abb. 8 zeigt eine Darstellung der geplanten Meßeinrichtungen mit ihren Meßgrößen. An den fünf Meßzweigen lassen sich 3 Einrichtungen (1,4,5) zur Ermittlung von Supraleiter-Kenngrößen erkennen.

Zuerst wurde eine Magnetisierungsmeßapparatur⁵⁾ aufgebaut, um aus der Vielfalt der metallurgisch behandelten Drahtmaterialien, die für den Magnetbau verwendet werden, Kriterien mit Hilfe von Magnetisierungs- und Hysteresisverlustmessungen aufzustellen. Der komplizierte Aufbau eines solchen Drahtmaterials geht aus dem Schliffbild einer Nb-Ti (50 Gew.% Ti) -Probe hervor (Abb. 9). Dieses Probenmaterial wurde für die nachfolgenden Bestrahlungstestläufe verwendet. Es handelt sich um einen Mehrkernleiter mit 130 Filamenten (Filamentdurchmesser 24 μm), die von einer Cu-Matrix umgeben sind. Abb. 10 zeigt die mit der Magnetisierungseinrichtung aufgenommene Hysteresiskurve der unbestrahlten NbTi-Probe. Die aus der Kurve gewonnenen magnetischen Verluste betragen etwa 280 kJ/m^3 .

Bei Bestrahlungsexperimenten integriert ein Ladungsintegrator den Strahlstrom. Mit Hilfe einer Preset-Technik können alle interessierenden Meßgrößen wie J_c , M , T_c u.a. auf die Ladung bzw. der ihr entsprechenden Energieabsorption in der Probe normiert werden. Dadurch ist ein Vergleich der einzelnen Messungen untereinander möglich, zumal wenn die Bestrahlungszeiten in Raten erfolgen.

Eine weitere Einrichtung dient zur Temperaturmessung der bestrahlten Probe bzw. der Temperaturüberwachung von einigen Installationen im He-Tank. So wird z.B. die 1000 A-Stromzuführung im He-Tank an besonders kritischen Stellen mit Temperaturmeßfühlern überwacht. Eine programmierbare Abfragevorrichtung kann in vorgegebenen Zeitintervallen max. 10 Temperaturmeßstellen nacheinander ausmessen und die Ergebnisse speichern. Die Meßeinrichtungen (1) und (4) in Abb. 8 sind geplant oder stehen bereits im Aufbau.

3. Funktionserprobung und Meßergebnisse

Zur Funktionserprobung der Anlage wurden Testmessungen mit 50 MeV Deuteronen und 100 MeV α -Teilchen durchgeführt. Hauptziele dieser Messungen waren erstens die Ermittlung der statischen und dynamischen Heliumverluste und damit die Bestimmung der Leistungsgrenze der Anlage, zweitens die Abschätzung der Temperaturerhöhung einer NbTi-Probe unter Strahlenbelastung. Besondere Beachtung fand das Zusammenspiel der 3 Haupteinrichtungen wie z.B. die He-Rückverdichtungsanlage mit ihren Kontrollsystemen.

3.1 Der Bestrahlungsvorgang

Nach Evakuierung des Isoliervakuumraumes des Bestrahlungskryostaten (Endvakuum 10^{-6} Torr) wird dieser mit flüssigem Stickstoff vorgekühlt. Nachdem sich nach 8 - 10 h eine mittlere Temperatur im He-Tank von etwa 200 K eingestellt hat, wird mit der He-Einfüllung begonnen. Der Einfüllvorgang erfolgt in 2 Stufen wie aus Abb. 11 hervorgeht. Zunächst wird Helium nur bis unterhalb der Strahlfenster eingefüllt, um Strahlfokussierungsmessungen durch den Bestrahlungskryostaten zu ermöglichen. Danach wird aufgefüllt bis zu einem max. Stand von 70 bis 80 cm He, dies entspricht etwa 35 l Helium. Die Füllzeiten der beiden Einfüllstufen betragen ca. 60 bzw. 20 min. Die statischen He-Verluste des Kryostaten wurden aus mehreren Messungen ermittelt und betragen oberhalb der Strahlfenster $2,5 \pm 0,3$ l/h ($1,8 \pm 0,2$ W).

Zwischen Einfüllstufe 1 und 2 werden folgende Strahlfokussierungsmessungen durchgeführt. Für den externen Strahltransport im Zyklotronbunker stehen als Fokussierungsmittel ein Ablenkmagnet, ein Vertikalablenkmagnet, zwei Quadrupoldupletts, eine Korrekturlinse und ein Schaltmagnet zur Verfügung. Mit diesem primären Strahlführungssystem wird der Strahl auf den 1. Klappschirm KS1 hinter der Betonabschirmung fokussiert und auf geometrische Ausdehnung kontrolliert. Das sich anschließende sekundäre Magnet-system (Triplettsystem L1, 2 und 3) ermöglicht in horizontaler wie in vertikaler Richtung eine Abbildung auf den eingefahrenen ZnS-Schirm im He-Tank. Die Strahlfleckgröße kann dabei von 3 bis 10 mm Durchmesser variiert werden. Mit den Klappschirmen KS2 und KS3 wird die Divergenz des Strahles bestimmt. Sie beträgt etwa 3° für Deuteronen bei Fokussierung auf einen Strahlfleckdurchmesser von 3 mm. Mittels Transmissionsmessung am Beamstop BS (s. Abb. 2) kann die Fokussierung des Teilchenstrahles durch diese 11 Magneteinheiten intensitätsmäßig kontrolliert werden. Je nach Maschineneinstellung des Zyklotrons beträgt sie 70 bis 90%. Die Transmission durch den Bestrahlungskryostaten wird über den Faradaykäfig FK mit einem Stromintegrator gemessen und beträgt für Deuteronen etwa 60%.

Nach diesen Messungen wird Helium bis zum maximalen Stand aufgefüllt, die Probe in Bestrahlungsposition eingefahren und bestrahlt. Erreicht der Heliumspiegel eine bestimmte untere Marke (noch oberhalb der Strahlfenster), so wird automatisch Helium eingefüllt, ohne daß der Strahlbetrieb unterbrochen werden muß. Gemessen werden die Bestrahlungszeiten und die im Faradaykäfig aufgefangene Ladung. Anschließend wird die definiert bestrahlte Probe im He-Bad in den unter der Strahlfensterebene hängenden Hochfeldmagneten (max. Feld 7 T, bisher benutztes Feld 4 T; Bohrung 96 mm) abgesenkt und ihre supraleitenden Eigenschaftsänderungen ausgemessen.

3.2 Helium-Verlustmessungen

Durch dynamische Helium-Verlustmessungen wurde der maximal nutzbare Deuteronen- bzw. α -Strahlstrom bei Bestrahlungsversuchen bestimmt. Der Strahlstrom ist begrenzt durch die Heliumgas-Aufnahme der Rückverdichtungsanlage bei stationärem Betrieb. Hierzu wurde die schon erwähnte NbTi-Probe in Schritten von 100 und mehr nA je 16 Minuten lang mit Deuteronen (später mit α -Teilchen) bestrahlt. Die dabei entstehende He-Flüssigkeitsabnahme wurde mit einer geeichten He-Standanzeige gemessen. Die Ergebnisse für Deuteronen und für α -Teilchen sind in den Abb. 12 und 13 dargestellt. Man erhält eine Schar von Ausgleichsgeraden mit unterschiedlicher Steigung, die jeweils für den am Beam-stop BS gemessenen Strahlstrom charakteristisch ist. Infolge der durch die Zyklotronmaschine bedingten starken Strahlintensitätsschwankungen wird der in Klammern gesetzte Strahlstromwert als Mittelwert angegeben, der mit Hilfe des Ladungsintegrators am Faradaykäfig ermittelt wurde. In den Abb. 12 und 13 sind unten die statischen Verluste des Bestrahlungskryostaten eingezeichnet, d.h. die Verluste, die ohne Bestrahlung auftreten. Die eingezeichneten Fehler sind systematische Fehler. Die gestrichelt eingezeichneten, oberen Geraden stellen jeweils die maximale Leistungsgrenze (etwa $65 \text{ Nm}^3/\text{h}$) der He-Rückverdichtungsanlage dar, die bei einem 100 MeV α -Teilchenstrom von $1,5 \mu\text{A}$ nahezu erreicht ist. Für Deuteronen reichen die Maximalströme nach einer Extrapolation bis zu $4 \mu\text{A}$.

Um die Energieabsorption in der bestrahlten NbTi-Probe mittels der He-Verlustmeßmethode zu bestimmen, wurden Verlustmessungen mit und ohne Probe durchgeführt. Abb. 14 zeigt die Ergebnisse für 50 MeV Deuteronen- und 100 MeV α -Teilchen jeweils mit und ohne NbTi-Probe. Die eingezeichneten Geraden sind Ausgleichsgeraden. Bei $1,5 \mu\text{A}$ Deuteronen- bzw. α -Teilchenstrom beträgt der He-Verlust mit Probe 36 ± 3 bzw. $86 \pm 5 \text{ l/h}$. Eine theoretische Abschätzung der He-Verluste ergibt für 50 MeV Deuteronen (100 MeV α -Teilchen) mit einem berechneten Energieverlust von 16 MeV (76 MeV) einen Wert von 30 l/h (75 l/h). Die He-Verdampfungsrate der Bestrahlungsanlage kann für α -Teilchen mit $55 \pm 6 \text{ l}/\mu\text{Ah}$ bis zu einem Maximalstrom von $1,5 \mu\text{A}$ angegeben werden.

Abschließend wird in der Abb. 15 die bei der Bestrahlung absorbierte Strahlleistung in der NbTi-Probe für Deuteronen und α -Teilchen dargestellt. So zeigt die mit dem maximalen α -Strahlstrom ($1,5 \mu\text{A}$) belastete NbTi-Probe eine Leistungsaufnahme von $42 \pm 4 \text{ W}$, dagegen $15 \pm 2 \text{ W}$ bei Deuteronen. Eine Rechnung liefert für $1,5 \alpha$ -Teilchen mit 100 MeV Anfangsenergie 30 W bzw. für $1,5 \mu\text{A}$ Deuteronen mit 50 MeV Anfangsenergie 12 W . Um die absorbierte Strahldosis (absorbierte Energie pro Masseneinheit) bei Bestrahlungsmessungen angeben zu können, ist es notwendig, den Strahl definiert auszublenden. Bei der α -Bestrahlung wurde eine Cu-Lochblende mit 3 mm Lochdurchmesser verwendet. Die bestrahlte NbTi-Probenmasse beträgt dann 34 mg . Bei einem mittleren α -Strahlstrom von 300 nA wird in der NbTi-Probe eine Leistung von etwa 8 W absorbiert, das entspricht einer Strahlungsleistung von etwa $9 \times 10^{10} \text{ rad/h}$. Dies bedeutet, daß mit 100 MeV α -Teilchen bei einem mittleren Strahlstrom von 300 nA nur eine Bestrahlungszeit von ca. 12 h benötigt wird, um die relativ hohe Dosis von 10^{12} rad zu erzielen.

3.3 Temperaturmessungen

Bei Bestrahlungsexperimenten ist es ein allgemeines Problem, die durch Bestrahlung verursachte Erwärmung der Probe am Strahlort zu messen. Besonders schwierig gestaltet sich die Temperaturmessung bei Bestrahlungen mit Reaktor-neutronen, da hier die sekundären, energiereichen γ -Strahlen das Probenmaterial nahezu unkontrollierbar aufheizen. Nun ist es aber wegen Ausheileffekten notwendig, die induzierten Strahlenschäden bei einer festgehaltenen Temperatur oder innerhalb eines bestimmaren Temperaturbereiches, auszumessen. Übliche Standardmethoden zur Temperaturbestimmung verwenden vielfach Thermosonden wie Thermowiderstände oder Thermoelemente. Die Schwierigkeit einer solchen Temperaturmessung direkt am Strahlort ist aber die, daß die verwendete Meßsonde wärmekontaktmäßig auch in der Nähe oder am Bestrahlungsort montiert werden muß. Das bedeutet, daß die Sonde erstens durch die in ihr absorbierte Strahlenenergie aufgeheizt wird, und daß zweitens eventuelle Strahlenschäden die Sonde unbrauchbar machen können.

Im folgenden wird nun eine Methode beschrieben, die gestattet, einen Bestrahlungsbereich unterhalb T_c ausfindig zu machen und oberhalb T_c die Temperaturerhöhungen des Probenmaterials zu Beginn der Bestrahlung auszumessen:

Die supraleitende Probe wird mit einem ausgeblendeten Teilchenstrahl im He-Bad (Temperatur 4,2 K) kurzzeitig bestrahlt. Der Strahlfleck auf der Probe hat beispielsweise einen Durchmesser von 3 mm. Durch die Probe wird ein konstanter Meßstrom von $J_{\text{Meß}} = 10$ bis 100 mA geschickt. (Die untere Grenze des Meßstromes ist gegeben durch die Empfindlichkeit des zur Registrierung verwendeten Digitalvoltmeters). Anfang und Ende der supraleitenden Drahtprobe werden mittels dünner Cu-Leitungen mit einem Digitalvoltmeter verbunden. Bleibt die Probe bei einem eingestellten Teilchenstrahlstrom supraleitend, d.h. unterhalb T_c , so ist der gemessene Spannungsabfall U_{Probe} über der Probe gleich Null. Erhöht man den Strahlstrom und damit die in der Probe absorbierte Energie bis zu einem bestimmten Wert, dann werden die definiert bestrahlten, supraleitenden Drahtteile normalleitend und liefern bei einem konstanten $J_{\text{Meß}}$ eine entsprechende Spannung U_{Probe} . Eichet man nun die je nach Strahlstrom verschiedenen Spannungssignale U_{Probe} mit geeichten Thermowiderständen, so erhält man die gewünschte Zuordnung zwischen Temperatur und Strahlstrom.

In Abb. 16 wird das mit einem xy-Schreiber aufgenommene Spannungs-Zeit-Diagramm einer NbTi-Probe gezeigt. Aufgeschrieben wurde die Spannung U_{Probe} in Abhängigkeit von der Zeit. Zunächst ist kein Teilchenstrahl vorhanden, die Probe supraleitend, der Schreiber schreibt die Nulllinie. Bei der Zeit t_1 wird ein möglichst konstant gehaltener α -Strahlstrom von 1,5 μA eingeschaltet. Die supraleitende Probe wird im ausgeblendeten, bestrahlten Gebiet (Strahlfleckdurchmesser 3 mm) sofort normalleitend, und U_{Probe} wird im Rhythmus der Strahlschwankungen vom Schreiber registriert. Zur Zeit t_2 wird der Strahlstrom abgeschaltet, wobei die Probe sofort wieder ihren supraleitenden Zustand einnimmt, d.h. der Schreiber registriert die Spannung Null.

Für jeden eingestellten Strahlstrom erhält man in dieser Weise einen entsprechenden Spannungswert U_{Probe} und nach einer Temperatureichung den jeweils entsprechenden Temperaturwert vom bestrahlten Probenteil; z.B. entspricht dem in Abb. 16 gezeigten Spannungswert (etwa 45 μV) einer 1,5 μA α -Bestrahlung eine Temperatur von etwa 50 K.

Zur Temperatureichung wurde ein NbTi-Drahtstück verwendet, das die gleiche Länge (etwa 35 mm für Ein- und Ausschlußseite der Probe, s. auch Abb. 6) wie das der Bestrahlung ausgesetzten NbTi-Probe besitzt. Im thermischen Kontakt mit zwei geeichten C-Widerständen und einem geeichten Pt-Widerstand wurden an diesem Drahtstück Spannungsmessungen bei konstantem Meßstrom ($J_{\text{Meß}} = 100 \text{ mA}$) in einem Temperaturbereich von 4,2 bis 300 K durchgeführt. Die erhaltene Temperatur-Eichkurve ist in Abb. 17 dargestellt. Aus dem unteren Teil der Meßkurve, der im vergrößerten Maßstab dargestellt ist, erhält man den Wert der kritischen Temperatur des Supraleiters. Für die verwendete Probe wurde folgender Wert ermittelt: $(T_c)_{\text{Nb-Ti (50 Gew.\% Ti)}} = 9,6 \pm 0,4 \text{ K}$.

3.4 Sicherheitsvorkehrungen

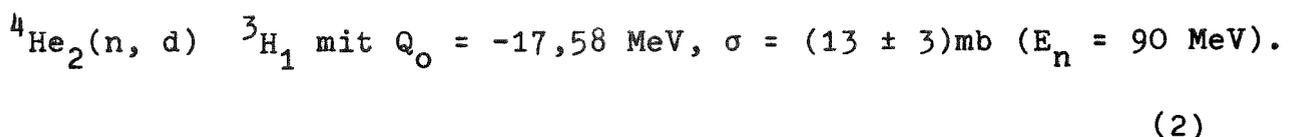
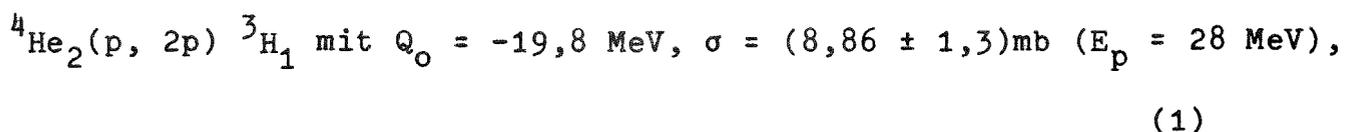
Im Interesse der Betriebssicherheit wurden folgende Gefahrenquellen gesondert abgesichert:

1. Explosionsartiges Verdampfen des flüssigen Heliums infolge eines Quenchs des supraleitenden Hochfeldmagneten,
2. mechanische Bruchgefahr der Sichtfenster aus Preßglas am He-Tank und äußerem Vakuummantel des Bestrahlungskryostaten (s. Abb. 5),
3. thermische Überbeanspruchung und Zerplatzgefahr der Havarfolien an den Strahlfenstern durch Strahlbelastungen und schließlich
4. die Aktivierung des Heliums und seiner Fremdstoffe durch Bestrahlung.

Punkt 1 betrifft den im Stromhochfahrbetrieb möglichen, plötzlichen Zustandswechsel (supra-normalleitender Zustandsübergang) des Hochfeldmagneten, wobei in kurzer Zeit (einige sec) ein Teil der gespeicherten Feldenergie (max. 7 kJ/s) als Joule'sche Wärme an das Kühlmittel abgegeben wird. Zur Abführung der entstehenden He-Gasmenge wurde ein Vollhub-Sicherheitsventil auf dem Kryostatendeckel montiert, das bei einem eingestellten Überdruck von $0,20 \text{ kp/cm}^2$ die geforderte Abblaseleistung von 335 g/s erbringt (angenommene He-Gastemperatur 10 K). Ebenso schützt ein am äußeren Vakuummantel des Kryostaten angebrachtes Sicherheitsventil (Abblasedruck ca. $0,2 \text{ kp/cm}^2$) gegen Überdruck im Isoliervakuum, z.B. beim Bersten der Glasfenster im He-Tank (Punkt 2).

Die Gefahrenquelle 3 enthält den größten Unsicherheitsfaktor und zwar die unkontrollierbare "Alterung" der Havarfolien (Strahlfenster), bedingt durch wechselnde Temperatur- und Strahlenbelastungen. Hier müssen erst Erfahrungswerte gesammelt werden. Zur Zeit werden die Folien aus Sicherheitsgründen schon nach 10 μAh ausgewechselt und untersucht. Als Sicherheitsmaßnahme gegen ein Belüften der Zyklotronmaschine mit He-Gas dient ein elektropneumatisches Schiebeventil PV2 (VAT), das im Strahlrohr vor dem Bestrahlungskryostaten (s. Abb. 2) montiert ist. Dieses Ventil wird mittels Vakuummeßgeräten über das Isoliervakuum (eingestellte Druckschwelle etwa 10^{-4} Torr) gesteuert. Später soll dieser Schieber durch ein Schnellschiebeventil (ebenfalls VAT) mit Schließungszeiten im msec-Bereich ersetzt werden.

Über Punkt 4 ist zu bemerken, daß Helium (^4He) unter Beschuß mit Protonen, Deuteronen oder α -Teilchen mit Energien von 25 MeV pro Nukleon und durch sekundär erzeugte Teilchen zahlreiche Kernreaktionen eingehen kann. Günstigerweise sind die Reaktionsquerschnitte jedoch klein.⁶⁾ Tritium ($^3\text{H}_1$, β^- -Strahler, $T_{1/2} = 12,26 \text{ a}$) erhält man u.a. durch folgende Reaktionen:



Das hierbei gebildete Tritium verhält sich chemisch wie Wasserstoff und wird wegen seiner großen Affinität teilweise schon in den Leitungssystemen stabile chemische Verbindungen eingehen. Zum ständigen Nachweis von Tritium und seinen flüchtigen Reaktionsprodukten wird das gesammelte Helium aus den Flaschenbatterien laufend durch eine spezielle Tritium-Nachweisapparatur TMH2 (Proportionalzählrohr-System mit Antikoinzidenzstufe; Firma KIMMEL) geleitet. Die Nachweisschwelle dieser Apparatur für Tritium liegt bei 2×10^{-12} Ci/cm³. Die maximal zulässige Arbeitsplatz-Konzentration (MAK) von ³H₁ in Luft beträgt (zur Zeit) 2×10^{-11} Ci/cm³. Bei den ersten Bestrahlungsexperimenten wurden He-Proben vor und nach der Bestrahlung gesondert in Plastiksäcken entnommen und einzeln ausgemessen. Bisher wurde jedoch kein Tritium oberhalb der Nachweisgrenze nachgewiesen.

4. Schlußbemerkungen

Die Bestrahlungsanlage wurde insgesamt mit 65 Strahlstunden getestet. Es zeigte sich, daß die gestellten Anforderungen an Bestrahlungskryostat, Vakuumsystem, He-Rückverdichtungsanlage und andere Einrichtungen erfüllt wurden. Der Aufbau von weiteren Meßeinrichtungen zur Ausmessung von thermischen und elektrischen Supraleitungsgrößen wird fortgesetzt.

Mit dieser Tieftemperatur-Bestrahlungsanlage werden zunächst Messungen an supraleitenden Drahtmaterialien unter ähnlichen Bedingungen durchgeführt, wie sie bei Supraleitungsmagneten für Großbeschleuniger auftreten können. Für die an solchen Beschleunigungsmaschinen (300 GeV Protonensynchrotron CERN) vermutlich auftretenden Strahldosen schätzt LEWIN⁷⁾ folgende 3 Aktivierungsquellen ab:

1. Durch Strahlverluste bei der Injektion des Protonenstrahles (maximale Strahldosisleistung $500 \times E_i^{0,6}$ rad/h mit E_i = Einschußenergie in GeV),
2. durch Streuverluste während der Beschleunigung (max. 100 rad/h bei einer 1000 GeV-Maschine; Dosiswert stark

vom Gasdruck im Strahlrohrsystem abhängig), und

3. durch Verluste bei der Extraktion (max. Strahldosis etwa $250 \times E_a^{0,6}$ rad/h mit E_a = Endenergie der Teilchen in GeV).

Um eine obere Grenze für die auftretenden Strahldosen im Bereich einer 1000 GeV-Maschine zu finden, wurde der in Punkt 3 angeführte Ausdruck verwendet. Für Pulsbetrieb (10 s Strahl, 10 s Pause) und mit einem Erhöhungsfaktor von 25 bei ungünstiger Positionierung der Magnete erhält man eine über ein Jahr (360 d) aufsummierte Strahldosis von $2,0 \times 10^9$ rad. Dabei erzeugt der hochenergetische Protonenstrahl nach je einer Reichweite von etwa 100 g/cm^2 im Magnetmaterial (Dichte etwa $4 - 5 \text{ g/cm}^3$) eine Kaskade von Sekundärteilchen mit einer mittleren Multiplizität von etwa 10. Die Endenergieverteilung der erzeugten Sekundärteilchen liegt in einem Energiebereich um etwa 100 MeV, der gerade mit dem Karlsruher Zyklotron simuliert werden kann.⁸⁾

Bestrahlungsexperimente zur Untersuchung der Supraleitungsgrößen in schnell gepulsten Hochfeldmagneten sind geplant.

Wir danken Herrn Professor Dr. W. Heinz für die erwiesene Unterstützung und sein Interesse an dieser Arbeit.

Für die zur Verfügung gestellten finanziellen Mittel zum Aufbau dieser Anlage gebührt dem Bundesministerium für Bildung und Wissenschaft Dank.

Die Anfertigung der einzelnen Bauteile für die Bestrahlungsanlage wurde größtenteils in eigenen Institutswerkstätten durchgeführt. Unser besonderer Dank gilt den verantwortlichen Leitern, Herrn R. Böhmer und Herrn K. Wussow für die Feinmechanische Werkstatt und Herrn J. Bröckl für die Elektronische Werkstatt im Institut für Experimentelle Kernphysik sowie Herrn Ingenieur O. Pulch für die Hauptwerkstatt des Kernforschungszentrums.

Ebenfalls danken wir Herrn K -R. Krebs, Herrn J. Pytlik und Herrn D. Weigert für Mitarbeit und Diskussion.

Schließlich bedanken wir uns bei der Betriebsgruppe des Karlsruher Isochronzyklotrons unter Leitung von Herrn Dr. G. Schatz für die Bereitstellung des Zyklotronstrahles.

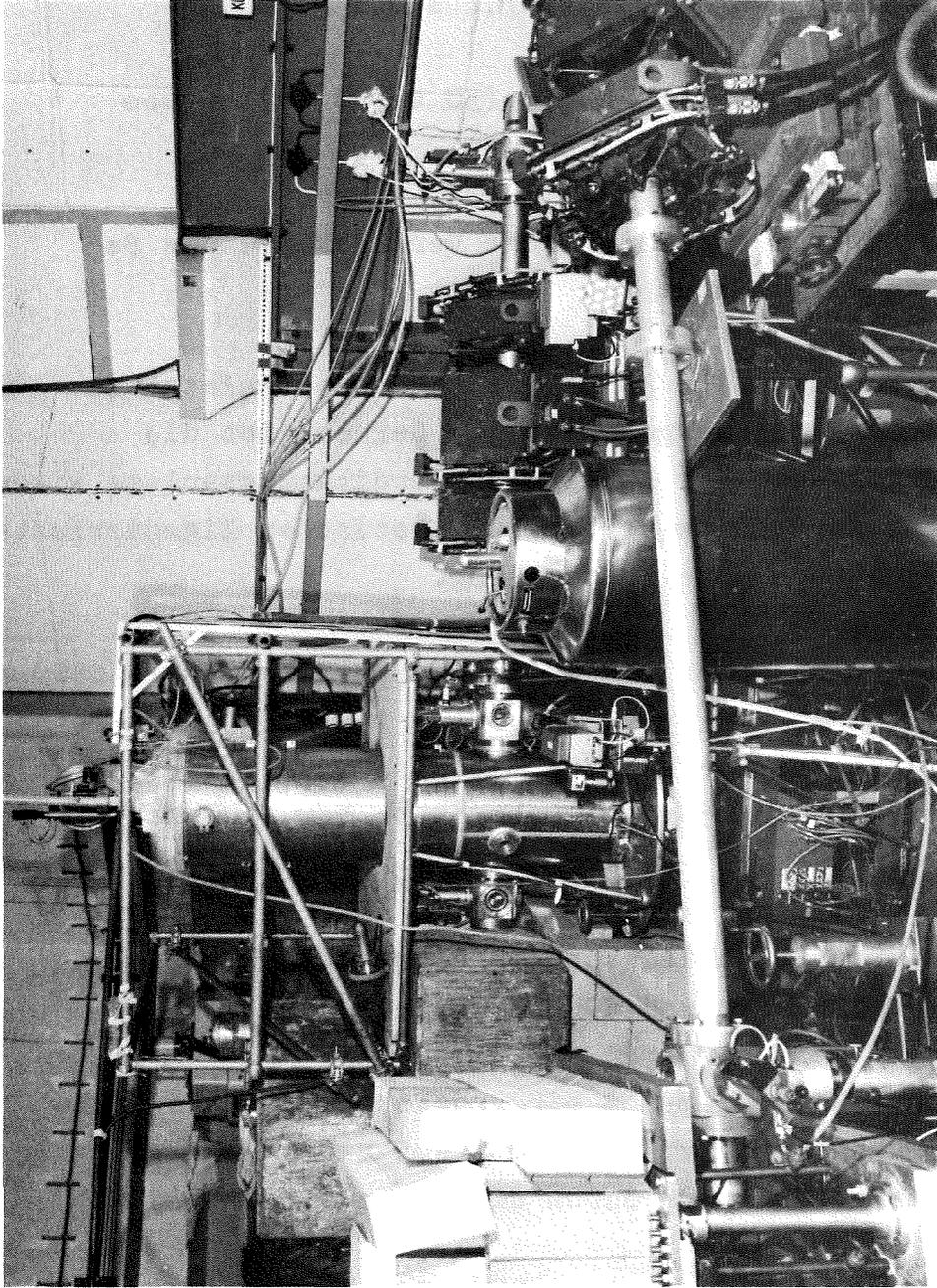
Literaturhinweise

- 1) S.I. Tsyarkin, R.S. Chudnova, Sov. Sol. Stat. Phys. 13 (1972) 2588
- 2) H. Berndt, N. Kartascheff, H. Wenzl, Z. angew. Phys. 24 (1968) 305;
R.H. Kernohan, S.T. Sekula, J. of Appl. Phys. 38 (1967) 4904;
W. Decker, J. Diehl, K. Hain, H. Katheder, Ch.Leitz, Kern-
technik, Isotopentechnik und -Chemie 6 (1966) 257
- 3) K. Wohlleben, Zeitschr. f. Angew. Phys. 27 (1969) 92;
W.V. Hassenzahl, J.D. Rogers, W.C. Armstrong, Proc. of the
1971 Part. Acc. Conf., March 1 - 3 (1971), Washington
- 4) H.T. Coffey, E.L. Keller, A. Patterson, S.H. Autler, Phys.
Rev. 155 (1967) 355
- 5) K -R. Krebs, J. Pytlik, E. Seibt, Technischer Bericht KFK 1683
(1972), Karlsruhe; wird veröffentlicht
- 6) W. Kunz, J. Schintlmeister, Nuclear Tables, Part II Nuclear
Reactions, Pergamon Press (1965)
- 7) J.D. Lewin, Rutherford Lab. Report RHEL/R 118 (1968);
P.F. Smith, J.D. Lewin, Nucl. Instr. and Meth. 52 (1967) 298
- 8) A. Citron, L. Hoffmann, C. Passow, W.R. Nelson, M. Whitehead,
Nucl. Instr. and Meth. 32 (1965) 48;
A. Citron, private Mitteilung

Abbildungen

- Abb. 1: Teilansicht des Bestrahlungskryostaten in der Experimentierhalle des Karlsruher Zyklotrons. Rechts im Bild Strahlführungsrohr mit 3 Quadrupollinsen. Bildmitte der Bestrahlungskryostat mit Montagebühne. Anschließend nach links der Faradaykäfig mit Schwerbetonabschirmung.
- Abb. 2: Übersichtsschema der Heliumbad-Bestrahlungsanlage
- Abb. 3: Schematischer Aufbau des Bestrahlungskryostaten
- Abb. 4: Schnitt durch den Bestrahlungskryostaten (Technische Details)
- Abb. 5: Schnitt durch Strahlfenstersystem und Draufsicht Bestrahlungskryostat (Technische Details)
- Abb. 6: Schematischer Strahlverlauf im Bestrahlungskryostaten. Eingetragen sind die Deuteronenenergien nach Durchtritt durch die Strahlfenster SF1, SF2, SF3 und die Probe im Flüssig-Heliumraum. Die Winkelaufweitung des Deuteronenstrahles wird durch θ angegeben.
- Abb. 7: Funktionsschema der Helium-Rückverdichtungsanlage
- Abb. 8: Übersicht der Meßeinrichtungen mit Meßgrößen.
 T_c = kritische Temperatur, $J_c(H)$ = kritische Transportstromdichte in Abhängigkeit eines äußeren Magnetfeldes H ,
 ρ = spezifischer elektrischer Widerstand, $M(H)$ = Magnetisierung in Abhängigkeit von H , H_{c1} bzw. H_{c2} = unteres bzw. oberes kritisches Magnetfeld.

- Abb. 9: Schliffbild eines Nb-Ti (50 Gew.% Ti) -Mehrkernleiters mit Kupfermatrix (Bildvergrößerung 200 : 1). Draht-Spezifikationen: Durchmesser (ohne Lackisolierung) 0,4 mm, Filamentzahl 130, Filamentdurchmesser 24 μm , Twistlänge 4 mm, Kupfer zu Supraleiter-Querschnittsverhältnis 1,2 : 1, Dichte $7,6 \pm 0,1 \text{ g/cm}^3$.
- Abb. 10: Hysteresiskurve einer Nb-Ti (50 Gew.% Ti) -Probe (Drahtspezifikation s. Abb. 9)
- Abb. 11: Helium Einfüll- und statische Verlustkurve des Bestrahlungskryostaten
- Abb. 12: Helium-Verluste für 50 MeV Deuteronenstrahlströme bis 2000 nA. Obere gestrichelte Gerade gibt die Leistungsgrenze der Helium-Rückverdichtungsanlage wieder, untere gestrichelte Gerade die statischen Eigenverluste des Kryostaten ohne Bestrahlung.
- Abb. 13: Helium-Verluste für 100 MeV α -Teilchenströme bis 1500 nA
- Abb. 14: Dynamische Helium-Verluste mit und ohne NbTi-Probe in Abhängigkeit von 50 MeV Deuteronen- bzw. 100 MeV α -Strahlstrom
- Abb. 15: Absorbierte Strahlleistung in einer NbTi-Probe für 50 MeV Deuteronen und 100 MeV α -Teilchen
- Abb. 16: Spannungs-Zeit-Diagramm einer bestrahlten NbTi-Probe im Heliumbad. (α -Strahlstrom = 1,5 μA ; α -Energie = 100 MeV). Meßstrom durch die Probe $J_{\text{Meß}} = 100 \text{ mA}$.
- Abb. 17: Temperatur-Eichkurve einer NbTi-Sonde (NbTi-Drahtlänge = 35 mm). Meßstrom durch die Sonde $J_{\text{Meß}} = 100 \text{ mA}$. Bildausschnitt zeigt Bestimmung der kritischen Temperatur T_c von Nb-Ti (50 Gew.% Ti) -Mehrkernleiter (Draht-Spezifikationen s. Abb. 9).



A N 2932-2205

Abb. 1

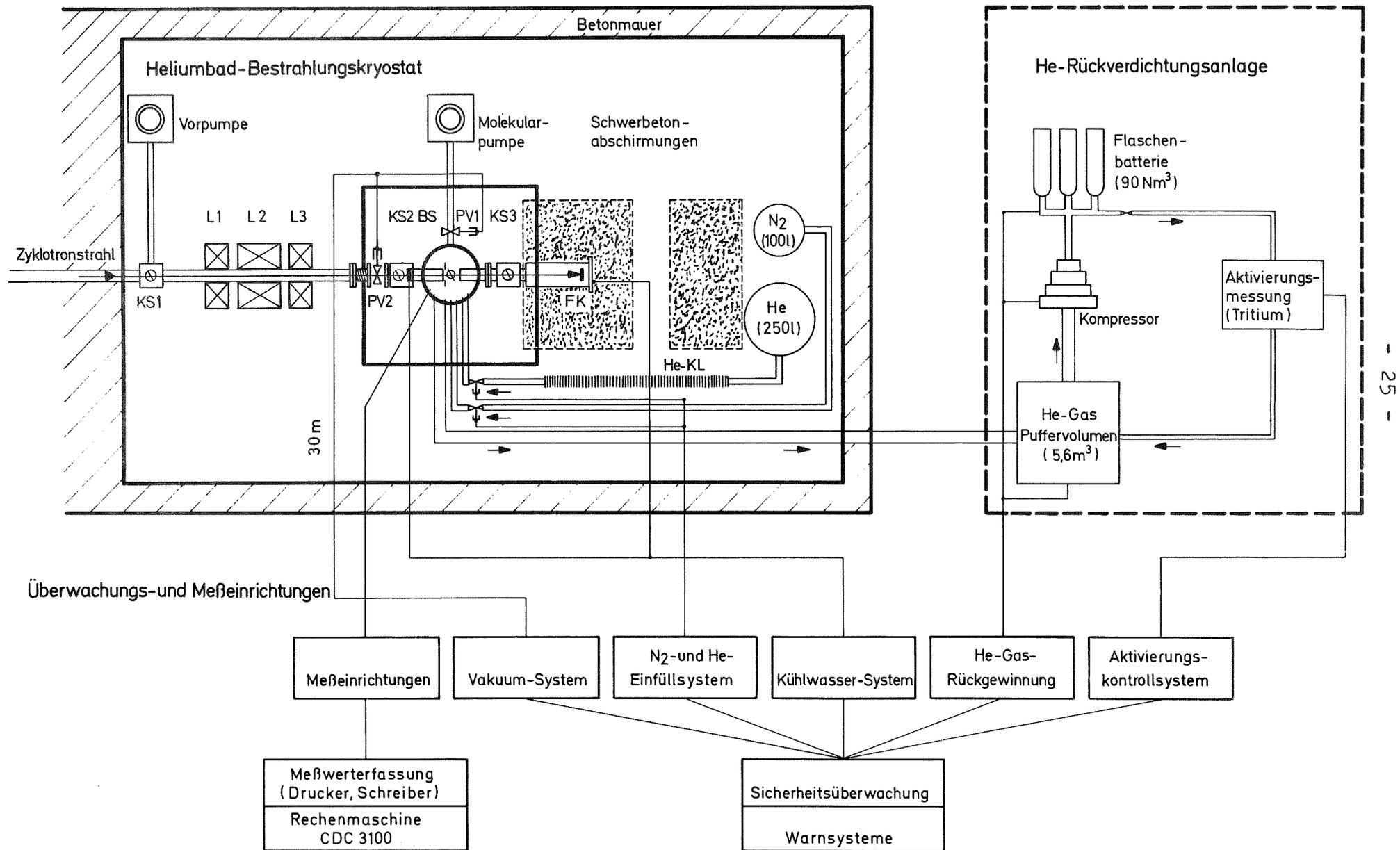


Abb. 2

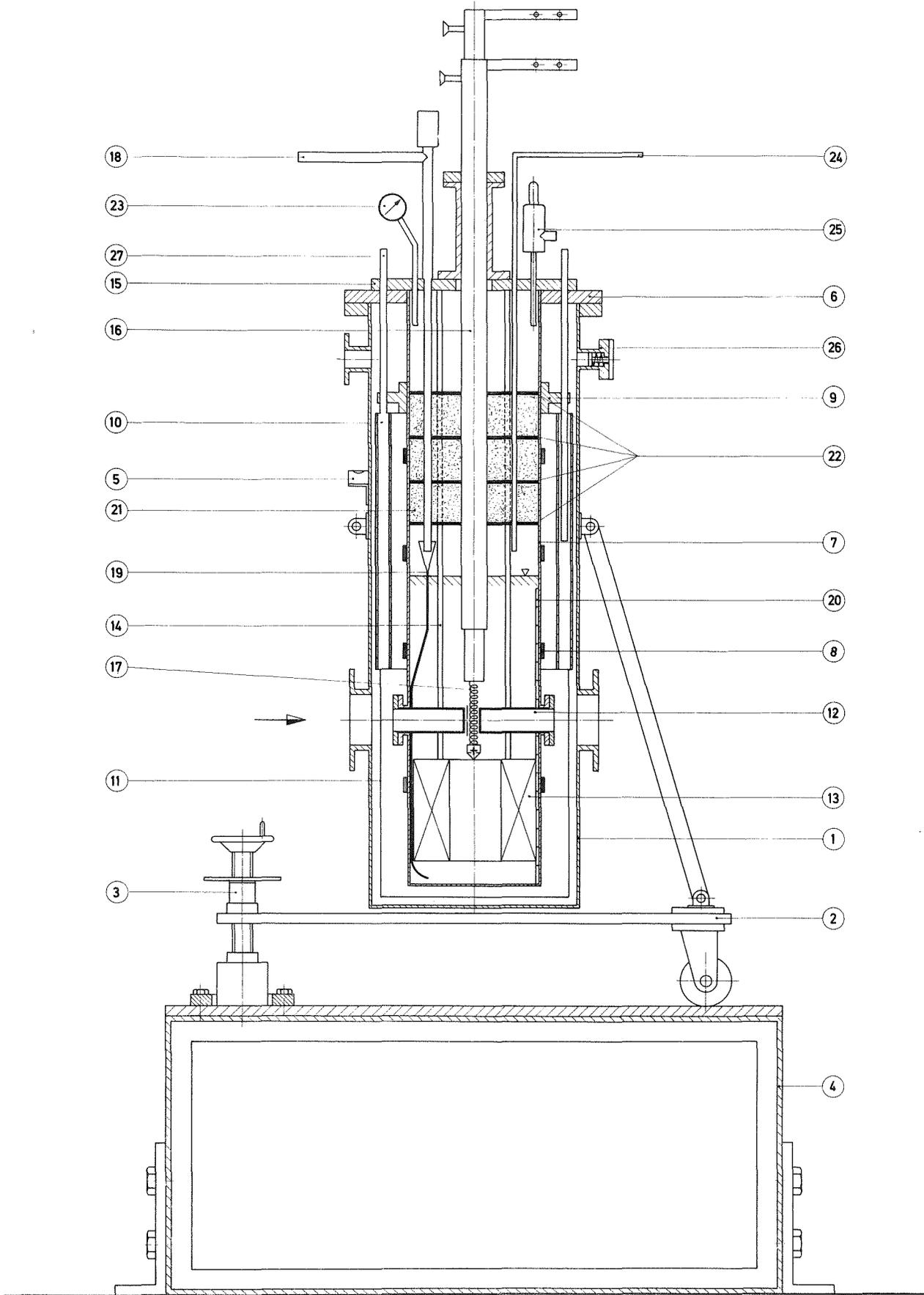


Abb. 3

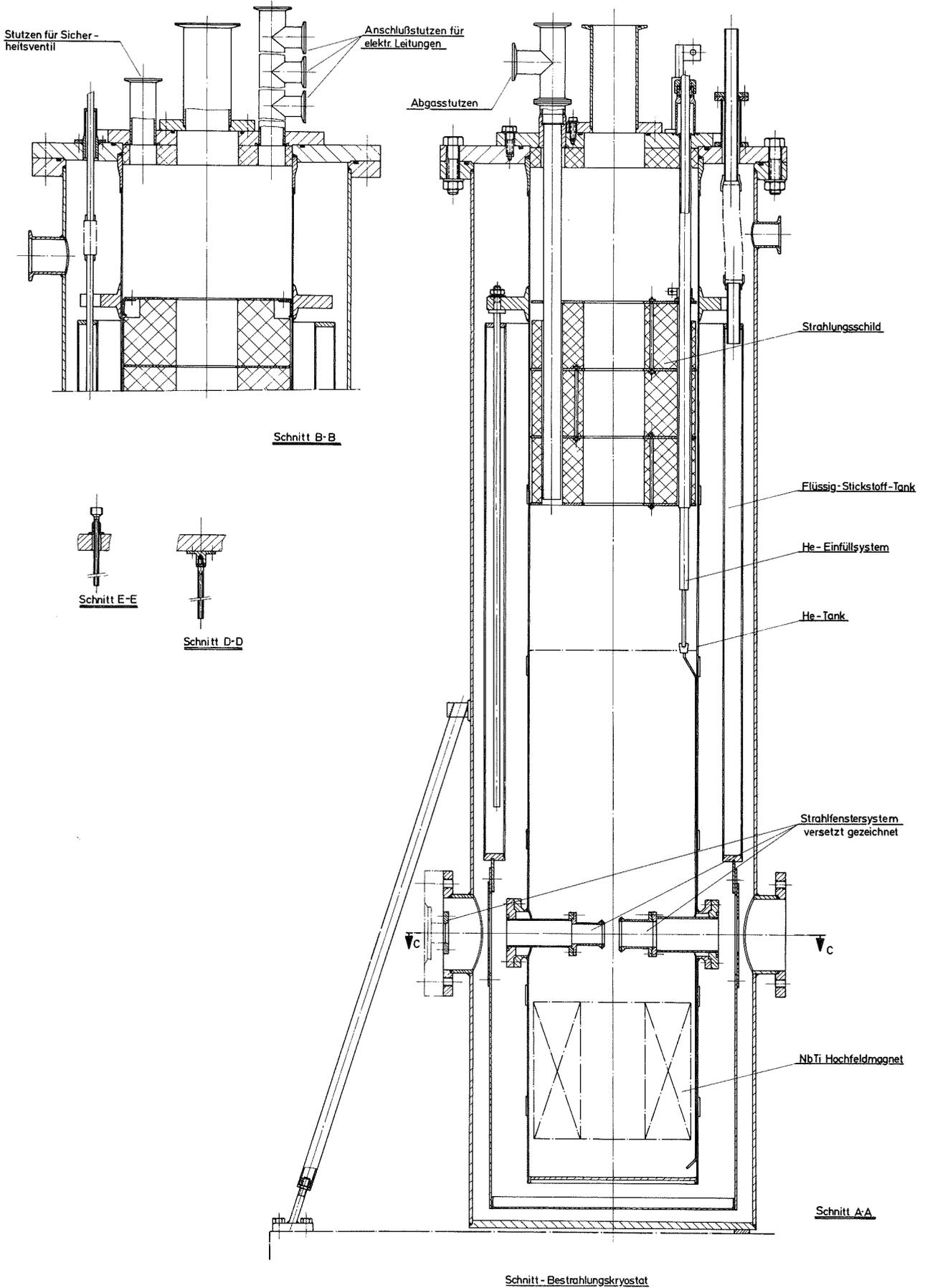
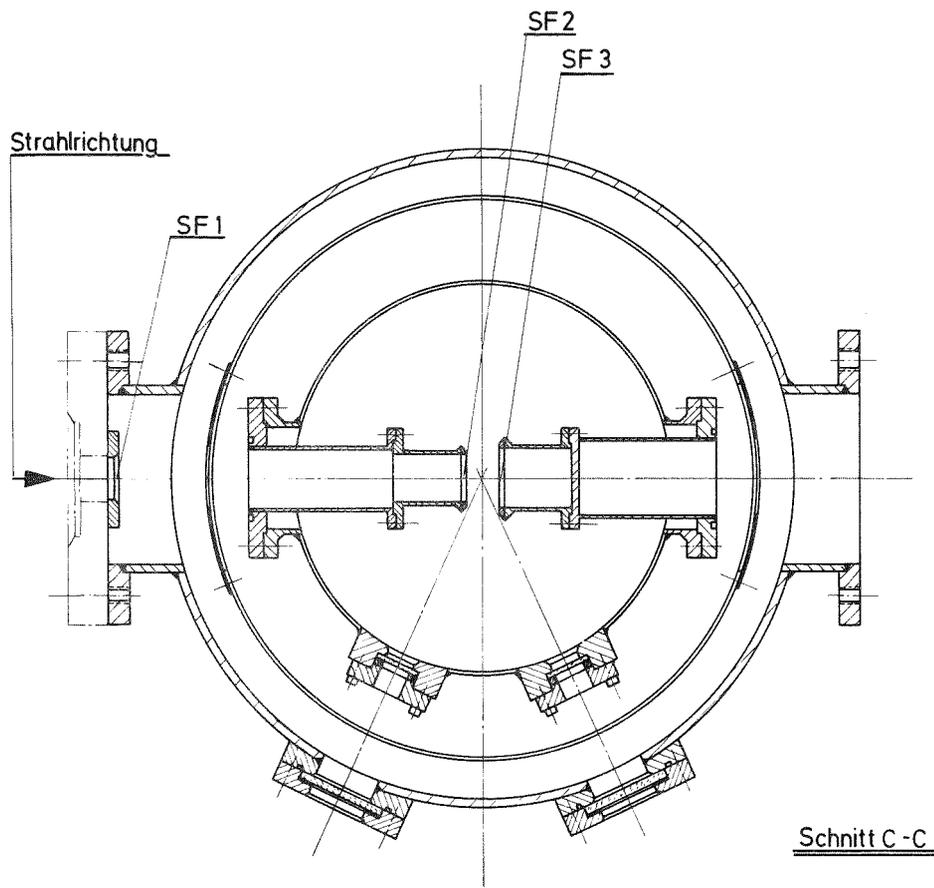
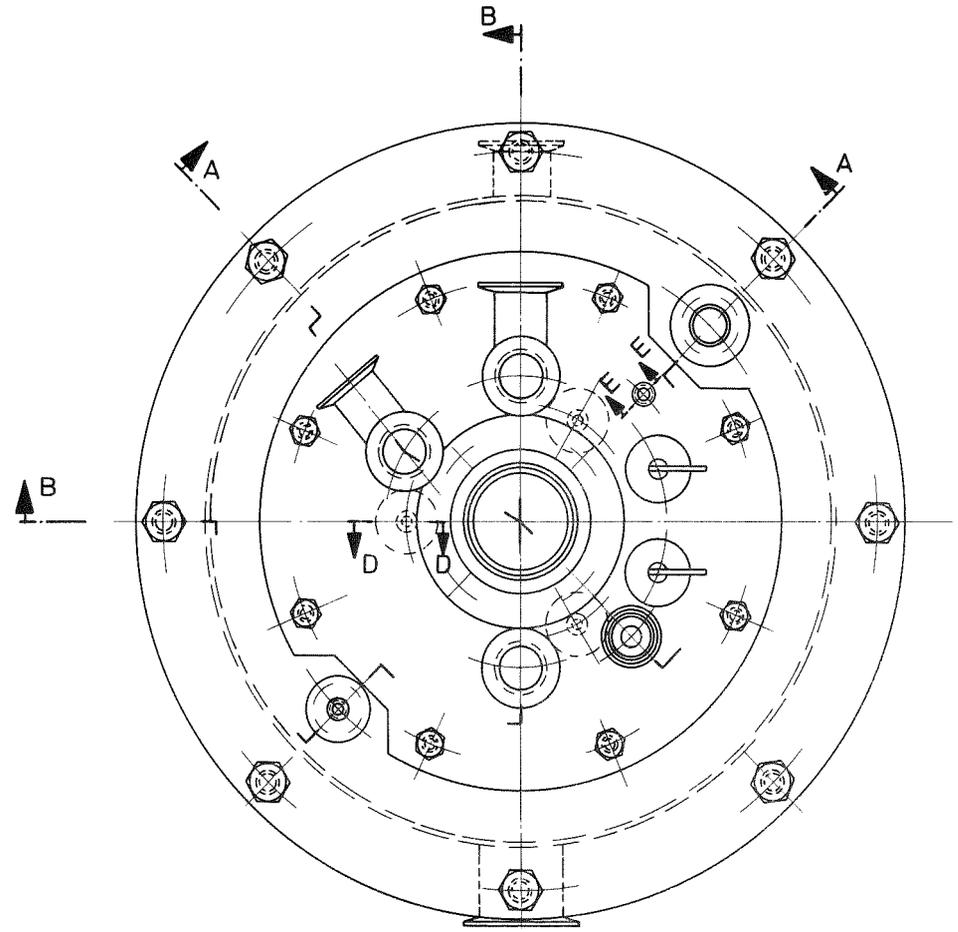


Abb. 4



Schnitt C-C

Schnitt durch Strahlenfenstersystem



Draufsicht Bestrahlungskryostat

Abb. 5

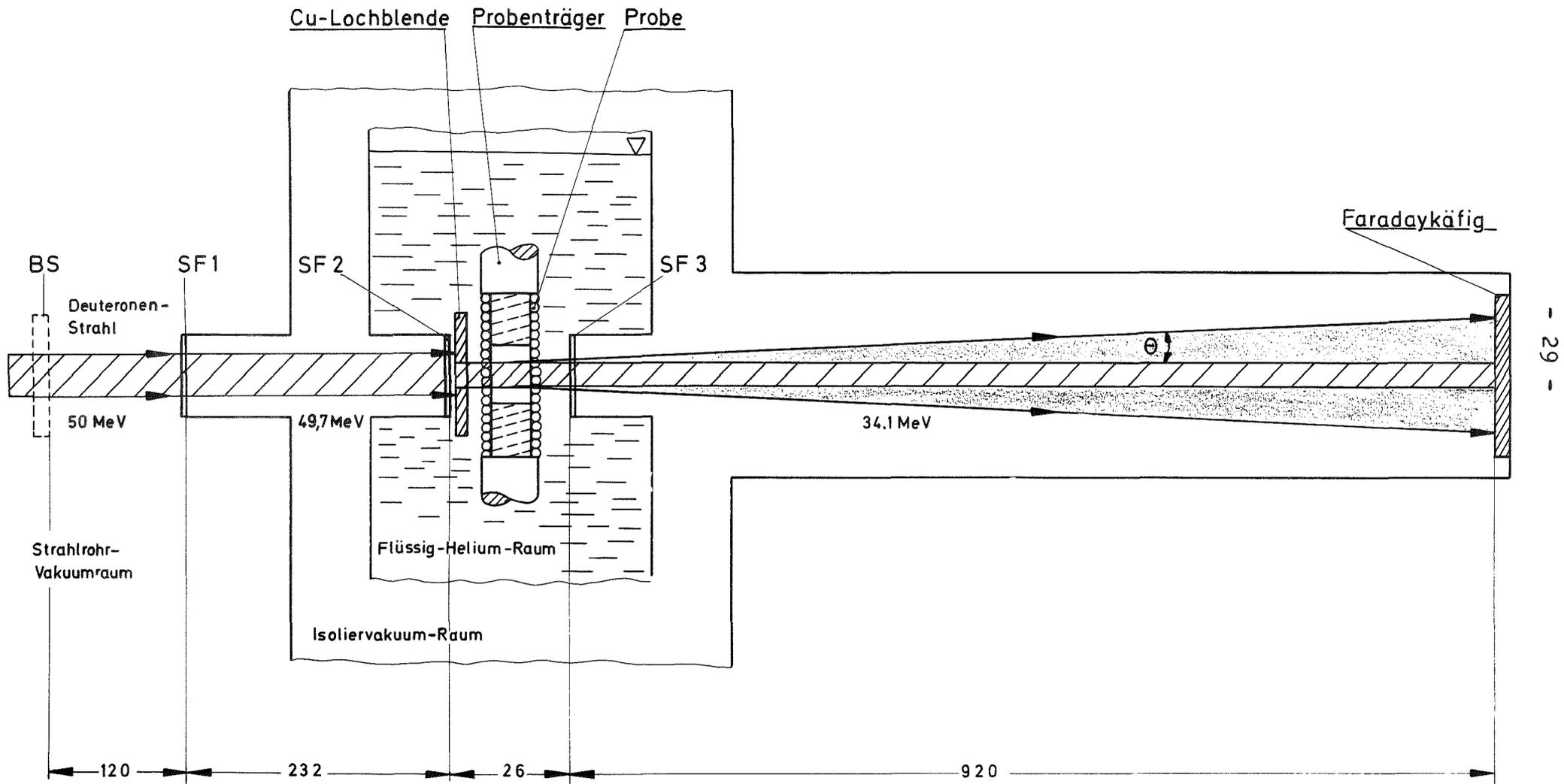


Abb. 6

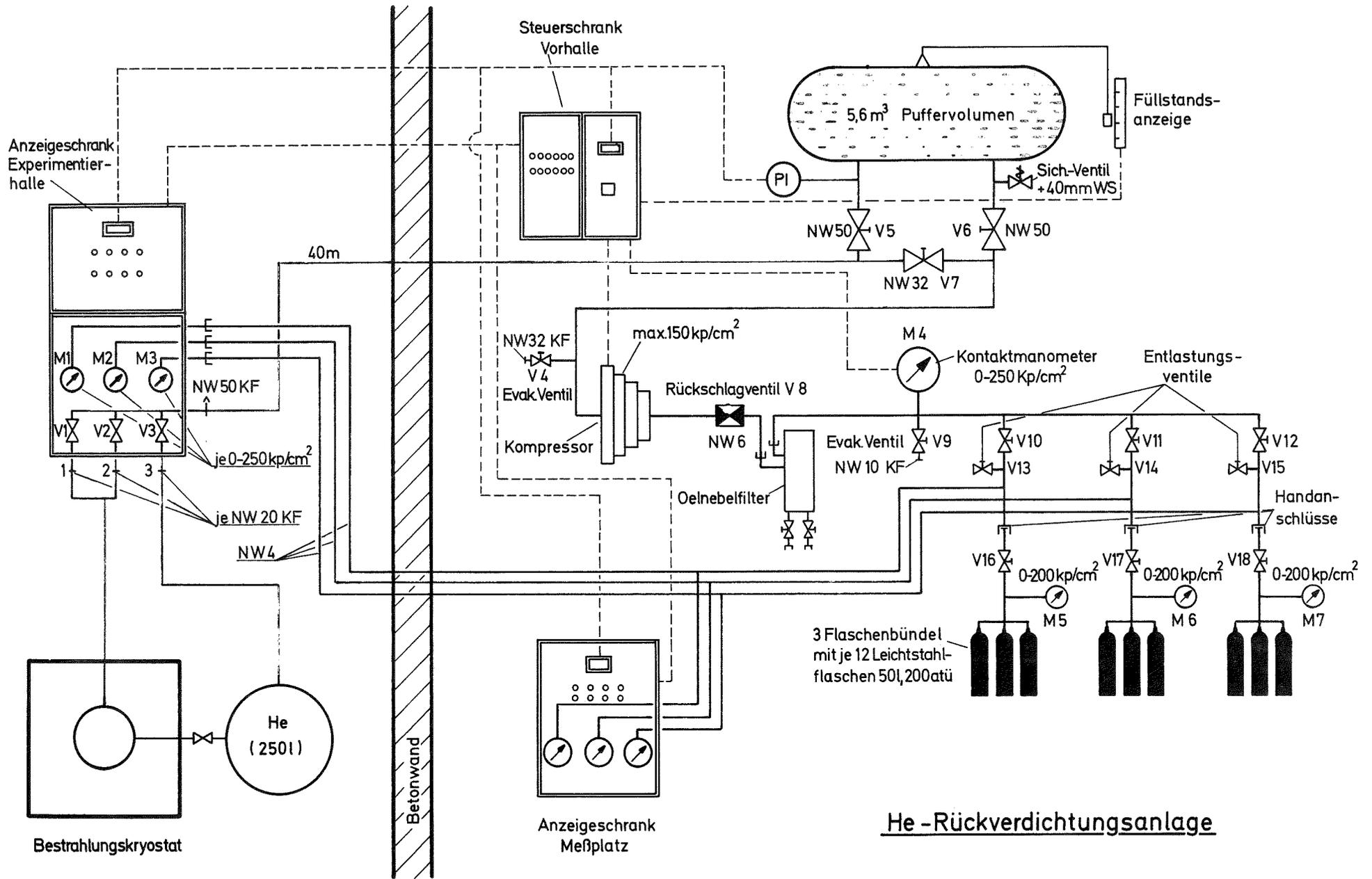


Abb. 7

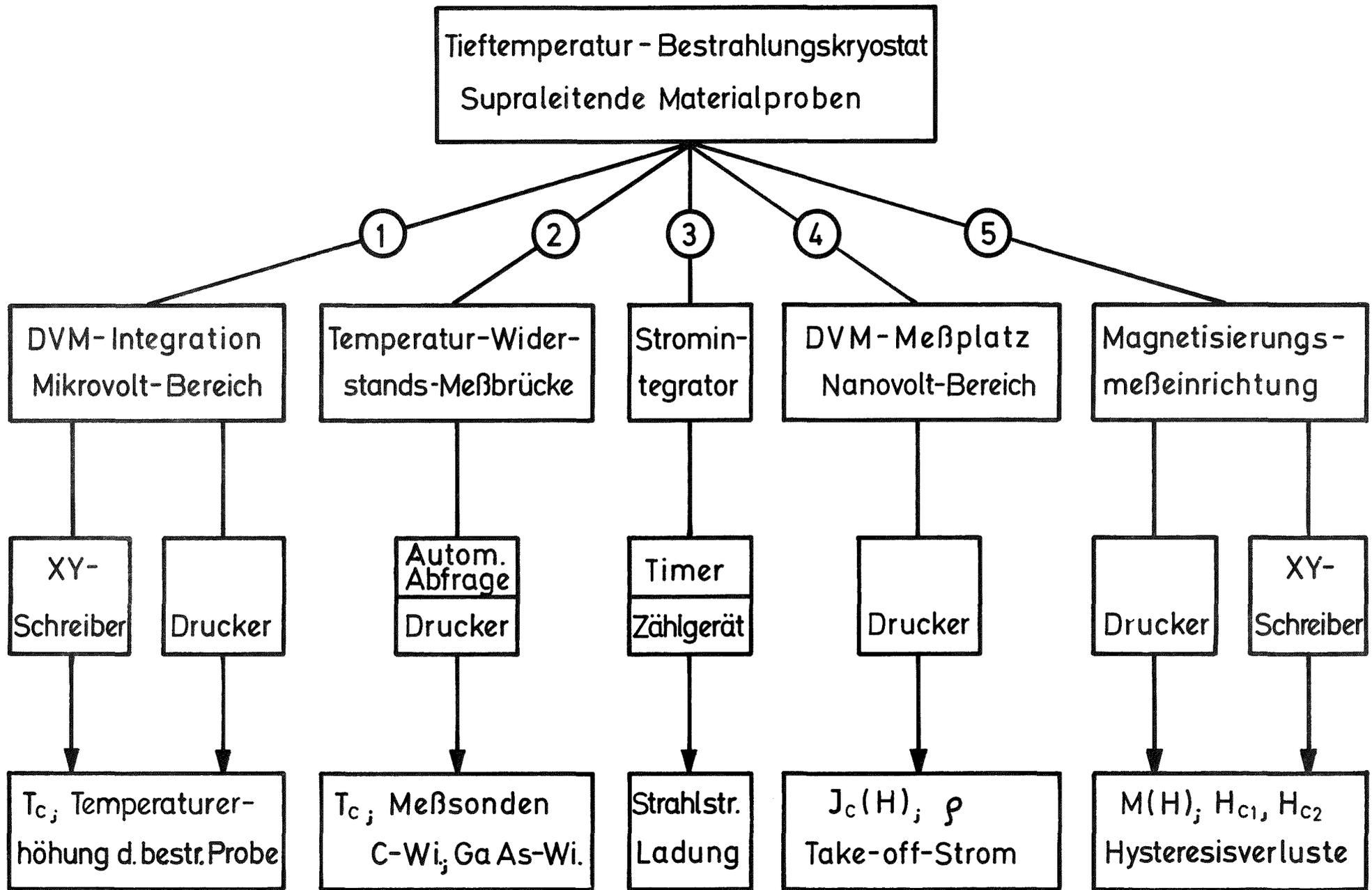


Abb. 8

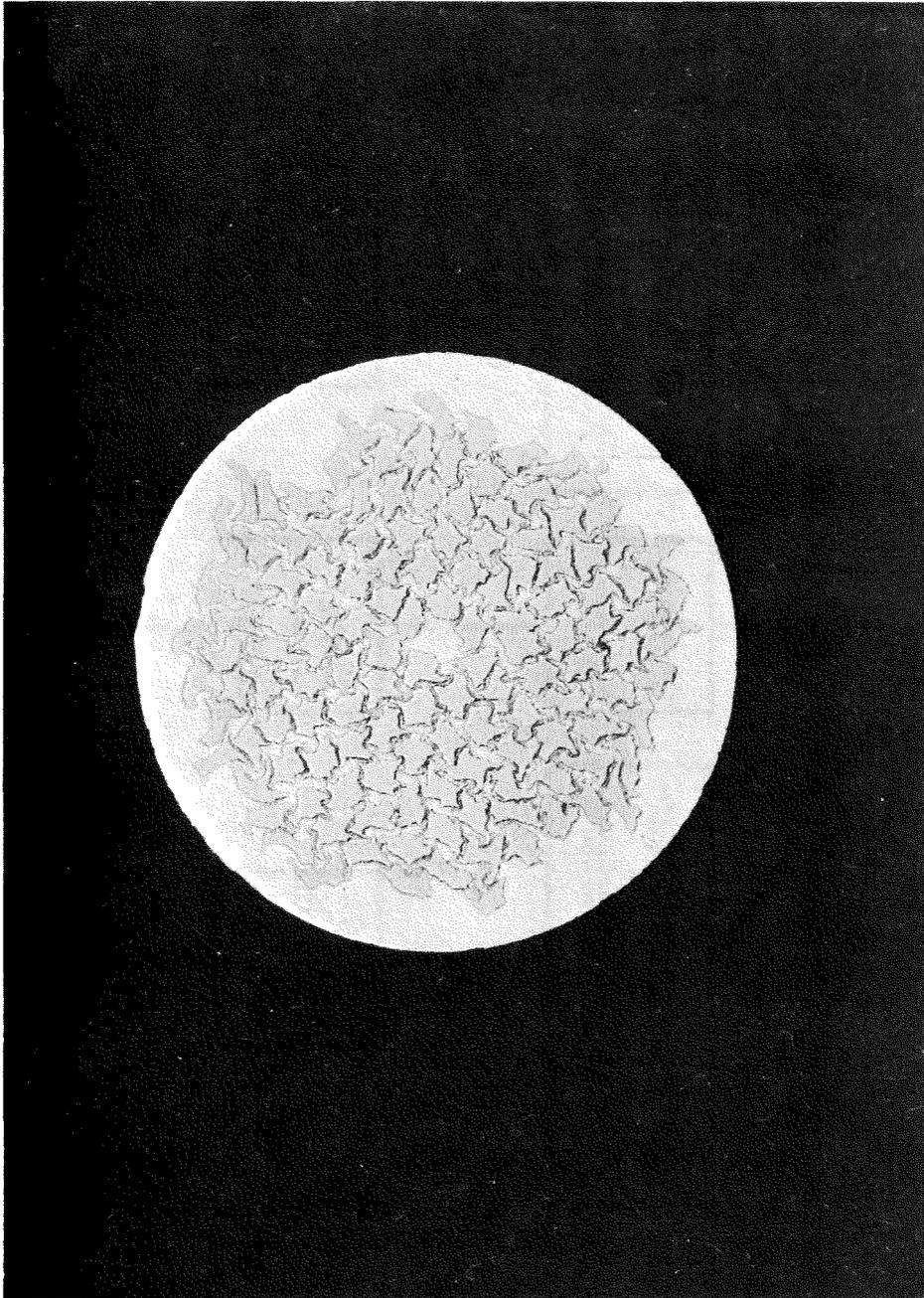


Abb. 9

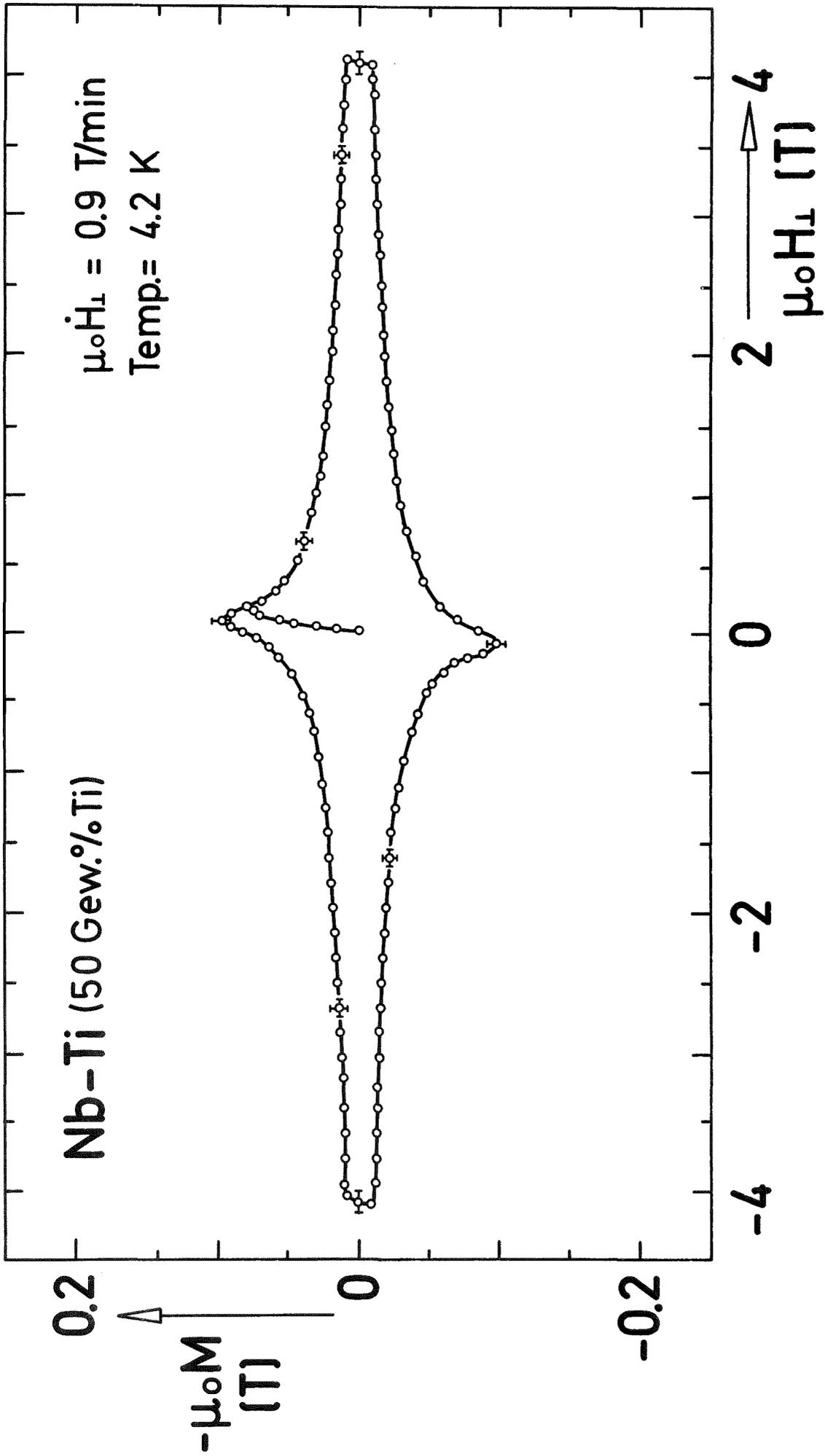


Abb. 10

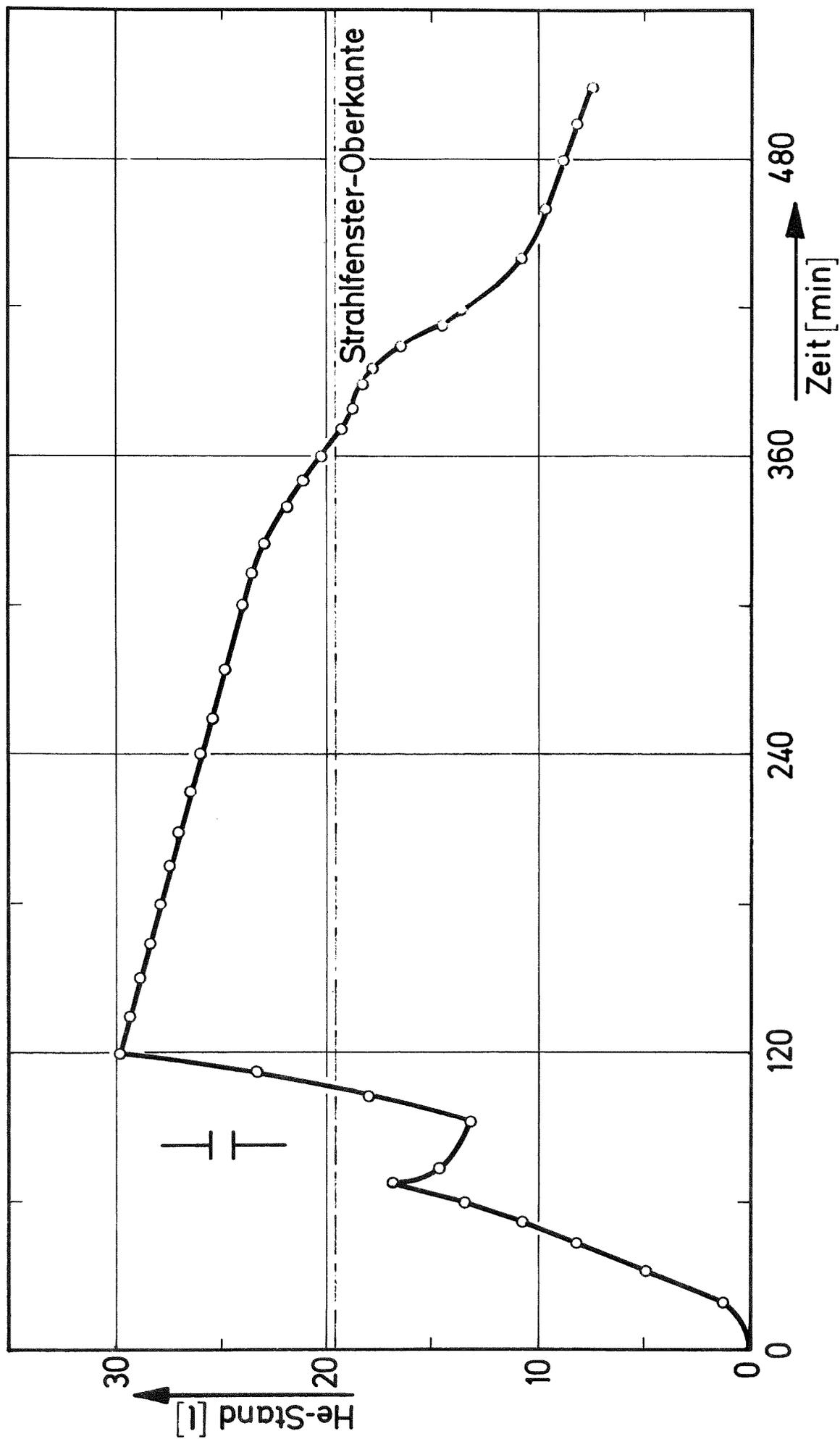


Abb. 11

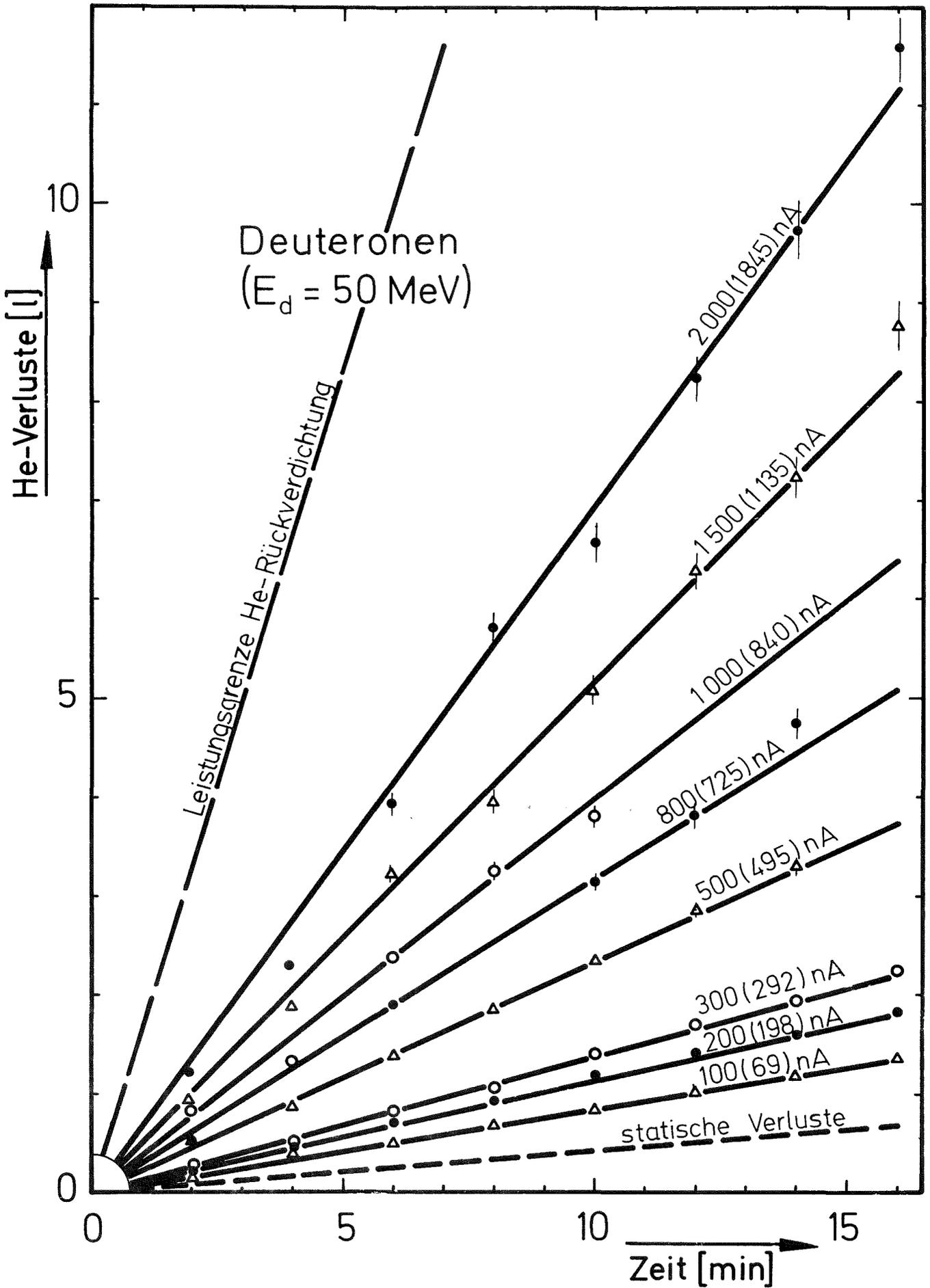


Abb. 12

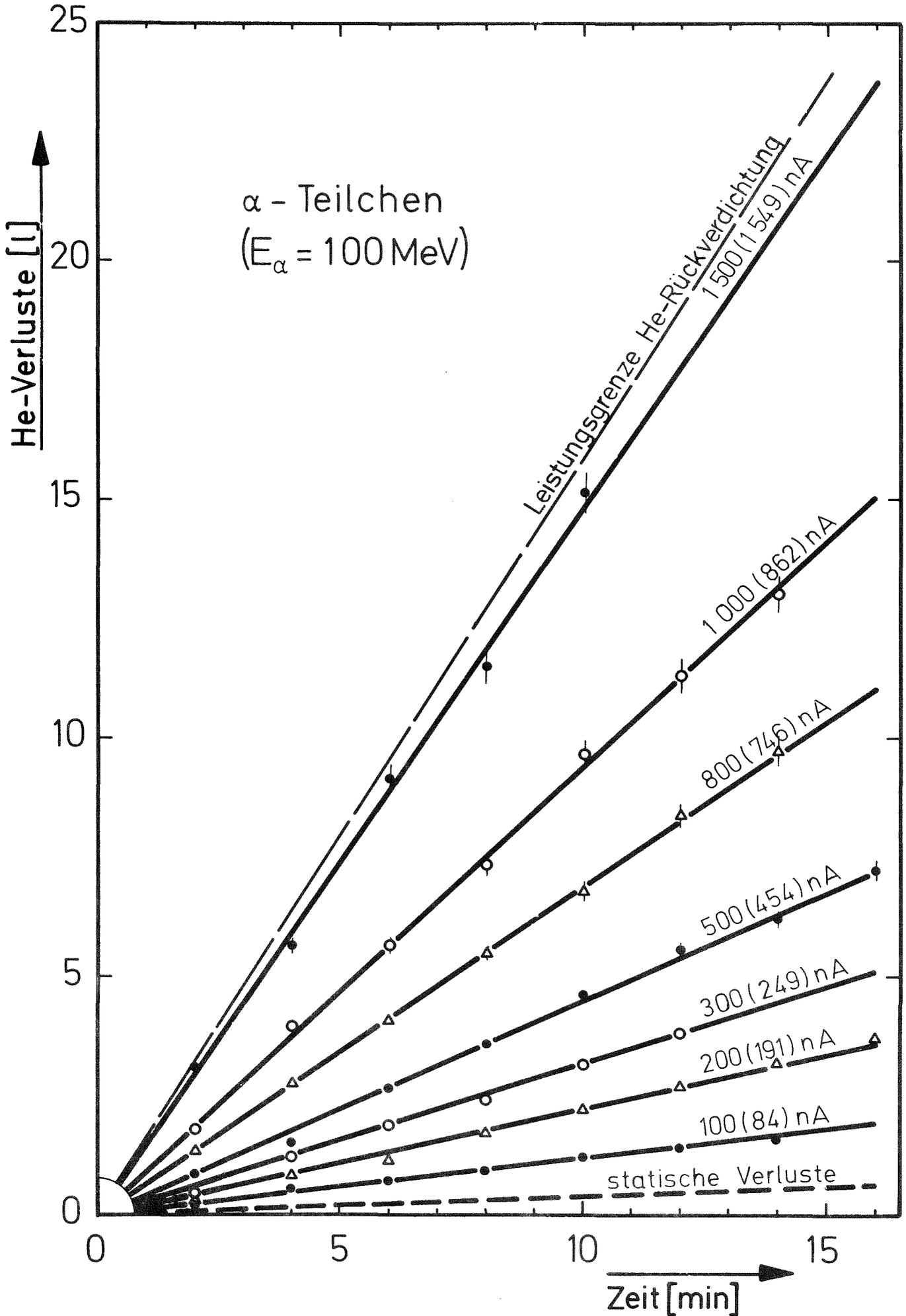


Abb. 13

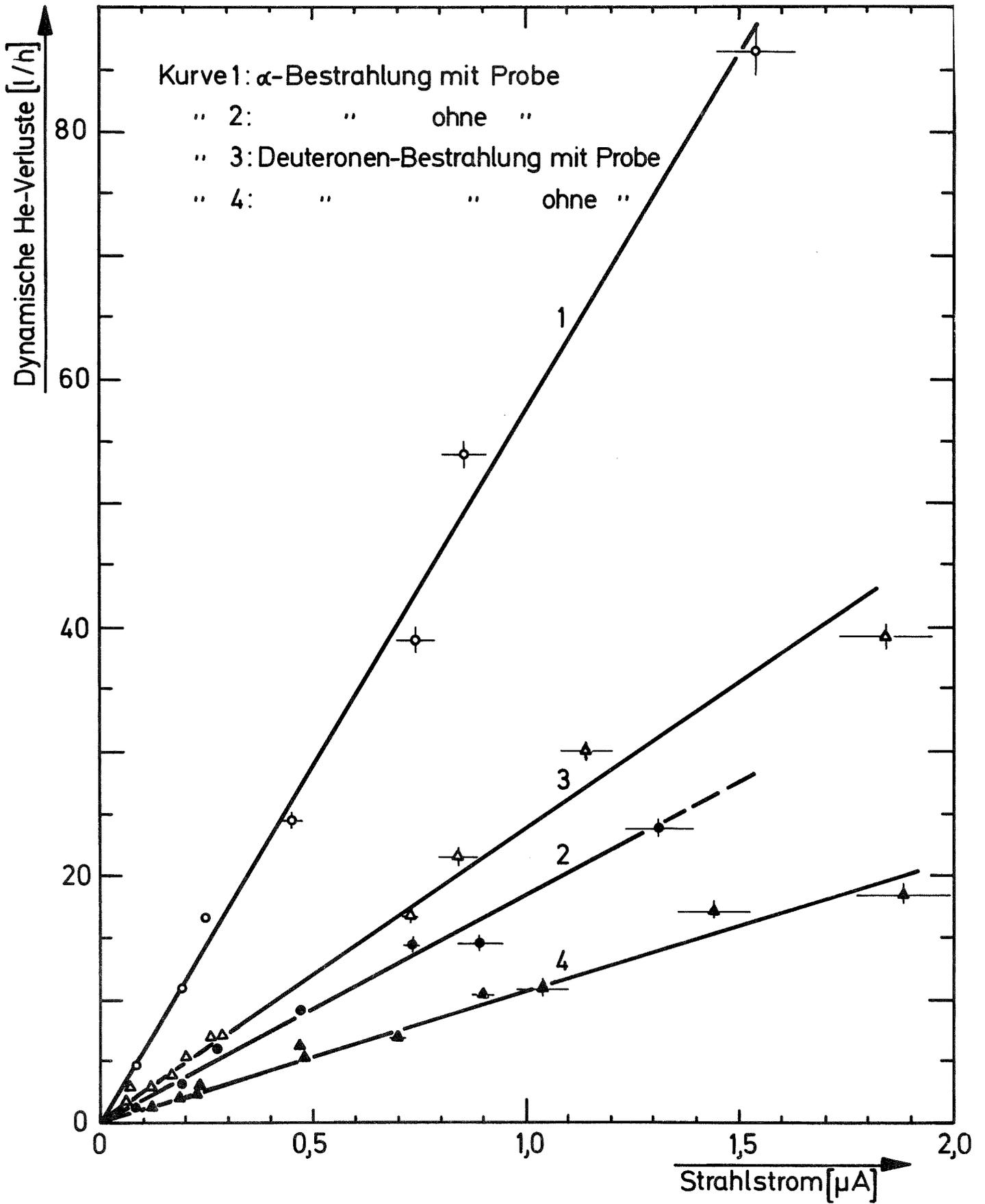


Abb. 14

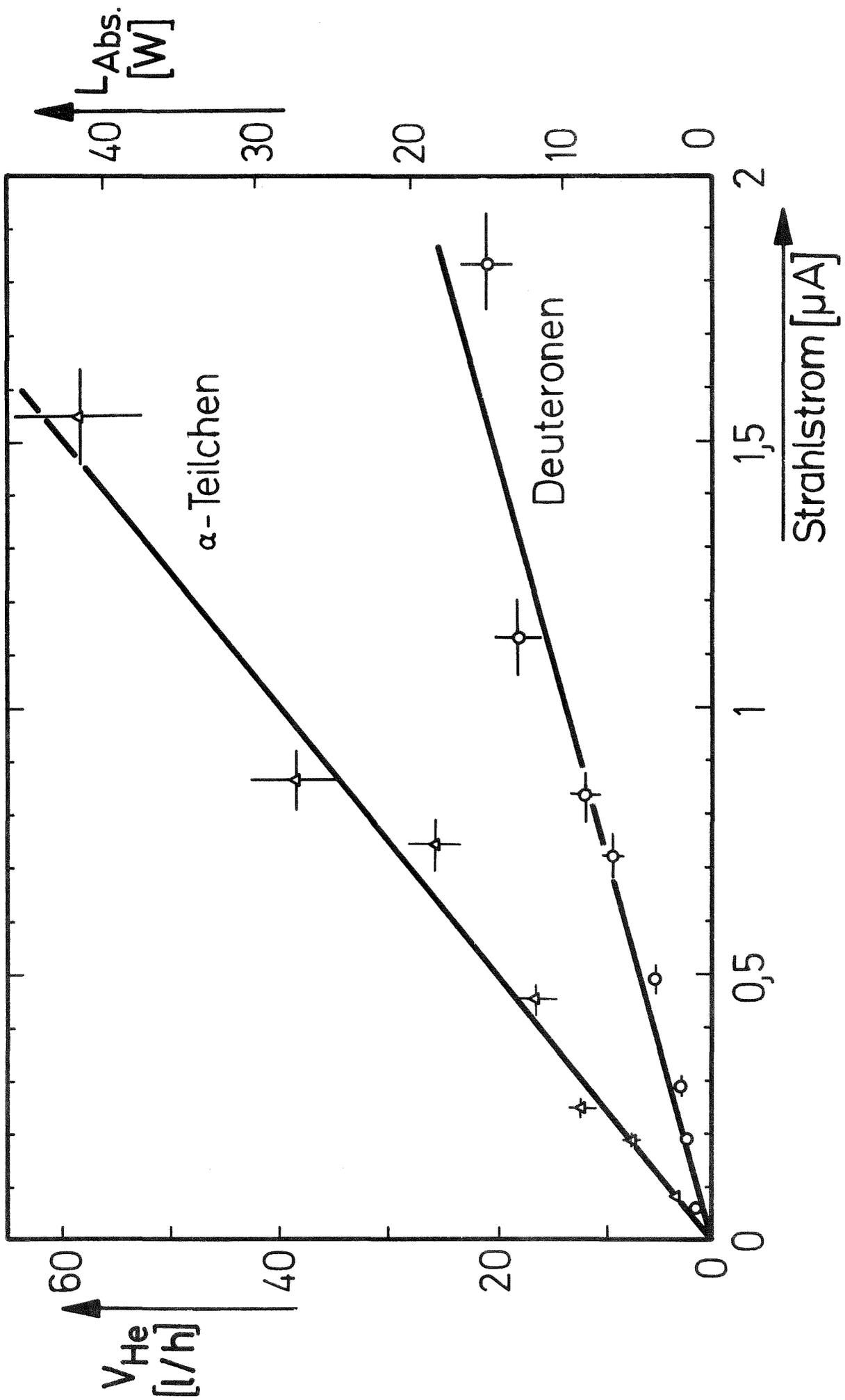


Abb. 15

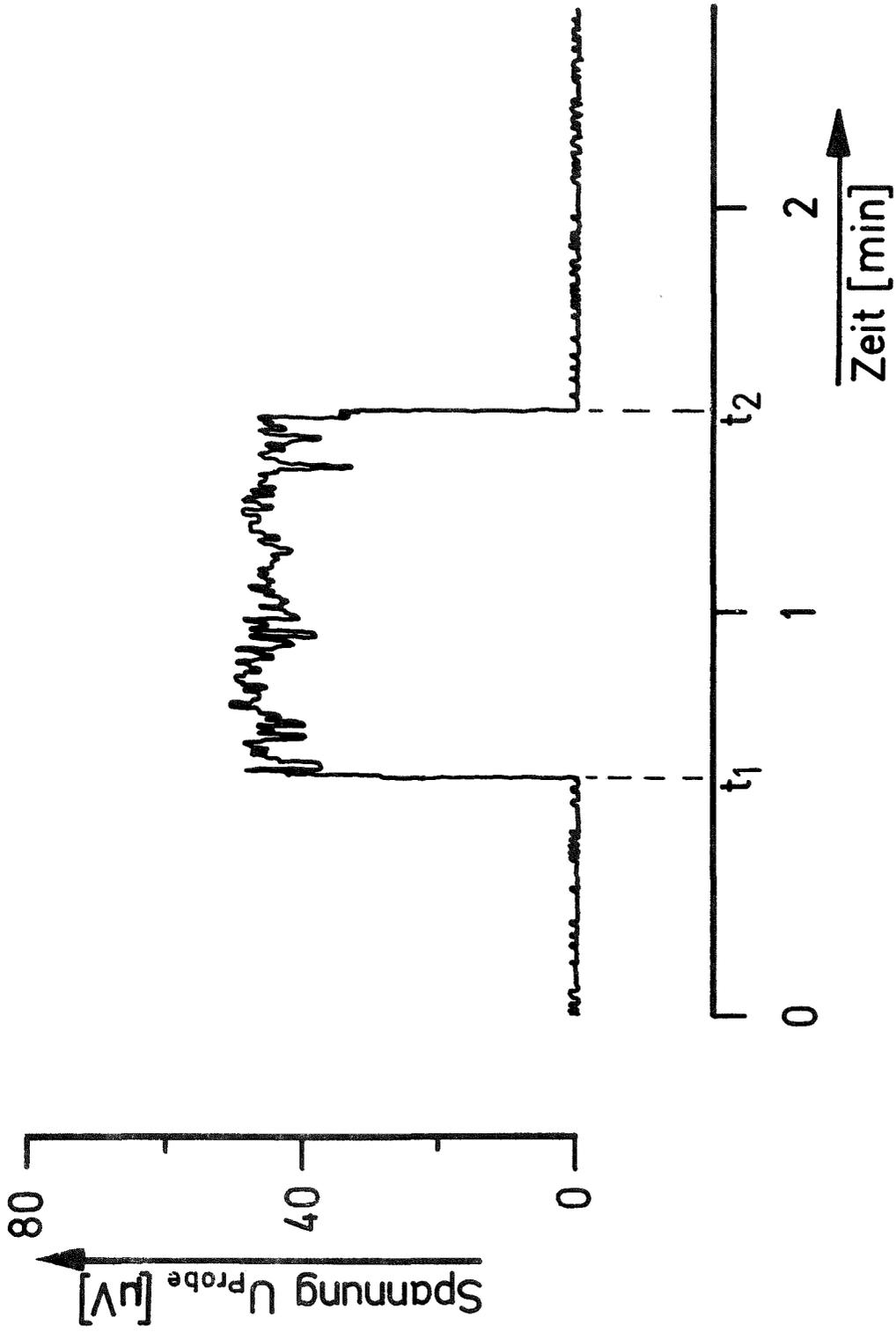


Abb. 16

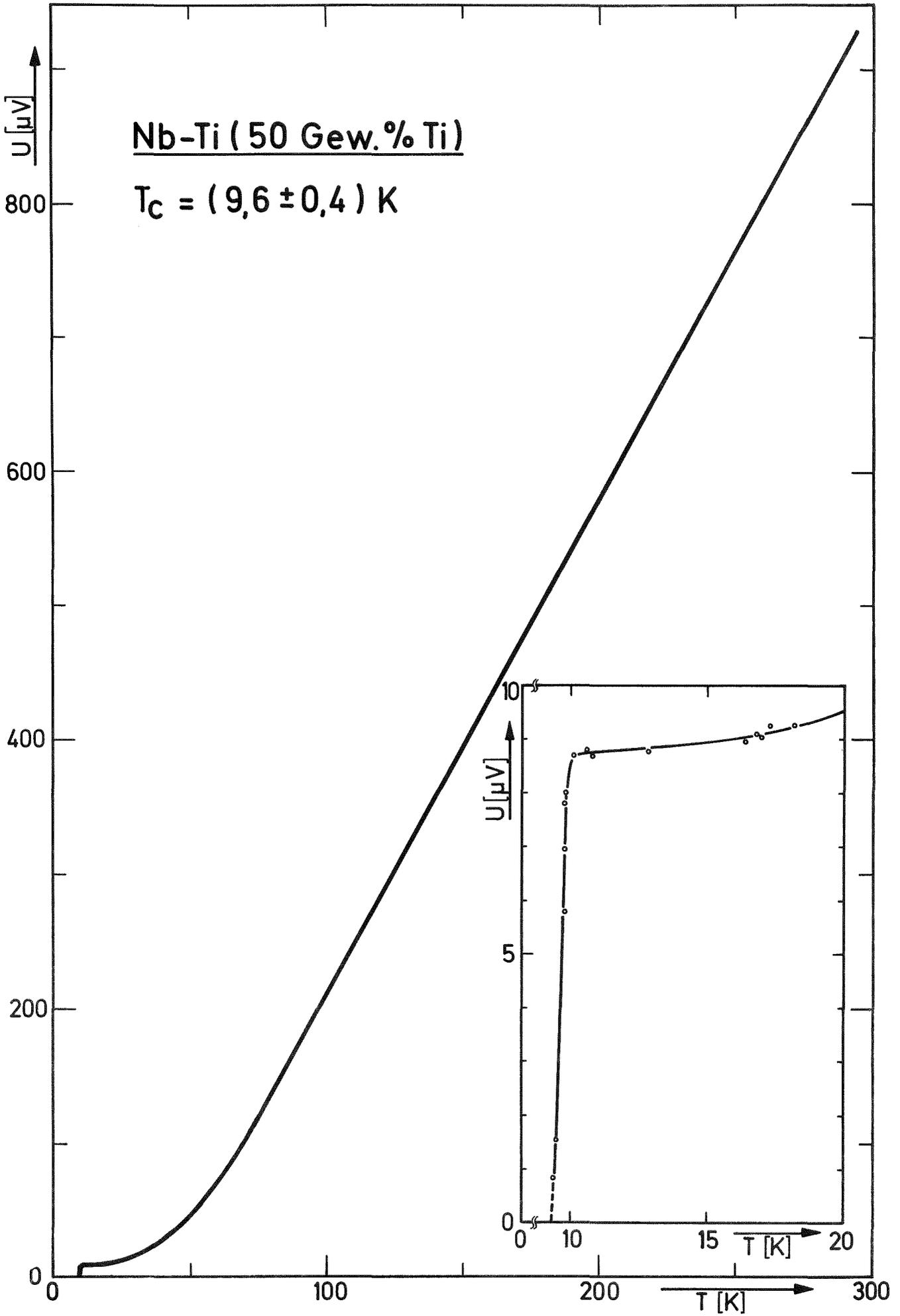


Abb. 17