

Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

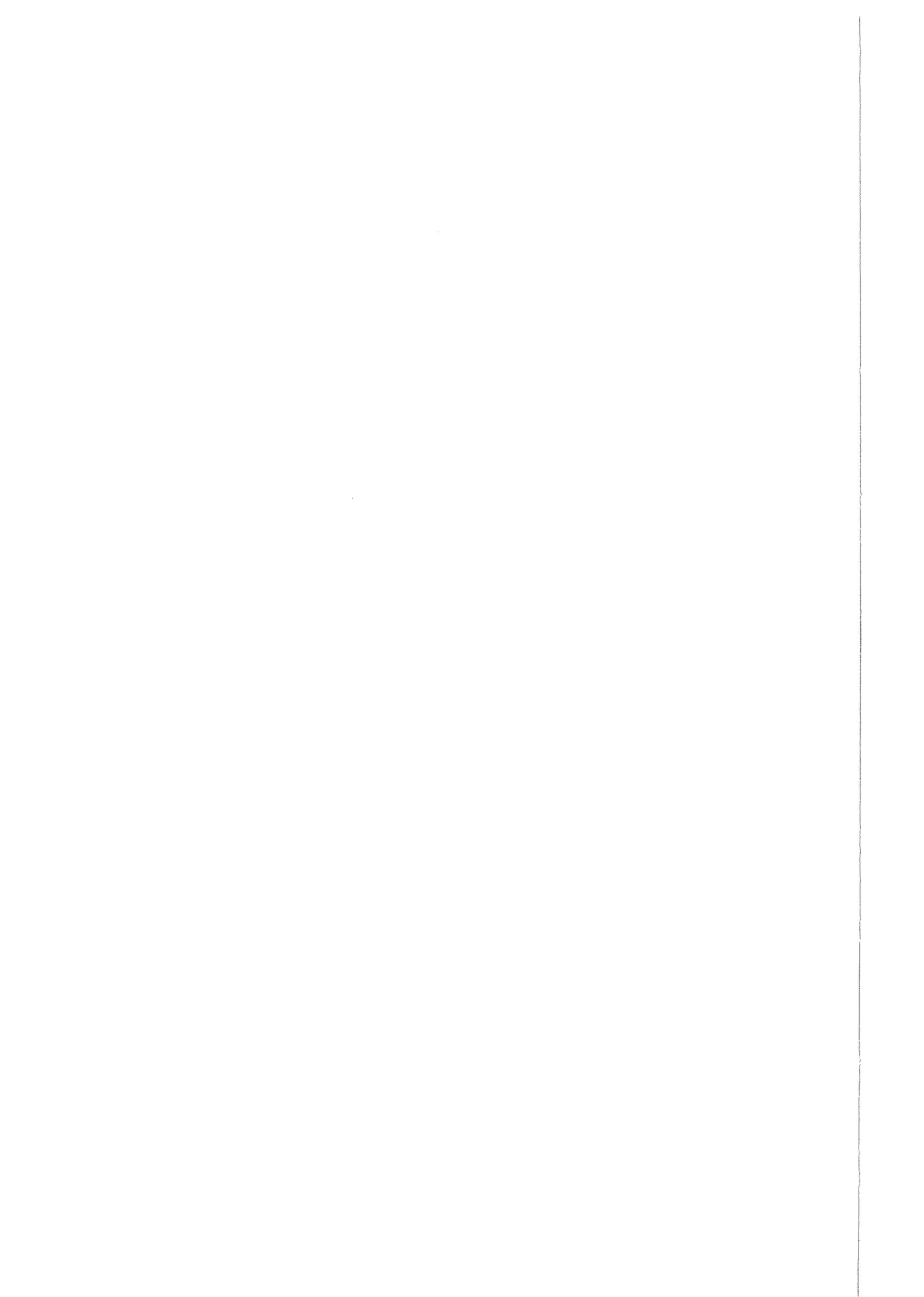
Wissenschaftliche Berichte
FZKA 6229

**Erzeugung von
Synchrotronstrahlung
mit einem neuartigen,
supraleitenden Mikroundulator**

T. Hezel

Projektgruppe Errichtung ANKA

Februar 1999



Forschungszentrum Karlsruhe

Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte

FZKA 6229

**Erzeugung von Synchrotronstrahlung mit einem
neuartigen, supraleitenden Mikroundulator**

T. Hezel

Projektgruppe Errichtung ANKA

Von der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe genehmigte

Dissertation

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe

1999

Als Manuskript gedruckt
Für diesen Bericht behalten wir uns alle Rechte vor
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH
Postfach 3640, 76021 Karlsruhe
Mitglied der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft
Deutscher Forschungszentren (HGF)
ISSN 0947-8620

ERZEUGUNG VON SYNCHROTRONSTRAHLUNG MIT EINEM NEUARTIGEN, SUPRALEITENDEN MIKROUNDULATOR

Übersicht

Undulatoren sind aneinandergereihte magnetische Dipolpaare abwechselnder Polarität. In ihrem alternierenden magnetischen Feld senden Elektronen Synchrotronstrahlung aus, erfahren jedoch keine Nettoablenkung. Das Spektrum der emittierten Strahlung hängt von der Energie der Elektronen, der Periodenlänge und dem Magnetfeld ab. Undulatoren mit kurzer Periodenlänge erlauben es, die Energie der Elektronen und damit den Aufwand für die Erzeugung von Synchrotronstrahlung niedrig zu halten.

In der vorliegenden Arbeit wird ein neuartiger, supraleitender Undulator mit der sehr kleinen Periodenlänge von 3,8 mm aus einem stromdurchflossenen Supraleiter beschrieben. Bei Strahltests am Mainzer Mikrotron MAMI wurde das mit einem 855 MeV Elektronenstrahl erzeugte Spektrum vermessen. Das Maximum liegt, wie theoretisch erwartet, bei 1,78 keV.

GENERATION OF SYNCHROTRON RADIATION WITH A NOVEL SUPERCONDUCTIVE MICRO-UNDULATOR

Abstract

Undulators consist of a sequence of magnetic dipoles with alternating field directions. In the undulator electrons are emitting synchrotron radiation despite the fact that the particles are not undergoing a net deflection. The spectrum of the emitted radiation depends on electron energy, period length of the undulator and the strength of the magnetic field. Undulators with short period length allow to keep the energy of the electrons and therefore the costs low.

In this thesis a novel superconductive undulator with a very short period length of 3,8 mm made from a superconductive wire is presented. The undulator was successfully tested at the Mainz Microtron MAMI with a 855 MeV beam. The measured spectrum at 1,78 keV was found to be in good agreement with calculations.

1	EINLEITUNG	3
2	STRAHLUNGSERZEUGUNG MIT RELATIVISTISCHEN ELEKTRONEN	5
2.1	Synchrotronstrahlung aus Ablenkmagneten	5
2.2	Synchrotronstrahlung aus Insertion Devices	7
2.3	Zusammenfassung der Arbeiten zu Mikroundulatoren	9
3	KONZEPTION DES SUPRALEITENDEN MIKROUNDULATORS	12
3.1	Grundlagen	12
3.2	Auswahl des supraleitenden Materials	16
3.3	Auslegung, Aufbau und Test des Undulators in einem Badkryostaten	23
4	AUFBAU DES UNDULATORSYSTEMS	27
4.1	Aufbau der Undulatorspulen	27
4.2	Untersuchung im Badkryostaten	29
4.3	Aufbau eines Kryostaten zur Durchführung von Strahltests	35
4.3.1	Vakuumtechnik	35
4.3.2	Kryotechnik	37
4.4	Kontrollsystem, Vakuumsystem und Meßwerterfassung	48
5	EXPERIMENTELLE ERGEBNISSE	55
5.1	Kalttest ohne Elektronenstrahl	55
5.2	Erzeugung von Synchrotronstrahlung	60
6	ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	71
7	LITERATUR	72
8	ANHANG	76
8.1	Teilchenbeschleuniger	76
8.2	Berechnung der Sicherheitselemente	79

1 Einleitung

Röntgenstrahlung wird seit ihrer Entdeckung im Jahre 1895 in vielen Bereichen wie z.B. in der Medizin, für Materialuntersuchung und der Mikrostrukturtechnik eingesetzt. Der Bedarf an Röntgenstrahlungsquellen mit hoher Strahlqualität stieg seit ihrer Entdeckung dramatisch an. Mit dem Bau von Elektronenbeschleunigern eröffneten sich neue Möglichkeiten, Röntgenstrahlung durch freie Elektronen, die sich auf einer kreisförmigen Bahn bewegen, zu erzeugen. Da diese Strahlung 1947 erstmals an einem Elektronensynchrotron der Firma General Electric nachgewiesen werden konnte, wird sie als Synchrotronstrahlung bezeichnet [Koc83]. Weltweit wurden zahlreiche solcher Synchrotronstrahlungsquellen gebaut, im Forschungszentrum Karlsruhe ist ANKA (**Å**ngströmquelle **K**arlsruhe) im Aufbau [Mos95].

Zunächst wurde die von normalen Ablenkmagneten emittierte Synchrotronstrahlung verwendet. Um noch bessere Strahlqualität zu erreichen, ging man dazu über, zwischen den Ablenkmagneten spezielle Magnete, sogenannte Insertion Devices, wie z.B. Undulatoren, einzusetzen. Dabei handelt es sich um periodische Aneinanderreihungen von mehreren Einzelmagneten mit abwechselnder Polarität, die in ihrer Gesamtheit keine Nettoablenkung der Elektronen hervorrufen. Die räumliche Periodizität des Magnetfelds wird durch die Periodenlänge beschrieben.

Bei einem Undulator ist der Auslenkungswinkel um die ungestörte Bahn gering [Koc83a]. Wegen des kleinen Auslenkwinkels der Elektronen kommt es zu einer kohärenten Überlagerung der emittierten Strahlung mit Verstärkung oder Auslöschung. Die Verstärkung findet bei diskreten Wellenlängen bzw. Energien statt. Ein Undulator strahlt somit weitgehend monochromatische Synchrotronstrahlung mit höheren Harmonischen aus, Ablenkmagnete dagegen ein breites, kontinuierliches Spektrum.

Die Wellenlänge, bei der die oben beschriebene Verstärkung stattfindet, hängt von der Energie der Elektronen, der Magnetfeldstärke und der Periodenlänge des Undulators ab.

Bei der technischen Realisierung von Undulatoren gibt es im wesentlichen drei verschiedene Bauformen: Elektromagnete (von Spulen erregte Weicheisenpole), Hybridmagnete (von Permanentmagneten erregte Weicheisenpole) und Permanentmagnete.

Um mit konventionellen Undulatoren harte Röntgenstrahlung zu erzeugen, muß die Teilchenenergie circa 6 GeV oder mehr betragen. Solche Synchrotronstrahlungsquellen sind vergleichsweise teuer, deshalb versucht man alternativ ein härteres Spektrum durch Reduktion der Periodenlänge des Undulators zu erreichen. Allerdings ist es technisch nicht ganz einfach, Undulatoren mit einer Periodenlänge von Millimetern aus Permanentmagneten aufzubauen, wie es bei Undulatoren größerer Periodenlänge üblich ist.

Angeregt durch Ergebnisse von Tatchyn et al. [Tat87] wurde im Forschungszentrum Karlsruhe auf Vorschlag von Moser [Mos91] in den frühen 90er Jahren untersucht, ob ein supraleitender Undulator mit extrem kurzer Periodenlänge (50 und 500 μm) mit den Mitteln der Mikrotechnik hergestellt werden kann [Hol91]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein Weg beschrieben, Undulatoren mit kurzen Perioden (im vorliegenden Fall 3,8 mm) aus NbTi-Supraleitern zu bauen, die im Vakuum in unmittelbarer Nähe des Elektronenstrahls angebracht sind und die Möglichkeit bieten, im Vergleich zu Undulatoren aus Permanentmagneten höhere magnetische Feldstärken zu erreichen.

Häufig werden Supraleiter in Spulen verwendet, um mit sehr vielen Windungen (> 100) und einem vergleichsweise niedrigem Strom (200 bis 400 A) ein relativ starkes Magnetfeld (5 bis 20 T) zu erzeugen. Bei der technischen Ausführung eines supraleitenden Mikroundulators mußte ein anderes Konzept verfolgt werden: Mit wenigen Windungen (1 bis 6) und einem hohem Strom (500 bis 1000 A) wird ein Magnetfeld von 1 bis 3 T erzeugt. Zunächst mußte ein geeignetes Material für den supraleitenden Draht gefunden werden, der einen solchen Hochstrombetrieb ermöglicht. Im Anschluß daran wurde ein technisch umsetzbares Konzept erarbeitet, das es erlaubt, solche Undulatoren auf relativ einfache Weise zu bauen. In einem nächsten Schritt wurde der Undulator in einen Kryostaten integriert und erfolgreich betrieben. Zum Abschluß der Arbeit wurde der Undulator mit seinem Kryostaten in die Strahlführung des Mainzer Mikrotrons MAMI eingebaut und die erzeugte Synchrotronstrahlung ortsaufgelöst vermessen. Damit konnte gezeigt werden, daß der im Rahmen dieser Arbeit entstandene Undulator unter normalen Betriebsbedingungen voll einsatzfähig ist.

2 Strahlungserzeugung mit relativistischen Elektronen

2.1 Synchrotronstrahlung aus Ablenkmagneten

Wird ein hochrelativistisches Elektron durch ein Magnetfeld auf eine gekrümmte Bahn gezwungen, emittiert es elektromagnetische Strahlung in Vorwärtsrichtung mit dem vertikalen Öffnungswinkel $2/\gamma$ bei $h\nu=E_C$, der charakteristischen Energie (Abb. 2.1) und einem horizontalen Fächer, der dem Ablenkwinkel entspricht (Abb. 2.2). Man nennt Elektronen hochrelativistisch, wenn sie sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit ($\gamma = E/E_0 \gg 1$) bewegen, wobei E die Gesamt- und E_0 die Ruheenergie der Elektronen bezeichnet. Zwei der für diese Arbeit relevanten Beschleunigertypen, der auf dem Gelände des Forschungszentrums Karlsruhe im Bau befindliche Speicherring ANKA und das Mainzer Mikrotron MAMI, werden im Anhang kurz beschrieben (Kap. 8.1).

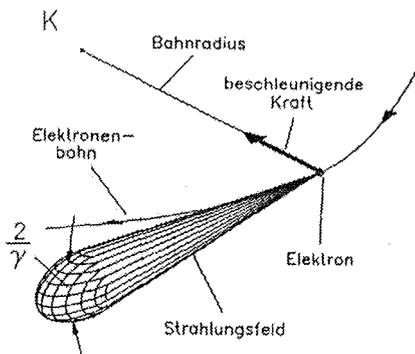


Abb. 2.1: Winkelverteilung der Synchrotronstrahlung während der Emission von einem Punkt der Bahn [Wil92].

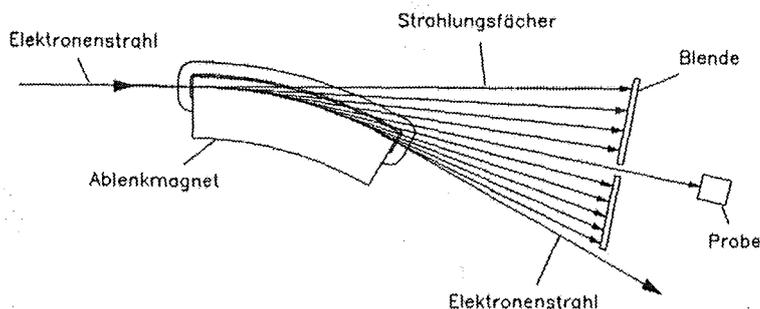


Abb. 2.2: Horizontaler Strahlungsfächer eines Elektronenstrahls beim Durchlaufen eines Ablenkmagneten [Wil92].

Das Spektrum der Strahlung erstreckt sich üblicherweise vom Infrarot bis zum Röntgenbereich (Abb. 2.3). Die dort aufgetragene Brillanz gibt den spektralen Photonenfluß bezogen

auf den Raumwinkel, in dem die Strahlung abgegeben wird, und die Quellfläche, von der sie emittiert wird, an.

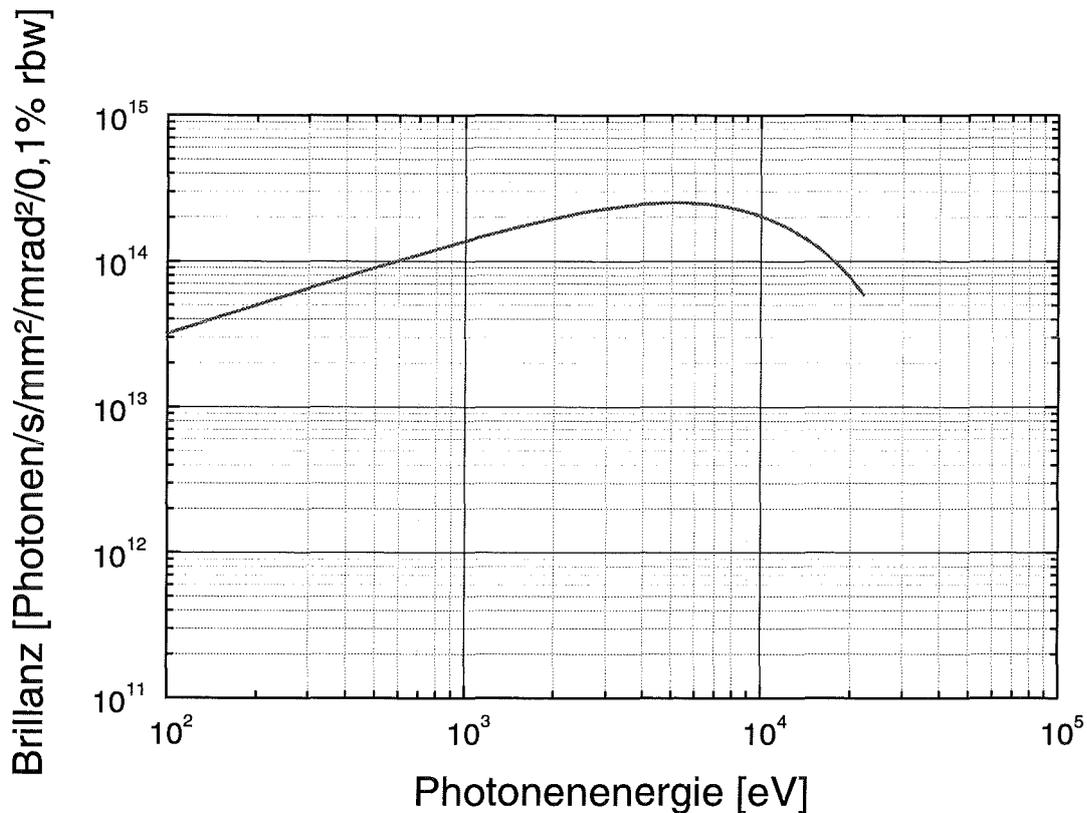


Abb. 2.3: Spektrum eines ANKA-Ablenkmagneten bei einem Strom von 400 mA [Mos95]. Die Brillanz beschreibt den spektralen Photonfluß bezogen auf den Raumwinkel, in dem die Strahlung abgegeben wird, und die Quellfläche, von der sie emittiert wird.

Die charakteristische Energie der erzeugten Strahlung, die das Leistungsspektrum in zwei gleiche Hälften teilt, berechnet sich wie folgt:

$$E_c [keV] = 0,665 \cdot B[T] \cdot E^2 [GeV] \quad (2.1)$$

wobei B das Magnetfeld des Ablenkmagneten und E die Gesamtenergie der Elektronen ist. Die abgestrahlte Leistung pro Winkelintervall hängt vom Ablenkradius r ab, wobei r für $\gamma \gg 1$ direkt proportional zur Energie der Elektronen ist (2.2).

$$P [W / mrad^2] = 18,1 \cdot \frac{E^4 [GeV]}{r [m]} \cdot I [A] \quad (2.2)$$

$$r [m] = \frac{1}{0,299} \cdot \frac{E [GeV]}{B [T]}$$

2.2 Synchrotronstrahlung aus Insertion Devices

Bei einem Speicherring sind Energie und maximaler Fluß der Photonen durch die Energie der Elektronen, den Strahlstrom und den Radius der Ablenkmagneten festgelegt. Insertion Devices ermöglichen einen höheren Fluß pro Winkleinheit oder eine höhere Energie der Photonen. Als Insertion Devices werden Wellenlängenschieber, Wiggler oder Undulatoren verwendet.

Wellenlängenschieber

Wellenlängenschieber unterscheiden sich von Ablenkmagneten lediglich durch die Stärke des Magnetfelds. Um höherenergetische Photonen zu erhalten, muß der Ablenkradius des Wellenlängenschiebers kleiner als der eines Ablenkmagneten und damit das Magnetfeld höher sein. Daher sind Wellenlängenschieber meist aus supraleitenden Spulen aufgebaut, Magnetfelder um 7 T sind üblich.

Im Vorfeld dieser Arbeit wurde auch der Einfluß eines 12 T Wellenlängenschiebers auf den Betrieb eines Speicherrings anhand des Beispiels von ANKA untersucht. Die Ergebnisse dieser Rechnungen wurden in [Ban96] und [Hez96] veröffentlicht.

Wiggler und Undulatoren

Wiggler und Undulatoren verwenden das gleiche Grundprinzip, unterscheiden sich aber in der Stärke des verwendeten Magnetfelds und damit auch in der Charakteristik der erzeugten Strahlung.

Sie bestehen aus einer größeren Anzahl von aufeinander folgenden magnetischen Dipolpaaren abwechselnder Polarität, so daß das Magnetfeld entlang der Längsachse des Wigglers bzw. Undulators periodisch alterniert (Abb. 2.4).

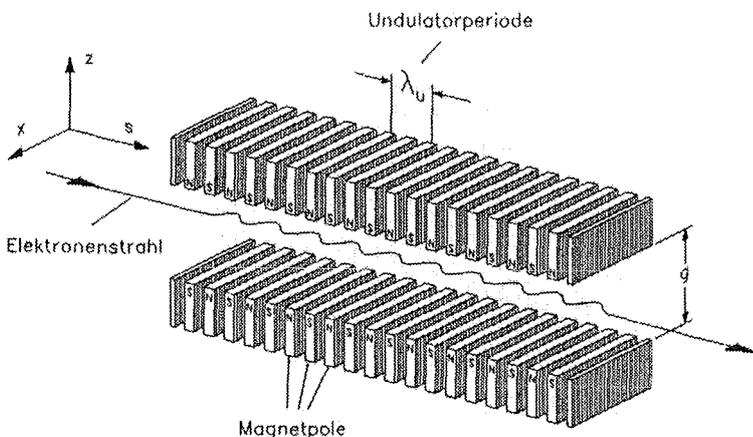


Abb. 2.4: Prinzipieller Aufbau eines Wigglers bzw. Undulators [Wil92].

Prinzipiell stehen folgende technische Möglichkeiten zur Erzeugung alternierender Magnetfelder zur Auswahl:

- Permanentmagnete
- Hybridmagnete
- Elektromagnete

Wiggler und Undulatoren unterscheiden sich durch den Ablenkwinkel Θ_w der Teilchenbahn und den natürlichen Öffnungswinkels der Strahlung $1/\gamma$.

$$K = \Theta_w \cdot \gamma \quad (2.3)$$

Bei $K \leq 1$ spricht man von Undulatoren, bei $K > 1$ von Wiggeln. Bei Undulatoren ist das Magnetfeld schwächer und die Ablenkung der Elektronen (Θ_w) daher kleiner als der natürliche Öffnungswinkel der Strahlung ($1/\gamma$). Es kommt zu einer kohärenten Überlagerung der emittierten Photonen, durch Interferenz treten Verstärkungen und Auslöschungen auf. Bei Wiggeln tritt die Überlagerung auf Grund der starken Ablenkung der Elektronen nicht auf. Ihr Spektrum ist daher dem der Wellenlängenschieber sehr ähnlich. In Abb. 2.5 ist das Spektrum eines Undulators qualitativ dargestellt.

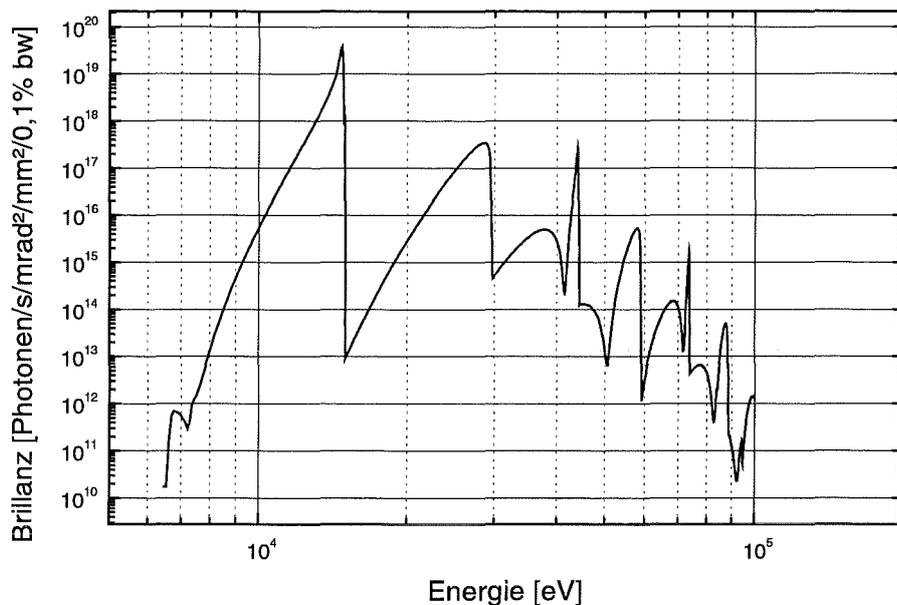


Abb. 2.5: Qualitative Darstellung eines über den Raumwinkel integrierten Undulatorspektrums. Der Strahlstrom beträgt 400 mA, die Periodenlänge 3,8 mm, das Magnetfeld 1 T, die Energie 2,5 GeV und die Emittanz 5 nrad. Wird die Strahlung nahe der Achse durch eine Lochblende ausgeblendet, treten im wesentlichen nur noch die scharfen Peaks auf.

Die Photonenenergie der Harmonischen eines Undulators E_{ph} berechnet sich nach folgender Formel:

$$\lambda_{ph} = \frac{\lambda_U}{2 \cdot n \cdot \gamma^2} \cdot \left(1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2 \cdot \Theta^2 \right)$$
$$E_{PH} [keV] = \frac{123,9842}{\lambda_{ph} [nm]} \quad (2.4)$$

mit λ_U als Periodenlänge, n als Anzahl der Harmonischen und Θ als Beobachtungswinkel.

Die Vorteile der von Undulatoren erzeugten Spektren gegenüber denen der Wiggler sind u.a. folgende:

- Hohe Brillanz
- Diskrete Energieverteilung
- Starke Bündelung der Strahlung.

Anhand von (2.4) kann man erkennen, daß die Reduktion der Periodenlänge eines Undulators eine lineare Erhöhung der Photonenenergie zur Folge hat. Dies erklärt die Anstrengungen, die in den letzten Jahren in diese Richtung unternommen wurden (siehe Tab. 2.1).

2.3 Zusammenfassung der Arbeiten zu Mikroundulatoren

Verschiedene Forschungsgruppen versuchen Mikroundulatoren mit unterschiedlichen Techniken zu bauen. In Tab. 2.1 sind die uns bekannten, realisierten Undulatoren mit einem Polabstand von weniger als 10 mm zusammengefaßt.

Es fällt auf, daß die Mehrzahl der aufgelisteten Undulatoren aus Permanentmagneten gebaut wurde. Grund hierfür ist die größere Verbreitung dieser Technik im Vergleich zu den elektromagnetischen Undulatoren. Betrachtet man die Periodenlänge, so erkennt man, daß unterhalb von 10 mm das elektromagnetische Prinzip überwiegt.

Tab. 2.1: Übersicht uns bekannter, realisierter Undulatoren mit einem Polabstand von weniger als 10 mm (nach Veröffentlichungszeitpunkt sortiert).

Autor/Institut	Periodenlänge [mm]	Anzahl der Perioden	Magnetfeld [T] @ Polabstand [mm]	Wirkprinzip	Referenz
Granatstein et al., Maryland	2,7	10	0,8*10 ⁻⁴ T/A @ 1	Elektromagnet mit Kupferleiter	[Gra85]
Tatchyn et al., SLAC	0,726	35	0,3 @ 0,25	Permanentmagnete	[Tat87]
Ben-Zvi et al., BNL	8,8	3	0,5 @ 4,4	Supraleiter	[Ben90]
Warren et al., LANL	13,6	73	0,65 @ 1,5	Permanentmagnete	[War90]
Stefan et al., BNL	16	20	0,68 @ 6	Permanentmagnete	[Ste91]
Gomes et al., LNLS	8,8	11,5	0,1 @ 1,5	Kupferleiter	[Gom92]
Baurichter, ASTRID	5,6	16	0,91 @ 1	Permanentmagnete	[Bau93]
Andersson et al., MAXLAB	24	34,5	0,76 @ 7,7	Hybridtechnik	[And95]
Dambach, MAMI	12	10	1 @ 3	Permanentmagnete	[Dam95]
Stoner et al., MIT	8,8	70	0,42 @ 4,2	Elektromagnet mit Kupferleiter	[Sto95]
Ingold et al., BNL	7,3	69	1,28 @ 1,5	Supraleiter	[Ing96]
Stefan et al., BNL	11	31	0,688 @ 3,3	Permanentmagnete	[Ste98]

Vorarbeiten am Forschungszentrum Karlsruhe

Auf Vorschlag von Moser [Mos91] wurde von H. Holzapfel in einer Diplomarbeit untersucht, wie ein supraleitender Mikro- undulator mit Mitteln der Mikrotechnik (z.B. LIGA-Verfahren [Bec86] und [Men97] oder spanabhebende Mikrofertigung [Bie88] und [Fri97]) hergestellt werden könnte [Hol91]. Das Prinzip ist in Abb. 2.6 dargestellt.

Der Leiter wird in zwei übereinander liegenden, ebenen Platten in mäandrierenden Nuten geführt. Der Elektronenstrahl befindet sich in der Mitte der Platten.

Sich gegenüberliegende Leiter haben gleiche Stromrichtung, so daß man entlang des Elektronenstrahls ein in vertikaler Richtung periodisch alternierendes Magnetfeld erhält.

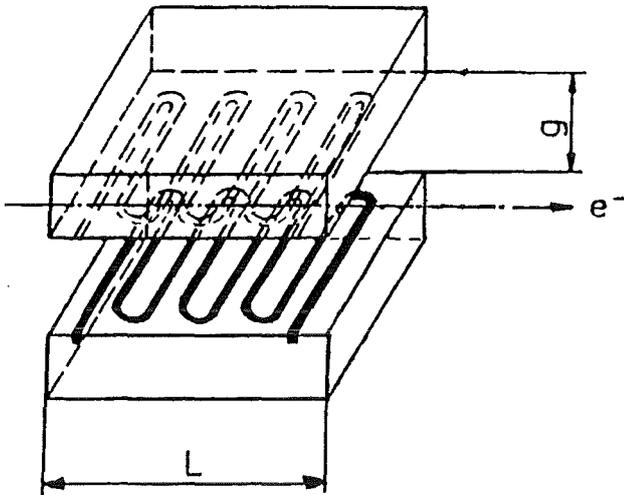


Abb. 2.6: Prinzipskizze des supraleitenden Mikroundulators [Hol91]. L bezeichnet die Gesamtlänge des Undulators, g den Polabstand und e^- die Lage der Elektronenbahn.

Dabei wurden zwei verschiedene Periodenlängen, 500 μm bzw. 50 μm , in Betracht gezogen. Dies führte bei Polabständen von 250 μm bzw. 25 μm zu Magnetfeldstärken von 0,12 T bzw. 0,012 T. Diese kleinen Polabstände stellen extreme Anforderungen an einen Einsatz der beiden in der Diplomarbeit vorgeschlagenen Varianten an einem Speicherring. Um den damit verbundenen technischen Aufwand zu begrenzen, wurde für die vorliegende Arbeit ein anderer Weg gewählt.

3 Konzeption des supraleitenden Mikroundulators

3.1 Grundlagen

In Kapitel 2.2 wurde bereits ausgeführt, daß das Magnetfeld in Undulatoren entweder durch Permanentmagnete, in Hybridtechnik oder, wie in der vorliegenden Arbeit beschrieben, mittels eines stromdurchflossenen Leiters erzeugt werden kann. In diesem Kapitel soll auf diese Art der Erzeugung eines Magnetfelds eingegangen werden.

Felderzeugung durch einen stromdurchflossenen Leiter

Wie im Gesetz von Biot-Savart beschrieben, erzeugt ein Strom, der durch einen unendlich dünnen, langen, geraden Leiter fließt, ein kreisförmiges Magnetfeld (3.1). Die Stärke des Magnetfelds B hängt vom Strom I , dem Abstand r zwischen Leiter und Beobachtungspunkt und dem Medium (μ_r) ab, das den Leiter umgibt.

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{I}{2\pi \cdot r} \quad (3.1)$$

μ_0 ist die Vakuumpermeabilität ($4\pi 10^{-7}$ Vs/Am), μ_r die Permeabilitätszahl des Mediums außerhalb des Leiters.

Überlagerung der Felder mehrerer Leiter

Das Feld zweier paralleler in einer Ebene liegender Leiter, die von Strömen gleicher Stärke aber unterschiedlicher Richtung durchflossen werden, addiert sich (Abb. 3.1).

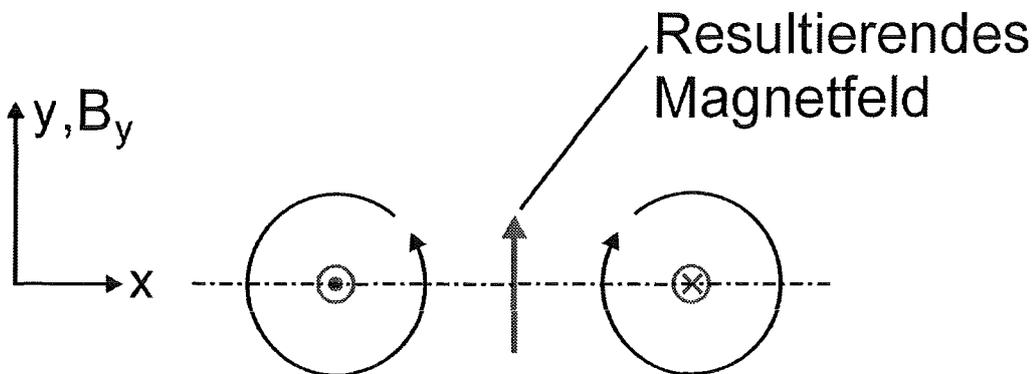


Abb. 3.1: Resultierendes Magnetfeld zweier unendlich dünner, langer, gerader Drähte mit entgegengesetzten Stromrichtungen.

Das maximale Feld in y-Richtung tritt in der Mitte der von beiden Leitern aufgespannten Ebene entlang der Mittellinie auf. Dort verstärken sich die Feldkomponenten in y-Richtung, die Komponenten in x-Richtung heben sich gegenseitig auf.

Im Zentrum von vier Leitern überlagern sich die Magnetfeldkomponenten in y-Richtung in der in Abb. 3.2 dargestellten Weise. Das von einem Leiter erzeugte Magnetfeld in y-Richtung ist:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{I}{2\pi \cdot r} \cdot \cos \alpha \quad (3.2)$$

wobei α der Winkel zwischen der Verbindungsgerade des Leiters mit dem jeweiligen Ort und der x-Achse ist.

Die y-Komponente des resultierenden Magnetfelds ist im Zentrum der Anordnung maximal.

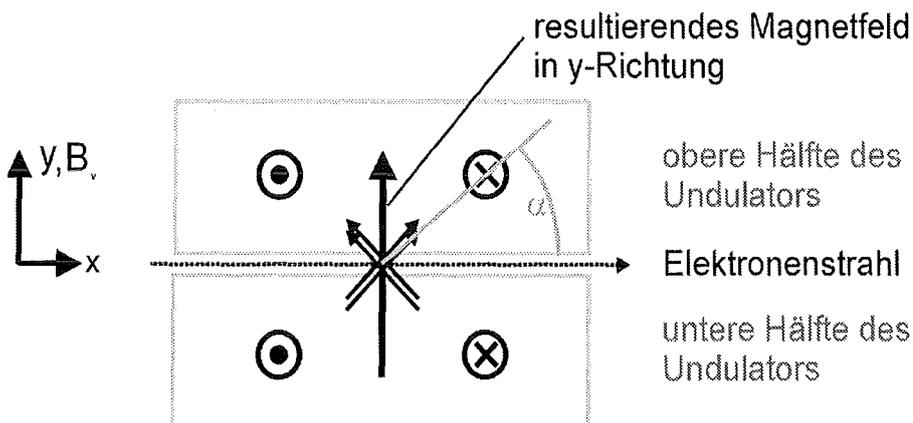


Abb. 3.2: Vertikales Magnetfeld im Zentrum von vier Drähten. Die Anordnung der Drähte entspricht einer Periode eines Undulators.

Abb. 3.2 stellt einen elektromagnetischen Undulator dar. Der Elektronenstrahl wird genau in der Mitte zwischen den beiden Spulen geführt. Wiederholt man die in Abb. 3.2 dargestellte Struktur, so erhält man auf der x-Achse ein in y-Richtung periodisch alternierendes Magnetfeld (Abb. 3.3).

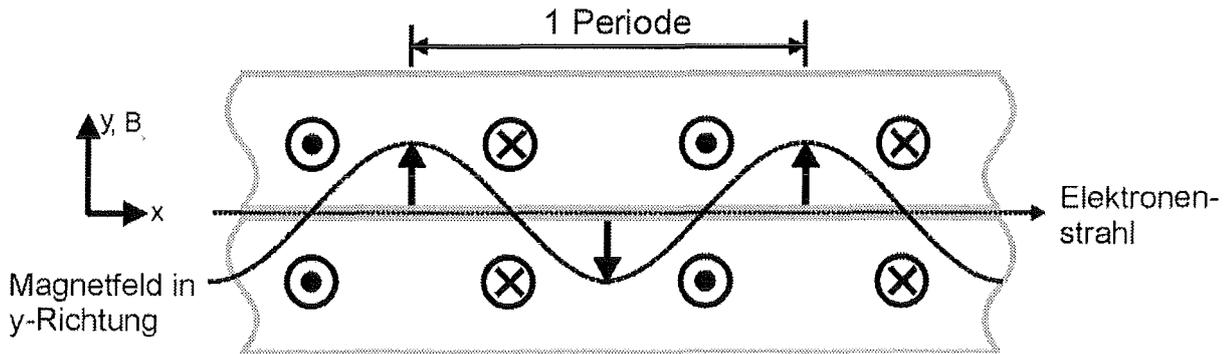


Abb. 3.3: Resultierendes Magnetfeld in y-Richtung eines unendlich langen Undulators.

Formelmäßig kann die Überlagerung der vertikalen Magnetfeldkomponenten der einzelnen Leiter folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$\sum_i B_{i,y} = \sum_i (\cos \alpha_i \cdot B_i) = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r}{2\pi} \sum_{\substack{i=-\infty \\ i \neq 0}}^{+\infty} \frac{I_i \cdot (-1)^{(2i+1)} \left[\frac{g}{2} + \delta + R \right]}{r_i^2}. \quad (3.3)$$

wobei g dem Abstand der beiden Undulatorhälften, δ dem Abstand des Leiters von der Oberfläche und R dem Radius der Querschnittsfläche des Leiters entspricht. Der Abstand vom Leitermittelpunkt zu dem Punkt, an dem das Magnetfeld berechnet werden soll, wird mit dem Vektor \vec{r}_i bezeichnet. Dieser wird für positive und negative i -Werte unterschiedlich berechnet:

$$\text{Für } i > 0: \quad r_i^2 = \left[x + \frac{\lambda_u}{2} \left(i - \frac{1}{2} \right) \right]^2 + \left[\frac{g}{2} + \delta + R \right]^2$$

$$\text{Für } i < 0: \quad r_i^2 = \left[x - \frac{\lambda_u}{2} \left(i - \frac{1}{2} \right) \right]^2 + \left[\frac{g}{2} + \delta + R \right]^2 \quad (3.4)$$

Dabei tragen nicht nur die 4 nächsten Leiter, sondern im Prinzip alle aus der näheren Umgebung zum Feldverlauf bei (Abb. 3.4).

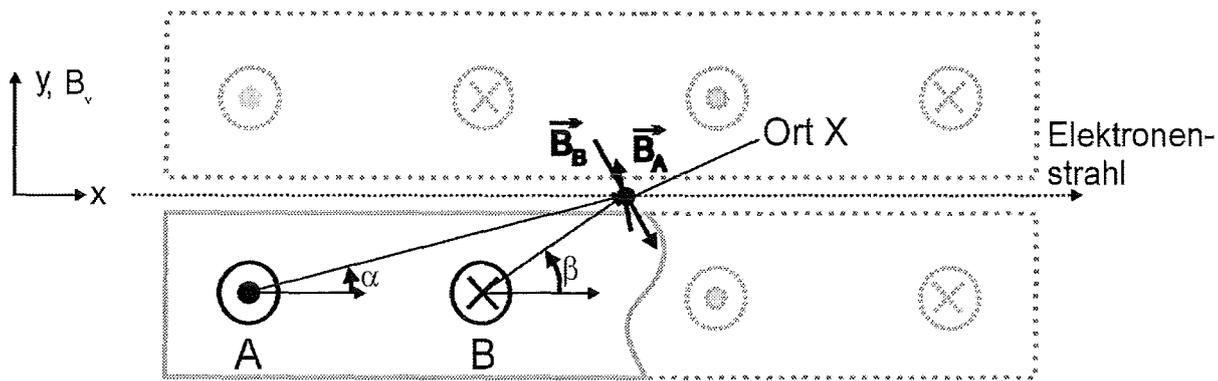


Abb. 3.4: Schwächender Einfluß benachbarter Drähte. Die Magnetfelder sind nur für die Drähte A und B dargestellt.

Einerseits ist der Abstand von Leiter A zum Ort X größer als der von Leiter B und daher das absolute Feld dort kleiner. Andererseits ist der Cosinus des Winkels von Leiter A (α) größer als der von Leiter B (β) und daher die Komponente des Felds in y-Richtung größer. Dies bedeutet, daß direkt benachbarte Drähte einen nicht zu vernachlässigenden schwächenden und die darauf folgenden einen verstärkenden Einfluß auf die y-Komponente des überlagerten Magnetfelds haben usw. Daher müssen sie bei der Berechnung des resultierenden Magnetfelds berücksichtigt werden.

Diese grundsätzlichen Überlegungen wurden durch Feldrechnungen mit Computerprogrammen wie den Finite-Element-Programmen MAFIA [Maf96] und TOSCA [Tos89] begleitet. Ergebnisse dieser Rechnungen sind in Kap. 3.3 dargestellt.

3.2 Auswahl des supraleitenden Materials

Sowohl Hoch- (HTSL) als auch Tieftemperatursupraleiter (TTSL) müssen auf ihre Verwendung hin untersucht werden. TTSL werden in der Regel bei höchstens 4,2 K betrieben. Sie benötigen daher das relativ teure flüssige Helium als Kühlmittel. HTSL hingegen sind bereits supraleitend, wenn sie mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden.

Eine Zusammenstellung der kritischen Stromdichte gängiger Materialien findet sich in Tab. 3.1.

Tab. 3.1: Vergleich der kritischen Stromdichte gängiger Supraleitungsmaterialien [Vac90], [Gas96] und [Sch97].

Material	Prinzip	Krit. Stromdichte [kA/mm^2] ohne angelegtes Magnetfeld
NbTi	TTSL	> 2,0 bei 4,2K
Nb ₃ Sn	TTSL	> 3,5 bei 4,2K
YBCO	HTSL	> 1,0 bei 77K
Nd-123	HTSL	> 1,0 bei 77K

Die kritischen Stromdichten der HTSL liegen bei niedrigeren Magnetfeldern unter denen der TTSL. Bei sehr hohen Magnetfeldern (>20T) stellen die HTSL allerdings eine interessante Alternative dar. Ihre kritische Stromdichte liegt in diesem Bereich oberhalb der der TTSL.

Es muß aber berücksichtigt werden, daß HTSL mit hoher Stromdichte bis jetzt nur in sehr dünnen Schichten hergestellt werden können (üblicherweise < 1 μm). Das führt trotz hoher Stromdichte zu relativ kleinen absoluten Stromstärken und damit zu kleinen absoluten Magnetfeldstärken. Des weiteren ist die Fertigung der HTSL weitaus komplizierter und teurer als die der TTSL. Leiterbahnen werden z.B. mit Diamantsägen aus Vollmaterial herausgeschnitten (Bi-2212) oder mittels Sputtern und Laserdeposition aufgebracht (YBCO). Hinzu kommt außerdem, daß sich die HTSL-Technologie zur Zeit im Laborstadium befindet und nicht mit der hohen Reproduzierbarkeit und Verfügbarkeit der TTSL konkurrieren kann. Aus diesen Gründen wurde auf die Verwendung von HTSL verzichtet.

Innerhalb der TTSL kann zwischen NbTi und Nb₃Sn gewählt werden. Nb₃Sn weist eine um etwa 50% höhere Stromdichte auf, hat allerdings den Nachteil, daß es sehr brüchig ist. Es wird daher in einer Art Zwischenstufe angeliefert und muß vor Verwendung in seiner endgültigen Form gegläht werden. Während dieses Glühvorgangs (etwa 700°C über einen Zeitraum von u. U. mehreren Wochen) werden die supraleitenden Nb₃Sn-Ausscheidungen gebildet [Vac90]. Da dieser Glühprozeß sowohl die Fertigungsdauer als auch den

Fertigungsaufwand und die Materialauswahl des Spulenkörpers stark beeinflusst, wurde im Rahmen dieser Arbeit auf die Verwendung von Nb₃Sn verzichtet. Statt dessen wurde ein TTSL aus NbTi verwendet. Er weist folgende Vorteile auf:

- kommerzielle Verfügbarkeit
- relativ günstige Anschaffungskosten
- hohe Qualität
- hohe Zuverlässigkeit
- ausreichende kritische Stromdichte
- keine nachträgliche Wärmebehandlung
- relativ gute Handhabbarkeit

Es wurde der mit Lack isolierte, rechteckige NbTi Supraleiter F54-1.35 der Vakuumschmelze Hanau mit einem Querschnitt von 1,25 x 0,8 mm² (1,19 x 0,74 mm² ohne Isolation) ausgewählt [Thö96].

Versuche zur Strombelastbarkeit eines Supraleiters

Der kritische Strom eines Supraleiters wird durch das Magnetfeld und die Temperatur begrenzt. Um den maximal erreichbaren magnetischen Fluß abschätzen zu können, muß die kritische Stromdichte in Abhängigkeit des Magnetfelds bekannt sein. Normalerweise werden Supraleiter verwendet, um Spulen mit sehr vielen Windungen (> 100) herzustellen. Der Strom liegt in diesen Fällen bei 200 bis 400 A, das erzeugte Magnetfeld bei 5 bis 20 T. Im vorliegenden Fall können nur wenige Windungen (1 bis 6) verwendet werden. Um trotzdem ein ausreichend starkes Magnetfeld zu erzeugen, muß der Strom im Supraleiter relativ hoch sein (400 bis 1000 A). Für diesen Magnetfeldbereich gibt es wenig Daten über den Verlauf des kritischen Stroms, weshalb ein eigenes Experiment durchgeführt wurde.

Zur Untersuchung der kritischen Stromdichte in diesem Bereich wurde der Supraleiter um einen Zylinder aus Isolationsmaterial gewickelt aber nicht zusätzlich fixiert. Dieser Spulenkörper (Durchmesser \cong 80 mm) wird an einem Probenhalter befestigt (Abb. 3.5).

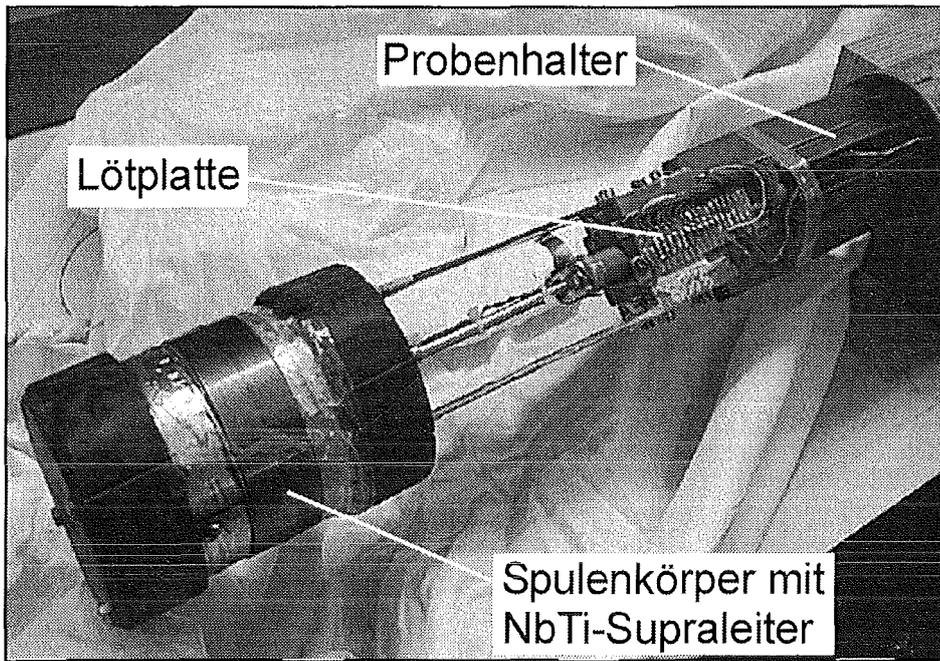


Abb. 3.5: Spulenkörper (Durchmesser \approx 80 mm) mit dem gewickelten rechteckigen NbTi-Supraleiter und dem Probenhalter. Über die Lötplatte können Meßsignale vom Spulenkörper nach außen zu den Auswertegeräten geführt werden.

Der Spulenkörper wird in ein Heliumbad getaucht und die Probe einem bekannten, veränderlichen Magnetfeld ausgesetzt. Die Probenhalter ermöglichen den Transport hoher Ströme von den Netzgeräten zu dem im Heliumbad befindlichen Spulenkörper.

Während eines versuchs wird der Strom durch den Supraleiter kontinuierlich erhöht und der kritische Strom (der Strom bei dem sich ein Quench andeutet) bestimmt. Dazu wird der Spannungsabfall am Supraleiter mit sogenannten Potentialdrähten gemessen.

Damit der Quench nicht nur detektiert, sondern auch lokalisiert werden kann, werden weitere Potentialdrahtpaare angelötet. Dies geschieht in einer Art Intervallschachtelung. Das erste Paar zeigt, wie bereits erwähnt, den Spannungsabfall innerhalb des ganzen Supraleiters (20 Windungen) an. Das zweite Paar mißt die Potentialdifferenz von der achten bis zur zwölften und das dritte Paar die Potentialdifferenz von der neunten bis zur elften Windung. Das erste Paar wurde an den Quenchdetektor angeschlossen, die beiden anderen Paare wurden mit einem x-y-Schreiber aufgezeichnet und anschließend ausgewertet.

Bei allen Versuchen trat der Quench in den innersten beiden Wicklungen auf. Die Ursache dafür ist, daß an dieser Stelle die Summe der Magnetfelder am größten ist. Das sehr homogene, von außen angelegte Magnetfeld war an allen Stellen gleich groß. Hinzu kommt das von der Spule selbst erzeugte Magnetfeld, das in den zentralen Windungen des Leiters am stärksten ist.

Die Messung des kritischen Stroms fand in einem Helium-Badkryostaten statt. Der Spulenkörper wurde dazu von oben eingeführt. Abb. 3.6 zeigt das Resultat der Messung.

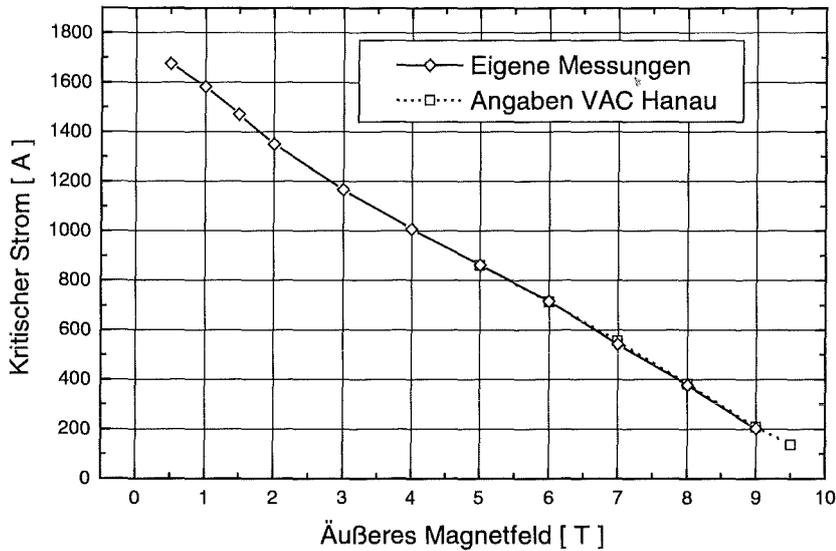


Abb. 3.6: Verlauf des kritischen Stroms in Abhängigkeit vom äußeren Magnetfeld und Vergleich mit Herstellerangaben [Vac90] und [Hez97].

Im Bereich von 5÷9 T erkennt man eine gute Übereinstimmung zwischen den vom Hersteller gemessenen und den im Versuch ermittelten Werten (s. Tab. 3.2).

Tab. 3.2: Vergleich der Herstellerangaben mit den Meßwerten des kritischen Stroms in Abhängigkeit vom äußeren Magnetfeld [Vac90].

Magnetfeld [T]	0,5	1	1,5	2	3	4	5	6	7	8	9	9,5
I [A] VAC	-	-	-	-	-	-	863	714	556	384	208	137
I [A] Messung	1675	1583	1470	1350	1167	1008	863	717	543	378	202	-
Abweichung [%]	-	-	-	-	-	-	0	0,42	-2,34	1,56	-2,89	-

Die in Abb. 3.6 und Tab. 3.2 angegebenen Magnetfeldstärken beziehen sich nur auf das äußere Magnetfeld. Das vom Supraleiter selbst erzeugte Magnetfeld wird nicht berücksichtigt. Man kann deshalb davon ausgehen, daß die realen kritischen Stromstärken höher liegen. Das äußere Feld verläuft parallel zum Eigenfeld, so daß sich die magnetischen Feldstärken auf der Innen- und Außenseite verstärken bzw. aufheben.

Vorversuche zur Strombelastbarkeit einer Undulatorwicklung

Mit Kenntnis der im vorhergehenden Kapitel ermittelten Abhängigkeit zwischen kritischem Strom und äußerem Magnetfeld kann das Magnetfeld des Undulators mit Finite-Elemente-Programmen berechnet werden. Zur Überprüfung der Rechnungen wurden Messungen durchgeführt.

Der Supraleiter wurde bifilar um einen ovalen Grundkörper aus Kupfer gewickelt und in vier Lagen übereinander und fünf Perioden nebeneinander angeordnet (Abb. 3.7).

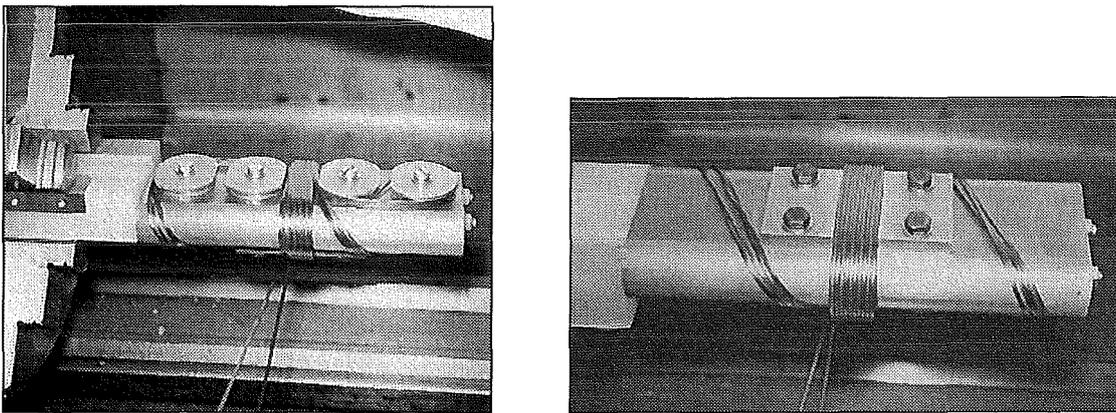


Abb. 3.7: Wickelkörper während des bifilaren Wickelvorgangs auf einer Drehbank [Hez96a].

Die vier Kupferzylinder links und rechts der Wicklung dienen dazu, den Supraleiter nach dem Wickeln einer Lage so umzulenken, daß übereinander liegende Leiter vom Strom in gleicher Richtung durchlaufen werden. Die Enden des Supraleiters werden auf links gelegene Anschlußstücke aus Kupfer gelötet, die mittels Glasfaser-Kunststoff (GFK) elektrisch isoliert sind (Abb. 3.8). Mit deren Hilfe kann der Wickelkörper an dem in diesem Kapitel beschriebenen Probenhalter befestigt werden.

Die Mitte des Leiters wird in Form eines „U“ um die beiden linken Kupferzylinder gelegt. Die beiden Leiter werden jeweils fünf Mal bifilar um den Kupferkern gewickelt (unterste Lage der Wicklung).

Anschließend wird der Supraleiter mit Hilfe der beiden auf der rechten Seite der Wicklung gelegenen Kupferzylinder umgelenkt; dann wird eine neue Lage gewickelt. Die dritte und vierte Lage des Wickelkörpers wird auf die gleiche Weise erzeugt. Nach Beendigung der vierten Lage befindet sich der Supraleiter auf der linken Seite und wird so an den beiden Kupferzylindern vorbei geführt, daß er auf die Anschlußstücke gelötet werden kann.

Um den Supraleiter auf den schmalen Seiten des ovalen Wickelkörpers besser fixieren zu können, wurden kleine Stücke aus GFK angebracht. Da selbst kleine Leiterbewegungen im Eigenfeld die Supraleitung zum Zusammenbrechen bringen können (Quench), wurde die gesamte Wicklung zur Sicherheit mit Stycast, einem quarzsandverfüllten Epoxidharz, vergossen.

Anschließend werden an den Stellen, an denen die beiden Enden des Supraleiters im GFK liegen, zwei Drähte (sogenannte Potentialdrähte) zur Quenchdetektion angelötet. Der gewickelte, kontaktierte und mit Stycast vergossene Wickelkörper ist in Abb. 3.8 dargestellt.

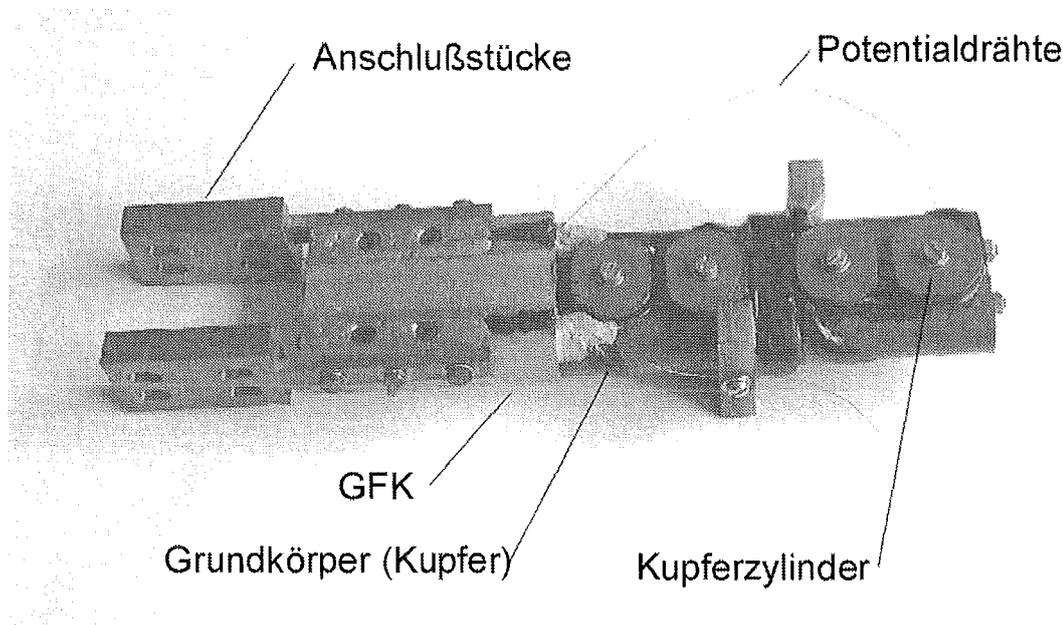


Abb. 3.8: Mit Stycast vergossener, kontaktierter Wickelkörper.

Der Wickelkörper wurde zusammen mit den Potentialdrähten an einem Probenhalter befestigt, elektrisch kontaktiert und in einen Badkryostaten eingeführt. Im Gegensatz zur Untersuchung des Spulenkörpers wurde in diesem Fall jedoch kein äußeres Feld angelegt, sondern nur der Strom durch den Supraleiter von 0 A ausgehend langsam bis zum Quench erhöht.

Den mit dem Programm TOSCA [Tos89] durchgeführten Rechnungen zufolge liegt der kritische Strom dieser Anordnung bei etwa 1400 A. Der im Versuch ermittelte kritische Wert lag bei nur 1000 A. Nach Ausbau des Wickelkörpers konnte man erkennen, warum der theoretische Wert nicht erreicht wurde: Das zur Fixierung des Supraleiters verwendete Stycast hatte an mehreren Stellen kleine Risse bekommen. Unter Einwirkung der Lorentzkraft hatten

sich einzelne Leiter aus ihrer Verankerung im Stycast gelöst und bewegt. Dies führte zum Zusammenbruch der Supraleitung.

Diskussion der Ergebnisse

Für den Bau des eigentlichen Undulators wurde daher entschieden, den Supraleiter in Nuten zu führen.

1. Das Verkleben des Leiters mit Stycast auf einer glatten Metalloberfläche ist nicht ausreichend, um die auftretenden Kräfte zu kompensieren.
 2. Die Umlenkung des Supraleiters am Ende jeder Lage muß verbessert werden. Das manuelle Führen des Supraleiters um die Umlenkzylinder und der anschließende Wechsel der Drehrichtung der Drehmaschine ist unhandlich und kann zum Verlust der Vorspannung des Leiters führen. Außerdem kann der Supraleiter durch das manuelle Führen um die Kupferzylinder deformiert werden.
-

3.3 Auslegung, Aufbau und Test des Undulators in einem Badkryostaten

Nach Abschluß der im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Voruntersuchungen im Badkryostaten wurde ein Labormuster eines supraleitenden Undulators gebaut und getestet. Auslegung und Aufbau der beiden Undulatorspulen werden in diesem Kapitel näher erläutert.

Magnetfeldberechnung

Wie bereits in Kapitel 3.2 ausgeführt muß der Supraleiter in Nuten geführt werden.

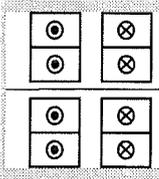
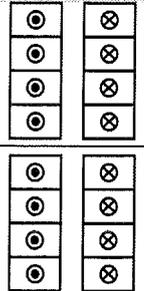
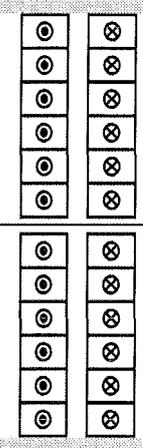
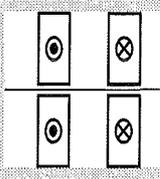
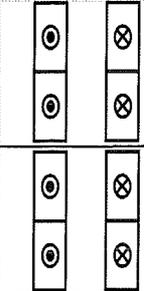
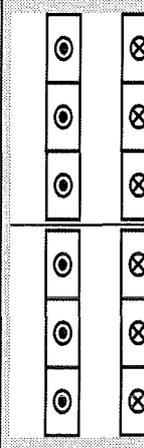
In einem ersten Schritt wurden verschiedene Kombinationen aus Stegbreite, Nuttiefe und Leiteranordnung unter Verwendung des ausgewählten, rechteckigen NbTi-Supraleiters untersucht. Um die große Anzahl möglicher Anordnungsvarianten einzuschränken und realisierbare Lösungen zu erhalten, wurden folgende Vorgaben gemacht:

1. Aus wickeltechnischen Gründen muß zwischen Supraleiter und Nut ein Spiel von 0,1 mm vorliegen.
2. Die Periodenlänge des Labormusters soll 3,8 mm betragen. Ausschlaggebend dafür waren die geometrischen Abmessungen des Supraleiters. Gemäß (2.4) haben die Photonen bei einer Elektronenenergie von 855 MeV eine charakteristische Energie von 1,79 keV, bei 2,5 GeV liegt diese bei 15,6 keV.

Die folgenden Betrachtungen hinsichtlich der Stärke des erzeugten magnetischen Flusses wurden ohne Verwendung von permeablen Materialien mit Hilfe des Finite-Element-Programms MAFLA [Maf96] durchgeführt.

In Tab. 3.3 sind verschiedenen Leiteranordnungen dargestellt. Sie unterscheiden sich in der Breite der Stege, der Anzahl und Anordnung der Supraleiter und in der Höhe des resultierenden maximalen Felds.

Tab. 3.3: Vergleich verschiedener Leiteranordnungen: Strom 1000 A, Polabstand 0,5, 1 und 2mm.

						
Fall	1	2	3	4	5	6
Stegbreite [mm]	0,55	0,55	0,55	1,0	1,0	1,0
Feld [T] @ gap 0,5 mm	0,55	0,66	0,67	0,33	0,4	0,42
Feld [T] @ gap 1 mm	0,4	0,43	0,44	0,24	0,29	0,29
Feld [T] @ gap 2 mm	0,175	0,19	0,19	0,11	0,13	0,13

Anhand Tab. 3.3 erkennt man, daß Fall 2 (Supraleiter in 4 Lagen übereinander) auf Grund der großen magnetischen Flußdichte die günstigste Leiteranordnung darstellt. Durch Hinzufügen weiterer Leiterpaare (Fall 3) wird die Stärke des magnetischen Flusses nur unwesentlich erhöht, der Aufwand während der Herstellung jedoch deutlich vergrößert.

In Abb. 3.9 ist der Verlauf der mit MAFIA [Maf96] berechneten magnetischen Flußdichte für einen Undulator mit einem Polabstand von 1 mm bei einem Strom von 1000 A mit der ausgewählten Leiteranordnung dargestellt.

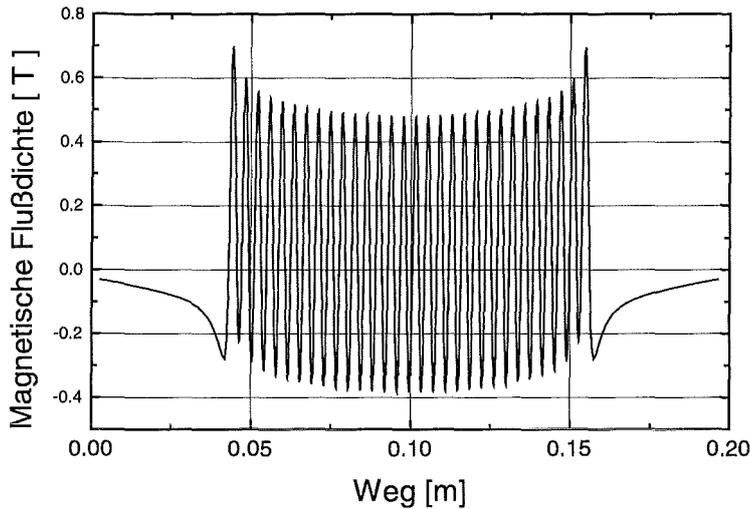


Abb. 3.9: Magnetische Flußdichte eines Undulators der Periodenlänge 3,8 mm mit 30 Perioden, einem Polabstand von 1 mm und einem Strom von 1000 A.

Man erkennt den für einen Undulator typischen alternierenden Verlauf des Magnetfelds. Deutlich sichtbar ist der schwächende Einfluß benachbarter Drähte (vgl. Kap. 3.1): Die Maxima der Randfelder des Undulators sind höher als die Maximalwerte des Felds im Zentrum, da am Rand die Schwächung der Felder auf Grund fehlender Leiter geringer ist. Durch eine geschickte Anordnung der Leiter in den Randregionen können die dort auftretenden Feldüberhöhungen reduziert werden (Abb. 3.10). Erreicht wird dies dadurch, daß die Leiter in den ersten und letzten beiden Perioden weiter entfernt von der Strahlachse gelegt werden (s. Abb. 4.2).

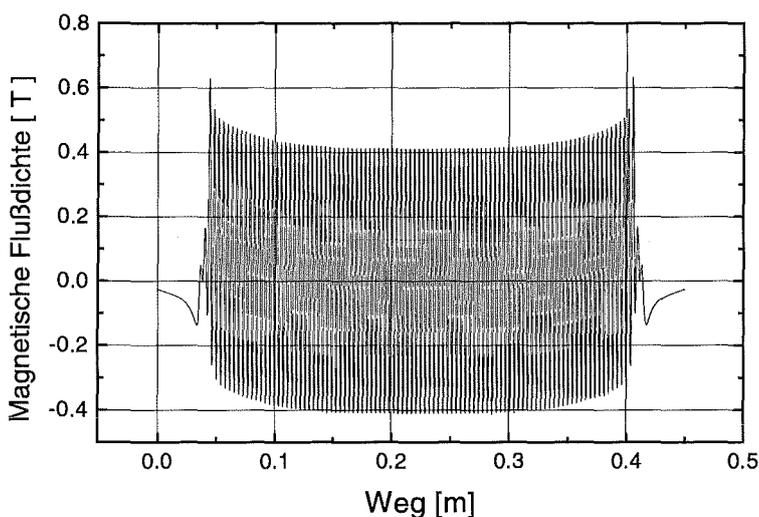


Abb. 3.10: Magnetische Flußdichte eines Undulators mit 100 Perioden. Die Drähte in den ersten und letzten beiden Perioden sind weiter von der Achse des Elektronenstrahls entfernt. Der Polabstand beträgt 1 mm, der Strom 1000 A.

Um die magnetische Flußdichte weiter zu erhöhen, können die Stege zwischen den Supraleitern aus Weicheisen gefertigt werden. Dies führt bei zu Abb. 3.10 unveränderten Randbedingungen zu der in Abb. 3.11 dargestellten magnetischen Flußdichte.

Vergleicht man beide Abbildungen, so erkennt man, daß die Randfelder bei Verwendung von Weicheisen weniger stark ausgeprägt sind. Dieser ausgleichende Effekt des Weicheisens hat jedoch zur Folge, daß das gesamte Magnetfeld eine Verschiebung in positive y -Richtung aufweist. Dieser unerwünschte Effekt kann durch Überlagerung eines konstanten Magnetfelds (Helmholtz-Spulen) reduziert werden.

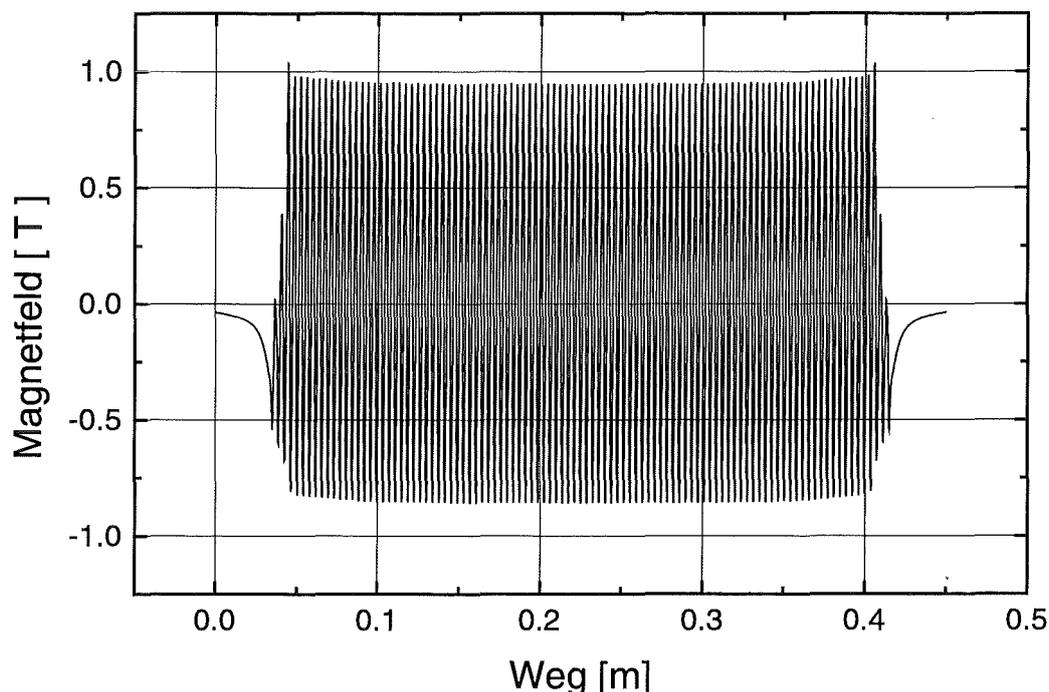


Abb. 3.11: Magnetische Flußdichte eines Undulators mit 100 Perioden. Zur Verstärkung des magnetischen Flusses wurden die Stege aus Weicheisen gefertigt, der Polabstand beträgt 1 mm, der Strom 1000 A.

Ziel weiterer Arbeiten wird es sein, die Randfelder und die Verschiebung des Felds weiter zu reduzieren. Das Magnetfeld muß unter anderem so optimiert werden, daß die Randeffekte für verschiedene Polabstände und Stromstärken vernachlässigt werden können. Hierfür sind allerdings sehr zeitaufwendige Simulationen erforderlich, die den Rahmen der vorliegenden Arbeit deutlich übersteigen.

4 Aufbau des Undulatorsystems

4.1 Aufbau der Undulatorspulen

Die in den vorhergehenden Kapiteln formulierten Anforderungen an die Undulatorspulen sollen hier nochmals zusammengefaßt werden:

- Der Supraleiter soll in 4 Lagen gewickelt und in Nuten geführt werden.
- Die Führung des Supraleiters während des Wickelvorgangs muß im Vergleich zum Vorversuch (Kap. 3.2) verbessert werden.
- Aus Gründen der Einfachheit wird ein bifilarer Wickelvorgang angestrebt.
- Zur Erhöhung der magnetischen Flußdichte wird Weicheisen verwendet.
- Die Nuten im Weicheisen sollen senkrecht zur Trajektorie der Elektronen stehen.
- Um einen möglichst kleinen Polabstand zu erhalten, wird der Supraleiter indirekt gekühlt.

Ergebnis der Überlegungen ist die in Abb. 4.1 dargestellte Struktur.

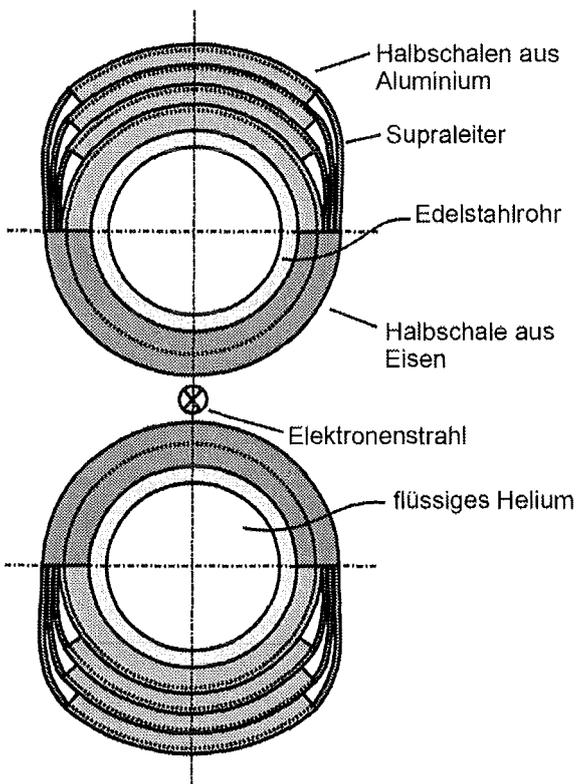


Abb. 4.1: Schnitt quer durch die Undulatorspulen.

Jede Undulatorspule besteht aus einer Halbschale aus Weicheisen mit geraden Nuten auf der dem Strahl zugewandten und 4 Halbschalen aus Aluminium mit schräg verlaufenden Nuten

auf der dem Strahl abgewandten Seite. Die fünf Halbschalen werden durch den unter Zugspannung stehenden Supraleiter an ein im Zentrum angeordnetes Edelstahlrohr gepreßt. In der Halbschale aus Weicheisen liegen die 4 Lagen Supraleiter in einer Nut (3,2 mm tief und 1,35 mm breit) direkt aufeinander, in den Halbschalen aus Aluminium befindet sich je ein Supraleiter in einer Nut (0,8 mm tief und 1,35 mm breit). Wird der Supraleiter kontinuierlich um die Undulatorplatte gewickelt, so muß eine Steigung, ähnlich dem Gewinde einer Schraube, vorgesehen werden. Man beginnt den Wickelprozeß damit, daß das Edelstahlrohr, auf dem die Halbschale aus Weicheisen und die innerste Halbschale aus Aluminium befestigt sind, in das Futter einer Drehmaschine eingespannt wird. Die Mitte des Supraleiters, der zuvor in 2 gleich lange Stücke unterteilt und auf 2 Kabeltrommeln gewickelt wurde, wird unter Vorspannung in eine kreisförmige Nut der untersten Halbschale aus Aluminium gelegt. Durch Drehen des Futter der Drehmaschine wird der Supraleiter kontinuierlich bifilar in die Nuten der beiden Halbschalen gewickelt. Auf Grund der bifilaren Wickeltechnik wird bei einer Umdrehung des Futter eine Periode des Undulators fertiggestellt. Sind alle Perioden mit einer Lage des Supraleiters gefüllt, so wird die zweite Halbschale aus Aluminium auf der ersten angebracht und die zweite Lage des Supraleiters gewickelt. Die Richtung der schrägen Nuten in der zweiten Halbschale aus Aluminium verläuft entgegengesetzt der in der ersten Halbschale. Ebenso entstehen die dritte und vierte Lage. Anschließend wird der Supraleiter an einem Ende der Undulatorplatte mechanisch befestigt (geklemmt).

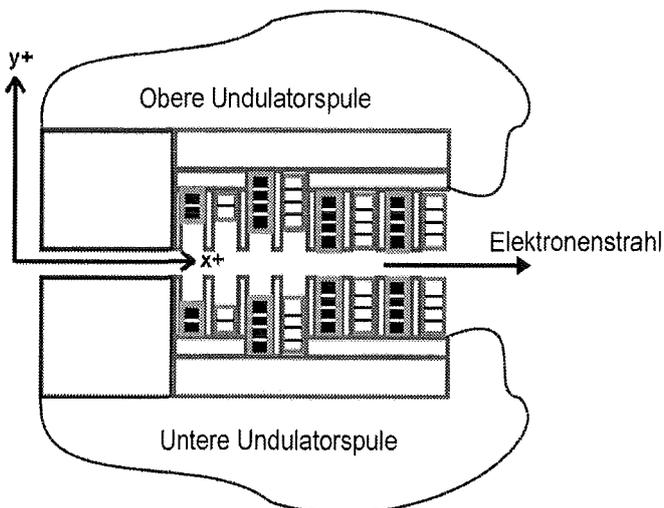


Abb. 4.2: Darstellung der ersten 4 Perioden der beiden Undulatorspulen. Die erste Periode enthält 2 Supraleiter pro Nut, alle anderen Perioden 4. Die Nuten der zweiten Periode sind 1 mm tiefer als die restlichen. Leiter mit gleicher Stromrichtung sind in Schwarz bzw. Weiß gekennzeichnet.

Die Lage und Anzahl der Supraleiter in den ersten und letzten beiden Perioden ist in Abb. 4.2 dargestellt. Bedingt durch das Wickelprinzip enthalten die erste und letzte Periode jeweils nur

zwei Supraleiter pro Nut. Die Nuten der zweiten und vorletzten Periode wurden 1 mm tiefer ausgeführt. Dadurch wird eine Reduktion der Feldüberhöhungen an den Enden des Undulators erreicht (vgl. Kap. 3.3).

Die Radien des Edelstahlrohrs und der verschiedenen Halbschalen sind so aufeinander abgestimmt, daß ein guter Flächenkontakt (und damit auch guter Wärmeübergang) gewährleistet ist.

4.2 Untersuchung im Badkryostaten

Bevor ein spezieller Kryostat für den Undulator gebaut werden konnte, wurde die Undulatorspule in einem vertikalen Badkryostaten auf Ihre Funktion hin untersucht.

Messung des kritischen Stroms

Die in Abb. 4.3 dargestellte Undulatorspule wurde mittels der beiden am linken Ende befindlichen Kupferbacken an dem in Kap. 3.2 beschriebenen Probenhalter befestigt und gleichzeitig elektrisch kontaktiert. Anschließend wurden Undulator und Probenhalter in den Badkryostaten eingebracht und abgekühlt. Der Heliumstand war während des Experiments immer so hoch, daß der Supraleiter stets von flüssigem Helium umgeben war.

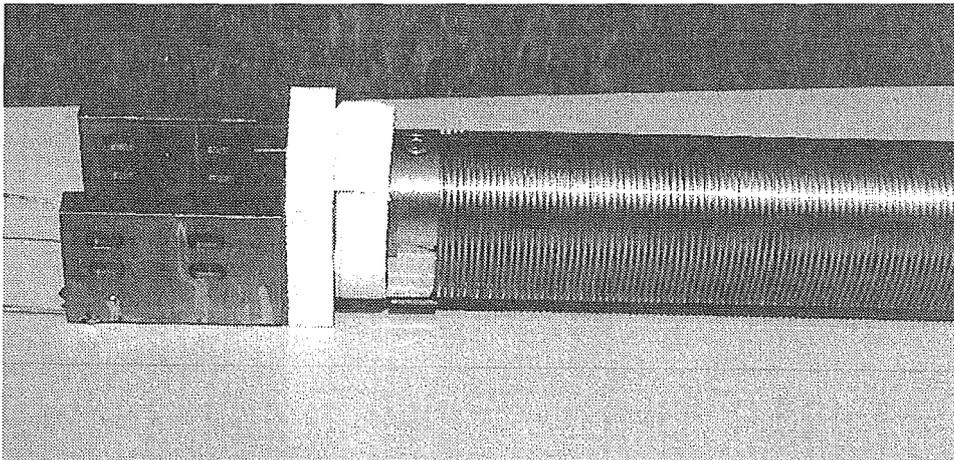


Abb. 4.3: Undulatorspule vor dem Test im Badkryostaten. Am linken Ende liegen die Kupferkontakte, mit deren Hilfe die Undulatorspule an einem Probenhalter befestigt wurde [Hez97a].

Im Verlauf des Experiments wurde der Strom durch den Supraleiter kontinuierlich erhöht und gleichzeitig die am Supraleiter anliegende Spannung aufgezeichnet. Ein Quenchedetektor verhinderte die Zerstörung des Supraleiters. Es wurde kein äußeres Magnetfeld angelegt. Der

Strom wurde in 14 Versuchen, jeweils ausgehend von 0 A, erhöht. Der Verlauf des gemessenen kritischen Stroms ist in Abb. 4.4 dargestellt.

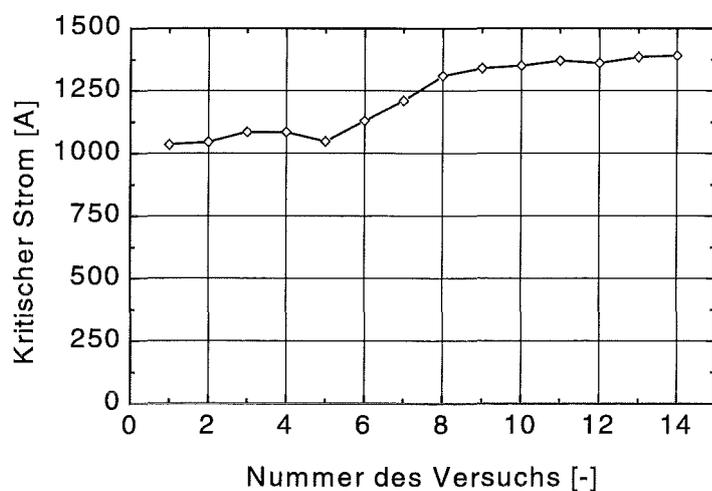


Abb. 4.4: Verlauf des kritischen Stroms während der Untersuchung einer Undulatorspule im Badkryostaten.

Man erkennt, daß der Supraleiter "trainiert" und gegen einen Maximalwert des Stroms auf etwa 1400 A läuft. Dieser gemessene Maximalwert kommt dem berechneten von etwa 1470 A sehr nahe. Zusätzlich wurde bei einem konstanten Strom von 1050 A ein Dauertest von etwa 6 Minuten Dauer durchgeführt. Während dieses Versuchs konnte weder ein Ansteigen des gemessenen Potentials entlang des Supraleiters noch ein erhöhter Heliumverbrauch festgestellt werden. Dies läßt den Schluß zu, daß im vorliegenden Fall der größte Teil des angelegten Stroms durch den Supraleiter floß. Im Falle eines Kurzschlusses wäre der Heliumstand, bedingt durch die vom Ohmschen Widerstand hervorgerufene Wärme, deutlich schneller abgefallen.

Um zu überprüfen, ob der Strom nicht dennoch während der Messungen teilweise über das Eisen oder das Aluminium kurzgeschlossen war, wurde der Supraleiter mit 6 zusätzlichen Potentialabgriffen versehen und erneut in das Heliumbad getaucht. Die in den einzelnen Segmenten des Undulators gemessenen Potentiale waren so klein, daß ein eventuell aufgetretener Kurzschlußstrom auf jeden Fall kleiner 1 A sein mußte.

Erste Magnetfeldmessungen

Das Magnetfeld wurde im Rahmen einer Diplomarbeit vermessen [Fri98]. Im folgenden werden die wichtigsten Resultate zusammengefaßt.

Die magnetische Flußdichte wurde mit einer räumlichen Auflösung von 0,1 mm und einer Genauigkeit von etwa 1 mT in 0,5 mm Abstand von der Oberfläche gemessen. Die Messung

find im Heliumbad statt, sollte aber so ausgelegt werden, daß sie in einer späteren Phase auch in dem in Kap. 4.3 beschriebenen Kryostaten im Vakuum durchgeführt werden kann.

Als Sensor wurde eine Hall-Sonde mit einer aktiven Fläche von $0,1 \times 0,1 \text{ mm}^2$ der Firma Areopoc ausgewählt und im Badkryostaten kalibriert. Diese Sonde wurde mittels einer Führung an der Undulatorplatte angebracht und über eine Stange von außerhalb des Kryostaten von Hand bewegt (Abb. 4.5).

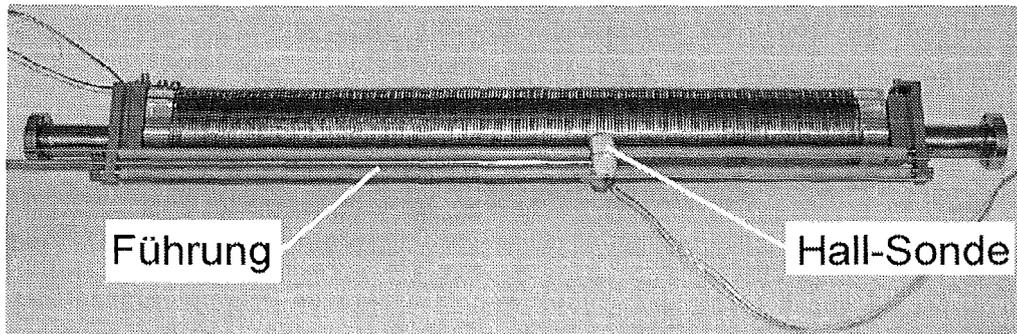


Abb. 4.5: Undulatorplatte mit Führung, Stange und Hall-Sonde [Fri98] und [Fri98a].

Es wurden mehrere Messungen verschiedener Abschnitte des Undulators mit Strömen von 100 bis 1000 A durchgeführt. In Abb. 4.6 ist die gemessene magnetische Flußdichte entlang einer Undulatorplatte in einem Abstand von 0,5 mm von der Oberfläche bei einem Strom von 600 A dargestellt.

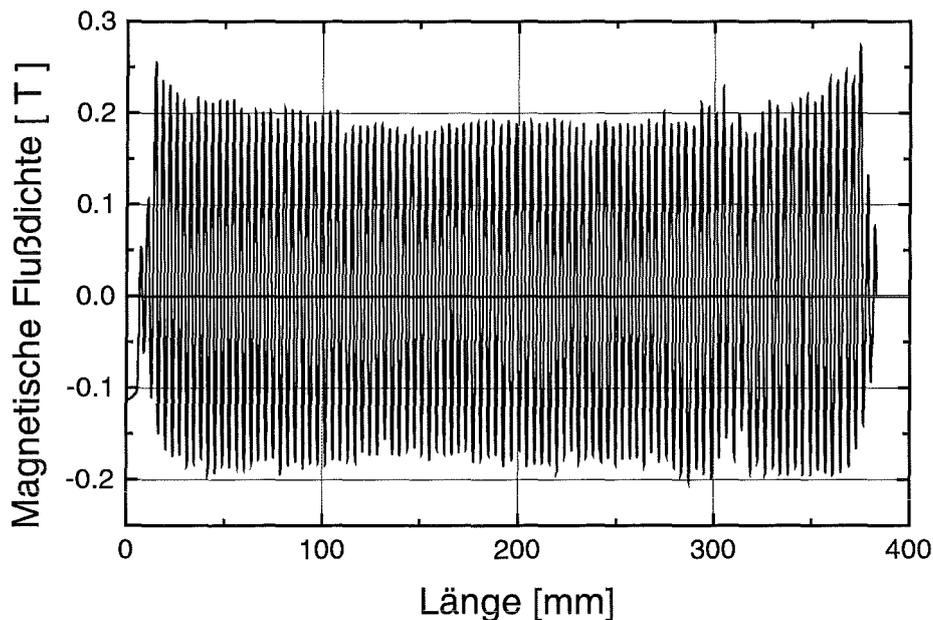


Abb. 4.6: Magnetische Flußdichte entlang der gesamten Undulatorplatte bei einem Strom von 600 A in 0,5 mm Abstand der Hall-Sonde von der Oberfläche [Fri98] und [Fri98a].

Man erkennt den von den Simulationen bekannten periodischen Verlauf und die Verschiebung der Flußdichte in positive y-Richtung. Um zu überprüfen, ob die Verschiebung der Flußdichte nicht durch äußere Störungen hervorgerufen wird, wurde unter gleichen Bedingungen die Richtung des angelegten Stroms umgekehrt. Bei dieser Messung trat die Verschiebung, wie mittels der Simulationen vorhergesagt, in die negative y-Richtung auf.

Der unebene Verlauf der Einhüllenden des Magnetfelds hat vermutlich mehrere Ursachen:

Diese liegen erstens in der Kryotechnik. Um den technischen und finanziellen Aufwand klein zu halten wurde auf den Bau einer extrem genauen Führungsvorrichtung der Hall-Sonde, welche die auf Grund der großen Temperaturdifferenz auftretenden Schrumpfungen kompensieren könnte, verzichtet. Des weiteren wurden zur Bewegung der Sonde kein kryotauglicher, hochauflösender Stepper-Motor, sondern eine einfache Stange, die von außerhalb des Kryostaten von Hand bewegt wurde, verwendet. Dies führte zu ungleichmäßigen Bewegungen der Sonde. Beides kann zu kleinen Veränderungen des Abstands zwischen Sonde und Undulator und damit zu Meßungenauigkeiten führen.

Zweitens wurde bei der Fertigung des Undulators aus Kostengründen auf enge Toleranzen verzichtet. Dies führte dazu, daß die Breite der Weicheisenstege zwischen den Supraleitern um bis zu 0,1 mm (20%) variiert und daher das Magnetfeld unterschiedlich verstärkt wird. Drittens können mechanische Vibrationen der Kompressoren der Heliumanlage zu Meßfehlern führen.

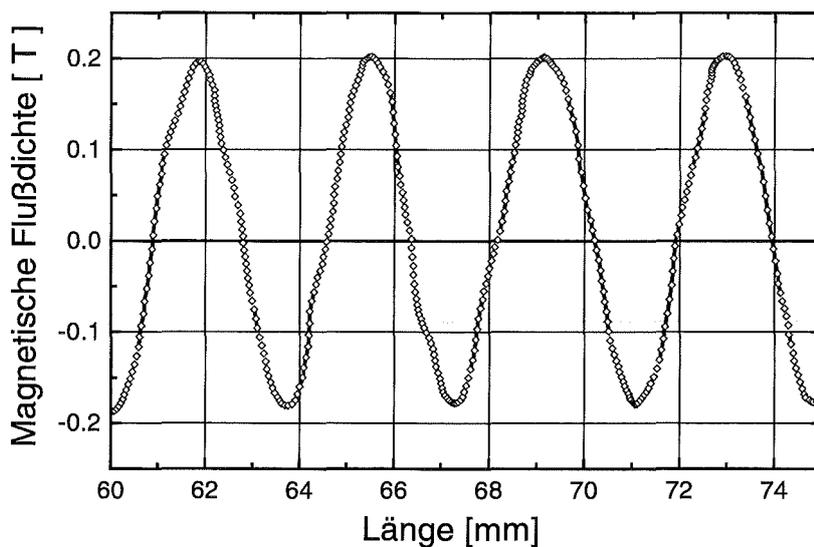


Abb. 4.7: Vergrößerter Ausschnitt der gemessenen magnetischen Flußdichte in der Mitte des Undulators bei einem Strom von 600 A in 0,5 mm Abstand von der Undulatorplatte [Fri98]. Die Rauten entsprechen Meßpunkten.

Abb. 4.7 zeigt eine vergrößerte Darstellung des bereits in Abb. 4.6 dargestellten magnetischen Flusses. Anhand dieser Darstellung kann man neben der Periodenlänge des Undulators von 3,8 mm auch die Schwankungen der magnetischen Flußdichte erkennen. Das maximale Magnetfeld beträgt bei einem Strom von 600 A in 0,5 mm Abstand von der Oberfläche zwischen -0,187 und 0,202 T.

Ein typischer Verlauf der gemessenen magnetischen Flußdichte am Rand des Undulators (Randfeld) ist in Abb. 4.8 dargestellt. Man erkennt die bereits in Kap. 3.3 diskutierten Überhöhungen am äußeren Ende des Undulators. Die beiden kleineren Amplituden am linken Ende kommen daher, daß in die beiden ersten Nuten nur je 2 Supraleiter gelegt werden. Der von ihnen erzeugte magnetische Fluß ist daher kleiner als der im Zentrum des Undulators.

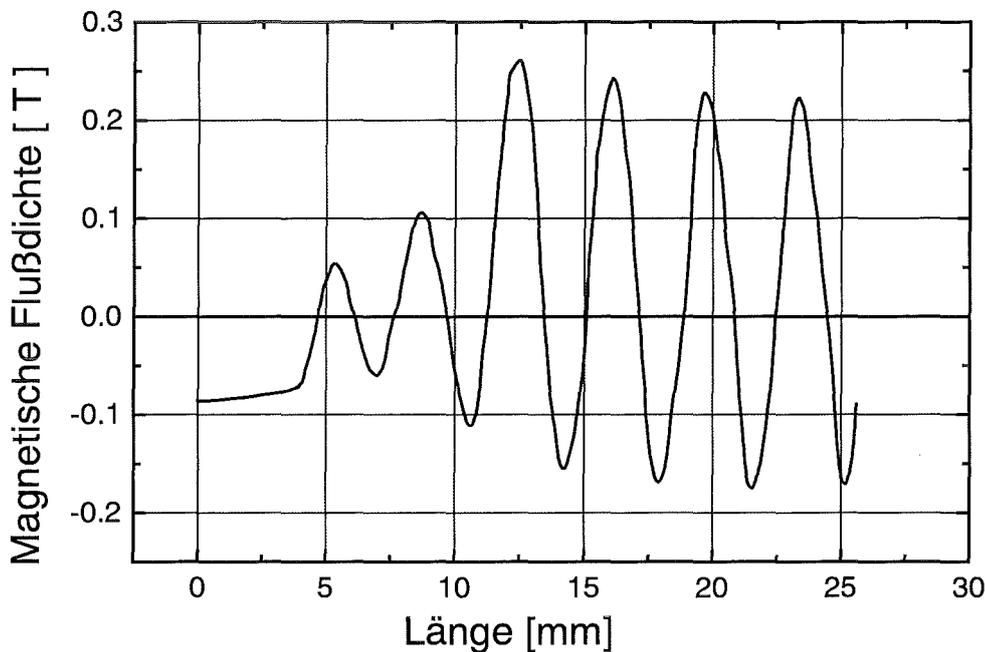


Abb. 4.8: Typischer Verlauf der magnetischen Flußdichte am Rand des Undulators bei einem Strom von 600 A in 0,5 mm Abstand von der Undulatorplatte [Fri98].

Der Verlauf der Maximalwerte der magnetischen Flußdichte in Abhängigkeit des angelegten Stroms ist in Abb. 4.9 dargestellt.

Es wird Aufgabe weiterer Messungen sein den Feldverlauf noch präziser zu ermitteln.

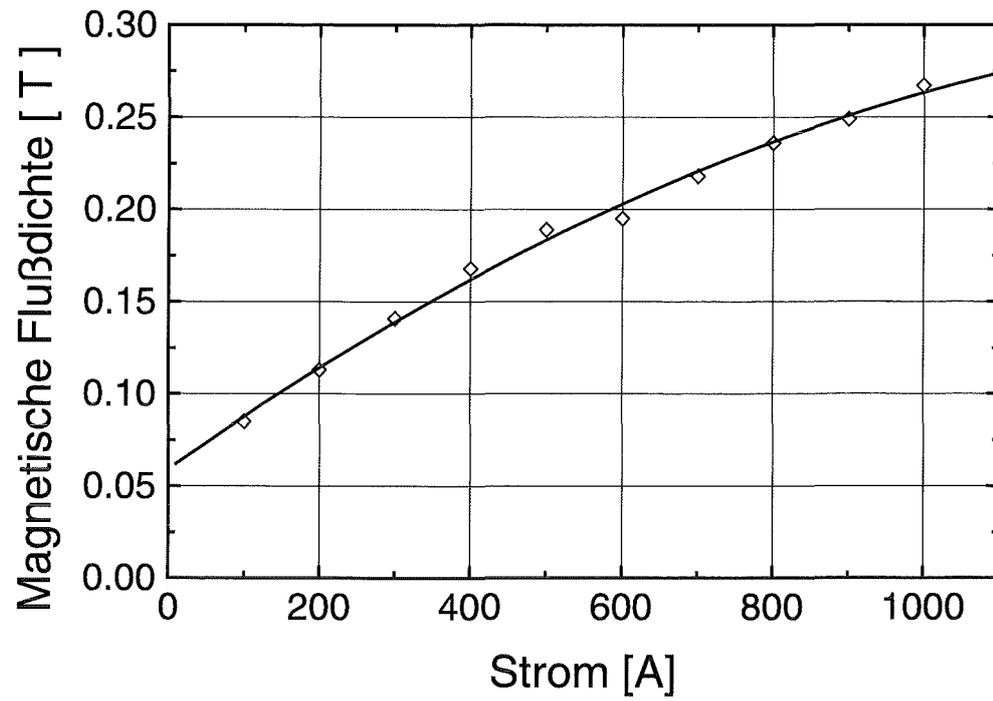


Abb. 4.9: Gemessene Maximalwerte der magnetischen Flußdichte in Abhängigkeit vom angelegten Strom [Fri98]. Der Abstand der Hall-Sonde von der Oberfläche war in allen Fällen 0,5 mm.

4.3 Aufbau eines Kryostaten zur Durchführung von Strahltests

Um den Undulator an einem Teilchenbeschleuniger testen zu können, mußte ein eigener Kryostat gebaut werden.

Dieser besteht aus drei Funktionseinheiten:

- Vakuumkammer
- Strahlungsschild (flüssiger Stickstoff)
- Heliumbehälter.

Aus Kostengründen muß der Kryostat so konstruiert werden, daß der Wärmestrom auf das Heliumbad und damit der Verbrauch an flüssigem Helium minimiert wird.

Wärme wird auf drei verschiedene Arten in das Heliumbad transportiert: Durch Konduktion, Konvektion und Strahlung. Die Reduktion der Konvektion wird durch das Vakuum erreicht, die Konduktion kann durch eine geschickte Bauweise des Heliumbehälters (möglichst geringe Querschnitte für den Wärmestrom) klein gehalten werden und die Strahlung wird durch Strahlungsschilde und Superisolation minimiert.

4.3.1 Vakuumtechnik

Der Heliumbehälter wird aus Isolationsgründen von einer Vakuumkammer umgeben. Dies hat eine deutliche Reduktion des Wärmeeintrags durch Konvektion zur Folge. Der Verlauf der Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Gasdruck ist in Abb. 4.10 dargestellt [Sch71].

Der Verlauf der Wärmeleitfähigkeit im Vakuum kann in drei Bereiche untergliedert werden: Bei Drücken größer 10 Pa befindet man sich im Kontinuumsbereich. Hier findet der Wärmeaustausch durch Stöße der Moleküle untereinander statt und ist druckunabhängig. Der Bereich von 0,01 bis 10 Pa wird als Smoluchowski- oder Übergangsbereich bezeichnet. Die Moleküle stoßen aneinander und an die Wände. Die Wärmeleitung in diesem Bereich ist stark druckabhängig. Bei Drücken kleiner 0,01 Pa ist die freie Weglänge der Teilchen größer als die Behälterabmessungen. In diesem Bereich, der auch als Molekularbereich bezeichnet wird, ist die Wärmeleitung durch das Restgas sehr klein.

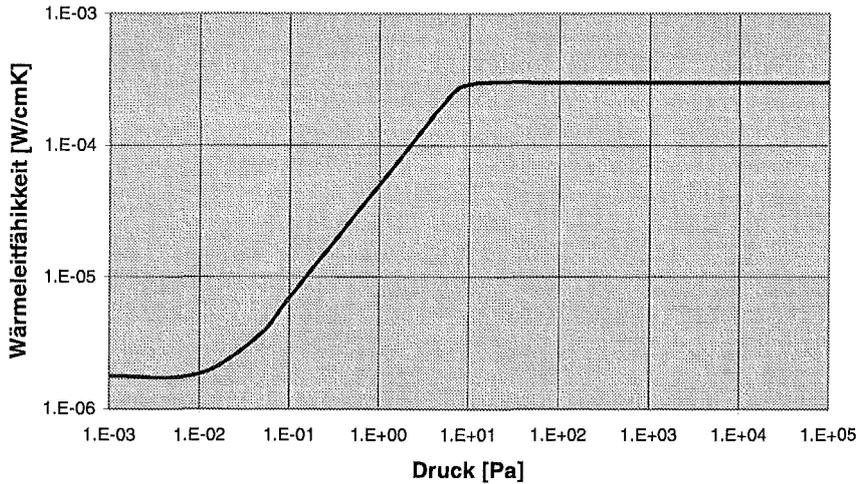


Abb. 4.10: Einfluß des Drucks auf die Wärmeleitfähigkeit eines Gases [Sch71].

Der Kryostat wurde in eine vorhandene Vakuumkammer eingebaut, die an der linken und rechten Innenseite thermische Schutzschilde (sog. Kryopanel), die mit flüssigem Stickstoff gefüllt werden können, besitzt (Abb. 4.11). Die Kammer ist 1020 mm breit, 940 mm hoch und 1240 mm lang und mit Versteifungsrippen versehen. Die Wandstärke beträgt 10 bzw. 20 mm, als Material wurde Edelstahl (1.4301) verwendet. Alle Flansche sind mit Viton-Dichtringen ausgeführt.

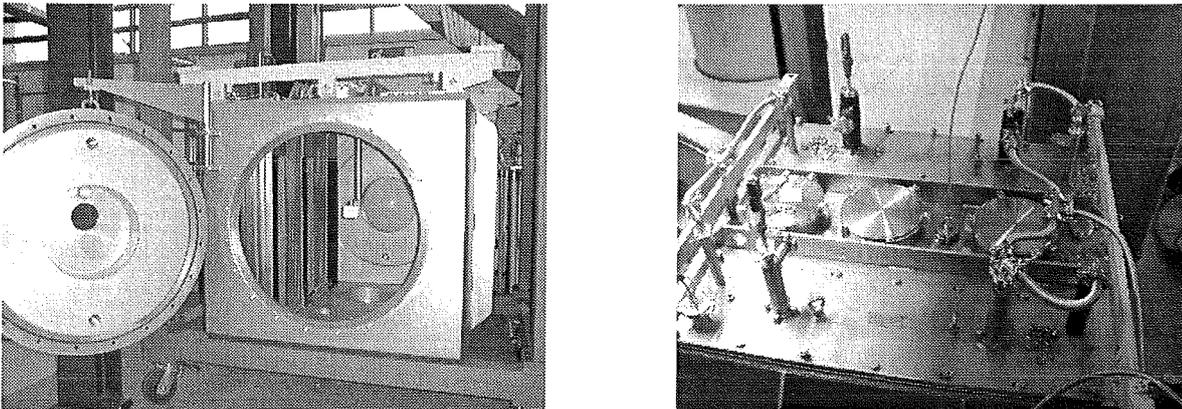


Abb. 4.11: Vakuumkammer auf fahrbarem Gerüst. Links erkennt man einen der schwenkbaren Flansche und ein Kryopanel. Rechts ist die Oberseite der Kammer mit den Füllstützen der Kryopanel und drei zentralen Flanschen zu sehen.

An den Stirnseiten ist je ein schwenkbarer Flansch mit Innendurchmesser 700 mm angebracht. Ein guter Zugang zum Einbringen des Heliumbehälters sowie anschließenden Änderungs- und Reparaturarbeiten ist somit gewährleistet.

Auf der Oberseite werden die beiden Kryopanel parallel zu den Längsseiten eingesetzt. In der Mitte sind drei Flansche der Nennweite 200 mm angeschweißt. Der zentrale Flansch wird als Aufhängung für den Heliumbehälter verwendet, einer der beiden äußeren dient als Sicherheitsventil (vgl. Kap. 4.3.2).

Auf der Unterseite befinden sich mehrere Flansche mit unterschiedlichen Durchmessern. Verwendet wird jedoch nur ein Flansch mit Nennweite 100 mm. An ihm wird die in Kap. 4.4 beschriebene Pumpeinheit befestigt. Des weiteren sind 11 Flansche mit Nennweite 40 mm an verschiedenen Stellen der Vakuumkammer angeschweißt. Sie werden als Anschlüsse für Drucksensoren, Belüftungsventile und Durchführungen verwendet.

4.3.2 Kryotechnik

Kryopanel

Die Panels (Abb. 4.12) sind 880 mm hoch, 1000 mm lang und wurden aus Edelstahl (1.4541) gefertigt. Sie bestehen aus einem langen, gebogenen äußeren Stickstoff-Strahlungsschutzschild und zwei geraden, auf der Innenseite angeordneten, Schutzschildern. Die Schutzschilder sind so miteinander verbunden, daß ihre vertikalen Kühlkanäle im Verbund von flüssigem Stickstoff durchströmt werden.

Die Innenfläche des gebogenen Schutzschildes wurde, um die kalte Oberfläche und damit das Saugvermögen der Panels zu vergrößern, von den Vorbenutzern mit Aktivkohle beschichtet.

Für den Strahltest wurden die Kryopanel mit flüssigem Stickstoff gefüllt. Dafür gibt es zwei Gründe: Einerseits werden die Kryopanel als Vakuumpumpe verwendet. Mit ihrer Hilfe soll der Druck in der Vakuumkammer im Anschluß an Justier- und Montagearbeiten möglichst schnell in den Bereich von 10^{-7} mbar abgesenkt werden. Dies ist insbesondere für einen Test des Undulators an einem Teilchenbeschleuniger eine wichtige Voraussetzung. Andererseits dienen die beiden Panels als Strahlungsschild für den in ihrer Mitte angebrachten Heliumbehälter. Um den Verbrauch von flüssigem Stickstoff zu reduzieren, wurden die Außenseiten des äußeren gebogenen Stickstoff-Strahlungsschutzschildes mit Superisolation versehen. Dabei handelt es sich um einen Verbund aus 12 Lagen Aluminium-Folie mit hohem Reflexionskoeffizient zwischen denen sich organisches Material als Abstandshalter mit schlechter Wärmeleitung befindet.

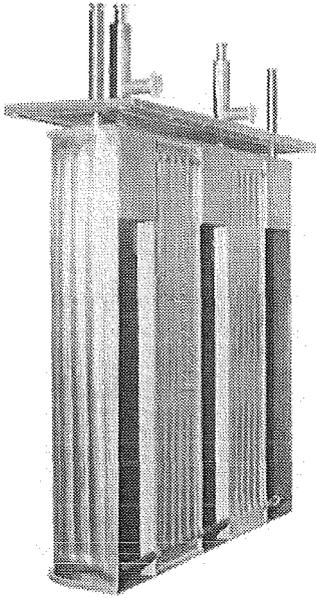


Abb. 4.12: Kryopanel mit Stickstoff-Strahlungsschutzschilden und Füllstutzen. Die horizontale Platte liegt auf der Vakuumkammer auf und wird gegen diese abgedichtet [Dür97].

Zum Befüllen der Panels wurden 4 Heber angefertigt (Abb. 4.13).

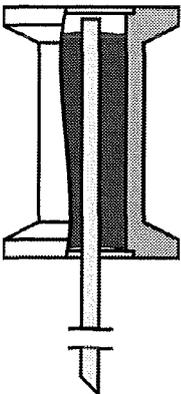


Abb. 4.13: Heber zum Füllen der Kryopanel.

Sie bestehen aus einem Standard-Verlängerungsstück der Nennweite 16 mm mit Kleinflanschen in das ein Stück Teflonschlauch gesteckt und mit Stycast vergossen wird. Um zu verhindern, daß der Schlauch auf dem Boden der Panels aufsitzt und die Öffnung verschlossen wird, wurde er an seinem unteren Ende angeschragt. Insgesamt vier dieser Heber wurden gebaut und in die dafür vorgesehenen Füllstutzen eingesetzt. Da es am Versuchsort keine Stickstoff-Verflüssigungsanlage gibt, wurde das Stickstoffabgas nicht aufgefangen. Außerdem wurde an beiden Panels je ein Sicherheitsventil angebracht.

Heliumbehälter

Der im Rahmen dieser Arbeit konstruierte Heliumbehälter befindet sich aus Isolationsgründen zum großen Teil in der Vakuumkammer. Er hängt an einem zentralen Flansch der Nennweite 200 (Abb. 4.14) und wurde als Badkryostat ausgelegt. Das flüssige Helium wird mittels Heber und Teflonschläuchen an verschiedene Stellen des Behälters gebracht und füllt diesen von dort aus. Das Heliumgas kann nach oben entweichen. Zum Schutz gegen Wärmestrahlung wurde der gesamte Heliumbehälter mit Superisolation umgeben. Er kann in die Funktionseinheiten Deckel, Balg, Vorratsbehälter und Strahlungsschild unterteilt werden. Diese werden im folgenden kurz erläutert.

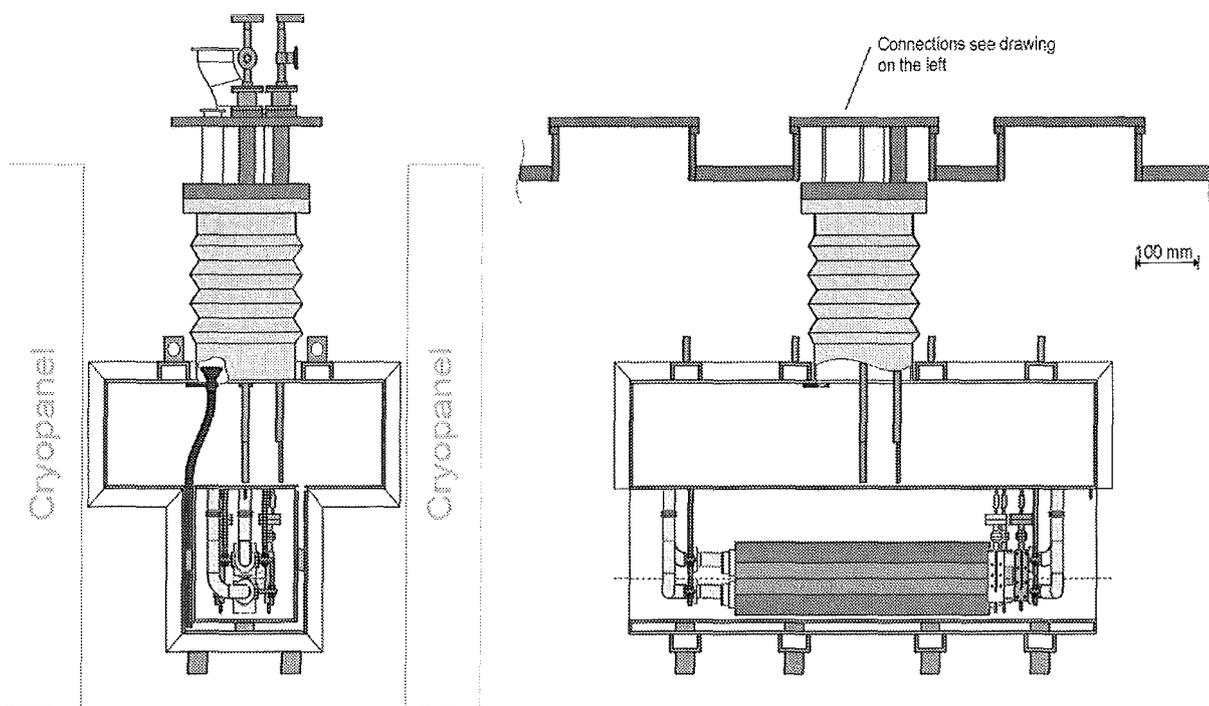


Abb. 4.14: Prinzipskizze des Heliumbehälters [Fri98a].

Der Deckel besteht aus zwei über mehrere Rohre miteinander verschweißten Flanschen (Abb. 4.15). Der obere Flansch liegt auf der Vakuumkammer auf und trägt den gesamten Heliumbehälter. Die Rohre dienen als Durchführungen für Heliumgas, Strom, Meßleitungen und flüssiges Helium von der Umgebung in den Heliumbehälter.

Außerdem sind an der Unterseite des Deckels 4 Führungsstangen angebracht. Sie verhindern, daß der Balg sich auf Grund des im Betrieb auftretenden großen Innendrucks verformt (Abb. 4.18).

Der Balg verbindet den Deckel mit dem Vorratsbehälter. Er dient dazu, den Wärmestrom vom Deckel (befindet sich etwa auf Raumtemperatur) zum flüssigen Helium möglichst klein zu

halten. Dies wird dadurch erreicht, daß einerseits die Wandstärke des Balgs relativ klein gewählt wurde (0,2 mm), andererseits sehr viele Membranpaare verwendet werden. Dadurch wird die effektive Weglänge vom Deckel zum Vorratsbehälter sehr groß ($\cong 2$ m).

Das Gewicht des Heliumbehälters wird über drei an der Außenseite des Balgs befestigte Gewindestangen übertragen.

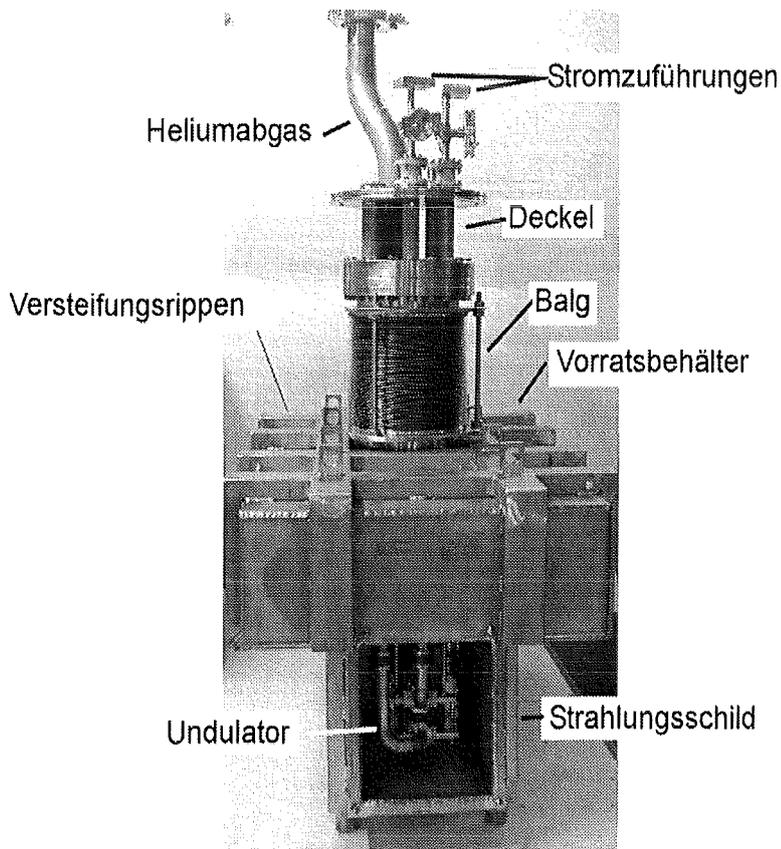


Abb. 4.15: Heliumbehälter ohne Superisolation in Vorderansicht.

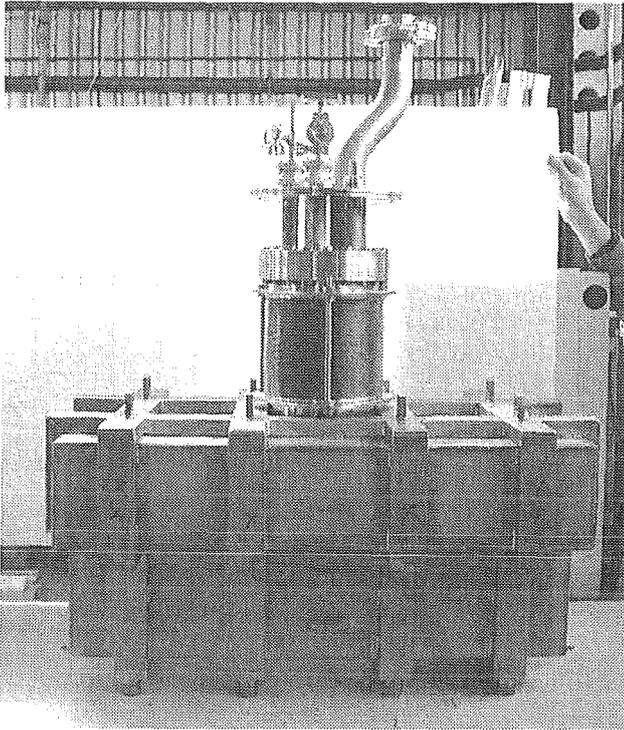


Abb. 4.16: Heliumbehälter ohne Superisolation in Seitenansicht.

Der Kryostat soll aus Gründen der Einfachheit nicht kontinuierlich gefüllt werden. Es muß daher ein ausreichendes Vorratsvolumen vorgesehen werden, das es erlaubt, den Undulator eine angemessene Zeit (2-3 h) zu betreiben. Eine Abschätzung des auftretenden Wärmestroms ergab, daß maximal 20 l Helium pro Stunde benötigt werden, weshalb ein Vorratsvolumen von 50 l vorgesehen wurde. Da das Raumangebot innerhalb der rechteckigen Vakuumkammer relativ beschränkt ist, mußte der Heliumbehälter ebenfalls rechteckig ausgeführt werden. Dies führte dazu, daß der Behälter (Wandstärke 4 mm) zusätzlich noch mit U-Profilen versteift werden muß (Abb. 4.15 und 4.16). Die Abmessungen des Behälters sind $750 \times 450 \times 150 \text{ mm}^3$ (LxBxH), die Edelstahl-Legierung ist 1.4571.

Im Inneren des Vorratsbehälters befinden sich die Heliumstandsonde und ein Trichter der als Verteiler für das flüssige Helium dient. Von ihm aus geht ein Teflonschlauch an die tiefste Stelle des Strahlungsschilds, zwei weitere führen das Helium jeweils in das Heliumrohr jeder Undulatorschule.

An der Unterseite des Vorratsbehälters befindet sich der Undulator, der auf vier Seiten von einem heliumdurchströmten Strahlungsschutzschild umgeben ist. Um einen Zugang zum undulator zu ermöglichen, wurden die Stirnseiten nicht verschlossen, sondern mit 8 mm starken Kupferplatten versehen. Zwischen diese und den Heliumbehälter wurde zur Verbesserung der Wärmeleitfähigkeit Indiumdraht geklemmt.

Diese extreme Abschirmung des Supraleiters gegen wärmestrahlung ist notwendig, da im vorliegenden Fall der Supraleiter indirekt gekühlt wurde und nicht, wie üblich, direkt im Heliumbad angeordnet war.

Undulator

Der Aufbau der Undulatorspulen wurde bereits in Kap. 4.1 beschrieben.

An jedes Ende der dort erwähnten Edelstahlrohre sind Conflat-Flansche geschweißt mit deren Hilfe der Undulator demontierbar über 90°-Winkelstücke und Bälge mit der Heliumversorgung aus dem Vorratsbehälter verbunden ist. Die Undulatorspulen können über Gewindestangen, die an den balgseitigen Conflat-Flanschen befestigt sind, justiert werden. Das Innere der Heliumversorgung des Undulators ist so ausgeführt, daß es keine Stelle gibt, an der sich Heliumgas ansammeln könnte.

Zwischen Wicklung und Flansch sind die Durchführungen des Supraleiters aus dem flüssigen Helium ins Hochvakuum angebracht. Sie bestehen aus an das Heliumrohr angeschweißte Röhrchen, in denen der Supraleiter von der Wicklung ins Innere des Heliumrohrs geführt wird. Anschließend wurden die Röhrchen mit Stycast in einer Doppelrohr-Technik vergossen und somit abgedichtet (Abb. 4.17).

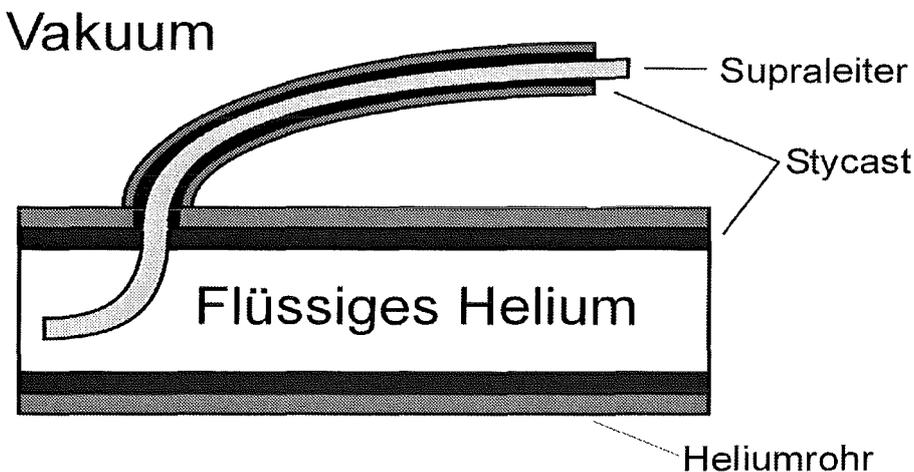


Abb. 4.17: Durchführung des Supraleiters in einer Doppelrohrtechnik aus dem flüssigen Helium ins Hochvakuum.

Stromzuführungen

Die Stromzuführungen dienen dazu, den erforderlichen Strom von außerhalb des Kryostaten ins Innere des Heliumrohrs zu leiten. Ihr Aufbau lehnt sich an die am Institut für Technische Physik (ITP) bereits vorhandenen abgasgekühlten Stromzuführungen an. Sie bestehen aus zwei Teilen: Einer Kupferzuführung und einem Supraleiter (Abb. 4.18).

Die Kupferzuführung reicht von Außen bis in das flüssige Heliumbad. Sie besteht aus einem Edelstahlrohr in dessen Innerem 150 Kupferdrähte (Durchmesser je 0,5 mm) eingezogen sind. Diese Drähte sind an ihrem einen Ende in Kupferkontakte, an die die Kabel der Netzgeräte angeschlossen werden, eingelötet. Das andere Ende wird an einen Halbzylinder aus Kupfer, der sich im Heliumbad befindet, gelötet. Das Edelstahlrohr enthält etwas oberhalb der maximalen Füllhöhe des Vorratsbehälters mehrere Öffnungen durch die Heliumgas in das Edelstahlrohr eintreten kann. Außerhalb des Behälters befinden sich in den Edelstahlrohren ebenfalls Öffnungen, die in einem Flansch münden. Bei Verschließen des eigentlichen Heliumabgasrohrs muß der gesamte Volumenstrom des kalten Heliumgases durch die Stromzuführungen entweichen und kühlt diese im Gegenstromprinzip. Dadurch wird eine starke Reduktion des Wärmezustroms auf das flüssige Helium erreicht.

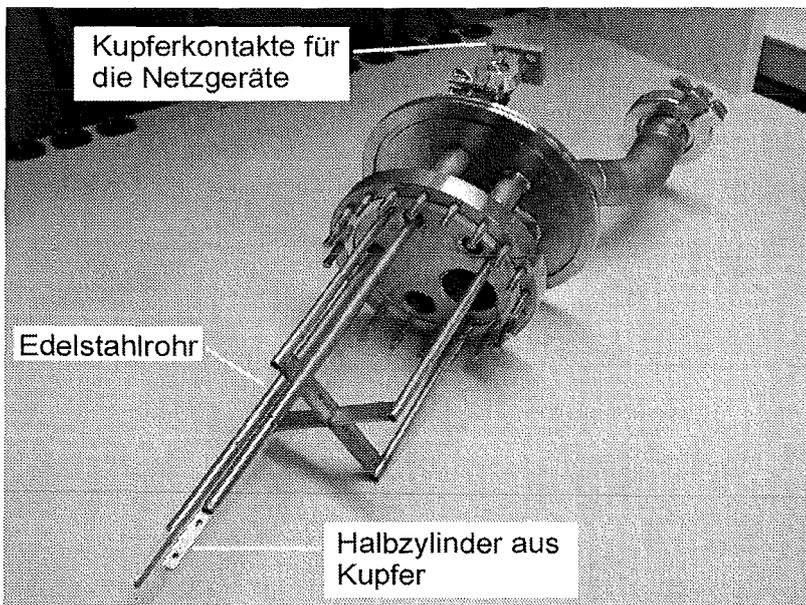


Abb. 4.18: Stromzuführungen. An die Halbzylinder aus Kupfer wird der Supraleiter geklemmt.

An das kalte Ende der Kupferzuführung wird ein, in einen passenden Halbzylinder eingelöteter, Supraleiter geklemmt. Dieser führt den Strom durch den Heliumbehälter verlustfrei in das Innere des Heliumrohrs an die Stelle, an der die Enden des Supraleiters der

Spule aus den Durchführungen ragen; er wird dort mit diesen verlötet. Der Leiter besteht aus zwei abisolierten, aufeinander gelöteten Stücken des bekannten Supraleiters (Typ F54-1.35) die anschließend mit einer Isolation versehen wurden. Diese Anordnung dient der Vergrößerung des vorhandenen Kupferquerschnitts. Im Fall eines lokalen Quenchs kann das Kupfer den Strom tragen, der Supraleiter sich wieder abkühlen und anschließend den Strom wieder tragen. Da die Supraleiter aus Montagegründen länger sein müssen, als es zur Überbrückung der Entfernung eigentlich erforderlich wäre, besteht die Gefahr, daß sie aus dem Heliumbad herausragen und nicht mehr optimal gekühlt werden. Sie wurden daher zusätzlich alle 10 bis 15 cm mit Messingklötzen beschwert. Damit wird sichergestellt, daß sie sich so lange wie möglich im flüssigen Helium befinden und somit optimal gekühlt werden. Prinzipiell bestehen zwei Möglichkeiten die beiden Spulen mit Strom zu versorgen: Die Reihen- und die Parallelschaltung: Bei einer Parallelschaltung müßte nicht nur der doppelte Strom von den Netzgeräten erzeugt werden, es ist auch nicht sichergestellt, daß beide Spulen von exakt dem gleichen Strom durchflossen werden. Deswegen wurde eine Reihenschaltung der beiden Undulatorspulen realisiert. Dazu war die Installation eines Verbindungsstücks zwischen oberer und unterer Spule notwendig, welches im vorliegenden Fall ebenfalls aus zwei isolierten Supraleitern aufgebaut wurde.

Sicherheitsaspekte

Da es sich bei dem Heliumbehälter und den Kryopaneln um Druckbehälter für tiefkalte Flüssigkeiten handelt, können im Falle des Versagens eines Teils des Systems auf Grund der Volumenvergrößerung der kalten Flüssigkeiten während des Verdampfens sehr hohe Drücke entstehen. Daher muß die Auslegung des Druckbehälters den gesetzlich vorgeschriebenen Regeln für Druckbehälter entsprechen. Die Konstruktion wurde in Abstimmung mit dem Technischen Überwachungsverein Südwest erarbeitet. Dies gilt insbesondere für die Auslegung des Druckbehälters, die Druckprobe und die Aufstellungsprüfung.

Folgende Versagensarten können bei vakuumisolierten Kryostaten auftreten:

1. Der Druckbehälter (Heliumbehälter bzw. Kryopanel) wird undicht, sein Inhalt entleert sich auf die warmen Wände der Vakuumkammer und verdampft schlagartig unter starker Volumenvergrößerung. Ein Liter flüssiges Helium (1 bar, 4,2 K) besitzt nach der Erwärmung auf 273 K ein Gasvolumen von 700 Litern bei einem Druck von einem bar. Für diesen Fall muß die Vakuumkammer mit einem ausreichend dimensionierten Sicherheitsventil abgesichert werden.
-

-
2. Der Vakuumbehälter wird undicht und füllt sich mit Luft. Das führt dazu, daß die Wände des Druckbehälters auf Raumtemperatur erwärmt werden. Die tiefkalte Flüssigkeit verdampft unter starker Volumenvergrößerung. In diesem Fall muß der Druckbehälter (Heliumbehälter bzw. Kryopanel) entsprechend ausgelegt und abgesichert werden. Zur Absicherung des Heliumbehälters werden wegen der großen Gefahr zwei Sicherheitselemente verwendet: Ein reversibles Sicherheitsventil, das bei geringem (hier 0,8 bar) und eine Berstscheibe, die bei höherem (hier 1,2 bar) Überdruck anspricht. Die Kryopaneln wurden je mit einem Sicherheitsventil versehen.

Die Auslegung der Bauteile und Sicherheitseinrichtungen geschah anhand der von der Arbeitsgemeinschaft Druckbehälter herausgegebenen AD-Merkblätter [ADM97].

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Sicherheitseinrichtungen sind in Abb. 4.19 dargestellt. Es handelt sich dabei um ein Sicherheitsventil für die Vakuumkammer (großer, lose aufliegender Flansch), ein Sicherheitsventil pro Kryopanel, ein Sicherheitsventil und eine Berstscheibe für den Heliumbehälter.

Alle verwendeten Sicherheitseinrichtungen müssen für tiefe Temperaturen geeignet sein.

Der Heliumbehälter muß so dimensioniert werden, daß er bei einer Temperatur von 4,2 K dem maximal auftretenden Druck standhält. Bevor mit der Fertigung des Heliumbehälters begonnen werden konnte wurde eine Festigkeitsrechnung durchgeführt. Anschließend fanden eine Überprüfung und die Genehmigung durch den TÜV, Fachbereich Anlagensicherheit und Immissionsschutz, statt. Festgelegt wurden in diesem Zusammenhang insbesondere die Betriebsbedingungen, das Material und die schweißtechnischen Randbedingungen.

Einbauten wie Stromzuführungen, Undulator und Heliumanschlüsse müssen bei Berechnung und Abnahme des Behälters nicht berücksichtigt werden, da von ihnen im Versagensfall keine Gefährdung der Umgebung ausgeht.

Bei der Auslegung des Heliumbehälters mußte darauf geachtet werden, daß das vorhandene Widerstandsmoment gegen Biegung größer ist als das auf Grund der Druckdifferenz hervorgerufene Biegemoment. Der vorliegende lange, rechteckige Heliumbehälter ist auf Grund seiner Form nicht dazu geeignet große Druckdifferenzen zu ertragen. Er wurde daher mit umlaufenden Versteifungsrippen aus U-Profilen versehen. Die drucktechnisch günstigere Form eines Zylinders konnte aus Platzgründen nicht realisiert werden.

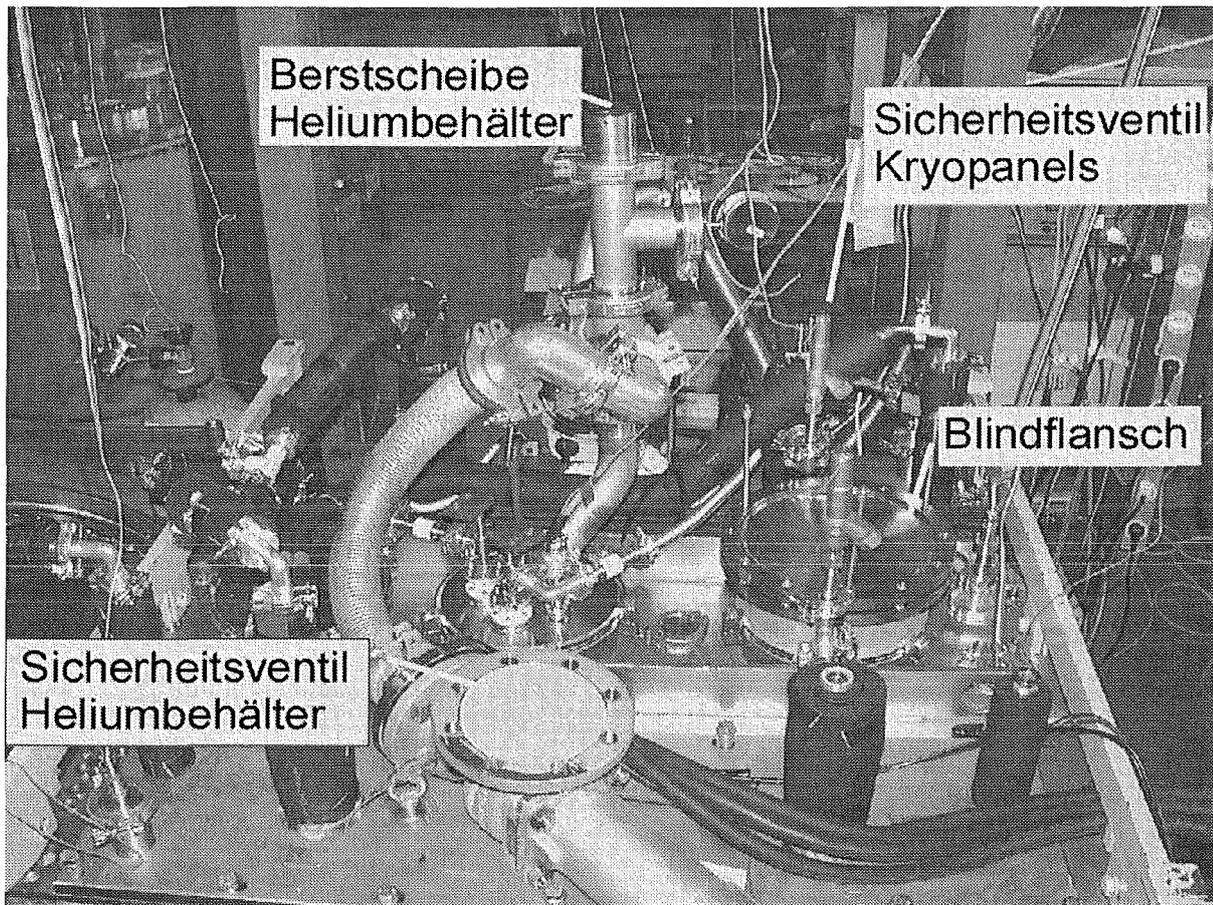


Abb. 4.19: Sicherheitseinrichtungen des Kryostaten. Die Vakuumkammer wird mittels eines lose aufliegenden Blindflanschs, die Kryopaneln mit Sicherheitsventilen und der Heliumbehälter mit einem Sicherheitsventil und einer Berstscheibe abgesichert.

Unter Verwendung der in Abb. 4.15 und 4.16 dargestellten Versteifungsrippen (Breite 50 mm, Höhe 20 mm und Wandstärke 5 mm) und einer Wandstärke von 4 mm ist der Heliumbehälter ausreichend dimensioniert. Die Legierung ist 1.4571.

Die Druckprobe, die in Anwesenheit eines Sachverständigen noch in der Werkstatt durchgeführt wurde, dient dazu, den Behälter auf eventuell aufgetretene Fertigungsfehler hin zu untersuchen. Hierzu wird der Innenraum des Druckbehälters mit Wasser gefüllt und eine Stunde lang mit einem Prüfdruck belastet. Der Prüfdruck liegt bei dem 1,3-fachen des maximal auftretenden Drucks. Im Fall des Heliumbehälters beträgt dieser Druck etwa 2,3 bar. Wenn nach einer Stunde an keiner Stelle Wasser ausgetreten und der Druck nicht abgefallen ist, hat der Behälter die Prüfung bestanden. Er wird mit einem Typenschild, auf dem Betriebsdruck, Betriebstemperatur, Baujahr, Volumen und Fertigungsnummer vermerkt sind, versehen. Der Sachverständige überprüfte außerdem, ob das verwendete Material den

Vorschriften entsprechend gestempelt ist und ob die erforderlichen Materialzeugnisse vorliegen.

Bei der Aufstellungsprüfung kontrolliert der Sachverständige, ob der Druckbehälter, die Vakuummkammer und die Kryopaneln mit den entsprechenden Sicherheitsvorrichtungen versehen sind. Diese müssen, belegt durch entsprechende Zeugnisse, gewährleisten, daß der auf dem Typenschild angegebene, maximale Betriebsdruck nicht überschritten wird. Die Sicherheitseinrichtungen müssen so angebracht sein, daß zwischen ihnen und dem abzusichernden Volumen keine Absperrvorrichtung vorhanden ist. Außerdem muß verhindert werden, daß Luft in den Zwischenraum eindringt. Die Luftfeuchtigkeit kann kondensieren und als Eis in Form eines Pfropfens die Verbindung zwischen dem Behälter und der Sicherheitseinrichtung versperren. Zusätzlich muß sichergestellt werden, daß durch austretendes kaltes Gas keine Gefahr für sich in der Umgebung befindende Menschen entsteht.

4.4 Kontrollsystem, Vakuumsystem und Meßwerterfassung

Bei den im folgenden Kapitel beschriebenen Komponenten handelt es sich um für den Betrieb des Undulators notwendige Anzeige- und Steuergeräte. Sie sind zusammen mit einem PC zentral in einem Rack angeordnet (Abb. 4.20).

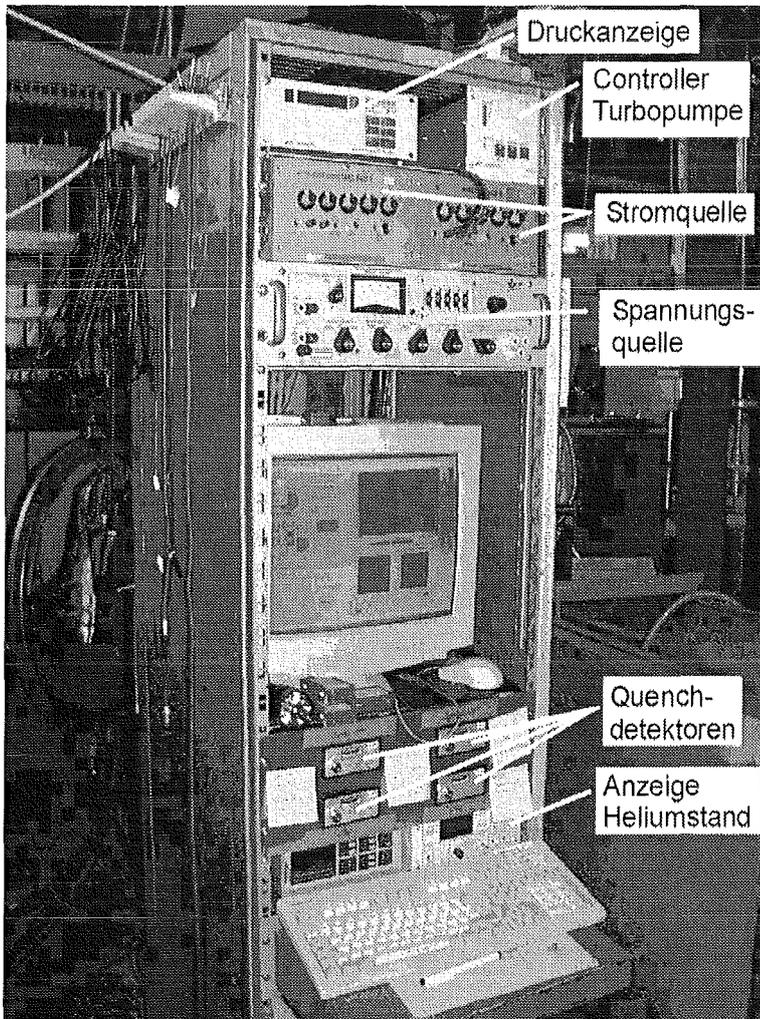


Abb. 4.20: Rack mit PC, Anzeige- und Steuergeräten.

Kontrollsystem

Auf Grund der vielen gleichzeitig zu erfassenden Meßgrößen und der daraus resultierenden umfangreichen Datenmengen wurde ein Meßdatenerfassungssystem aufgebaut [Fri98]. Hierfür wurde das kommerzielle Programm Labview [Nat98] verwendet. Es handelt sich dabei um eine graphische Entwicklungsumgebung, mit deren Hilfe im vorliegenden Fall einerseits Spannungen eingelesen, aufgearbeitet und dargestellt werden. Andererseits wird das Programm zur Ausgabe von Spannungen verwendet.

Labview ermöglicht im Vergleich zu herkömmlichen Programmen eine relativ einfache Eingabe von Funktionen (z.B. Schleifen). Dies liegt an der verwendeten Programmiersprache "G" mit deren Hilfe sogenannte Virtuelle Instrumente (vordefinierte Symbole, die bestimmten Funktionen entsprechen) in einer dem realen Meßaufbau sehr nahe kommenden Art und Weise durch Bewegung der Maus des PCs miteinander verbunden werden können.

Das Programm basiert auf zwei Darstellungsebenen: Einem Front-Panel als übersichtliche Bedien- und Anzeigeoberfläche und einem Blockdiagramm, welches die Vernetzung der einzelnen Virtuellen Instrumente miteinander beinhaltet.

Die Meß- und Steuergrößen können als Wert, in Form einer Graphik und in eine Datei ausgegeben werden. Die direkte Verarbeitung der Meßwerte mittels vordefinierter mathematischer Funktionen und Filter ermöglicht "online" eine sofortige Umwandlung der Meßwerte in physikalische Größen. So werden z.B. gemessene Spannungswerte direkt in die entsprechende Temperatur umgewandelt, ausgegeben und abgespeichert.

Als Schnittstelle zwischen PC und den Meßinstrumenten wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Karte der Firma National Instruments (Modell AT-MIO-16E-10) eingesetzt [Nat98]. Sie ermöglicht mittels eines integrierten Analog-Digital-Wandlers, daß 16 Spannungen gegen Erde oder 8 differentielle Spannungen parallel ausgelesen werden können. Zusätzlich können zwei analoge Spannungen ausgegeben werden.

Die Auflösung der Karte beträgt 12 bit bei einer maximalen Abtastrate von 100 kHz. Der Spannungsbereich der Karte kann in einem Bereich von -10 bis +10 V gewählt werden, durch Verkleinerung dieses Bereichs wird die Genauigkeit der Karte erhöht.

Netzgeräte

Es wurden zwei luftgekühlte Gleichstrom-Netzgeräte Modell 6466C der Firma Hewlett Packard verwendet. Jedes der Netzgeräte hat eine Leistung von 10 KW und kann im Konstantstrombetrieb bis zu 620 A liefern. Sie können entweder manuell oder ferngesteuert betrieben werden.

Da sie während der Strahltests an MAMI in der Experimentierhalle standen und dort aus Strahlenschutzgründen nicht manuell bedient werden konnten, mußte eine Fernsteuerung vorgesehen werden. Mit Hilfe des in diesem Kapitel beschriebenen Kontrollsystems wird eine Spannung von 0-6,3 V auf den analogen Steuereingang der Netzgeräte gegeben. Die Kalibrierkurven der Netzgeräte sind in Abb. 4.21 dargestellt.

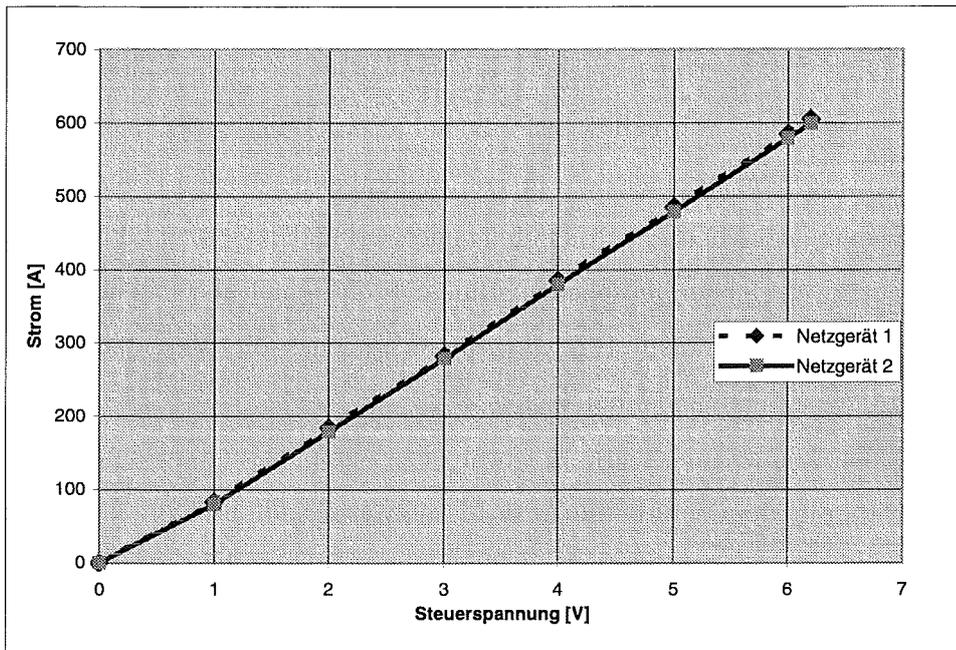


Abb. 4.21: Kalibrierkurven der Netzgeräte [Fri98].

Quenchedektoren

Das Auftreten eines Quenches bedeutet das Zusammenbrechen des supraleitenden Zustands und den Übergang zur Normalleitung. Um ein möglichst großes Magnetfeld zu erreichen, werden sehr hohe Ströme durch den Supraleiter geführt (im vorliegenden Fall bis zu 500 A).

Ein Supraleiter ist so aufgebaut, daß die supraleitenden NbTi-Filamente in einer Kupfermatrix eingebettet sind. Bricht der supraleitende Zustand zusammen, so kann der Strom im Kupfer fließen. Geht der Leiter unter Last in den normalleitenden Zustand über, so erzeugt der ohmsche Widerstand des Kupferanteils des Leiters auf Grund des kleinen Querschnitts (hier $\approx 0,5 \text{ mm}^2$) eine Wärmeleistung von bis zu einem Kilowatt. Diese kann nicht schnell genug abgeführt werden und führt daher zu einer Zerstörung des Supraleiters.

Um dieser Zerstörung vorzubeugen werden sogenannte Quenchedektoren eingesetzt. Ihre Wirkung beruht darauf, daß sich der Übergang von der Supraleitung zur Normalleitung nicht plötzlich vollzieht. Im Übergangsbereich fließt der Strom nicht mehr ausschließlich im Supraleiter, sondern teilweise auch in der diesen umgebenden Kupfermatrix. Übersteigt die Spannung in der Kupfermatrix einen vorgegebenen Wert (hier 10 mV), reagiert der Detektor und unterbricht die Stromversorgung. Dies geschieht, indem die Steuerleitungen der Netzgeräte, die über die Relais der Quenchedektoren geführt werden, unterbrochen werden. Die Quenchedektoren (Abb. 4.20) sind eine Entwicklung des Instituts für Technische Physik des Forschungszentrums Karlsruhe [Nöt97].

Es müssen 5 Bereiche durch Quenchedektoren überwacht werden: Die beiden Spulen, das Zwischenstück und die beiden Zuführungen.

Die Steuerleitungen der beiden Netzgeräte werden der Reihe nach über alle Detektoren geführt, wodurch jeder Quenchedetektor die Steuerleitung der Netzgeräte unterbrechen kann.

Temperatursensoren

Da NbTi-Supraleiter erst ab etwa 8 K supraleitend werden, kommt der Überwachung der Temperatur eine große Bedeutung zu. Um eine unnötige, durch Normalleitung hervorgerufene, Wärmeentwicklung zu vermeiden, sollte der Strom erst bei Temperaturen unterhalb 6 K eingeschaltet werden.

Die Temperatursensoren werden jeweils auf die äußerste Aluminiumhalbschale jeder Undulatorspule angebracht. Wegen des trotz genauer Fertigung noch vorhandenen Wärmeübergangswiderstands zwischen den einzelnen Aluminiumplatten und dem Edelstahlrohr im Inneren ist das die kritischste Stelle des Undulators. Wenn diese Sensoren eine ausreichend niedrige Temperatur anzeigen, kann der Supraleiter mit Strom beaufschlagt werden.

Besonders gut geeignet für Supraleitungsanwendungen sind Temperatursensoren mit einer Standardkurve, die im Bereich von 4,2-50 K einen steilen Verlauf aufweist. Sie reagieren in diesem Bereich weniger stark auf Störungen und bieten eine höhere Genauigkeit. Prinzipiell steht dafür eine große Auswahl an verschiedenen Typen zur Verfügung (z. B. Silizium, Gallium-Arsenid oder Kohle-Glas).

Da ein Anzeigegerät mit Meßkarten für Siliziumdioden vorhanden war, wurden Siliziumsensoren (Modell DT-470 der Firma Lake Shore) ausgewählt. Die Eichkurve ist in Abb. 4.22 dargestellt. Bei einem Strom von 10 μA liegen die gemessenen Spannungen zwischen 1,7 V bei 1,4 K und 0,1 V bei 475 K.

Die Temperatursensoren werden abwechselnd angesteuert und am PC dargestellt. Eine Konstantstromquelle versorgt einen dritten Sensor mit dem erforderlichen Meßstrom von 10 μA , die auftretende Spannung wird mit der Spannungsmeßkarte eingelesen und vom Kontrollsystem in die entsprechende Temperatur umgerechnet. Die dafür erforderlichen Chebychev-Reihen werden von Lake Shore bereitgestellt [Lak94].

Die Darstellung der Temperaturen erfolgt sowohl auf dem Monitor als Dezimalzahl (aktueller Wert) als auch in Form einer Graphik als zeitlicher Verlauf. In Abb. 5.2 ist der zeitliche Verlauf der Temperatur während eines Versuchs dargestellt.

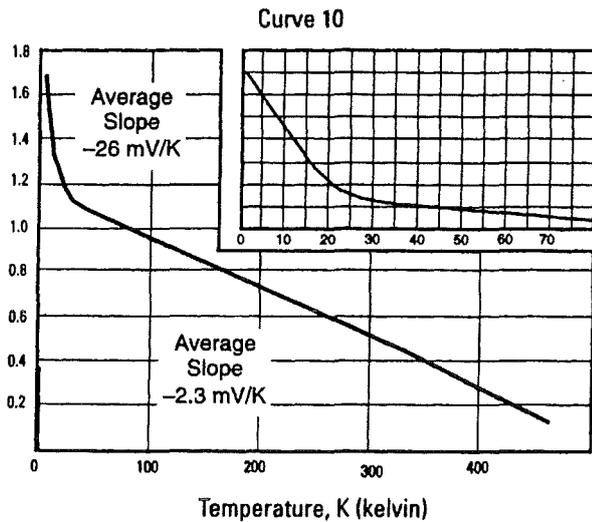


Abb. 4.22: Standardkurve für den Silizium-Tempersensor DT-470 [Lak94].

Vakuumpumpen

Wie in Kap. 4.3.1 bereits erwähnt, ist im Rahmen der Kryotechnik ein Isolationsvakuum von mindestens 10^{-5} mbar erforderlich. Um dies zu erreichen wird eine Pumpeinheit aus Turbopumpe und Vorpumpe verwendet (Abb. 4.23). Als Vorpumpe wurde eine zweistufige Drehschieberpumpe (16 m³/h) und als Hauptpumpe eine kohlenwasserstoffarme Turbopumpe (210 l/s) verwendet.

Um zu verhindern, daß Öl aus der Drehschieberpumpe in die Vakuumkammer gelangt, wurde eine Ölfalle zwischen Drehschieber- und Turbopumpe integriert. Zwischen Ölfalle und Turbopumpe wurde ein elektromagnetisches Sicherheitsventil installiert, das verhindert, daß bei Stromausfall Umgebungsluft und Öl aus der Ölfalle durch die Pumpen in die Vakuumkammer eindringen kann. Dies würde zu einer unerwünschten schlagartigen Verdampfung des Kryogens im Heliumbehälter und in den Kryopaneln führen. Zusätzlich wurde zwischen Turbopumpe und Vakuumkammer ein Dämpfungskörper, der die Schwingungsübertragung von der Turbopumpe auf die Vakuumkammer und umgekehrt minimieren soll, eingebaut. Ein Schieber zwischen Pumpeinheit und Vakuumkammer ermöglicht, daß das Vakuum zeitlich begrenzt auch ohne Einsatz der Pumpen aufrecht erhalten werden kann.

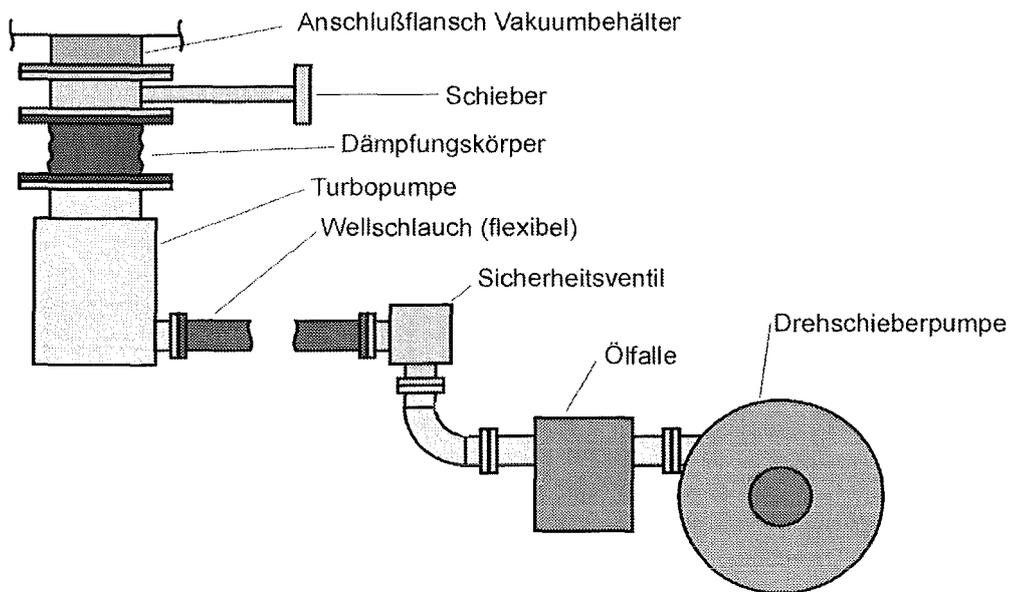


Abb. 4.23: Schematische Anordnung der Pumpeinheit aus Schieber, Pumpen, Dämpfungskörper, Ölfalle und Absperrrichtungen.

Drucksensoren

Für den Druckbereich von Umgebungsdruck bis zu 10^{-4} mbar wird eine Pirani-Meßröhre verwendet. In ihr befindet sich ein Meßfaden, der unabhängig von seiner Wärmeabgabe auf einer konstanten Temperatur gehalten wird. Da der Wärmeübergang vom Meßdraht auf das Gas mit abnehmendem Druck schlechter wird, kann man anhand der Heizspannung auf die Druckverhältnisse im Kryostaten schließen.

Für Drücke von 10^{-2} bis 10^{-9} mbar wird eine Penning-Röhre (auch Kaltkathoden-Ionisations-Vakuummeter genannt) eingesetzt. Ihr Prinzip beruht darauf, daß freie Elektronen, die durch ein Magnetfeld auf eine Kreisbahn gezwungen werden, die Atome des Restgases ionisieren. Der so entstehende Ionenstrom ist dem Druck proportional.

Heliumstandanzeige

Um während des Betriebs den Heliumstand kontrollieren zu können muß eine Heliumstandsonde in den Vorratsbehälter integriert werden. Hierfür wird üblicherweise ein in einer mit Löchern versehenen Schutzhülle geführter, sehr dünner NbTi Supraleiter verwendet. Dieser wird senkrecht im Heliumbehälter befestigt (Abb. 4.24).

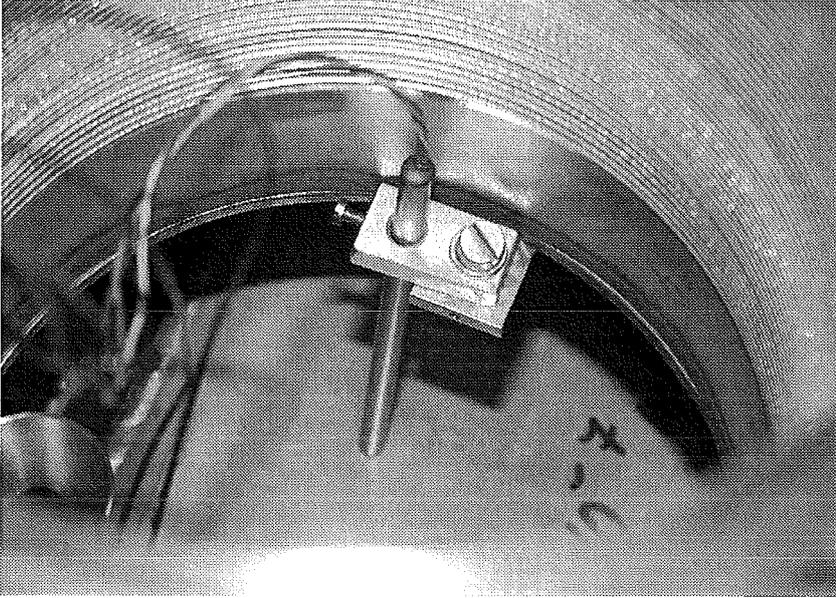


Abb. 4.24: Fixierung der Heliumstandsonde im Kryostat.

Der Sensor besteht aus einem am oberen Ende angeordneten Heizer und dem darunter angeordneten Supraleiter mit einer aktiven Länge von 15 cm (Abb. 4.25). Der Heizer stellt sicher, daß der Teil des Supraleiters oberhalb des flüssigen Heliums normalleitend ist. Auf Grund der kleinen Masse des Supraleiters wird er direkt unterhalb der Heliumoberfläche supraleitend. Mittels einer konventionellen 4-Punkt-Messung wird der Widerstand und damit die Länge des normalleitenden Anteils des Sensors gemessen und mit Hilfe eines kalibrierten Anzeigegeräts in den zugehörigen Heliumstand umgerechnet.

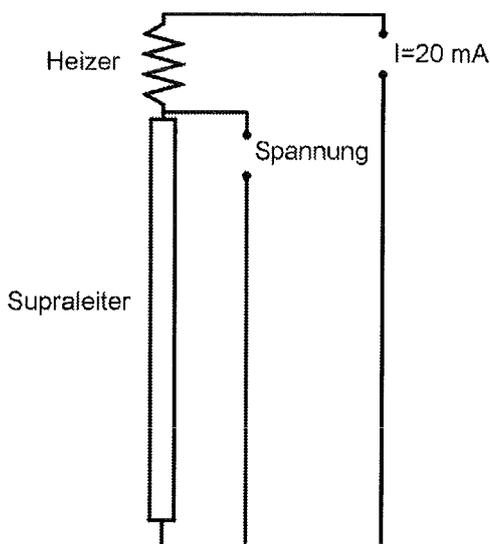


Abb. 4.25: Prinzipskizze der Heliumstandsonde.

5 Experimentelle Ergebnisse

5.1 Kalttest ohne Elektronenstrahl

Die Tests wurden am Institut für Technische Physik des Forschungszentrum Karlsruhe unter Nutzung der vorhandenen Infrastruktur durchgeführt.

Der Undulator wurde hinsichtlich seines Quenchverhaltens untersucht. Außerdem wurde der Füllvorgang der Kryopanel und des Heliumbehälters untersucht und optimiert.

Abkühlvorgang

Nach dem Evakuieren des Vakuumbehälters wurde ab einem Druck von 10^{-2} mbar flüssiger Stickstoff in die Kryopanel eingefüllt. Nachdem diese komplett gefüllt waren und sie somit den Undulator gegen die Wärmestrahlung abschirmten, wurde mit dem Füllvorgang des Heliumbehälters begonnen. Der Druck lag zu diesem Zeitpunkt etwa bei 10^{-7} bis 10^{-6} mbar.

Vor dem Einfüllen des flüssigen Heliums wurde der Heliumbehälter drei mal evakuiert und anschließend mit gasförmigen Helium gespült, wodurch vermieden werden soll, daß Luft im Kryostaten einfriert. Außerdem sollte der Verschmutzungsgrad des Heliums, das in die Rückgasleitung geleitet wird, möglichst gering sein.

Das flüssige Helium wird mit geringem Überdruck aus der Transportkanne über die beiden Heber in den Heliumbehälter geleitet. Es muß ein Kompromiß aus Abkühldauer und Heliumverbrauch gefunden werden. Ein typischer Temperaturverlauf während der Abkühlphase ist in Abb. 5.1 dargestellt. Die Temperaturen wurden an drei verschiedenen Stellen gemessen: An einem der Heliumrohre, das vom Vorratsbehälter zum Undulator führt, auf der Rückseite einer Undulatorspule und auf einer der Kupferplatten, die auf der Vorder- und Rückseite des Heliumbehälters zum Strahlungsschutz angebracht sind.

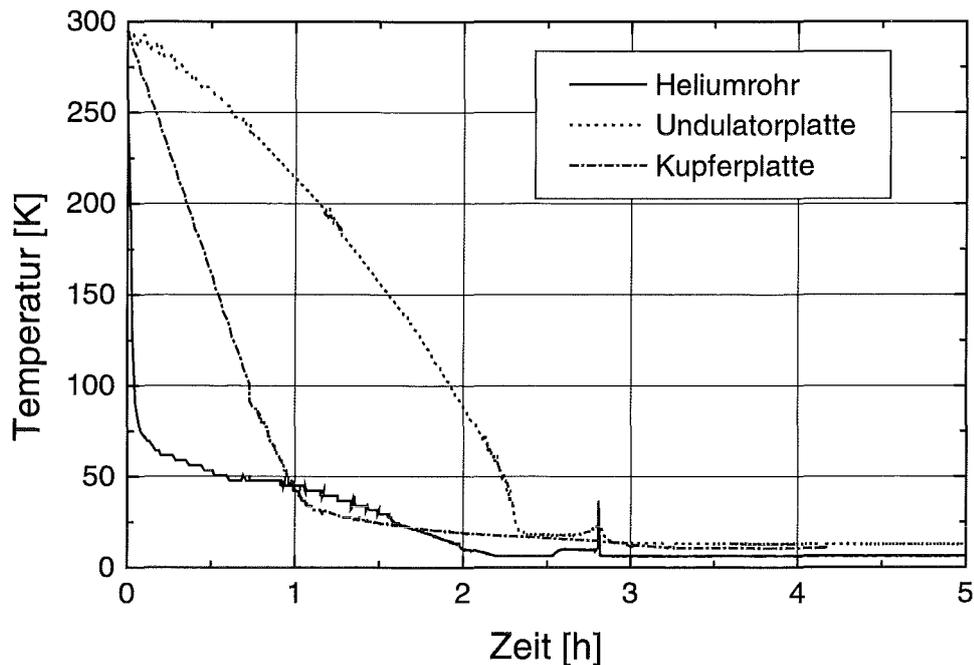


Abb. 5.1: Temperaturverlauf während der Abkühlung des Heliumbehälters.

Die Temperatur am Heliumrohr beginnt direkt nach Beginn des Füllvorgangs zu fallen. Grund hierfür ist, daß eine der Teflonzuführungen in unmittelbarer Nähe dieses Sensors endet. Somit kann sehr gut beobachtet werden, ob der Druck in der Transportkanne ausreicht, um Helium in den Kryostaten zu bringen. Der Undulator kühlt sich am langsamsten ab. Dies liegt hauptsächlich an der indirekten Kühlung.

Nach einer Dauer von etwa 4 Stunden hat sich ein stationärer Temperaturzustand eingestellt. Ab diesem Zeitpunkt konnte auch auf der Heliumstandanzeige eine Zunahme des Heliumvorrats beobachtet werden. Etwa 5 Stunden nach Beginn des Füllvorgangs des Heliumbehälters kann der Undulator in Betrieb genommen werden.

Die unterschiedlichen Temperaturen der Sensoren sind vermutlich mit jeweils ungleichen Wärmekontakten zu erklären. Die Existenz des Plateaus beweist jedoch, daß sich flüssiges Helium in dem entsprechenden Gefäß befindet.

In Abb. 5.2 ist der Temperaturverlauf an verschiedenen Stellen des Heliumbehälters während eines gesamten Versuchs dargestellt. Der Anstieg der Temperatur nach 10 Betriebsstunden kam durch eine Unterbrechung des Experiments und dessen Fortsetzung durch Nachfüllen von flüssigem Helium nach weiteren 10 Stunden zustande.

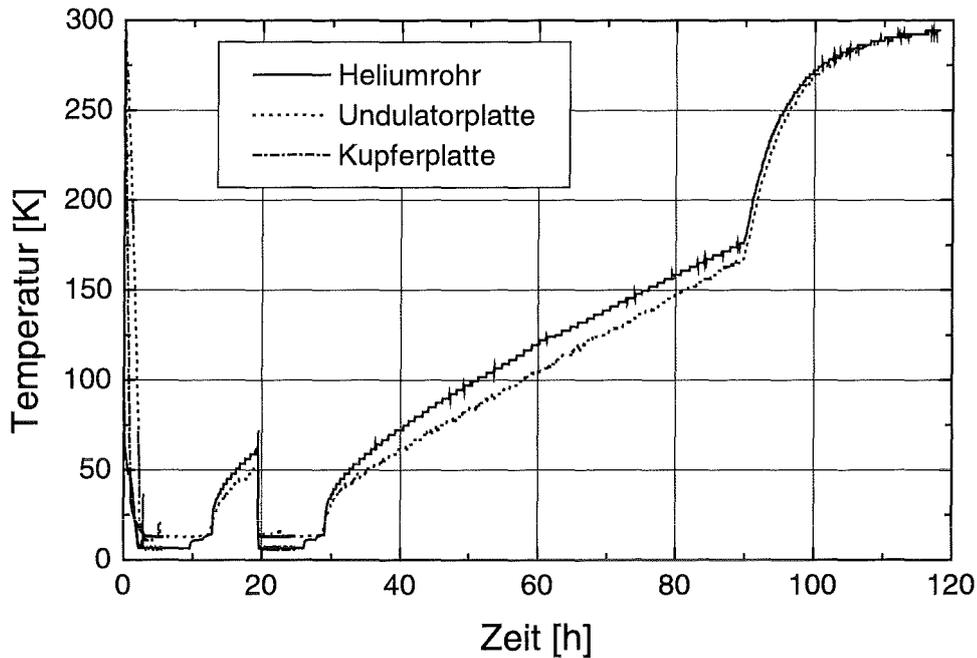


Abb. 5.2: Gesamter Temperaturverlauf während eines Versuchs.

Der Knick in den Temperaturkurven nach etwa 90 h Betriebsdauer kam dadurch zustande, daß die Vakuumkammer mit Stickstoffgas belüftet wurde und die verbesserte Wärmeleitung zwischen Vakuumkammer und Heliumbehälter zu einer schnelleren Erwärmung führte.

Versuche

Die Messung des kritischen Stroms wurde folgendermaßen durchgeführt:

- Kontinuierliche Erhöhung des angelegten Stroms und
- Dauertests bei konstantem Strom.

Beide Messungen mußten außerdem bei unterschiedlichen Heliumvorräten durchgeführt werden, weil dies dem Betriebszustand während eines Strahltests entspricht.

Im Verlauf der Messungen stellte sich heraus, daß die kritische Stelle bezüglich des Quenchverhaltens die Stromzuführungen waren. Diese wurden deshalb mehrmals verändert. Ursache für die Probleme war, daß die Supraleiter der Stromzuführungen, bedingt durch die Art der Montage des Heliumbehälters, relativ lose im flüssigen Helium lagen, teilweise auch aus diesem herausragten. Im Verlauf der Experimente wurden sie mehrmals modifiziert und ausgetauscht. Die letztendlich verwendete Version ist in Kapitel 4.3.2 beschrieben.

Die damit erreichte Verbesserung kann man in Abb. 5.3 erkennen. Dort ist für verschiedene Entwicklungsstufen der Stromzuführungen der Verlauf des kritischen Stroms aufgetragen.

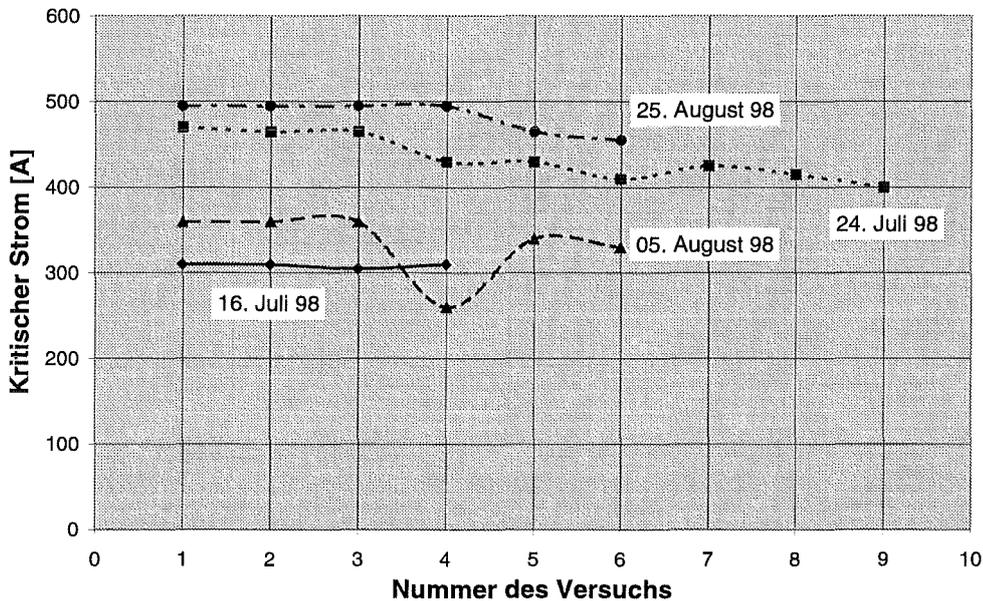


Abb. 5.3: Kritischer Strom für verschiedene Entwicklungsstufen der Stromzuführungen. Die Meßwerte eines Tages wurden so geordnet, daß der jeweils erste Wert der mit dem höchsten und der jeweils letzte Wert der mit dem niedrigsten Heliumstand ist.

Folgende Schlußfolgerungen können aus Abb. 5.3 gezogen werden:

- Von einer Ausnahme abgesehen, waren die an den Stromzuführungen durchgeführten Veränderungen erfolgreich und führten zu immer höheren kritischen Strömen. Das Designziel von etwa 1000 A wurde allerdings nicht erreicht.
- Mit abnehmendem Vorrat an flüssigem Helium nahmen auch die kritischen Stromstärken ab. Der Supraleiter im Heliumbehälter ragte offensichtlich zumindest teilweise aus dem Helium heraus, wurde nicht mehr optimal gekühlt und konnte daher keine so hohen Ströme tragen.

Die Dauertests bestätigten die oben getroffenen Aussagen hinsichtlich Entwicklungsstand und Heliumvorrat. Bei geringem Heliumvorrat können die Stromstärken jeweils um bis zu 15% niedriger liegen.

In Tab. 5.1 sind die Stromstärken, die jeweils für eine Zeitdauer von ca. 10 Minuten ohne Quench konstant gehalten wurden, aufgelistet.

Tab. 5.1: Während der Dauertests für ca. 10 Minuten ohne Quench angelegte Stromstärken.

Datum	16. Juli 98	24. Juli 98	5. August 98	26. August 98
Strom [A]	300	445	360	470

Diskussion der Ergebnisse

Im Verlauf der Kalttests ohne Elektronenstrahl konnte der Kryostat so modifiziert werden, daß es möglich war einen maximalen Strom von 495 A anzulegen. Im Dauerbetrieb konnten, je nach Heliumvorrat, zwischen 400 und 470 A sicher angelegt werden. Das damit erreichbare Magnetfeld bei einem Polabstand von 1 mm Höhe ist in Abb. 5.4 dargestellt. Es wurde an Hand der Magnetfeldmessungen (vgl. Kap. 4.2) extrapoliert.

Die Betriebsdauer liegt je nach Stromlast bei 2,5 -3 Stunden. Im Anschluß daran müssen etwa 60 Liter Helium nachgefüllt werden wofür etwa 0,5 Stunden benötigt werden.

Diese Rahmenbedingungen erschienen ausreichend, um einen Strahltest des Undulators am Mainzer Mikrotron MAMI durchzuführen.

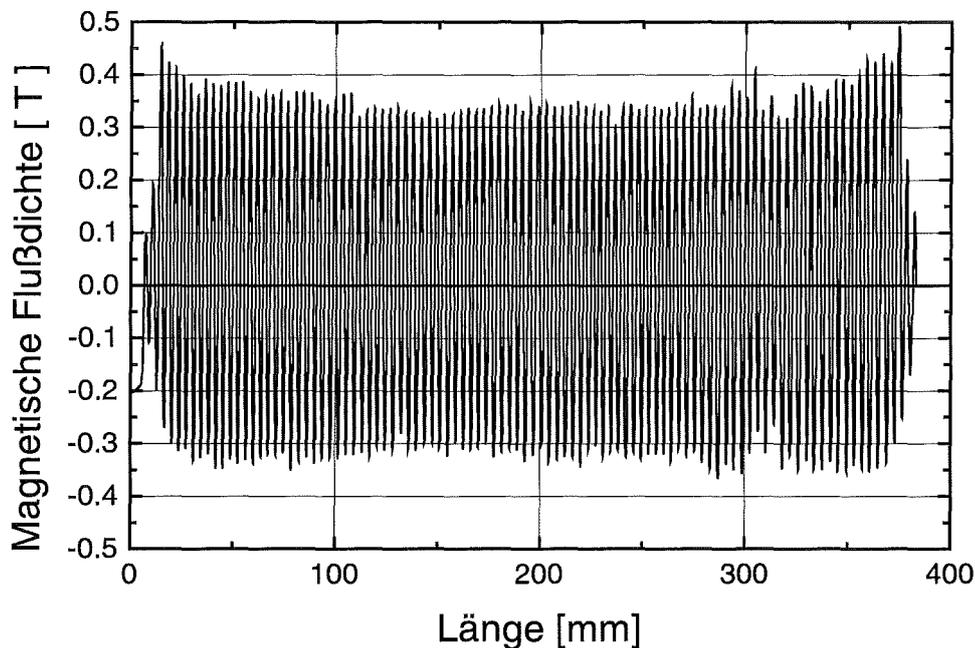


Abb. 5.4: Extrapoliertes Magnetfeld bei einem Polabstand von 1 mm und einem Strom von 470 A.

5.2 Erzeugung von Synchrotronstrahlung

Im Anschluß an die erfolgreichen Kalttests am Institut für Technische Physik wurde ein Strahltest am Institut für Kernphysik der Universität Mainz durchgeführt. Er diente dazu, die erzeugte Strahlung nachzuweisen, zu messen und zu charakterisieren. Davon erhoffte man sich, Aussagen über die Einsatzmöglichkeiten von supraleitenden In-Vakuum Undulatoren an Teilchenbeschleunigern treffen zu können. In diesem Zusammenhang sind insbesondere folgende Fragestellungen von Bedeutung:

- Ist die vertikale Ausdehnung des Elektronenstrahls und seines Halos im Undulator ausreichend klein, so daß die vorhandene Kühlleistung ausreicht, um die thermische Belastung des Undulators durch die im Strahl-Halo mitfliegenden geladenen Teilchen zu kompensieren?
- Welche Auswirkung hat der Undulator auf die Trajektorie der Elektronen strahlabwärts des Undulators?
- Wie wirkt der Strahl mit seiner Hochfrequenzstruktur auf den Betrieb des Supraleiters?

Der Aufbau des Mainzer Mikrotrons MAMI ist in Kapitel 8.1 beschrieben.

Vorversuche

Zur Überprüfung der Justiermöglichkeiten und zur Beantwortung des ersten oben genannten Punkts wurde ein Vortest durchgeführt. Dieser ist in [Fri98] beschrieben und soll an dieser Stelle kurz zusammengefaßt werden.

An der für den Strahltest des Undulators vorgesehenen Stelle des MAMI-Strahlrohrs wurde eine Vakuumkammer mit einem vertikal beweglichen Zinksulfid-Schirm, einem Drahtkreuz und drei Aluminiumplatten angebracht (Abb. 5.5). An dieser Stelle war die Strahloptik für den Einbau eines Undulators bereits so optimiert worden, daß minimale horizontale und vertikale Strahlmessungen vorlagen.

Im Verlauf des Versuchs wurde der Elektronenstrahl mit Hilfe von Steerer-Magneten über das Drahtkreuz, das aus einem vertikalen und einem horizontalen Draht mit Durchmesser 25 μm bestand, bewegt. Bei Auftreffen des Strahls auf das Drahtkreuz fließt ein Strom der mit einem Oszillographen gemessen wird. Aus der Halbwertsbreite des Stromimpulses und der Frequenz

der Steuerspannung der Steerer-Magnete konnten unter Berücksichtigung der Drahtabmessungen die horizontale und vertikale Strahlgröße bestimmt werden.

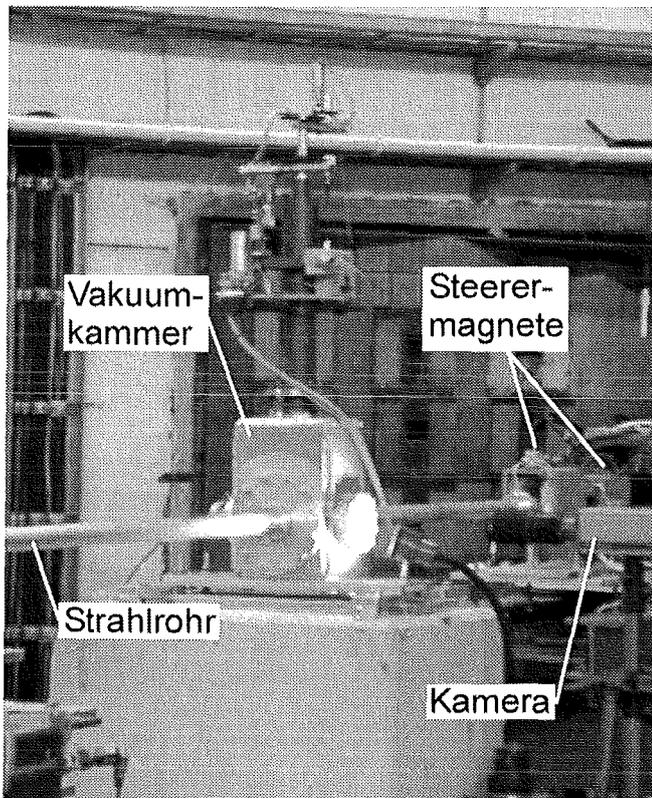


Abb. 5.5: Vakuunkammer mit Drahtkreuz, Zinksulfid-Schirm und Aluminiumplatten.

Das Ergebnis einer Messung des vertikalen Strahlquerschnitts ist in Abb. 5.6 dargestellt.

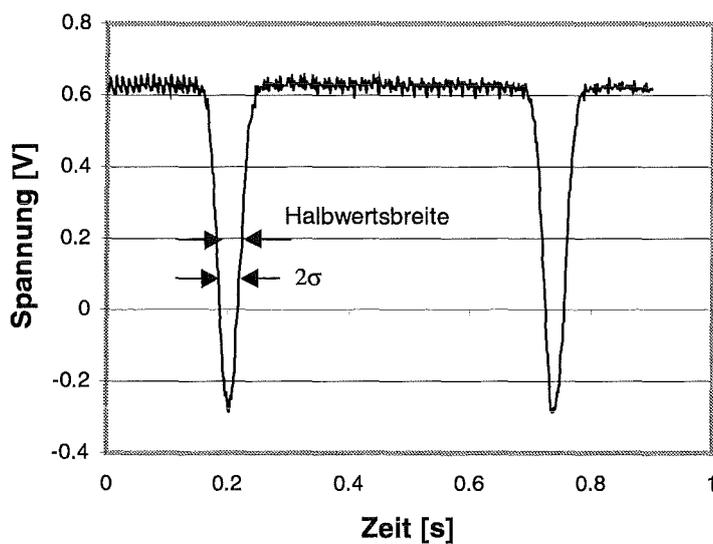


Abb. 5.6: Messung der induzierten Spannung über der Zeit zur Bestimmung des vertikalen Strahlquerschnitts [Fri98].

Der gemessene σ -Wert lag bei 25,1 μm (vertikal) und 40,1 μm (horizontal). Detailliertere Informationen über die Bestimmung der Abmessungen des Elektronenstrahls sind in [Fri98] angeführt.

In einem weiteren Versuch wurden drei Aluminiumplatten unterschiedlicher Länge zur Simulation des Polabstands des Undulators verwendet. Sie waren in 1 mm Abstand voneinander angebracht. Ziel dieses Versuchs war, die von den Elektronen und dem Halo erzeugte Bremsstrahlung zu messen. Bei verschiedenen Strahlströmen wurde mittels eines Detektors (Photodiode und NaJ-Detektor) die Anzahl der Ereignisse folgender Fälle aufgenommen:

- Untergrundstrahlung ohne Elektronenstrahl.
- Der Strahl passiert die Vakuumkammer ohne Einbauten.
- Der Strahl wird optimal durch den simulierten Polabstand geschossen.
- Der Strahl wird frontal auf eine der Platten gelenkt.

Ergebnis der Untersuchungen ist, daß der relative Anteil der in den Platten abgelagerten Strahlleistung bei etwa $2 \cdot 10^{-5}$ liegt. Bei einem Strahlstrom von 10 μA sind dies 0,31 W. Dieser Wärmestrom muß während des Strahltests so schnell über die Halbschalen aus Weicheisen an das Helium abgegeben werden, daß sich der Supraleiter nicht erwärmt und quentcht, was realisierbar erscheint.

Der Zinksulfid-Schirm mit Skalierung diente im Verlauf der Messungen dazu, die Steuerspannung der Steerer-Magnete zu eichen.

Integration des Undulators in die Strahlführung

Der Undulator wurde in der X1-Halle des Mainzer Mikrotrons MAMI in die Strahlführung integriert (Abb. 5.7). Strahlaufwärts war die bereits beschriebene Vakuumkammer mit Drahtkreuz eingebaut (Abb. 5.8). Mit Hilfe der vorhandenen Quadrupole und Steerer-Magnete konnte der Elektronenstrahl optimal fokussiert und durch den Undulator gelenkt werden.

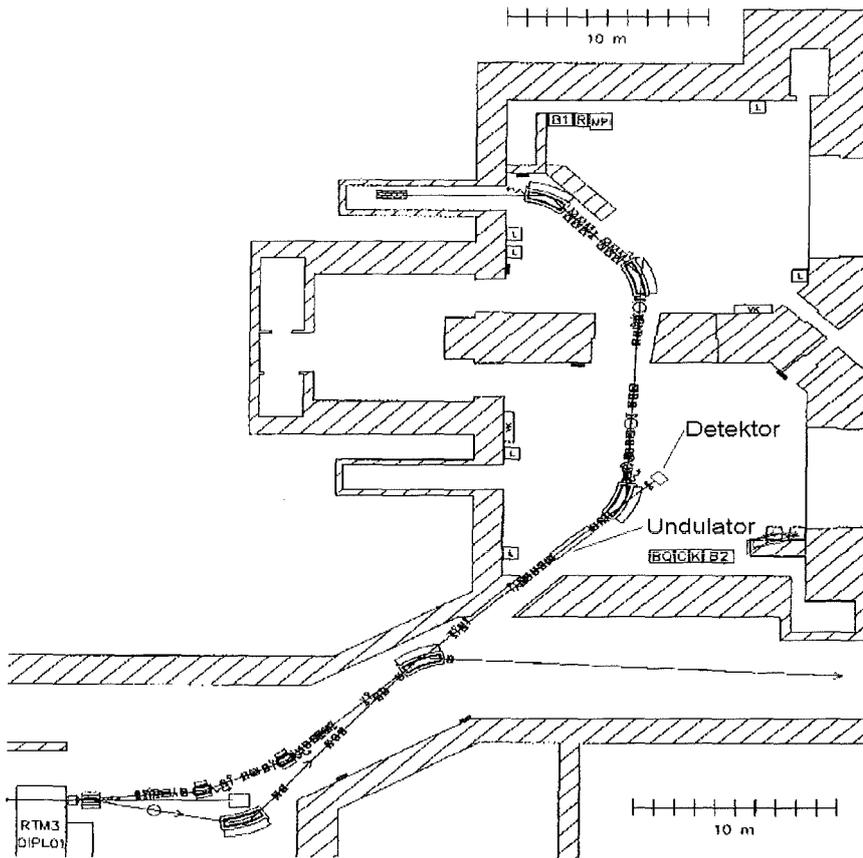


Abb. 5.7: Lage des Undulators in der Strahlführung der X1-Halle an MAMI [Lau98].

Der in Kapitel 4.3 beschriebene Kryostat wurde so an einem Gerüst befestigt, daß er senkrecht zu seiner Längsachse verschoben werden konnte (Abb. 5.8). Dies ist wichtig, da zwischen zwei Strahltests des Undulators unter Umständen mehrere Wochen mit Versuchsbetrieb zu anderen Themen liegen können und in diesem Fall die Elektronen nicht durch den kleinen Polabstand geschossen werden sollen. Die Aufhängung ist außerdem so konzipiert, daß die vertikale Position der Vakuumkammer über 4 Gewindestangen eingestellt werden kann.

Die Vakuumkammer des Undulators ist auf beiden Seiten mit Flanschen der Nennweite DN 40 KF versehen und mit Schiebern verschlossen. An diese Schieber werden Bälge angebracht, die an dem Strahlrohr befestigt sind. Dadurch kann die Vakuumkammer des Undulators direkt im Anschluß an ein Experiment im evakuierten Zustand seitlich versetzt d.h. verschoben werden (Abb. 5.9).

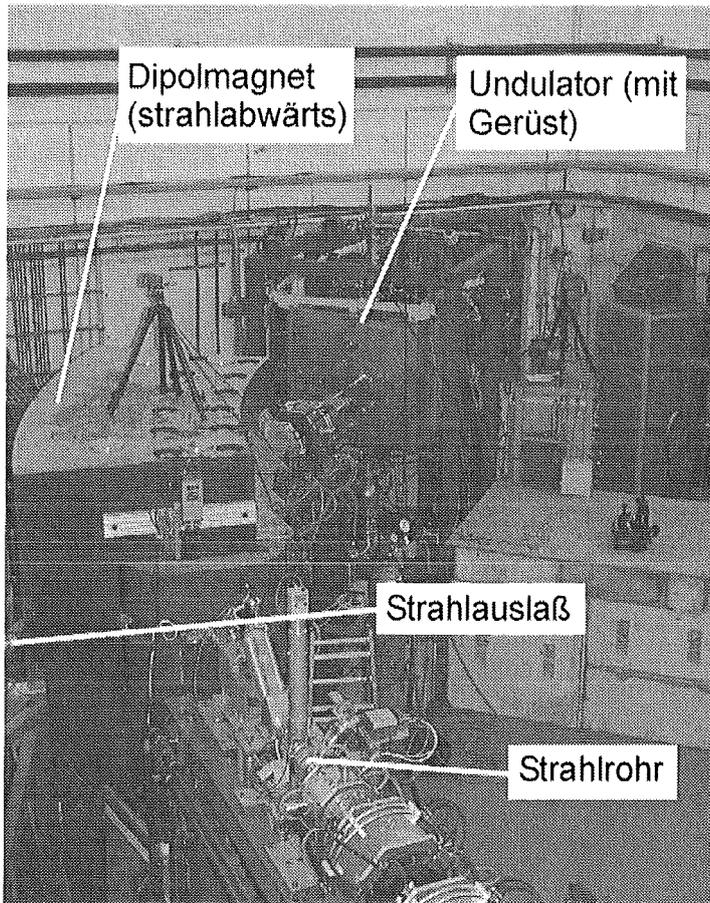


Abb. 5.8: Integration des Undulators in die Strahlführung von MAMI.

Die Steuerung und Überwachung des Experiments wurde, wie in Kap. 4.4 beschrieben, mit Hilfe des Kontrollsystems realisiert.

Am 0° -Auslaß des strahlabwärts gelegenen Dipolmagneten (Abb. 5.8) wurde ein ferngesteuerter, in horizontaler und vertikaler Richtung beweglicher, Meßtisch angebracht, auf dem ein Cd-Zn-Te-Detektor stand. Mit diesem Aufbau ist eine orts aufgelöste Messung der Energieverteilung möglich. Durch diesen Auslaß wurde im Verlauf der Versuche mit Hilfe des Theodolithen die Höhe und absolute Position der Undulatorspulen vermessen.

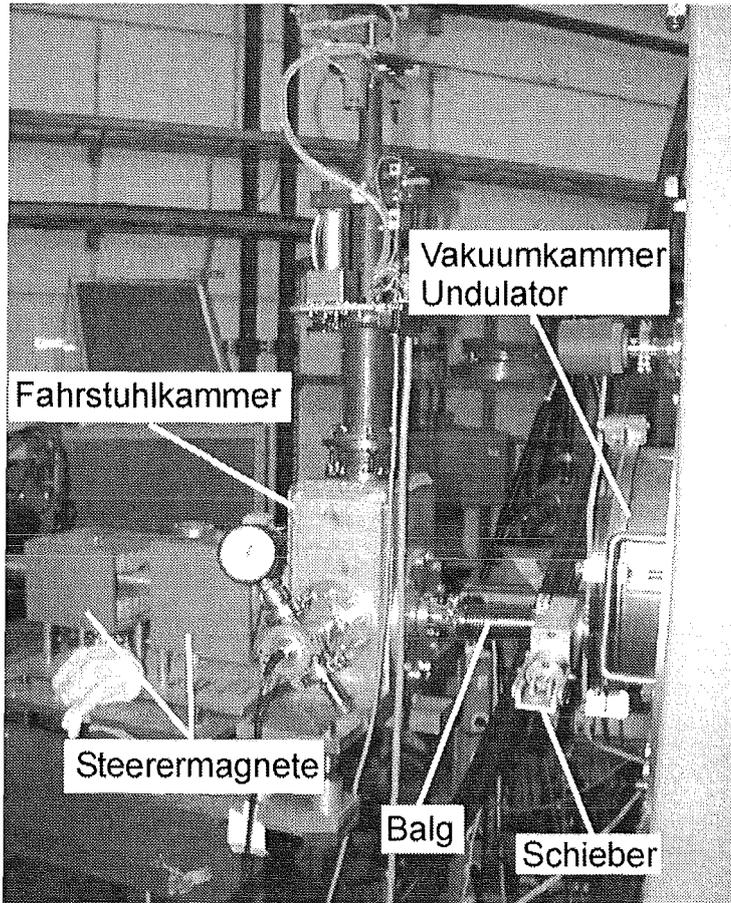


Abb. 5.9: Fahrstuhlkammer mit Drahtkreuz, Balg, Schieber und Undulator-Vakuummkammer.

Vorbereitung der Tests

Der Polabstand des Undulators wurde für den Strahltest auf 2 mm eingestellt. In der ersten Versuchsphase sollte die Belastung des Undulators durch den Halo möglichst klein gehalten werden. Weitere Experimente werden zeigen, bis zu welcher Höhe der Polabstand reduziert werden kann. Dies ist deshalb interessant, weil ein kleinerer Polabstand ein höheres Magnetfeld bedeutet und dieses wiederum einen größeren Durchstimmbereich ermöglicht.

Um den Abstand zwischen den beiden Spulen während des Experiments, trotz der durch Abkühlung auftretenden Längenänderung und der anziehenden Wirkung des Magnetfelds, möglichst konstant zu halten, wurden 4 Abstandshalter eingesetzt (Abb. 5.10).



Abb. 5.10: Abstandshalter zur Fixierung der beiden Undulatorspulen und Gewindestangen zur Abstützung des Heliumbehälters.

Diese Abstandshalter enthalten auf der linken Seite ein Langloch mit 12 mm Höhe und 22 mm Länge. Durch dieses Loch kann der Elektronenstrahl geschossen werden wenn der Undulator nicht mit einem Polabstand von 2 mm betrieben werden soll. Weiterhin ist auf Abb. 5.10 ein Teil der insgesamt 6 Gewindestangen zu erkennen, die zur Abstützung der Boden- gegen die Deckenplatte des Strahlungsschutzschilds verwendet werden. Auf Grund der Druckdifferenz beulen sich diese Platten nach innen. Dadurch wird nicht nur die Position der Undulatorspulen verschoben, sondern im Extremfall kann dadurch der Polabstand geringer werden.

Nachdem die Vakuumkammer des Undulators evakuiert und die Kryopaneln mit Stickstoff gefüllt waren, wurde die Lage des Undulators mit Hilfe des Theodolithen vermessen und korrigiert. Das Evakuieren des Vakuumbehälters hatte eine Verschiebung des Polabstands um 1,8 mm nach unten bewirkt. Ursache dafür war das Beulen des Heliumbehälters unter Innendruck.

Im Anschluß daran wurde der Strahl durch die "warmen" Undulatorspulen geführt und die Bremsstrahlung gemessen. Mit Hilfe der Steerer-Magnete wurde der Strahl in vertikaler und horizontaler Richtung bewegt, die Bremsstrahlung in Abhängigkeit der Position aufgenommen und die optimale Position eingestellt.

Als nächstes wurde der Heliumbehälter vollständig gefüllt, was auf Grund der negativen Längenänderung zu einer Verschiebung der Undulatorspulen nach oben führte, die wiederum mittels der Gewindestangen am Gerüst kompensiert werden konnte. Anschließend wurde mit Hilfe der gespeicherten Werte der Strahl ohne angelegtes Magnetfeld durch die Spulen geschossen und die erzeugte Bremsstrahlung gemessen.

Bei Variation des Undulatorfelds wurde keine Strahlverschiebung am Ende des stromabwärts gelegenen Ablenkmagneten festgestellt; es konnte mit den eigentlichen Strahltests begonnen werden.

Strahlungsmessung

Es wurden zwei Strahltests mit unterschiedlichem Meßaufbau und verschiedenen Detektoren durchgeführt.

Zunächst wurde ein Cd-Zn-Te-Detektor in etwa 6 m Entfernung vom Undulator aufgebaut. Die Photonen mußten eine 12,5 μm starke Kaptonfolie und 18 mm Luft durchlaufen, bevor sie auf den Detektor mit einer runden Meßöffnung des Querschnitts 25 mm^2 auftrafen. Es wurden Messungen mit unterschiedliche Magnetfeldern bei konstantem Strahlstrom durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Abb. 5.11 dargestellt.

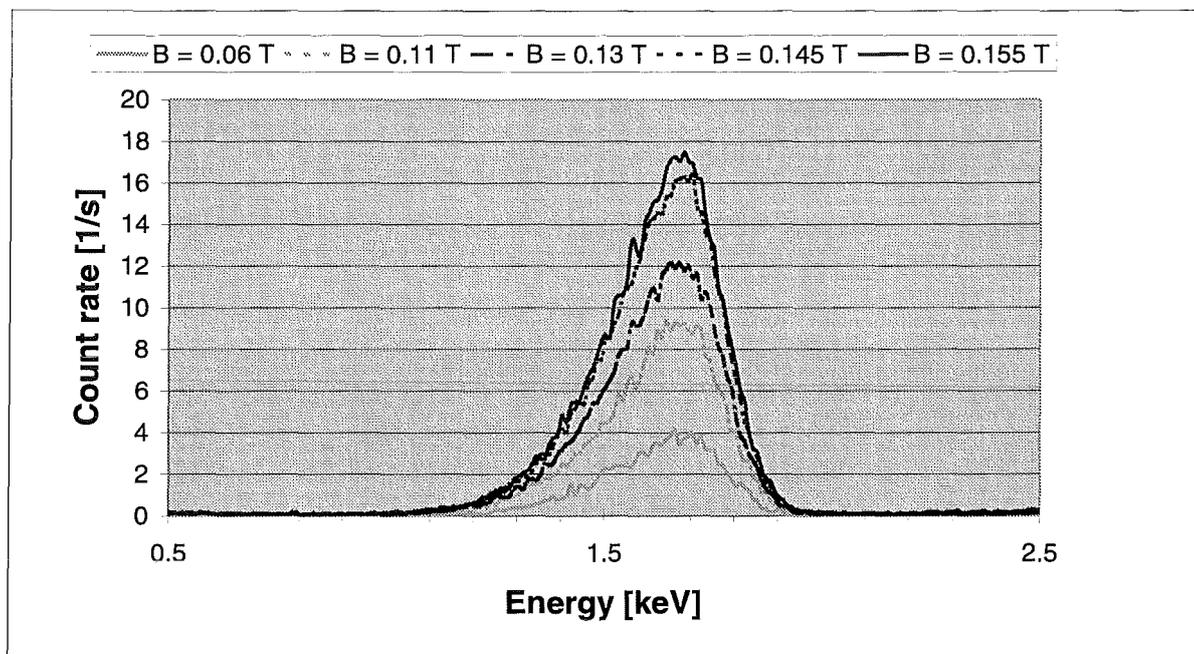


Abb. 5.11: Gemessene Spektren bei einem Strahlstrom von etwa 2 nA.

In einem zweiten Schritt wurde ein etwa 6 m langes evakuiertes Rohr an den Auslaß des Ablenkmagneten geschraubt. Am anderen Ende wurde ein Germanium-Detektor so angebracht, daß eine Blende mit einer Bohrung von 200 μm im Vakuum vor den Detektor geschoben werden konnte. Die in den Abb. 5.12 - 5.14 dargestellten Messungen wurden mit Hilfe dieser Blende durchgeführt. Detektor und Blende waren so auf einem steuerbaren Tisch angebracht, daß sie vertikal und horizontal bewegt werden konnten. In Abb. 5.12 ist die Zählrate als Funktion der Energie der Photonen dargestellt. Der Strahlstrom betrug 30 nA, das Magnetfeld etwa 0,17 T. Bei dem gezeigten Spektrum wurde die Nullzählrate (Zählrate des Detektors ohne Undulatorfeld) abgezogen.

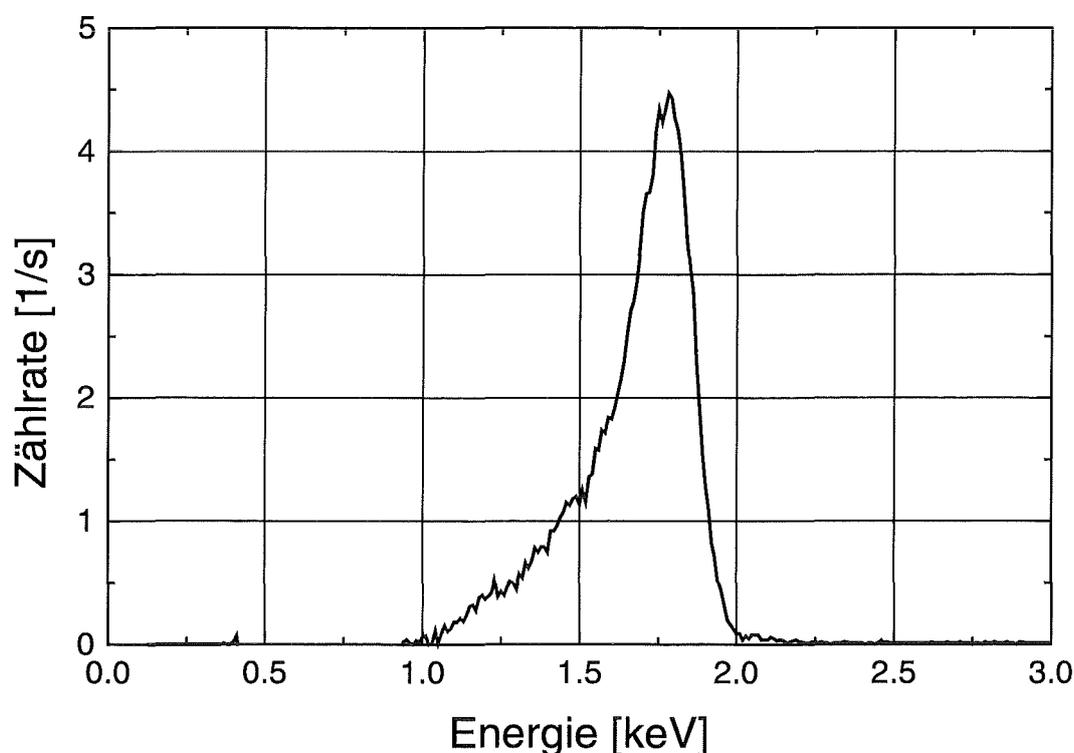


Abb. 5.12: Zählrate der Photonen in Abhängigkeit der Energie bei einem Magnetfeld von 0,17 T und einem Strahlstrom von 30 nA. Bei der hier gezeigten Zählrate wurde die Nullzählrate (Zählrate ohne Undulatorfeld) abgezogen.

Man erkennt ein Maximum der Zählrate bei 1,78 keV. Dieses wurde durch den Undulator bzw. sein Magnetfeld erzeugt. Die linke Flanke fällt deutlich flacher ab als die rechte. Dieser Effekt wird durch das bereits in Kap. 3.3 erwähnte, dem periodischen Undulatorfeld überlagerte, Dipolfeld hervorgerufen. Dieses bewirkt, daß die Elektronen im Undulator nicht periodisch um eine Gerade, sondern um eine Kreisbahn abgelenkt werden. Dadurch wird die Undulatorstrahlung nicht in einem scharf begrenzten Kegel, sondern, ähnlich der Strahlung

eines Ablenkmagneten, in einer Art Fächer abgegeben. Der Detektor mißt folglich trotz der sehr feinen Blende auch niederenergetischere Photonen, jedoch keine höherenergetischen. Dieser Effekt ist auch in Abb. 5.13 und 5.14 zu erkennen. Dort ist die gemessene Strahlung über der vertikalen bzw. horizontalen Koordinate des Detektors aufgetragen.

In Abb. 5.13 erkennt man die Energieverteilung der Photonen während einer vertikalen Bewegung des Detektors. Liegt die Blende auf Höhe der Elektronenbahn, so ist die Energie am größten. Entfernt man den Detektor von dieser Position fällt die Energie der Photonen in beide Richtungen symmetrisch ab.

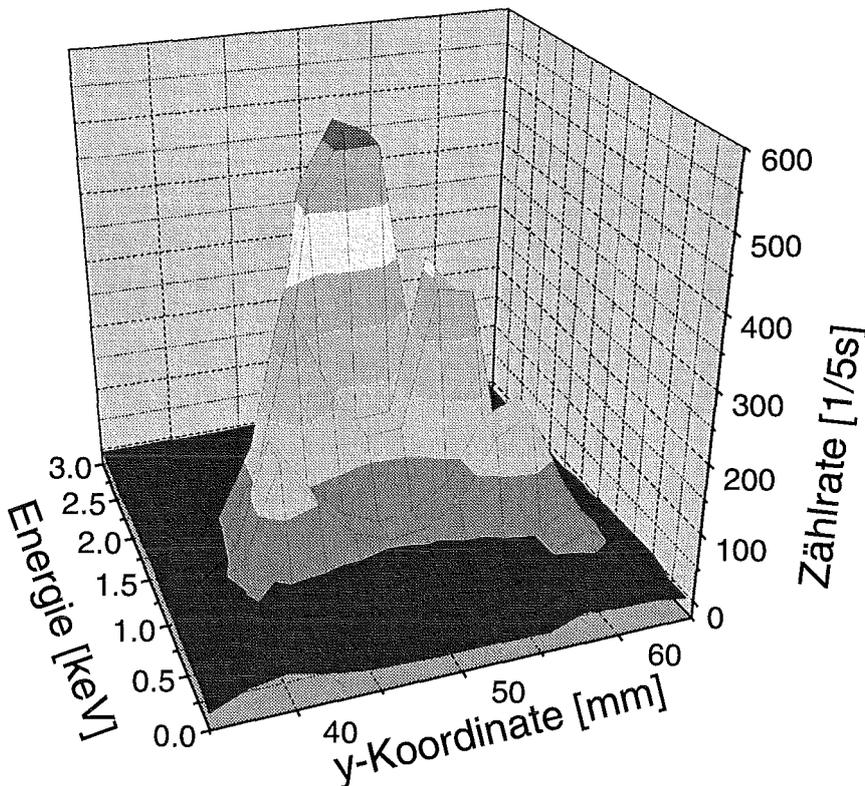


Abb. 5.13: Zählrate der Photonen und ihre Energie über der vertikalen Bewegungskordinate des Detektors. Der Strahlstrom betrug 30 nA, das Magnetfeld 0,17 T. Die Meßzeit betrug 278 Sekunden. Das in Abb. 5.12 gezeigte Spektrum findet sich in der Häufigkeitsverteilung der Punkte an einer festen Koordinate wieder. Der Abstand des Detektors vom Undulator betrug 12 m.

Im Idealfall sollte der in Abb. 5.14 dargestellte Verlauf der Energie und Zählrate der Photonen bei der Bewegung des Detektors in horizontaler Richtung dem in Abb. 5.13 gleichen. Der überlagerte Dipol bewirkt jedoch, daß die Strahlung in Form eines Fächers abgegeben wird. Dies führt zu dem in Abb. 5.14 dargestellten, breiten, gleichförmigen Spektrum.

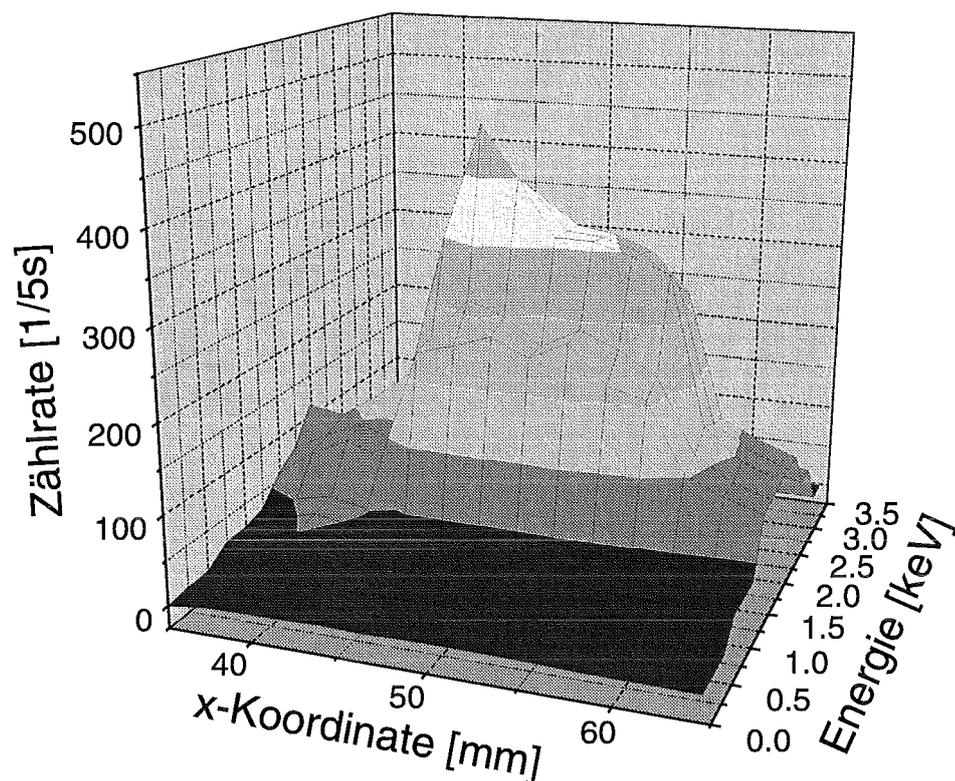


Abb. 5.14: Zählrate der Photonen und ihre Energie über der horizontalen Bewegungskordinate des Detektors. Der Strahlstrom betrug 30 nA, das Magnetfeld 0,17 T. Die Meßzeit betrug 335 Sekunden. Das in Abb. 5.12 gezeigte Spektrum findet sich in der Häufigkeitsverteilung der Punkte an einer festen Koordinate wieder. Der Abstand des Detektors vom Undulator betrug 12 m.

Die in diesem Kapitel beschriebenen Experimente zur Charakterisierung der erzeugten Strahlung wurden zum Schutz der Detektoren nur mit sehr niedrigen Strahlströmen durchgeführt. Eine interessante Fragestellung war außerdem, ob der Supraleiter, der dem Elektronenstrahl im Vakuum direkt ausgesetzt ist, bei höheren Strahlströmen quencht. Hierfür wurde bei einem konstanten Magnetfeld von 0,17 T der Strahlstrom mehrmals ausgehend von sehr kleinen Werten auf maximal 50 μA erhöht. Außerdem wurde der Elektronenstrahl (50 μA) wiederholt aus- und wieder eingeschaltet. In keinem der beschriebenen Fälle kam es zum Zusammenbruch der Supraleitung.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wird die Entwicklung eines indirekt gekühlten supraleitenden Undulators ausgehend von den ersten theoretischen Ansätzen über die Auslegung des gesamten Systems bis hin zum erfolgreichen Strahltest am Mainzer Mikrotron MAMI beschrieben.

Erstmalig ist es gelungen, einen hochrelativistischen Elektronenstrahl durch einen indirekt gekühlten supraleitenden Mikroundulator zu führen. Dafür war es notwendig, einen Kryostaten zu konstruieren, der sowohl den Anforderungen der indirekten Kühlung als auch dem Einsatz an einem Elektronenbeschleuniger gerecht wird.

Das Magnetfeld wird durch einen hohen Strom in einem geeignet angeordneten NbTi-Supraleiter erzeugt. Der Undulator hat 100 Perioden mit einer Periodenlänge von 3,8 mm. Das Magnetfeld einer Undulatorspule wurde im Rahmen einer Diplomarbeit in einem Helium-Badkryostaten mit Hilfe einer Hall-Sonde gemessen.

Während des Strahltests in Mainz betrug der Polabstand der Undulatorspulen 2 mm, die charakteristische Energie des gemessenen Spektrums von 1,79 keV war in guter Übereinstimmung mit den in Kap. 3.3 berechneten Werten.

Aufgabe weiterer Arbeiten muß es sein, den Undulator so zu optimieren, daß er an einem Speicherring der dritten Generation oder einem Linearbeschleuniger (Synchrotronstrahlungsquelle der vierten Generation) eingesetzt werden kann.

Voraussetzung dafür ist eine genauere Untersuchung der emittierten Strahlung, eine weitere Reduktion des Polabstands der Undulatorspulen, Studien über eine verbesserte Anordnung der Supraleiter und somit eine Optimierung des Magnetfelds sowie eine verbesserte Konstruktion für den Kryostaten.

Ein auf den Grundlagen dieser Arbeit weiterentwickelter Prototyp wird zur Zeit von einem Industriepartner gebaut und nach Fertigstellung durch das Forschungszentrum Karlsruhe an geeigneten Beschleunigeranlagen getestet werden.

7 Literatur

- [ADM97] AD-Merkblätter, Verband der Technischen Überwachungsvereine e.V., Essen, 1997
- [And95] Andersson, Å., Werin, S., Meinander, T. et al.; Experiences with the narrow gap undulator at MAX-lab, Nucl. Instr. Meth. A 362 (1995) S. 586 -591
- [Ban96] Bandow, U., Einfeld, D., Hezel, T. et al.; Calculation of the dynamic aperture in the ANKA storage ring with a high-field wavelength shifter, Proceedings of the fifth European Particle Accelerator Conference EPAC96, Sitges, Spain, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1996
- [Bau93] Baurichter, A.; Micropole Undulator for ASTRID - A design study, Institute for Synchrotron Radiation, Aarhus University, Ny Munkegade 10, DK-8000 Århus C, 1993
- [Bec86] Becker, E.W., Ehrfeld, W., Hagmann, P. et al.; Microelectronic Engineering 4, S. 35, 1986
- [Ben90] Ben-Zvi, I., Jiang, Z.Y., Ingold, G. et al.; The performance of a superconducting micro-undulator prototype, Nucl. Instr. Meth. A 297 (1990) S. 301 - 305
- [Bie88] Bier, W., Schubert, K.; KfK-Bericht 4363, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Februar 1988
- [But98] Buth, G., Doyle, S., Einfeld, D. et al.; Status of the 2.5 GeV light source ANKA, Proceedings of the 6th European Particle Accelerator Conference, Stockholm, Schweden, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1998
- [Dam95] Dambach, S.; Aufbau und Test eines Undulators kurzer Periode zur Erzeugung weicher Röntgenstrahlung mit 855 MeV Elektronen, Diplomarbeit, Institut für Kernphysik, Universität Mainz, 1995
- [Dür97] Dürr, S.; Institut für Mikrostrukturtechnik, Forschungszentrum Karlsruhe, Private Information, 1997
- [Fri97] Friedrich, C., Bacher, W., Bauer, W. et al.; High Aspect Ratio Processing, Handbook of Microlithography, Micromachining and Microfabrication, Vol.2 (1997)
- [Fri98] Fritz, M.; Erste Magnetfeldmessungen an einem supraleitenden Mikroundulator, Diplomarbeit, Institut für Mikrostrukturtechnik, Universität Karlsruhe, 1998
- [Fri98a] Fritz, M., Hezel, T., Homscheidt, M. et al.; First experiments with a 100 period superconductive undulator with a period length of 3.8 mm, Proceedings of the 6th European Particle Accelerator Conference, Stockholm, Schweden, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1998
-

-
- [Gas96] Gesellschaft für Angewandte Supraleitung, Lagebericht 1996 zur Angewandten Supraleitung, c/o Forschungszentrum Karlsruhe, Postfach 3640, D-76021 Karlsruhe, Deutschland, 1996
- [Gom92] Gomes, P.A.P., da Silva Rafael, F., Dröher Rodrigues, A.R.; Design, construction, and characterisation of an electromagnetic small period undulator, Rev. Sci. Instrum. 63 (1), January 1992, S. 352 - 354
- [Gra85] Granatstein, V.L., Destler, W.W., Mayergoyz, I.D.; Small-period electromagnet wigglers for free-electron lasers, Appl. Phys. Lett. 47 (6), 15. September 1985, S. 586 - 591
- [Hez96] Hezel, T., Krevet, B., Moser, H.O., Rossmannith, R.; The influence of a Superconducting Split-pair Solenoid as an Insertion Device on the Performance of a Storage Ring for Synchrotron Radiation, Forschungszentrum Karlsruhe, Wissenschaftliche Berichte FZKA 5839, 1996
- [Hez96a] Hezel, T., Rossmannith, R., Moser, H.O.; Conceptual and experimental feasibility study of a superconductive micro-undulator (unveröffentlicht), ANKA Technical Note, BES-04/96, Projektgruppe Errichtung ANKA, Forschungszentrum Karlsruhe, 1996
- [Hez97] Hezel, T., Rossmannith, R., Krevet, B., Moser, H.O.; Conceptual and experimental feasibility study of a superconductive micro-undulator, Proceedings of the Particle Accelerator Conference PAC97, Vancouver, Canada, 1997
- [Hez97a] Hezel, T., Krevet, B., Moser, H.O. et al.; A superconductive undulator with a period length of 3.8 mm, J. Synchrotron. Rad. (1998). 5, S. 448 - 450
- [Hol91] Holzapfel, H.; Entwurf eines supraleitenden Mikroundulators zur Erzeugung harter Röntgenstrahlung, Diplomarbeit, Institut für Mikrostrukturtechnik, Universität Karlsruhe (TH), 1991
- [Ing96] Ingold, G., Ben-Zvi, I., Solomon, L., Woodle, M.; Fabrication of a high-field short-period superconducting undulator, Nucl. Instr. Meth. A 375 (1996) S. 451 - 455
- [Jah97] Jahresbericht des Instituts für Kernphysik der Universität Mainz, 1997
- [Lak94] Standard curve 10, Do. No. C2S025, Lake Shore Cryotronics, 1994
- [Lau98] Lauth, W.; Institut für Kernphysik, Universität Mainz, Private Information, 1998
- [Koc83] Koch, E.-E. (Editor); Handbook on Synchrotron Radiation, Volume 1A, chapter 1.3, North Holland Publishing Company, 1983
-

-
- [Koc83a] Koch, E.-E. (Editor); Handbook on Synchrotron Radiation, Volume 1A, chapter 2.6, North Holland Publishing Company, 1983
- [Koc83b] Koch, E.-E. (Editor); Handbook on Synchrotron Radiation, Volume 1A, chapter 2.1, North Holland Publishing Company, 1983
- [Maf96] MAFIA, CST Gesellschaft für Simulationstechnik mbH, Darmstadt, Germany, 1996
- [Men97] Menz, W., Mohr, J.; Mikrosystemtechnik für Ingenieure (2. Auflage), Kap. 7, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, 1997
- [Mos91] Moser, H.O., Krevet, B., Holzapfel, H.; Mikroundulator, Patentschrift DE 4101094 C1, Kernforschungszentrum Karlsruhe, 1991
- [Mos95] Moser, H.O., Einfeld, D., Steininger, R.; Vorschlag zum Bau einer Synchrotronstrahlungsquelle (ANKA) im Forschungszentrum Karlsruhe zur Förderung der industriellen Umsetzung von Mikrofertigungs- und Analytikverfahren, Forschungszentrum Karlsruhe, 2. Auflage 1995
- [Mos98] Moser, H.O.; Projektgruppe Errichtung ANKA, Forschungszentrum Karlsruhe, Private Mitteilung, 1998
- [Nat98] National Instruments, 6504 Bridge Point Parkway, Austin, TX 78730 - 5039, Version 4.0, 1998
- [Nöt97] Nöther, G.; Institut für Technische Physik, Forschungszentrum Karlsruhe, Private Mitteilung, 1997
- [Sch71] Schmidt, F.; Thermische Isolation, Beitrag zum VDI-Lehrgang Kryotechnik, 1971
- [Sch97] Schneider, Th.; Inst. f. Technische Physik, Forschungszentrum Karlsruhe, Private Mitteilung, 1997
- [Ste91] Stefan, P.M., Solomon, L., Krinsky, S., Rakowsky, G.; NSLS Prototype Small-Gap Undulator (PSGU), IEEE, 1991, S. 1096 - 1098
- [Ste98] Stefan, P.M.; In-Vacuum Undulator Commissioned in the NSLS X-ray Ring, SRN Vol. 11, No. 1, 1998
- [Sto95] Stoner, R., Bekefi, G.; A 70-Period High-Precision Microwiggler for Free Electron Lasers, IEEE J. of Quantum Electron., 31, 6, (1995)
- [Tat87] Tatchyn, R., Csonka, P.L.; Attainment of submillimeter periods and a 0.3-T peak field in a novel micropole undulator device, Appl. Phys. Lett. 50 (7), 16 February 1987 S. 377 - 379
-

- [Thö96] Thöner, M.; Vakuumschmelze Hanau, Private Informationen, 1996
- [Tos89] The TOSCA Reference Manual, Vector Fields Limited, 24 Bankside, Kidlington, Oxford, UK
- [Vac90] Prospekt der Vakuumschmelze Hanau, D-6450 Hanau 1, Deutschland, Edition 09/90
- [War90] Warren, R.W., Feldman, D.W., Preston, D.; High-field pulsed microwigglers, Nucl. Instr. Meth., A 296 (1990) S. 558
- [Wil92] Wille, K.; Physik der Teilchenbeschleuniger und Synchrotronstrahlungsquellen, Teubner Verlag, Stuttgart, 1992
- [Win94] Winick, H. (Editor); Synchrotron Radiation Sources: a primer, World Scientific Publishing, 1994
-

8 Anhang

8.1 Teilchenbeschleuniger

In einem Beschleuniger werden geladene Teilchen durch elektromagnetische Felder beschleunigt und durch Magnetfelder senkrecht zur Bewegungsrichtung abgelenkt und fokussiert. Im folgenden wird die Wirkungsweise der zwei Beschleunigerarten, die für diese Arbeit wichtig sind, näher erläutert.

Mikrotron

Ein Mikrotron besteht prinzipiell aus den in Abb. 8.1 dargestellten Komponenten.

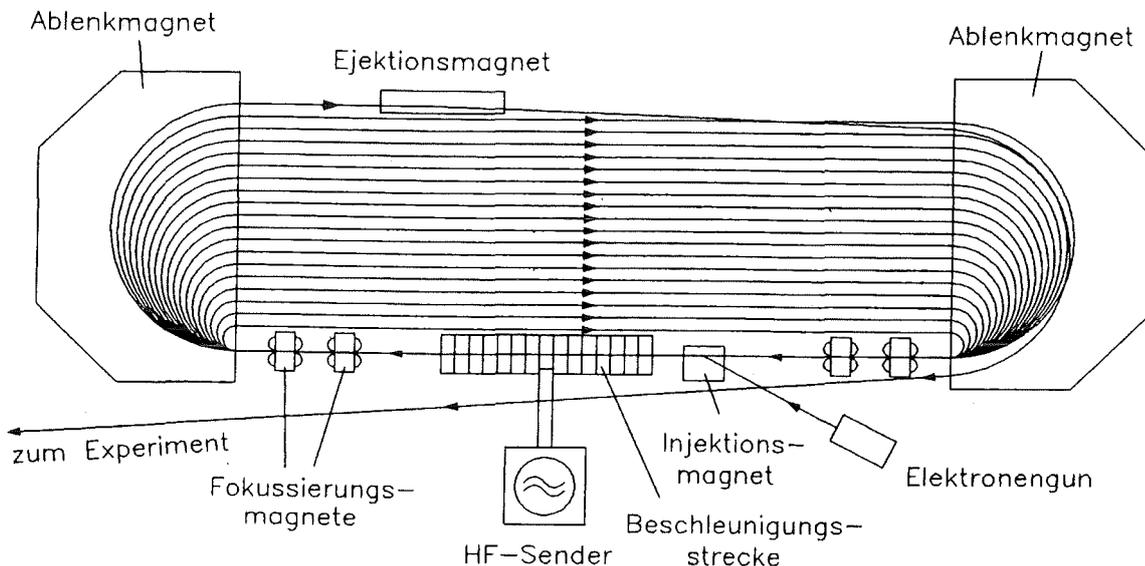


Abb. 8.1: Prinzip eines Racetrack-Mikrotrons [Wil92].

Die Elektronen werden im Elektronengun erzeugt, durchlaufen die Beschleunigungsstrecke und gelangen nach zwei 180° Ablenkungen wieder in die Beschleunigungsstrecke. Der Ablenkradius der Elektronen nimmt mit zunehmender Energie immer mehr zu. Dieser Umlenk- und Beschleunigungsvorgang wiederholt sich so lange, bis die Elektronen die vorgesehene Endenergie erreicht haben und mit Hilfe des Ejektionsmagneten aus dem Mikrotron gelenkt werden. Von Umlauf zu Umlauf erhöht sich die Umlaufzeit um ein ganzzahliges Vielfaches der Hochfrequenzperiode wodurch eine Synchronisation der Elektronen erreicht wird.

Das Mainzer Mikrotron MAMI besteht aus drei hintereinander angeordneten Mikrotrons und erreicht damit eine Elektronenenergie von 855 MeV (Abb. 8.2). Der aus dem dritten

Mikrotron (RTM3) kommende Strahl wird über Transferlinien zu den Experimentierhallen (im vorliegenden Fall die der X1-Kollaboration) geleitet, durchläuft die jeweilige Strahlführung und wird anschließend in einem beam dump vernichtet.

Die X1-Experimentierhallen sind in Abb. 5.7 dargestellt.

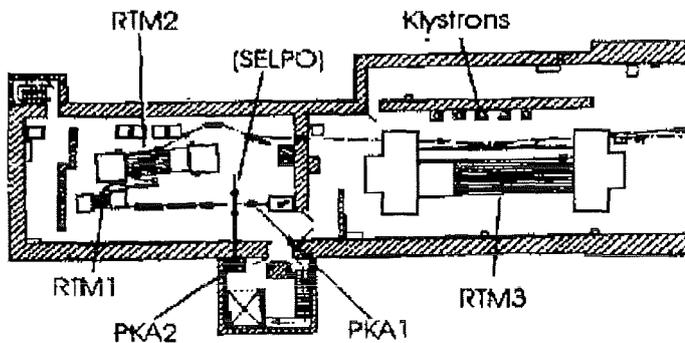


Abb. 8.2: Lageplan des Mainzer Mikrotrons MAMI [Jah97].

Speicherring

Der Aufbau eines Speicherrings soll im folgenden am Beispiel der auf dem Gelände des Forschungszentrums Karlsruhe im Bau befindlichen Synchrotronstrahlungsquelle ANKA erläutert werden. Wie in Abb. 8.3 zu erkennen, besteht ein Speicherring ebenfalls aus hintereinander angeordneten Beschleunigern. Bei ANKA werden die Elektronen in einer Elektronenkanone erzeugt (70 keV), in einem Mikrotron auf eine Energie von 53 MeV gebracht, in einem Booster-Synchrotron auf 500 MeV und anschließend im Speicherring auf nominal 2,5 GeV hochbeschleunigt. Weitere Informationen zum Beschleuniger finden sich z.B. in [But98].

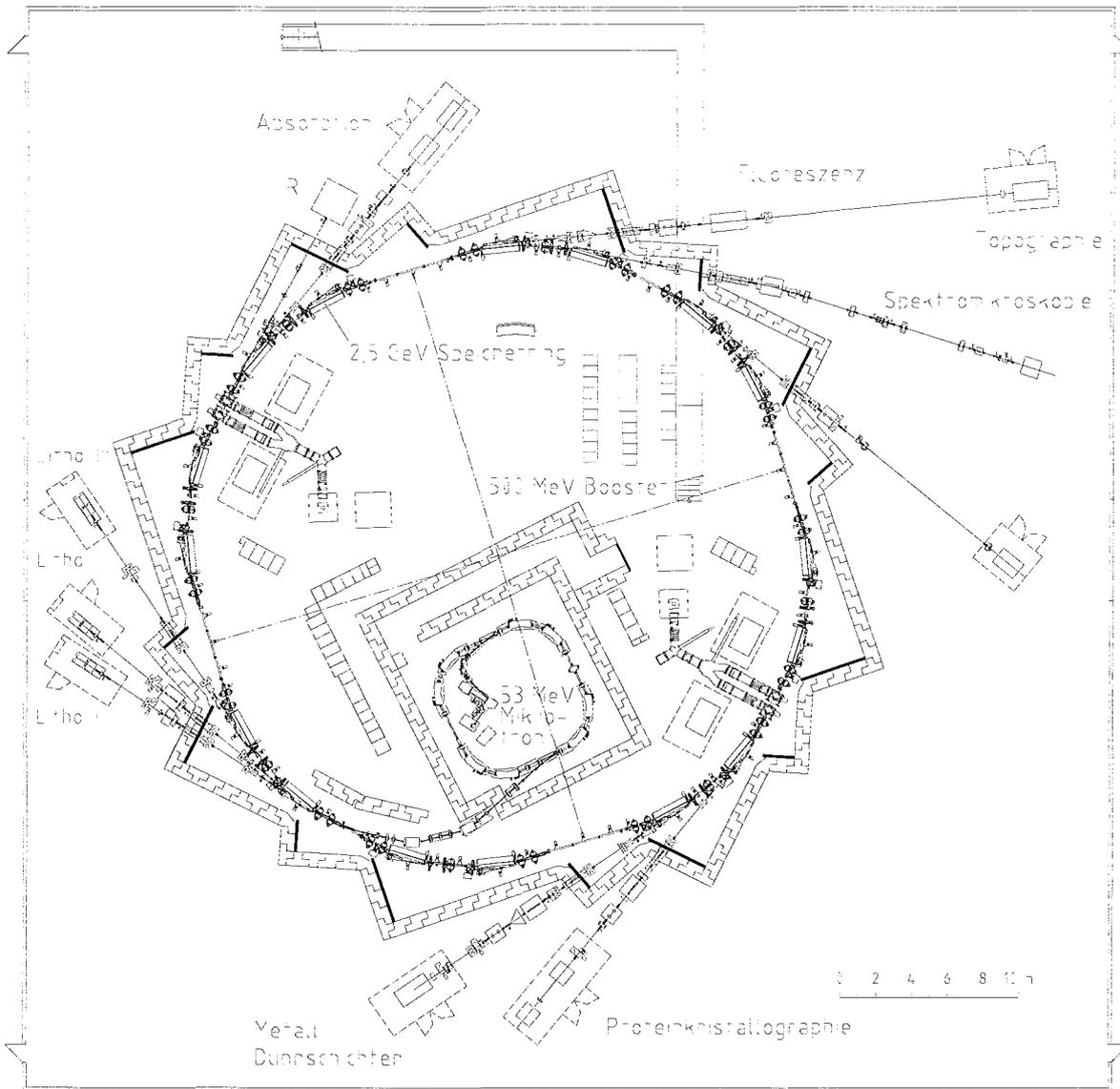


Abb. 8.3: ANKA-Gebäude mit Beschleuniger, Beamlines und Experimentierstationen [Mos98].

Die Hauptkomponenten eines Speicherrings sind:

- **Ablenkmagnete:** Sie haben ein konstantes Magnetfeld. Bei ANKA gibt es 16 Ablenkmagnete mit 1,5 T Magnetfeldstärke, die die Elektronen jeweils um $22,5^\circ$ ablenken.
- **Quadrupolmagnete:** Werden zur Fokussierung des Elektronenstrahls eingesetzt. Das Magnetfeld nimmt vom Zentrum aus linear zu.
- **Sextupolmagnete:** Sie werden benötigt, um für Teilchen verschiedener Energie gleiche Fokussierung zu erhalten. Das Magnetfeld nimmt vom Zentrum aus quadratisch zu.

- **Hohlraumresonatoren (Cavities):** Sie kompensieren die Energieverluste durch Strahlungsemission. Die 4 bei 500 MHz arbeitenden Cavities werden von 2 Klystrons versorgt.

Die über einen Zeitraum von vielen Stunden gespeicherten Elektronen erzeugen in den Ablenkmagneten Synchrotronstrahlung (vgl. Kap. 2.1).

Weitere Informationen zu diesem Thema und zur Anwendung von Synchrotronstrahlung finden sich in [Koc83] und [Win94].

8.2 Berechnung der Sicherheitselemente

In diesem Kapitel wird die Berechnung der erforderlichen Mindestquerschnitte der Sicherheitselemente erläutert. Die beiden Versagensarten wurden bereits in Kap. 4.3.2 vorgestellt.

Die zugrunde gelegten Betriebs- und Randbedingungen sind:

- Temperatur 4,2 K
- Maximale Druckdifferenz 2,2 bar
- Material des Behälters 1.4571
- Schweißbedingungen: V-Nähte, Tieftemperatur-Zusatzwerkstoff.

Da Edelstahl bei tiefen Temperaturen spröde wird, dürfen die unterschiedlichen Legierungen nur zu einem Teil ihrer Festigkeitskennwerte bei Raumtemperatur verwendet werden. Der Edelstahl 1.4571 wurde gewählt, weil dieses Material bei 4,2 K noch bis zu 75% seiner Festigkeitskennwerte bei Raumtemperatur verwendet werden darf. Bei den meisten anderen Materialien liegt dieser Wert bei 25%.

Eine bei der Auslegung der Sicherheitselemente wichtige Größe ist der zu erwartende, kritische Massenstrom.

Die Berechnung des kritischen Massenstroms ist in Tab. 8.1 dargestellt.

Tab. 8.1: Berechnung des kritischen Massenstroms für die beiden Versagensarten nach Druckbehältern unterschieden.

Bauteil	Versagensart 1		Versagensart 2	
	Heliumbehälter	Kryopanel	Heliumbehälter	Kryopanel
Benetzte Oberfläche [cm ²]	10 ⁴	10 ⁴	3,18*10 ⁴	9*10 ³
Wärmestrom pro Flächeneinheit [W/cm ²]	10	10	0,5	1
Wärme gesamt [kJ/s]	100	100	15,87	9
Verdampfungswärme Kryogen [kJ/kg]	20,9	199,1	20,9	199,1
Massenstrom [kg/h]	17226	1200	2735,8	162,7

Aus Tab. 8.1 geht hervor, daß bei der Auslegung des Sicherheitsventils der Vakuumkammer (Versagensart 1) lediglich der auftretende kritische Massenstrom bei Versagen des Heliumbehälters in Betracht gezogen werden muß. Bei Versagensart 2 müssen beide Behälter untersucht werden.

Auslegung des Sicherheitsventils der Vakuumkammer

Wie in Abb. 4.20 zu sehen, wird die Vakuumkammer mittels eines lose aufliegenden Blindflanschs der Nennweite 200 mm abgesichert. Herrscht im Innenraum der Kammer Umgebungsdruck wird der Flansch nur durch sein Eigengewicht auf den Viton-Dichtring gepreßt. Bereits bei kleinen Überdrücken im Innenraum wird er angehoben und läßt das Gas entweichen. Der Blindflansch wird aus Sicherheitsgründen mit drei Gewindestangen geführt. Die freie Weglänge wurde so groß gewählt, daß ein ausreichender freier Querschnitt vorhanden ist. Bedingt durch seinen Aufbau ist dieses Sicherheitsventil uneingeschränkt kryotauglich.

Ergebnis der in Tab. 8.2 dargestellten Berechnung des kleinsten erlaubten Durchmessers ist, daß der verwendete Blindflansch (Innendurchmesser 210 mm) ausreichend dimensioniert ist.

Tab. 8.2: Berechnung des kleinstmöglichen Durchmessers des Sicherheitsventils für die Vakuumkammer gemäß den AD-Merkblättern [ADM97].

Bauteil	Heliumbehälter	Kryopanel
Zahlenwertgleichung für den Mindestquerschnitt	$A_0 = 0,1791 \cdot \frac{q_m}{\alpha \cdot \psi \cdot p} \cdot \sqrt{\frac{T \cdot Z}{M}}$ mit q_m = abzuführender Massenstrom [kg/h] α = Ausflußziffer [-] p = absoluter Druck [bar] T = absolute Temperatur [K] Z = Realgasfaktor [-] M = molare Masse [kg/kmol] ψ = Ausflußfunktion [-]	
Zahlenwerte	$q_m = 17226$ kg/h $\alpha = 0,73$ $p = 1,5$ bar $T = 4,2$ K $Z = 1$ $M = 4$ $\psi = 0,4777$	$q_m = 1800$ kg/h $\alpha = 0,73$ $p = 1,5$ bar $T = 77$ K $Z = 1$ $M = 28$ $\psi = 0,4632$
Engster Querschnitt	6043,78 mm ²	1054,03 mm ²
Kleinster Durchmesser	87,72 mm	36,63 mm

Auslegung des Sicherheitsventils der Kryopanel

Die Strahlungsschilde und der über ihnen angeordnete Vorratsbehälter müssen gegen den Versagensfall 2 abgesichert werden. Hierfür wurde das in Abb. 4.20 dargestellte Sicherheitsventil (Modell MG 84 der Firma Messer-Griesheim) verwendet. Es wird auf einen der Kleinflansche mit Nennweite 16 mm angebracht. Aus den Unterlagen der Herstellerfirma geht hervor, daß es zur Absicherung von flüssigem Stickstoff geeignet ist. Die Berechnung des kleinsten, erforderlichen Querschnitts ist in Tab. 8.3 dargestellt.

Tab. 8.3: Berechnung des engsten Querschnitts der Sicherheitsventile für die Kryopanel.

	Berechnung
Zahlenwertgleichung	s. Tab. 8.2
Zahlenwerte	$q_m = 162,7 \text{ kg/h}$ $\alpha = 0,7$ $p = 1,5 \text{ bar}$ $T = 77 \text{ K}$ $Z = 1$ $M = 28$ $\psi = 0,4632$
Engster Querschnitt	99,4 mm ²
Kleinster Durchmesser	11,25 mm ²

Gemäß Tab. 8.3 ist ein Durchmesser der verwendeten Sicherheitsventile von 16 mm für den vorliegenden Fall ausreichend ist.

Auslegung des Sicherheitsventils und der Berstscheibe des Heliumbehälters

Für den Heliumbehälter wurde ein bauartbedingter maximaler Betriebsdruck von 2,2 bar (absolut) festgelegt (vgl. Kap. 4.3.2). Dieser Grenzwert wird durch den Einsatz einer Berstscheibe garantiert. Da bei einem Druckanstieg zunächst das reversible Sicherheitsventil ansprechen soll, muß dies so ausgelegt sein, daß das Gas auf jeden Fall entweichen läßt bevor die Berstscheibe zerstört wird. Im vorliegenden Fall wurde es auf einen Betriebsdruck von 1,8 bar (absolut) ausgelegt. Die Berechnung des engsten Querschnitts der Sicherheitseinrichtungen ist in Tab. 8.4 dargestellt.

Die Berstscheibe wurde von der Firma Rembe geliefert. Sie ist bauartbedingt kryotauglich. Das Sicherheitsventil der Firma Leser wurde aus kaltzähem Stahl gefertigt. Vor Auslieferung der beiden Sicherheitselemente fand eine Funktionsprüfung durch die entsprechende TÜV-Gruppe statt. Für den Fall der Berstscheibe bedeutet dies, daß eine zusätzliche Scheibe gefertigt wurde, die der Sachverständige anschließend auf ihre Funktion hin überprüfte.

Tab. 8.4: Berechnung des engsten Querschnitts des Sicherheitsventils und der Berstscheibe.

Bauteil	Sicherheitsventil	Berstscheibe
Zahlenwertgleichung	s. Tab. 8.2	
Zahlenwerte	$q_m = 2735,8 \text{ kg/h}$ $\alpha = 0,7$ $p = 1,8 \text{ bar}$ $T = 4,2 \text{ K}$ $Z = 1$ $M = 4$ $\psi = 0,5056$	$q_m = 2735,8 \text{ kg/h}$ $\alpha = 0,73$ $p = 2,2 \text{ bar}$ $T = 4,2 \text{ K}$ $Z = 1$ $M = 4$ $\psi = 0,5097$
Engster Querschnitt	788,13 mm ²	613,36 mm ²
Kleinster Durchmesser	31,68 mm	27,95 mm
Durchmesser vorhanden	46 mm	50 mm