

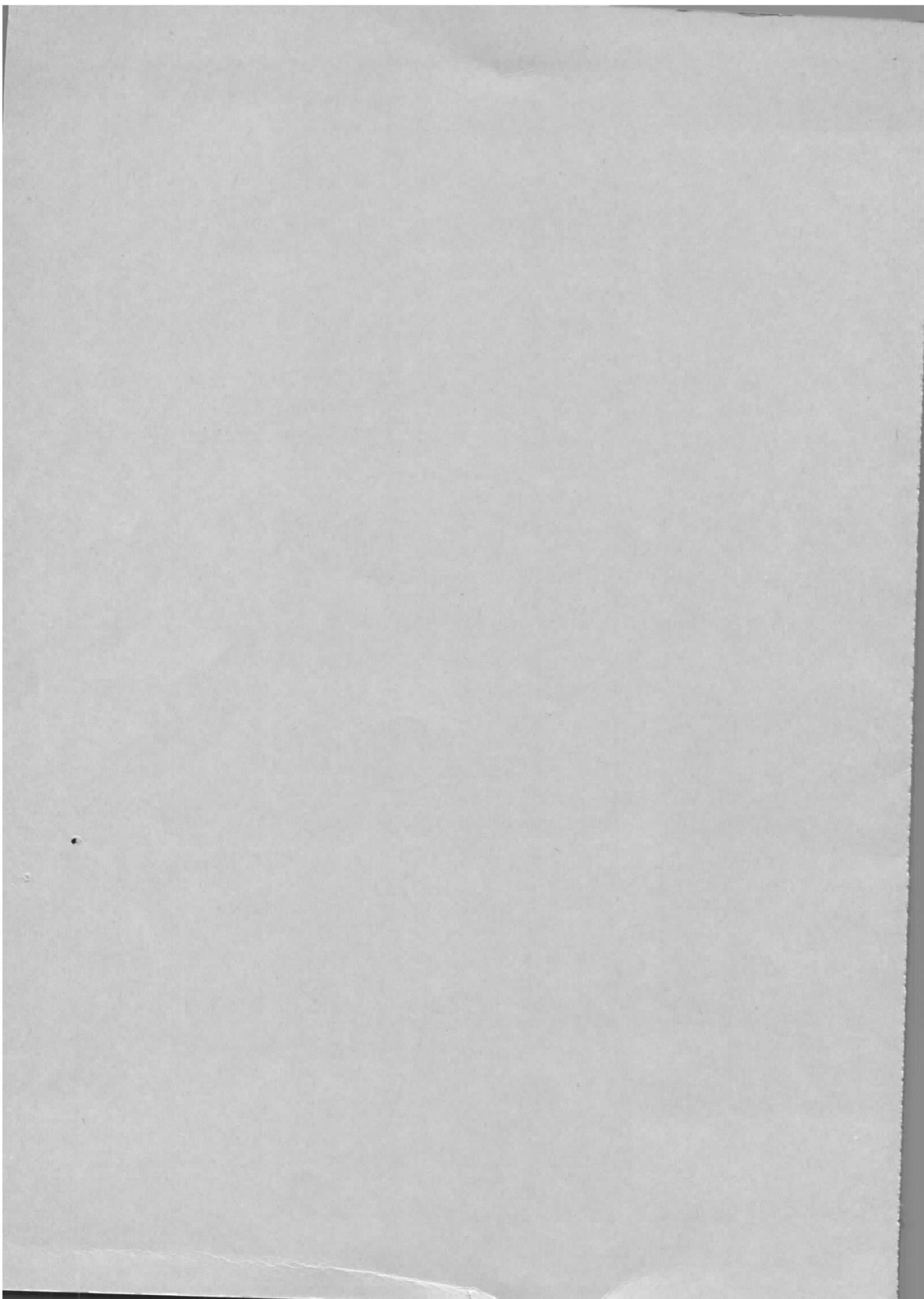
Interner Bericht
DESY H4-70/1
Juli 1970

DESY-Bibliothek
6. AUG. 1970

Synchrotronstrahlungsabsorber
des DESY-Speicherringes

von

J. Kouptsidis



DESY - H4/1
J.Kouptsidis

Hamburg, den 15.Juli 1970

Synchrotronstrahlungsabsorber

des DESY-Speicherringes

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Zusammenfassung	1
1. Einleitung	2
2. Anordnung und Belastung der vorgesehenen Strahlungsabsorber	
2.1. Synchrotronstrahlung	3
2.2. Anordnung der Absorber im Speicherring	4
2.3. Maximale Belastung des Hauptabsorbers	5
3. Zulässigkeit der Berechnung des Strahlungsabsorbers mit Hilfe der Fourier'schen Wärmeleitungstheorie	
3.1. Anwendungsgrenze der Fourier'schen Wärmeleitungstheorie	6
3.2. Impulsbelastung des Absorbers: Zur Frage der Besetzungszahl	10
4. Technischer Entwurf des Strahlungsabsorbers	
4.1. Wahl des Absorbermaterials	11
4.2. Form des Strahlungsabsorbers und thermische Berechnung der Wasserkühlung	14
4.3. Thermische Berechnung des Strahlungsabsorbers	17
4.4. Druckverluste im Kühlsystem des Strahlungsabsorbers	19
Abbildungen	
Literaturverzeichnis	21

Zusammenfassung

Der größte Teil der für den DESY-Speicherring geplanten Hochfrequenzleistung von 1,1 MW wird als Synchrotronstrahlung von den gespeicherten Elektronen oder Positronen abgestrahlt und trifft die Wand der Vakuumkammer. Diese hohe Leistung muß mit Hilfe von speziellen Strahlungsabsorbern aus dem Speicherring abgeführt werden.

Die vorgesehenen Absorber werden mit max. 23 kW bei einer spezifischen Oberflächenbelastung bis zu 30 kW/cm^2 belastet. Es wird gezeigt, daß diese hohen Leistungsdichten mit einem wassergekühlten Absorber aus Kupfer abgeführt werden können.

Die technischen Daten des berechneten Absorbers sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt:

Strahlungsabsorber:

Material:	OFHC-Kupfer
Gewicht:	etwa 20 kp
Max. Belastung:	25 kW
Max. spez. Oberflächenbelastung	30 kW/cm^2
Max. Oberflächentemperatur des Kupfers:	500°C

Kühlkreis eines Strahlungsabsorbers:

Wasser-Eintrittstemperatur:	$< 30^\circ\text{C}$
Wasser-Austrittstemperatur:	$< 70^\circ\text{C}$
Wassergeschwindigkeit:	1,2-2,0 m/s
Wasserverbrauch:	$0,5-0,85 \text{ m}^3/\text{h}$
Druckabfall:	0,13-0,36 at
Max. spez. Oberflächenbelastung der Kühlkanäle des Absorbers:	35 W/cm^2

1. Einleitung

Die im Speicherring gespeicherten Elektronen und Positronen durchlaufen 26,6 % ihrer geschlossenen Bahn im Magnetfeld der Ablenkmagnete. Auf diesem Teil ihrer Bahn verlieren sie ständig Energie durch "Synchrotronstrahlung". Diese elektromagnetische Strahlung hat ein kontinuierliches Spektrum bis hin zum Röntgenbereich und wird wegen der relativistischen Teilchengeschwindigkeit nur in die Flugrichtung der gespeicherten Teilchen innerhalb eines Kegels mit sehr kleinem Raumwinkel (für den geplanten DESY-Speicherring bis etwa 0,3 mrad) abgestrahlt.

Durch die emittierte Strahlung aller umlaufenden Elektronen oder Positronen würde die Vakuumkammer des Speicherringes in der Bahnebene mit einer sehr hohen Strahlungsdichte bis zu 30 kW/cm^2 belastet werden, die zur Zerstörung der Kammer führen würde!

Für die Absorption der Strahlung ist deshalb ein Absorber vorzusehen, mit dem die auftretende Synchrotronstrahlungsleistung noch sicher abgeführt werden kann; über die Dimensionierung dieses Absorbers wird in der vorliegenden Arbeit berichtet.

Der Strahlungsabsorber soll aus technischen Gründen möglichst mit einem normalen Kühlwasserkreis bei einer maximalen Wasseraustrittstemperatur von 70°C gekühlt werden. Der Absorber ist von der Konstruktion und vom Material her so auszulegen, daß die durch die Synchrotronstrahlung hervorgerufene zusätzliche Gasdesorption, die die Hauptgasquelle im Vakuumsystem des Speicherringes darstellt, nicht zu einem unzulässigen Druckanstieg im Strahlbereich führt. 1),2),3),4)

2. Anordnung und Belastung der vorgesehenen Strahlungsabsorber

2.1 Synchrotronstrahlung

Einen Überblick über die Theorie und die Eigenschaften der Synchrotronstrahlung mit numerischen Angaben zur Strahlung des DESY-Synchrotrons findet man bei R. Haensel und C. Kunz ⁵⁾. Vor kurzem wurden auch von A. Piwinski ⁶⁾ die im geplanten DESY-Speicherring auftretenden Leistungsdichten der Synchrotronstrahlung berechnet.

Die Synchrotronstrahlung belastet wegen der starken Bündelung die vorgesehenen Strahlungsabsorber in Form eines sehr schmalen Lichtstriches mit großer Intensität. Zur thermischen Berechnung des Strahlungsabsorbers muß die Leistungsdichte und die Breite der Fläche auf dem Absorber, die von der Synchrotronstrahlung betroffen wird, bekannt sein. Ferner ist die Kenntnis der Photonenenergieverteilung der Synchrotronstrahlung sehr wichtig, um die Eindringtiefe im Absorber in Abhängigkeit vom gewählten Material berechnen zu können.

Am stärksten belastet die Synchrotronstrahlung den Strahlungsabsorber bei 3 GeV Elektronenenergie, da sich die Synchrotronstrahlung mit wachsender Elektronenenergie stärker bündelt; daher werden nur die Werte der Synchrotronstrahlung bei 3 GeV zur Dimensionierung des Strahlungsabsorbers berücksichtigt.

Abb. 1 stellt die Winkelverteilung des gesamten Spektrums der Synchrotronstrahlung, die ein Elektron bei 3 GeV im DESY-Speicherring ausstrahlen würde, dar. Die gesamte von jedem Elektron ausgestrahlte Leistung ergibt sich durch Integration der Winkelverteilung und beträgt $9,8 \cdot 10^{-8}$ W/Elektron bei 3 GeV Elektronenenergie. Bei einer Teilchenzahl von $5,6 \cdot 10^{12}$ pro Ring - mit

je 0,9 A Strahlstrom - würde die Leistung der Synchrotronstrahlung 550 kW betragen.

In Abb. 2 ist die Energieverteilung der ausgestrahlten Photonen bei 3 GeV Elektronenenergie dargestellt.

Einfachheitshalber kann man die Winkelverteilung zur Berechnung der maximalen Belastung des Strahlungsabsorbers durch die Rechteckverteilung ABCD (Abb.1) ersetzen; die Höhe des Rechtecks wurde gleich dem Intensitätsmaximum der Synchrotronstrahlung und die Fläche gleich der Leistung der Synchrotronstrahlung angesetzt.

Damit wird sehr pessimistisch angenommen, daß die Synchrotronstrahlung innerhalb eines Winkels von $\pm 0,135$ mrad gleichmäßig ausgestrahlt wird. Dadurch ergibt sich natürlich eine größere Absorberbelastung, die aber die Sicherheit der Absorberberechnung erhöht.

2.2 Anordnung der Absorber im Speicherring

Die in jedem Ablenkmagneten ausgestrahlte Synchrotronstrahlung wird von einem Hauptabsorber, der am Ende der zugehörigen Magnetvakuumkammer liegt *, aufgefangen. Da der Strahlungsabsorber nur bis auf einen Abstand von 30 - 60 mm an den Teilchenstrahl herangefahren werden darf, wird ein Teil der im Ablenkmagneten entstehenden Synchrotronstrahlung (20 - 30 %) nicht vom entsprechenden Hauptabsorber aufgefangen und muß in den auf die Magnetkammer

* Die Aufstellung der Hauptabsorber wurde nach vakuumtechnischen Überlegungen entschieden ¹⁾.

folgenden Teil der Vakuumstruktur absorbiert werden. Deshalb sind in der jeweils in Strahlrichtung folgenden Magnet- oder Quadrupolkammer Hilfsabsorber vorgesehen.

Abb. 3 zeigt die Lage der drei Absorber in einer Magnetperiode des Speicherringes. Der Anteil der Synchrotronstrahlung, die nicht vom Hauptabsorber aufgefangen wird, ist in Abb. 4 in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Teilchenstrahl und Absorber dargestellt.

Der Hauptabsorber wird wegen des minimalen Abstandes vom Ursprungsort der Synchrotronstrahlung (etwa 1 m) am stärksten belastet; deshalb wird in diesem Bericht nur über die Dimensionierung des Hauptabsorbers berichtet.

Es wird sicherheitshalber angenommen, daß die gesamte Synchrotronstrahlung vom Hauptabsorber aufgenommen wird. Danach wird jeder der 24 Hauptabsorber jeden Ringes mit einer Leistung von $550/24 = 23$ kW belastet.

2.3 Maximale Belastung des Hauptabsorbers

Die ersten 30 mm des Strahlungsabsorbers werden nach Abb. 4 mit 10 % der Synchrotronstrahlungsleistung jeden Absorbers, d. h. mit max. $0,1 \cdot 23 = 2,3$ kW belastet.

Die Synchrotronstrahlung trifft den Strahlungsabsorber aus einem Abstand, der mindestens die Summe des Abstandes des Absorbers vom Ablenkmagneten (30 cm) plus 20 % der Teilchenbahn in der Ablenk- magnetkammer (63 cm) beträgt; die Synchrotronstrahlung, die an den letzten 20 % der Teilchenbahn entsteht, wird nicht vom Hauptabsorber, sondern von dem nachfolgenden Nebenabsorber aufgenommen.

Aus diesem Abstand und mit einer minimalen Divergenz von 0,27 mrad belastet die Synchrotronstrahlung dem Hauptabsorber in Form eines Striches mit Breite von $93 \cdot 0,27 \cdot 10^{-3} = 2,5 \cdot 10^{-2}$ cm. Daraus ergibt sich eine max. spezifische Belastung des Strahlungsabsorbers von $2,3/2,5 \cdot 10^{-2} \cdot 3 = 31$ kW/cm².

Bei dieser Abschätzung wurde die natürliche Breite des Teilchenstrahles noch vernachlässigt. Man kann aber mit Sicherheit annehmen, daß die Breite des Teilchenstrahles mindestens 0,1 mm sein wird und damit die Belastung des Strahlungsabsorbers auf 24 kW/cm² absinkt.

Sicherheitshalber wird aber die thermische Berechnung des Strahlungsabsorbers aufgrund der maximalen theoretischen spezifischen Belastung von 31 kW/cm² durchgeführt. Ferner wird angenommen, daß diese Leistungsdichte den Absorber in Form einer geraden Linie mit der Breite von 0,25 mm belastet.

3. Zulässigkeit der Berechnung des Strahlungsabsorbers mit Hilfe der Fourier'schen Wärmeleitungstheorie

3.1 Anwendungsgrenze der Fourier'schen Wärmeleitungstheorie

Die Berechnung des Wärmetransportes bzw. des thermischen Widerstandes des Strahlungsabsorbers wird mit Hilfe der bekannten mathematischen Theorie der Wärmeleitung (Fourier) ⁷⁾ durchgeführt; es wird dabei angenommen, daß die Synchrotronstrahlung nur die Oberfläche des Strahlungsabsorbers belastet und sich von dort her durch Wärmeleitung im Inneren des Absorbers verbreitet.

Eine detaillierte Betrachtung der Wechselwirkung der Synchrotronstrahlung mit dem Festkörper, z. B. unter Berücksichtigung der Absorptionstiefe der Photonen im Absorber, wird nicht vorgenommen werden.

Die mathematische Theorie der Wärmeleitung beruht auf zwei Postulaten, die für die wärmetechnischen Probleme im gewöhnlichen Energie- und Dimensionenbereich stets erfüllt sind: Es wird angenommen, daß die Materie ein Kontinuum darstellt und der Wärmefluß in einer mathematischen Ebene im Festkörper nur von dem Temperaturgradienten dT/dx bestimmt wird.

Die erste Annahme wird immer nur für Bereiche von wenigstens einigen atomaren Schichten erfüllt sein; die zweite Annahme begrenzt wiederum den Anwendungsbereich auf Dimensionen, die groß gegenüber der mittleren freien Weglänge der Wärmeträger (Elektronen) im Metall sind. Wenn z. B. die Energiedeposition im Material hauptsächlich innerhalb der ersten freien Weglängen der Elektronen zustande käme, dann wäre mit Sicherheit die Anwendung der Fourier'schen Wärmeleitungstheorie zur Berechnung des thermischen Widerstandes nicht erlaubt.

Solche Ungültigkeiten der Fourier'schen Wärmeleitungstheorie sind schon seit langem im Fall des Wärmetransportes in Gasen bei tieferen Drücken, bei denen die mittlere freie Weglänge in der Größenordnung der Systemdimensionen liegt, bekannt; es wurde nämlich gemessen, daß innerhalb der ersten mittleren freien Weglänge scharfe Temperaturgradienten vorhanden sind ⁸⁾: Der Wärmetransport wird in diesen Fällen hauptsächlich mit Hilfe gaskinetischer Überlegungen berechnet und als Wärmeübergangszahl an die mathematische Wärmeleitungstheorie angepaßt. In den letzten Jahren wurden vergleichbare Anomalien der Wärmeleitung auch an Festkörpern bei Belastung mit Leistungslasern

oder anderen optischen Leistungsquellen beobachtet ⁹⁾. Diese Anomalien, die zu sehr hohen Oberflächentemperaturen führen, können durch die geringe Absorptionstiefe* der Photonen im optischen Bereich, die vergleichbar der mittleren freien Weglänge der Elektronen im Metall (etwa 420 Å für Cu) sind, erklärt werden ^{10),11)}. Schon bei einer Belastung mit 40W/cm² bei einer Absorptionstiefe von 400 Å beträgt die erzeugte Volumenleistung 10⁵ kW/cm³ und liegt damit 5 Größenordnungen über den Werten, die bei "normalen" Wärmeleitungsproblemen entstehen.

Daher ist auch bei der Berechnung des Strahlungsabsorbers zu prüfen, ob die Energiedeposition bei den vorliegenden Energien der Photonen der Synchrotronstrahlung in einem Bereich erfolgt, dessen Tiefe groß gegenüber der freien Weglänge der Elektronen ist.

Die Absorption monoenergetischer Photonen in einem Absorber läßt sich nach den Gleichungen

$$dI(\epsilon, x) = - I(\epsilon, x) \mu(\epsilon) dx \quad (3.1.1),$$

$$I(\epsilon, x) = I(\epsilon, 0) e^{-\mu(\epsilon)x} \quad (3.1.2)$$

berechnen. $I(\epsilon, x)$ ist die Photonenintensität in der Tiefe x von der Absorberoberfläche, $dI(\epsilon, x)$ die in der Schicht mit der Dicke dx absorbierte Energie und $\mu(\epsilon)$ der lineare Absorptionskoeffizient der Photonen mit der Energie ϵ . Die Abhängigkeit des linearen Absorptionskoeffizienten in einem Kupferabsorber von der Photonenenergie ϵ ist in Abb. 5 nach verschiedenen

* Die Absorptionstiefe ist die Tiefe im Targetmaterial, bei der die Photonenintensität auf den 1/e-Wert der Intensität an der Oberfläche abgefallen ist.

Literaturwerten ^{12),13),14),15)} dargestellt: Durch Integration der Gleichung (3.1.2) im gesamten Spektrumbereich der Synchrotronstrahlung läßt sich der Verlauf der Absorption der Synchrotronstrahlung in einem Kupferabsorber berechnen.

In Abb.7 ist der Abfall der Intensität der Synchrotronstrahlung des Speicherringes bei 3 GeV Elektronenenergie in einem Kupferabsorber dargestellt; ähnliche Ergebnisse gelten auch für andere Metalle. Daraus läßt sich entnehmen, daß die Absorptionstiefe der Synchrotronstrahlung bei 3 GeV-Elektronenenergie etwa 4μ beträgt.

Da die Absorptionstiefe der Photonen der Synchrotronstrahlung viel größer als die mittlere freie Weglänge der Elektronen in Kupfer ist, kann man die Fourier'sche Wärmeleitungstheorie zur Berechnung des Strahlungsabsorbers der Synchrotronstrahlung anwenden.

Experimentell kann diese Annahme z. B. durch die Belastung der Absorberoberfläche mit Elektronen einer Elektronenkanone bei gleicher Leistungsdichte von etwa $30\text{kW}/\text{cm}^2$ geprüft werden. Die Elektronenenergie wird so gewählt, daß die Absorptionstiefe der Elektronen denjenigen der Photonen der Synchrotronstrahlung entspricht. In unserem Fall wäre, wie aus der Abb. 7 ersichtlich ist, eine Elektronenenergie von etwa 40 keV notwendig.

Eine genaue Untersuchung der Belastbarkeit des Strahlungsabsorbers durch Simulation mit Hilfe einer Elektronenkanone wird noch zusätzlich zur Kontrolle der Rechnung durchgeführt. Damit ergibt sich gleichzeitig die Möglichkeit der vakuumtechnischen Prüfung des Strahlungsabsorbers unter simulierten Arbeitsbedingungen.

3.2 Impulsbelastung des Absorbers: Zur Frage der Besetzungszahl

Bisher wurde angenommen, daß die Elektronen oder Positronen als Gleichstrom im Speicherring umlaufen und der Absorber mit dem zeitlichen Mittelwert der Synchrotronstrahlung belastet wird.

Tatsächlich aber laufen die gespeicherten Teilchen gebuncht im Ring und die Synchrotronstrahlung belastet also den Absorber mit einer Pulsleistung, die wesentlich höher als die mittlere Leistung ist.

Die Zahl der möglichen Bunche pro Ring beträgt 480; bei 3 GeV Elektronenenergie wird eventuell nur jeder 16. Bunch besetzt. Damit haben die Bunche einen Abstand von 9,6 m, so daß bei einer Bunchlänge von etwa 3 cm die Synchrotronstrahlung den Strahlungsabsorber mit einer Pulsdauer von 10^{-10} sec. und einer Wiederholungsfrequenz von $1/3,2 \cdot 10^{-8} \text{ sec}^{-1}$ belastet.

Die Leistung der entstehenden Synchrotronstrahlungsimpulse würde demnach um den Faktor $3,2 \cdot 10^{-8}/10^{-10} = 320$ höher als der Mittelwert der Synchrotronstrahlungsverluste liegen; das wiederum würde eine momentane Absorberbelastung im Bereich von $320 \cdot 30 \approx 10.000 \text{ kW/cm}^2$ bedeuten.

Es wird gezeigt, daß trotzdem die Berechnung des Absorbers mit der mittleren Belastung gerechtfertigt ist.

Die Synchrotronstrahlungsimpulse werden wenigstens innerhalb der ersten in 4μ Abstand von der Oberfläche des Absorbers liegenden Atomschichten aufgenommen. Die Masse dieser Schichten liegt z.B. für Kupfer bei etwa $3,6 \cdot 10^{-3}$ gr pro cm^2 der Oberfläche und besitzt eine Wärmekapazität von $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ Wsec/cm}^2\text{grad}$; die momentane Temperaturerhöhung, die durch den Synchrotronstrahlungsimpuls

entsteht, würde daher nur $10^{-10} \cdot 10^7 / 1,4 \cdot 10^{-3} = 0,7^\circ\text{C}$ hoch sein.

Auch ohne Berücksichtigung der Absorptionstiefe der Synchrotronstrahlung und nur unter der Annahme einer Oberflächenbelastung des Strahlungsabsorbers läßt sich einfach zeigen, daß nur die Wärmeleitung ohne wesentliche Temperaturgradienten die Strahlungsimpulse weiterleiten kann.

Nach der Theorie der Wärmeleitung läßt sich die Erhöhung ΔT der Oberflächentemperatur, die durch eine spezifische Oberflächenbelastung Q innerhalb der Zeit t entsteht, mit Hilfe der Gleichung $\Delta T = \frac{2Q}{\lambda} \cdot \sqrt{\frac{kt}{\pi\lambda}}$ berechnen ¹⁷⁾.
(k = Temperaturleitzahl = $\frac{\lambda}{\rho c}$, λ = Wärmeleitfähigkeit, ρ = Dichte, c = spezifische Wärme,)

$$\Delta T = \frac{2 \cdot 10^7}{3,7} \sqrt{\frac{1,14 \cdot 10^{-10}}{3,14}} = 32^\circ\text{C}$$

Aus beiden Abschätzungen geht hervor, daß die zusätzliche Temperaturerhöhung, die durch die Synchrotronstrahlungsimpulse entsteht, sicherlich vernachlässigt werden kann, und daß die Annahme einer konstanten Synchrotronstrahlungsbelastung zur Dimensionierung des Strahlungsabsorbers ausreicht.

4. Technischer Entwurf des Strahlungsabsorbers

4.1 Wahl des Absorbermaterials

Mit der Auswahl des geeigneten Materials, das die hohen Leistungsdichten der Synchrotronstrahlung ohne Veränderung aufnehmen soll, wird die Grundlage für die Konstruktion und Dimensionierung eines

Strahlungsabsorbers geschaffen. Ohne nähere Prüfung würde man nur hochschmelzende Metalle in Betracht ziehen; allerdings sind dabei nicht nur der hohe Schmelzpunkt, sondern auch die Wärmeleitfähigkeit und die vakuumtechnischen Eigenschaften dieser Metalle und nicht zuletzt die Kosten zu beachten.

Die auf der Absorberoberfläche auftretende maximale Temperatur ist nach der Fourier'schen Wärmeleitungstheorie eine lineare Funktion von $1/\lambda$, wobei λ die Wärmeleitfähigkeit des Absorbermaterials ist: $T_{\max} \sim 1/\lambda$. Keinesfalls darf T_{\max} größer als die Schmelztemperatur T_s des Absorbermaterials werden. Ferner muß der Dampfdruck des Absorbermaterials bei T_{\max} aus vakuumtechnischen Gründen kleiner als 10^{-10} Torr sein.

Daher erscheint es sinnvoll, die Zahlen λT_s und λT_o - wobei T_o die Temperatur bei einem Dampfdruck von 10^{-10} Torr ist - bei der Auswahl des Absorbermaterials zu berücksichtigen; je höher diese beiden Zahlen sind, desto größer ist die Belastbarkeit des entsprechenden Materials.

In der Tabelle 1 sind diese Zahlen zusammen mit einigen interessanten physikalischen Eigenschaften der hochschmelzenden Metalle angegeben. Daraus ersieht man, daß Kupfer und Wolfram am besten als Absorbermaterial geeignet sind. Aus technologischen und wirtschaftlichen Gründen wurde Kupfer für die Fertigung des Absorbers gewählt.

Eine günstige allgemeine Eigenschaft aller hochschmelzenden Metalle ist die verhältnismäßig schwache Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit im Bereich $0-500^{\circ}\text{C}$. In der Abb. 8 wurde die Kupfer-Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Temperatur dargestellt ¹⁸⁾; daraus ergibt sich, daß man bis 500°C mit einer Wärmeleitfähigkeit von mindestens $3,7 \text{ W/cm} \cdot \text{grad}$ des Kupfers rechnen kann.

Tabelle 1

Metall	Schmelzpunkt	Wärmeleitfähigkeit	T_o	λT_s	λT_o
	$T_s, ^\circ K$	W/cm·grad	$^\circ K$	W/cm	W/cm
W	3685	1,68	2150	6190	3610
Cu	1356	3,94	900	5340	3550
Mo	2885	1,47	1700	4240	2500
Be	1277	1,60	880	2040	1410
Ta	3270	0,54	2000	1765	1080
Ni	1725	0,92	1080	1585	994
Cr	2150	0,67	1000	1440	670
Ti	1940	0,16	1200	310	192

4.2 Form des Strahlungsabsorbers und thermische Berechnung der Wasserkühlung

Die technische Form des Strahlungsabsorbers hängt wesentlich von der Auslegung des Kühlwasserkreises ab, da die Oberflächenbelastung der Kühlkanäle nicht einen kritischen Wert überschreiten darf. Oberhalb des kritischen Wertes besteht die Gefahr der Blasenbildung und der Entstehung einer isolierenden Dampfschicht, die zur thermischen Instabilität und Zerschmelzung des Strahlungsabsorbers führen kann.

Diejenigen Werte der spezifischen Oberflächenbelastung, bei denen der normale Wärmetransport im Bereich der Blasenbildung bzw. im instabilen Bereich eintritt, sind nicht fest und hängen sehr stark von den Parametern des Systems ab (Flüssigkeitsart, Temperatur, Oberflächenrauigkeit, Oberflächenspannung, Flüssigkeitgeschwindigkeit usw.)¹⁹⁾.

Im allgemeinen liegen für Kühlwasseraustauscher Oberflächenbelastungen bis 35 W/cm^2 unterhalb des Bereiches der Blasenbildung²⁰⁾, und der instabile Bereich tritt erst bei Oberflächenbelastungen von 100 W/cm^2 ein²¹⁾. In der Literatur sind Fälle erwähnt, bei denen sich durch geeignete Turbulenz der kritische instabile Bereich erst bei 800 W/cm^2 entwickelte²²⁾.

Um Erosion im Dauerbetrieb zu vermeiden, wählt man sicherheits halber für Kupfer Kühlwassergeschwindigkeiten, die nicht wesentlich größer als $1,5 \text{ m/sec}$ sind²³⁾. Der Absorber soll deshalb mit einer Kühlwassergeschwindigkeit von $1,2 \text{ m/sec}$ betrieben werden. Es besteht dann die Möglichkeit, bei einer späteren Leistungserhöhung im Speicherring durch Erhöhung der Wassergeschwindigkeit auch noch diese erhöhte Leistung vom Absorber abführen zu können; bei größerer Geschwindigkeit verbessert sich die Kühlung ständig, da die Wärme-Übergangszahl etwa mit der 0,8-Potenz der Wassergeschwindigkeit ansteigt.²⁴⁾

Die Ausgangstemperatur des Kühlwassers soll 70°C nicht überschreiten; für die Eingangstemperatur werden 30°C angenommen. Daraus ergibt sich, daß zur Kühlung des Strahlungsabsorbers bei einer Leistung von 23 kW eine Wassermenge von $23 \cdot 10^3 / 4,19 \cdot (70 - 30) = 140 \text{ cm}^3/\text{sec} = 0,5 \text{ m}^3/\text{h}$ erforderlich ist. Entsprechend bekommt man den notwendigen Querschnitt der Kühlwasserkanäle bei einer Wassergeschwindigkeit von 1,2 m/sec:

$$\text{Querschnitt} = 140/120 = 1,2 \text{ cm}^2$$

Daraus ergibt sich ein sinnvoller Durchmesser der Kühlkanäle von 12 mm. Es ist gedacht, mit Hilfe von in Serie geschalteten Kühlkanälen von 12 mm Durchmesser den Hauptabsorber zu kühlen. Für die Serienschaltung der Kühlkanäle jeden Absorbers sind Überwachungsüberlegungen entscheidend; damit setzt sich die Zahl der notwendigen Druckwächter herab.

Die Übergangszahl der Kühlkanäle läßt sich einfach mit Hilfe der dimensionslosen Gleichung ²⁴⁾ berechnen:

$$\text{Nu} = 0,0243 \cdot (\text{Re})^{0,8} \cdot (\text{Pr})^{0,4}$$

wobei

$$\text{Nu} = \text{Nusselt-Zahl} = \alpha d / \lambda$$

$$\alpha = \text{Übergangszahl}$$

$$d = \text{Kanaldurchmesser} = 1,2 \text{ cm}$$

$$\lambda = \text{thermische Leitfähigkeit von Wasser} = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ W/cm} \cdot \text{grad bei } 50^{\circ}\text{C} \text{ }^{25)}$$

$$\text{Re} = \text{Reynold-Zahl} = u \cdot d / \nu$$

$$u = \text{mittlere Wassergeschwindigkeit} = 120 \text{ cm/sec}$$

$$\nu = \text{kinematische Viskosität von Wasser} = 0,0057 \text{ cm}^2/\text{sec bei } 50^{\circ}\text{C} \text{ }^{25)}$$

$$\text{Pr} = \text{Prandtl-Zahl} = c_p \mu / \lambda = 3,68 \text{ }^{25)}$$

$$\mu = \text{Wasserzähigkeit}$$

$$\text{Re} = 120 \cdot 1,2 / 0,0057 = 25.200 \text{ (turbulente Strömung)}$$

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= 0,0243 \cdot (25200)^{0,8} \cdot (3,68)^{0,4} = 136 \\ \alpha &= \text{Nu} \cdot \lambda/d = 136 \cdot 6,4 \cdot 10^{-3}/1,2 = 0,72 \text{ W/cm}^2 \cdot \text{grad} \end{aligned}$$

Die experimentelle Bestimmung der Übergangszahl bei DESY unter denselben Strömungsbedingungen an einem elektrisch geheizten Edelstahlrohr mit einem Durchmesser von 12 mm ergab Werte zwischen 0,65 und 0,7 W/cm² · grad in guter Übereinstimmung mit dem berechneten Wert von 0,72 W/cm² · grad.

Unter der Annahme einer mittleren Temperatur der Kupferoberfläche von 95°C im Kontakt mit dem Kühlwasser (mittlere Temperatur 50°C), ergibt sich eine spezifische Oberflächenbelastung von $0,72 \cdot (95-50) = 33 \text{ W/cm}^2$. Unter dieser spezifischen Belastung wird mit Sicherheit die Kühlfläche des Absorbers nicht die 100°C-Temperatur erreichen, und damit ist die Gefahr einer thermischen Instabilität völlig ausgeschlossen.

Ein Kanal mit Durchmesser von 12 mm hat eine Austauschfläche von etwa 3,8 cm² pro laufendem cm; für die max. mit 2,3 kW belastete 3 cm-Scheibe am Anfang des Strahlungsabsorbers würden wenigstens $2300/3,8 \cdot 33 = 6$ Kühlkanäle erforderlich sein. Der optimale Querschnitt des Strahlungsabsorbers ergab sich mit Hilfe elektrischer Messungen an Analogmodellen aus Widerstandspapier und ist in Abb.9 dargestellt. Der Vorteil des vorgeschlagenen Querschnittes liegt in der gleichmäßigen radialen Verteilung der aus der Synchrotronstrahlung erzeugten Wärme an den auf eine isotherme Fläche gelegten Kühlkanälen.

Die Größe des Strahlungsabsorbers bzw. der Abstand der Kühlkanäle von dem Treffpunkt der Synchrotronstrahlung ergab sich aus der geometrischen Anordnung der 6 notwendigen Kühlkanäle mit einem Durchmesser von 12 mm. Bei der Dimensionierung der Kühlkanäle wurde angenommen, daß die Oberflächenbelastung gleichmäßig im gesamten Umfang höchstens 35 W/cm² beträgt. Tatsächlich aber stellt der gesamte Umfang eines Kühlkanals keine Fläche gleicher Temperatur

dar, und damit besteht die Gefahr, daß bei der gewählten Anordnung örtlich größere Oberflächenbelastungen auftreten könnten. Man kann allerdings annehmen, daß mindestens die Hälfte der Oberfläche jeden Kanals, die dem Treffpunkt der Synchrotronstrahlung zugewandt ist, gleichmäßig belastet wird; auch in diesem Fall würde die Oberflächenbelastung max. verdoppelt werden, d.h. sich nur auf 70 W/cm^2 erhöhen und damit unterhalb des kritischen Punktes von 100 W/cm^2 liegen. Bei einer solchen Belastung würde zwar der Wärmeaustausch im Bereich der Blasenbildung liegen, jedoch ohne die Gefahr des Auftretens thermischer Instabilitäten.

4.3 Thermische Berechnung des Strahlungsabsorbers

Der gesamte thermische Widerstand des Strahlungsabsorbers läßt sich als Summe der Widerstände der Wasserkühlung und des Wärmetransportes im halbzyklindrischen Kupferblock berechnen.

Zur Berechnung des thermischen Widerstandes des Wärmeüberganges an den Kühlkanälen wird angenommen, daß nur die Hälfte der Kanaloberfläche die thermische Belastung aufnimmt; die sich daraus ergebenden Rechnungsfehler sind nicht erheblich, da der thermische Hauptwiderstand des Systems am Treffpunkt der Synchrotronstrahlung auftritt; sie tragen auch zur Erhöhung der Sicherheit der Dimensionierung bei. Der thermische Widerstand der Wasserkühlung R_w läßt sich mit Hilfe der Formel $R_w = \Delta T_1 / Q = 1 / \alpha F$ (ΔT_1 = Temperaturdifferenz zwischen Metalloberfläche und Wasser, Q = Wärmeleistung, α = Wärmeübergangszahl, F = Oberfläche) berechnen:

$$R_w = \Delta T_1 / Q = 1 / \alpha F = 1 / 0,72 \cdot 6 \cdot 3 \cdot 3,14 \cdot 0,6 = 4,1 \cdot 10^{-2} \text{ grad/W}$$

Dieser Widerstand gilt für einen 3 cm langen Absorberschnitt mit 6 Kühlkanälen. Da die Kühlkanäle auf einer zylindrischen Fläche angeordnet sind und die Synchrotronstrahlung den Strahlungs-

absorber nur auf einem schmalen Strich (0,25 mm) belastet, entsteht im Kupferblock ein $1/r$ - zylindrisches Temperaturfeld, wobei r der Abstand vom Treffpunkt der Synchrotronstrahlung ist; dieser Verlauf ergibt sich aus der linearen Beziehung zwischen r und der im Abstand r liegenden zylindrischen Fläche. In der Nähe des Treffpunktes der Synchrotronstrahlung, wo r sehr klein ist, treten daher die größten Temperaturgradienten und thermischen Widerstände des Strahlungsabsorbers auf.

Zur Berechnung des thermischen Widerstandes eines $1/r$ -Temperaturfeldes wurde die Formel²⁶⁾

$$\frac{\Delta T}{Q} = \frac{1}{\lambda \pi \ell} \cdot \ln \frac{D}{d}$$

unter der Annahme einer zylindrischen Kühlfläche konstanter Temperatur in einem Abstand $r = 35$ mm anstelle der Kühlkanäle angewandt:

- ΔT_2 = Temperaturdifferenz im Kupferblock
- Q = Wärmeleistung
- $\Delta T_2 / Q$ = thermischer Widerstand
- λ = Wärmeleitfähigkeit von Kupfer = 3,7 W/cm·grad
- ℓ = Länge der Absorberscheibe = 3 cm
- D = Durchmesser der Kühlfläche = 7,0 cm
- d = Höhe der Synchrotronstrahlung am Absorber = 0,025 cm

$$\frac{\Delta T_2}{Q} = \frac{1}{3,7 \cdot 3,14 \cdot 3} \cdot \ln \frac{7,0}{0,025} = 1,61 \cdot 10^{-1} \text{ grad/w}$$

Der gesamte thermische Widerstand der Absorberscheibe von 3 cm ist daher $0,161 + 0,041 = 0,2$ grad/W. Daraus ergibt sich, daß der thermische Widerstand des Wärmeüberganges an den Kühlkanälen nur etwa 20% des gesamten Widerstandes des Strahlungsabsorbers ausmacht.

Für den Fall, daß die Synchrotronstrahlung den Absorber mit der doppelten Breite (0,5 mm) bei gleicher Leistung trifft, würde der thermische Widerstand des Kupferblockes 0,14 grad/W und der

gesamte Widerstand 0,18 grad/W betragen. Die so berechneten Werte wurden auch mit Hilfe von elektrischen Analogmodellen bestätigt.

In beiden Fällen würden bei einer 2,3 kW Belastung Temperaturdifferenzen von $2300 \cdot 0,202 = 460^{\circ}\text{C}$ und $2300 \cdot 0,180 = 410^{\circ}\text{C}$ entstehen; bei einer mittleren Wassertemperatur von 50°C würden die Oberflächentemperaturen am Treffpunkt der Synchrotronstrahlung 510°C und 460°C entsprechend hoch sein.

Der Temperaturverlauf im Strahlungsabsorber in Abhängigkeit des Abstandes r von dem Treffpunkt der Synchrotronstrahlung wurde in Abb.10 für die maximale Belastung von 31 kW/cm^2 mit einer Strahlungshöhe am Absorber von $0,025 \text{ cm}$ dargestellt.

Tatsächlich werden aber die auftretenden Temperaturen kleiner sein, da sämtliche Berechnungsannahmen sicherheitshalber pessimistisch waren.

4.4 Druckverluste im Kühlsystem des Strahlungsabsorbers.

Der Druckverlust des Kühlwassers im Absorber läßt sich mit Hilfe der Formel $\Delta P = k \cdot \gamma \cdot u^2 / 2$, wobei $\gamma u^2 / 2g$ ($\gamma = \text{spez. Gewicht}$, $u = \text{Geschwindigkeit der Flüssigkeit}$, $g = \text{Erdbeschleunigung}$) der Staudruck ist, berechnen ²⁷⁾.

Der Proportionalitätsfaktor k hängt von den geometrischen Daten der Anordnung ab und wird als die Summe der Faktoren der auftretenden Verluste dargestellt: $k = k_1 + k_2 + \dots$
Man rechnet nämlich mit $k = 1,3$ für die Eintritts-, Anlauf- und Austrittsverluste einer turbulenten Strömung; ferner werden die 6 vorhandenen 180° -Winkel mit $k_2 = 7,5 \cdot (6 \cdot 1,5)$ berücksichtigt.

Die Verluste der turbulenten Strömung in den $6 \cdot 0,6 = 3,60$ m langen Kühlkanälen lassen sich mit Hilfe der Formel $k_3 = 0,03L/d = 0,03 \cdot 360/1,2 = 9$ berechnen²⁷⁾. Damit erhöht sich der gesamte Proportionalitätsfaktor auf etwa 18 ; $\Delta P = 18 \cdot \gamma u^2/2g$.

Die daraus resultierenden Druckdifferenzen für die verschiedenen Wassergeschwindigkeiten sind in der Tabelle 2 dargestellt; praktisch bleibt der Druckabfall des Kühlwassers am Strahlungsabsorber stets kleiner als 1 at; daher ist es nötig, den Strahlungsabsorber durch geeignete Drosselung an das 6 at-Kühlsystem des Speicherringes anzuschließen. Die Serienschaltung mehrerer Hauptabsorber wäre wegen der vorhandenen Temperaturdifferenz des Kühlwassers von etwa 40°C pro Hauptabsorber nicht zulässig; allerdings darf jeder Hauptabsorber mit seinem Nebenabsorber in Serien geschaltet werden, da letzterer nur eine 5°C-Temperaturerhöhung des Kühlwassers verursacht.

Tabelle 2

<u>Wassergeschwindigkeit</u> m/s	<u>Staudruck</u> at	<u>Druckabfall</u> at
1,2	$7,4 \cdot 10^{-3}$	0,13
1,5	$1,15 \cdot 10^{-2}$	0,21
2,0	$2,0 \cdot 10^{-2}$	0,36

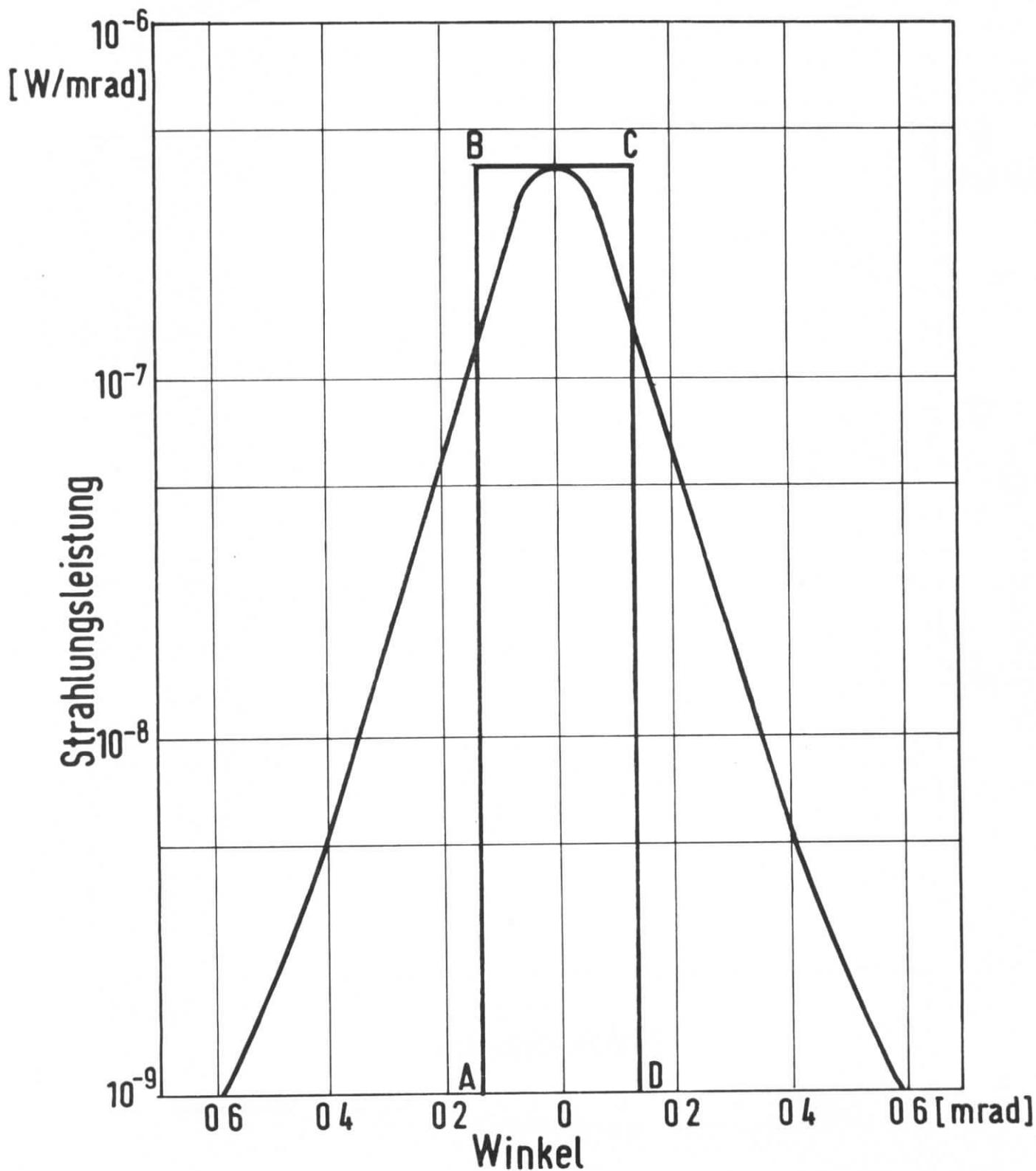


Abb.1: Winkelverteilung der Synchrotronstrahlung eines Elektrons im geplanten DESY-Speicherring bei 3 GeV. Die Rechteckverteilung ABCD wurde als eine konservative Näherung zur Berechnung des Strahlungsabsorbers angenommen.

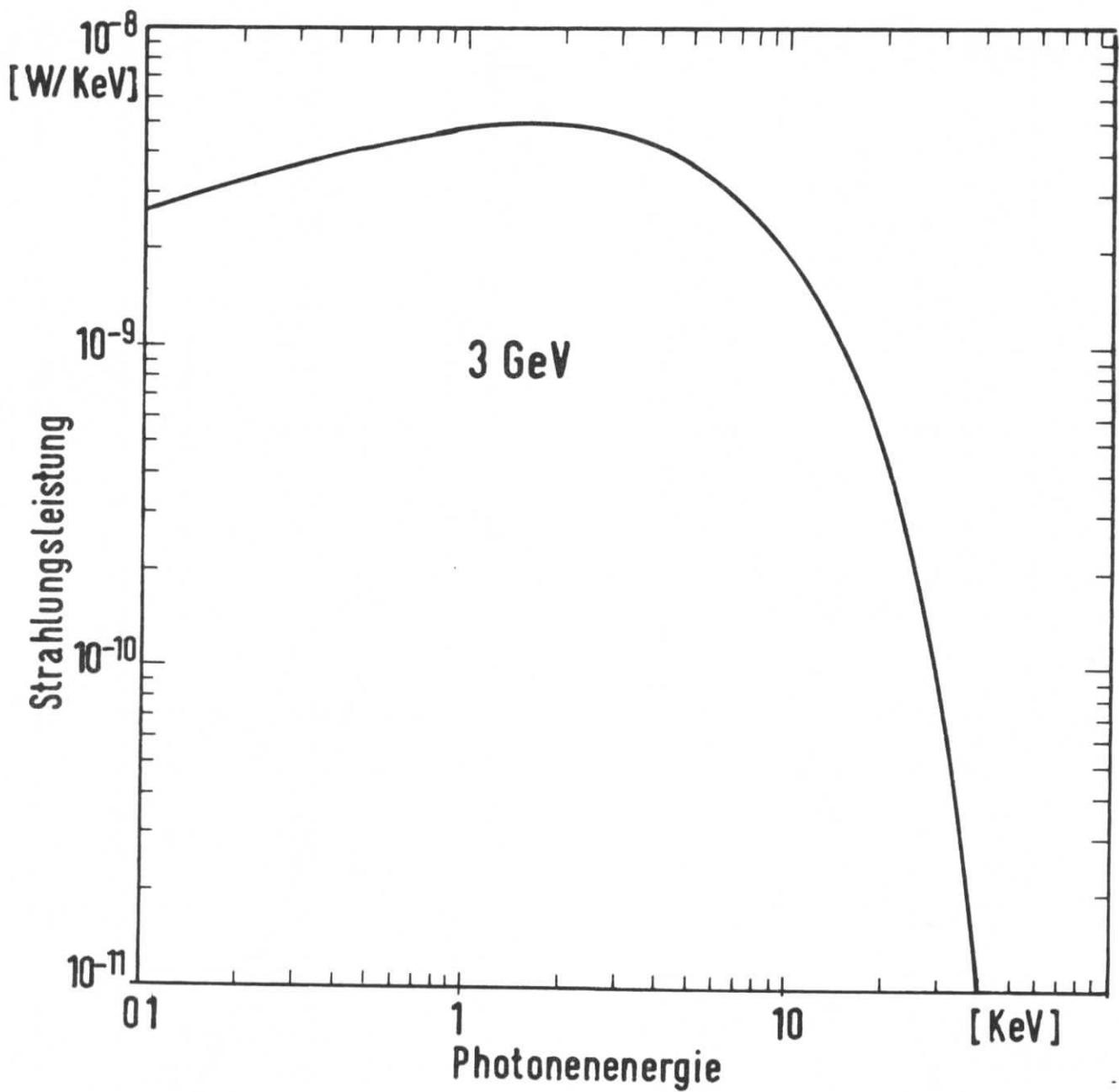


Abb.2: Energieverteilung der Synchrotronstrahlung eines Elektrons im geplanten DESY-Speicherring bei 3 GeV Elektronenenergie.

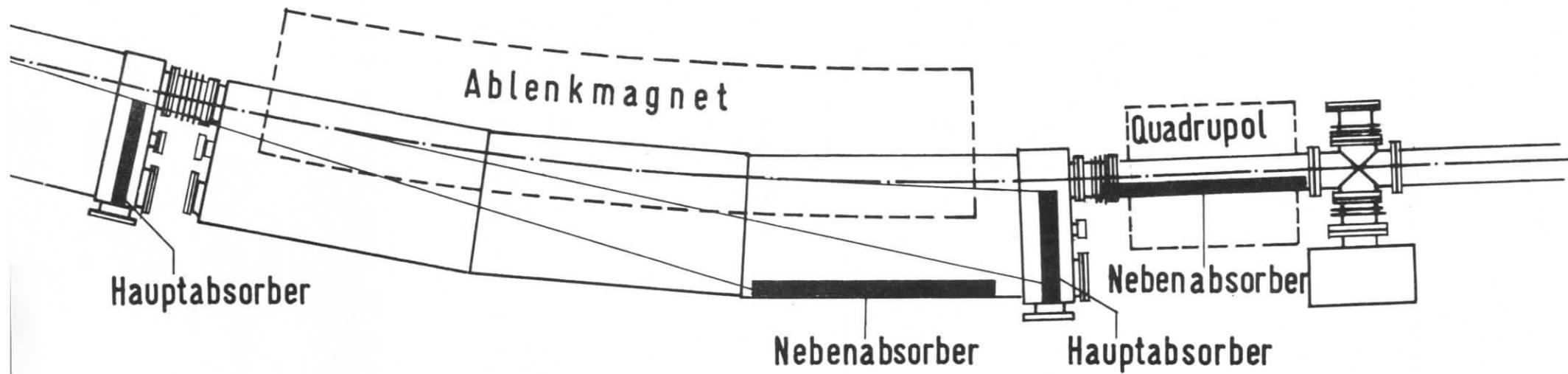


Abb.3: Aufstellung der Strahlungsabsorber in einer Magnetperiode des geplanten DESY-Speicherringes.

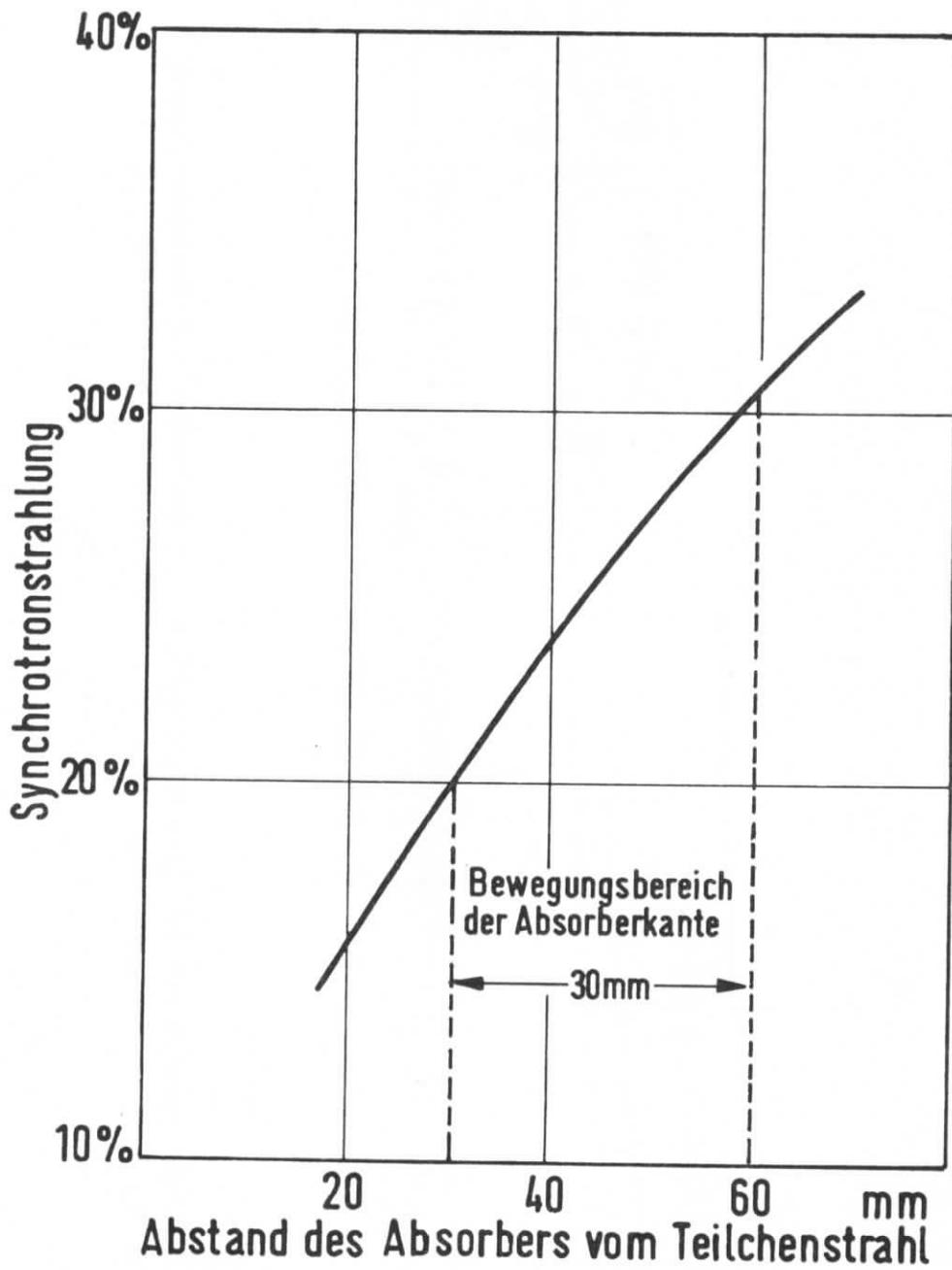


Abb.4: Anteil der Synchrotronstrahlung, die nicht vom Hauptabsorber aufgenommen wird, in Abhängigkeit des Abstandes des Absorbers vom Teilchenstrahl.

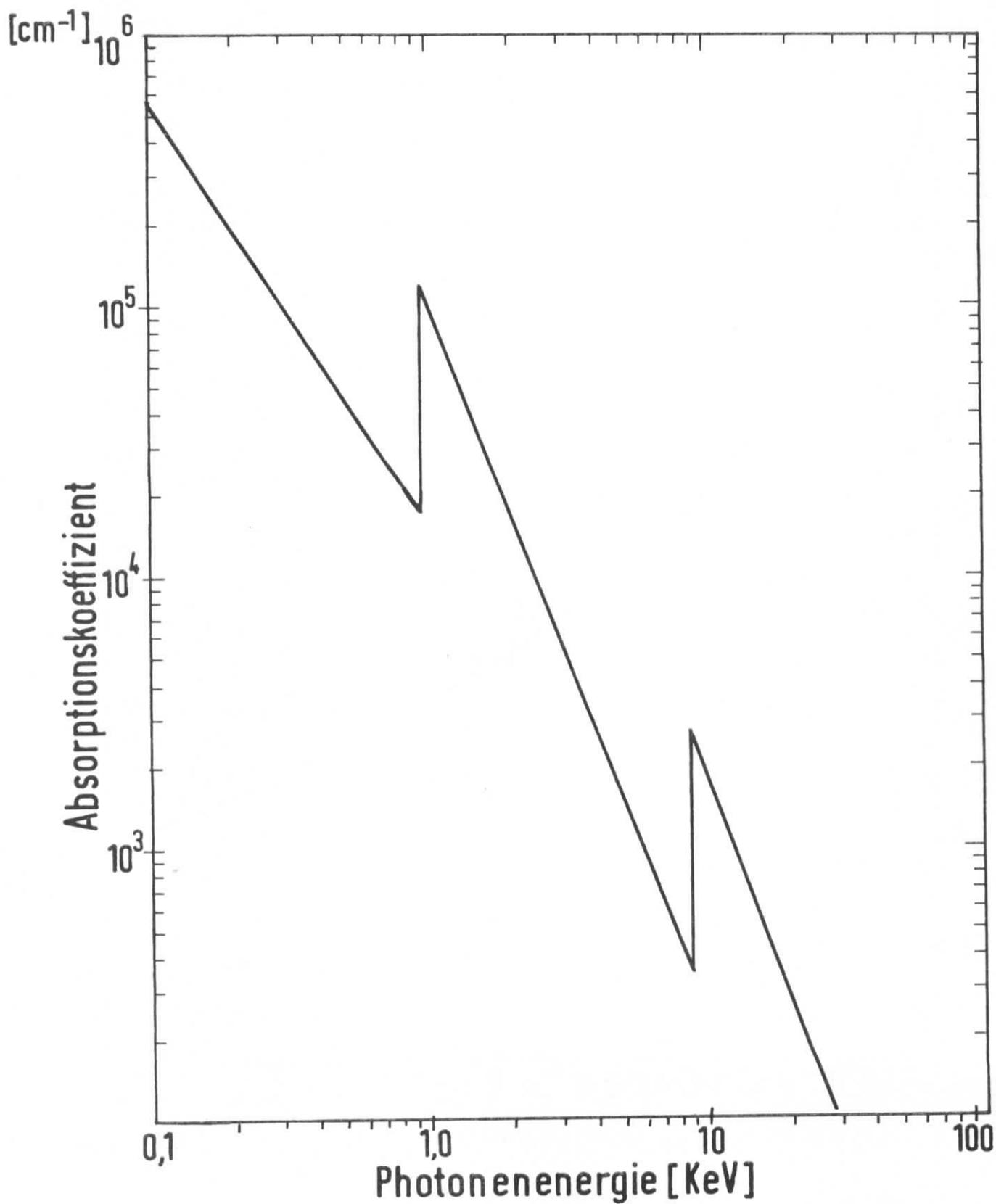


Abb.5: Linearer Absorptionskoeffizient von Kupfer ^{12) 13) 14) 15)}

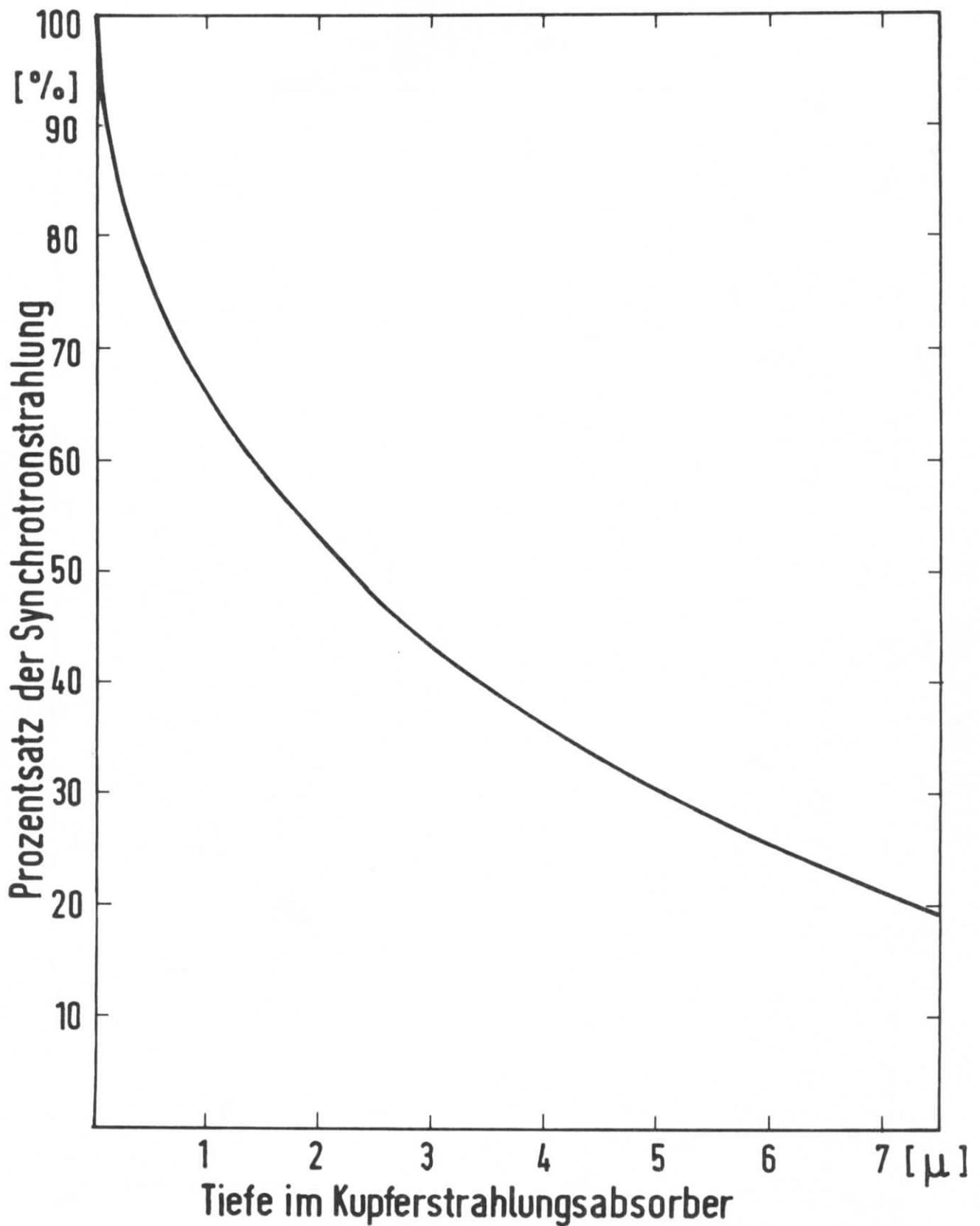


Abb.6: Verlauf der Absorption der Synchrotronstrahlung bei 3 GeV Elektronenenergie im Kupferabsorber.

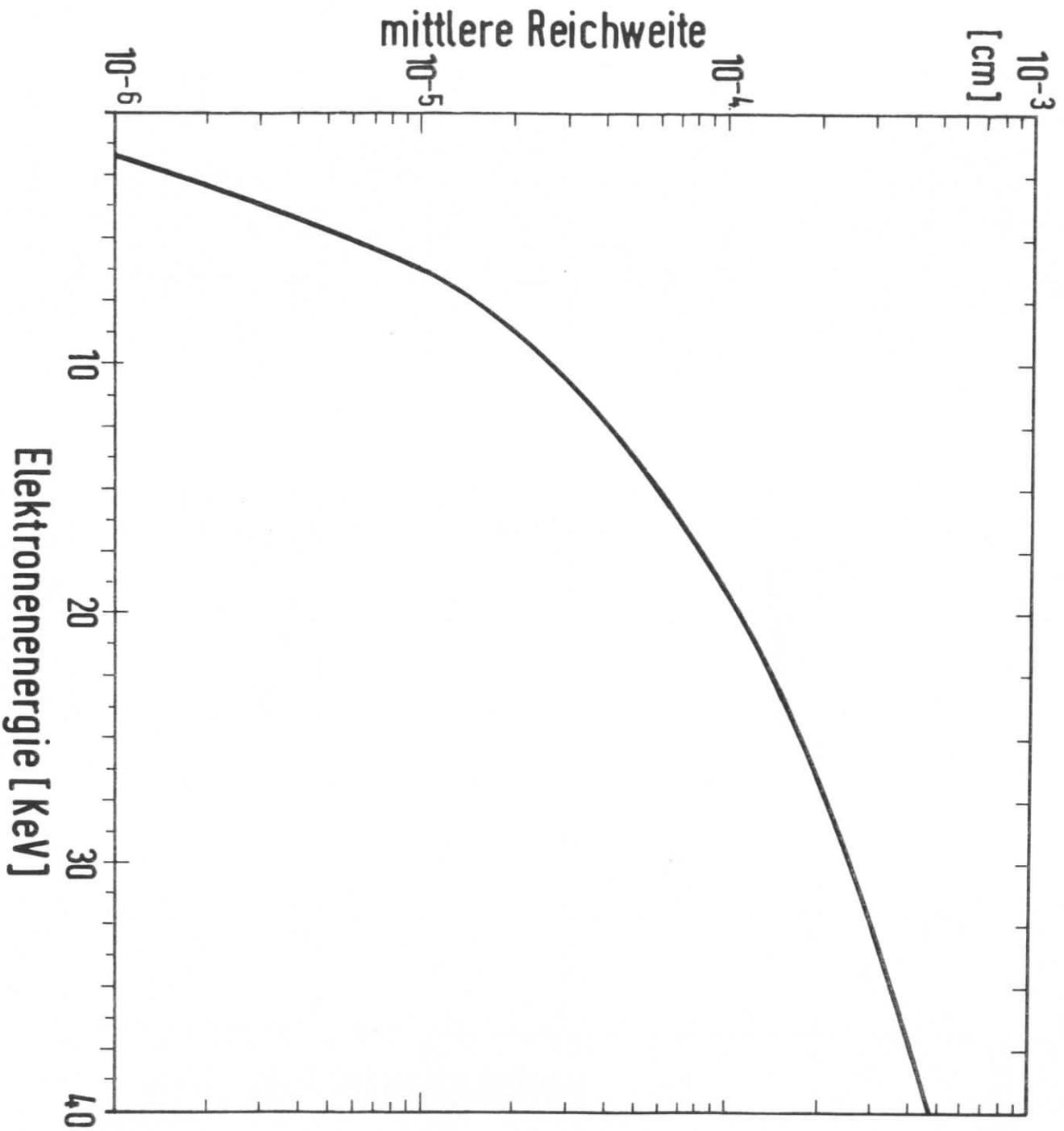


Abb. 7: Die mittlere Reichweite von Elektronen in einem Kupfertarget 16)

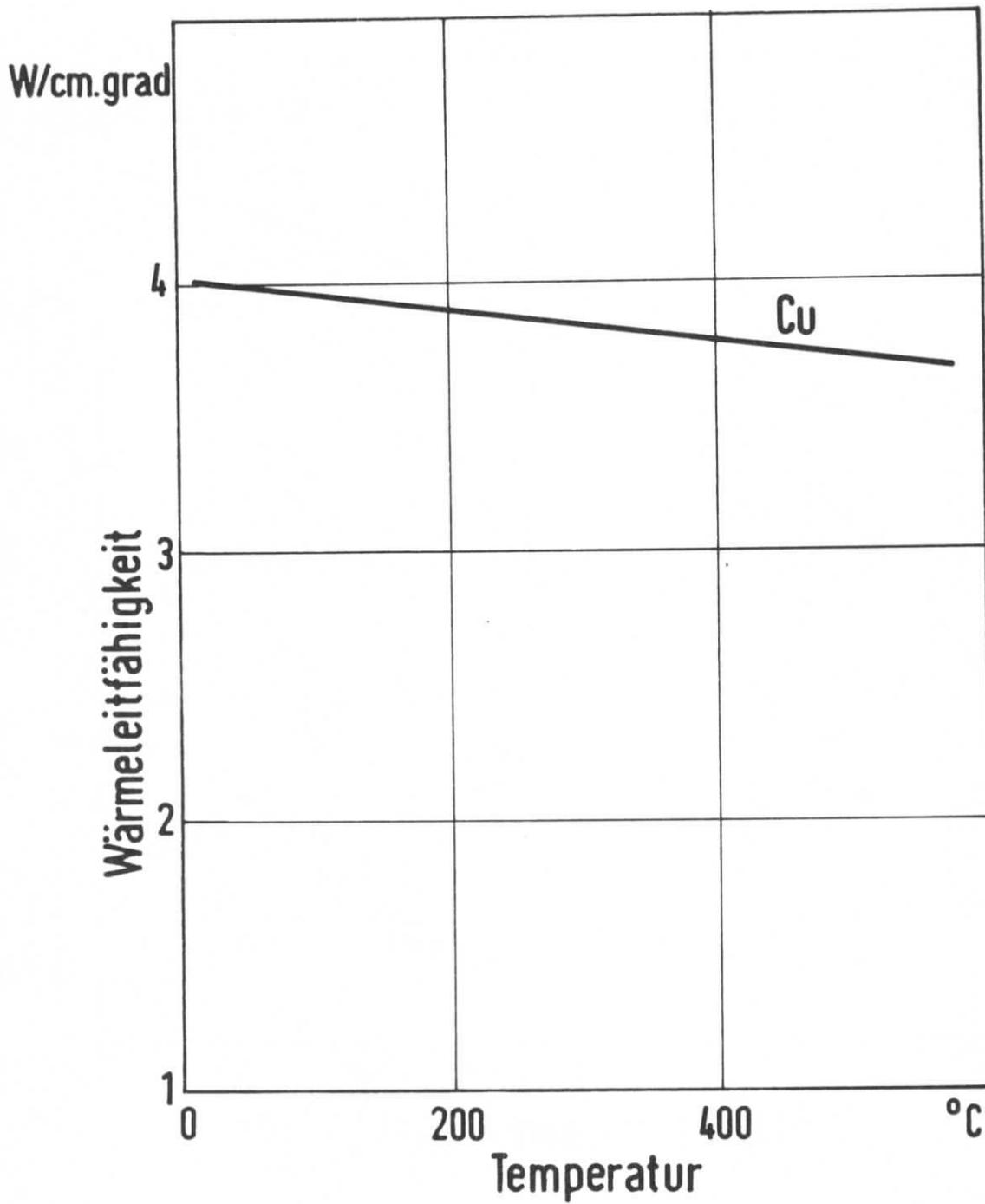


Abb.8: Die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit von Kupfer ¹⁸⁾

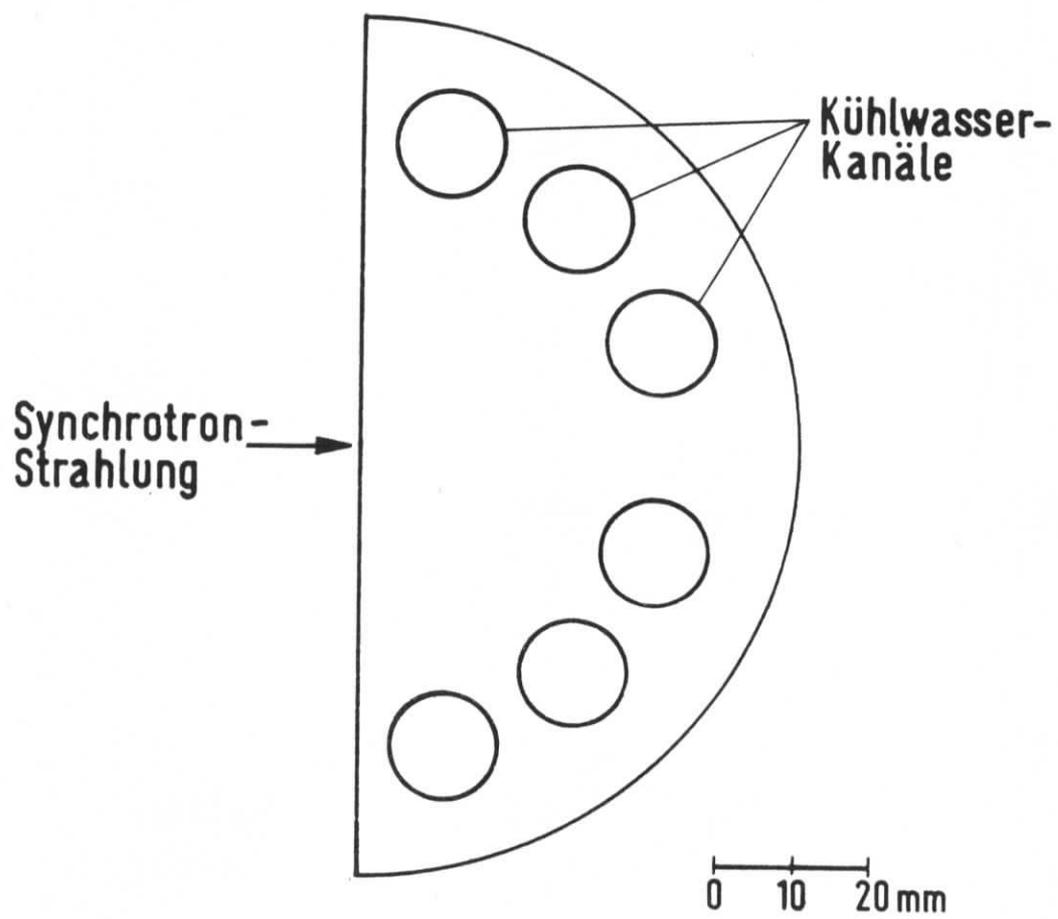


Abb.9: Querschnitt des Strahlungsabsorbers.

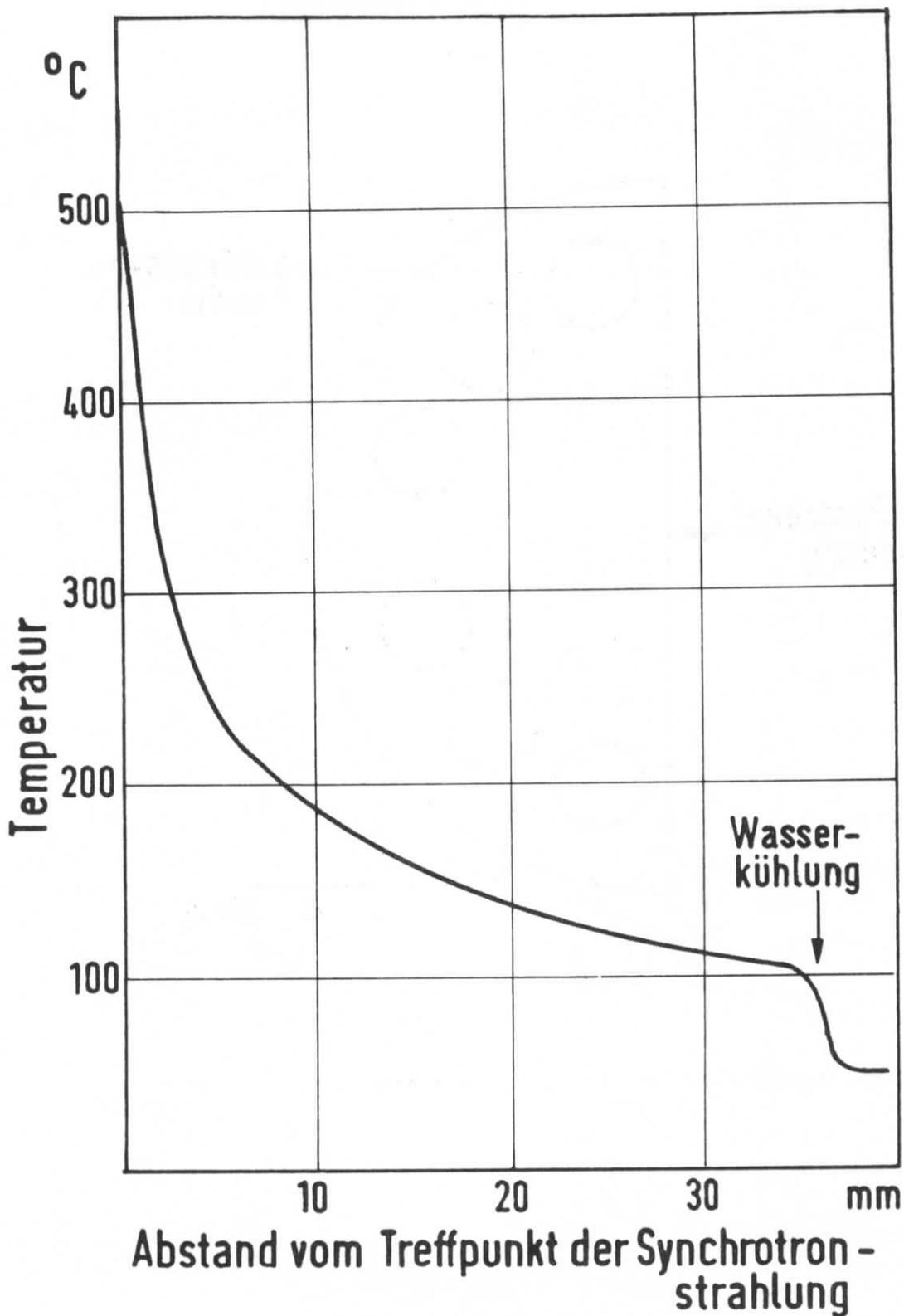


Abb.10: Temperaturverteilung im Strahlungsabsorber in Abhängigkeit des Abstandes vom Treffpunkt der Synchrotronstrahlung bei der max. Belastung von 31 kW/cm^2 (Höhe der Synchrotronstrahlung am Absorber $0,25 \text{ mm}$).

L i t e r a t u r

1. Vorschlag zum Bau eines 3 GeV Elektron-Positron-Doppelspeicherringes, DESY, 1967, S.78
2. CEAL-1013, "Vacuum Design Problems of High Current Storage Rings" , G.E.Fischer and R.A.Mack (Okt.1964).
3. CEAL 1017, "On Synchrotron Radiation Produced Photoelectrons from Copper" , G.E.Fischer and R.A.Mack (Febr.1965).
4. SLAC-Proposal, "SPEAR Design Report" (Aug.1969).
5. R.Haensel und C.Kunz, DESY 67/15, "Experimente mit der Synchrotronstrahlung", Mai 1967.
6. A.Piwinski, DESY-H1/2, "Die Verteilung der Synchrotronstrahlung auf einem Absorber", Oktober 1969.
7. H.S. Carslaw, J.C.Jäger: "Conduction of Heat in Solids, Chaledron Press, Oxford, 1959, 2.Auflage.
8. S.A.Schaaf, "Mechanics of rarefied Gases" Handbuch der Physik, Band VIII 2, S.591-624, Springer-Verlag, 1963.
9. R.E.Harrington, J.Appl. Phys. 37, 5, 2028-2034, 1966.
10. " " " " " 38 8, 3266-3270, 1967.
11. " " " " " 39 8, 3699-3706, 1968.
12. Cooke, Stewardson, Brit. J.Appl.Phys. 15, 1315,1964.
13. J.V.Victoreen, J.Appl.Phys. 19, 885, 1948.
14. S.J.M. Allen, Handbook of Physics and Chemistry 49thEd.,1969, E-133.
15. B.Sonntag, Dissertation, Un. Hamburg, 1969.
16. H.Schwarz, J.Appl.Phys., 35, 7, 2020, 1964.
17. H.S. Carslaw, J.C. Jäger: "Conduction of Heat in Solids, Chaledron Press, Oxford, 1959, 2.Auflage, S. 75.
18. R.W. Powell, C.Y.Ho, P.E. Liley: Thermal Conductivity of Selected Materials, NSRDS-NBS8, S.16, 1966, National Bureau of Standards-8.
19. E.Eckert: Wärme und Stoffaustausch, Springer 2.Auflage, 1959, S.191.
20. E.Eckert: Wie 19, jedoch S.6, Tab.1: Der Wert von $3 \cdot 10^5$ kcal/m²h entspricht etwa 35 W/cm².
21. E.Eckert: Wie 19, jedoch S.191, Abb.116.
22. F.C.Gunther: Trans.Amer.Soc.Mech.Eng. 73, 115-123, 1951
23. R.Gregorig: Wärmeaustauscher, S.315, H.Sauerländer-Verlag, F/M, 1959.
24. Eckert, Drake: Heat and Mass Transfer, Inter.Stud.Edition 2, S.211.
25. E.Eckert: Wie 19, jedoch S.279.
26. E.Eckert: Wie 19, jedoch S. 26: Der Unterschied um den Faktor 2 ergibt sich aus dem halben Zylinder im Fall des Strahlungsabsorbers.
27. R.Gregorig: Wie 23, jedoch S.235-246.
28. Perry's Chemical Engineers' Handbook, 4.Auflage, S.5-34, Table 5-20.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt den Herren Dr. Degèle und Dr. Pingel für Vorschläge und kritische Diskussionen.

Herrn Piwinski danke ich für klärende Diskussionen über die Synchrotronstrahlungsverteilung.

Herr Klucker stellte mir freundlicherweise Rechenprogramme der Synchrotronstrahlungsverteilung zur Verfügung.

Herrn Gödecke möchte ich für die Durchführung der Messungen der Übergangszahl der Wasserkühlung danken.

Frau Fiedler und Fräulein Körner danke ich für die mühevollen Schreibarbeit, Herrn Knaut für die sorgfältige Anfertigung der Zeichnungen.