

DESY HERA 06-01  
January 2006

# Synchrotronstrahlung und Synchrotronstrahlungsabsorber im Spinrotator im HERA e-Ring

B. Nagorny

CERN LIBRARIES, GENEVA



CM-P00061641

*Deutsches Elektronen-Synchrotron DESY, Hamburg, Germany*

# 26 160 75

## **Inhaltsverzeichnis :**

Einleitung.....	3
Aufbau des Rotators und Magnetanordnung.....	4
Beschreibung der Absorber.....	5
Synchrotronstrahlungsanalyse Absorber 1.....	6
Synchrotronstrahlungsanalyse Absorber 2.....	12
Synchrotronstrahlungsanalyse Absorber 3.....	15
Synchrotronstrahlungsanalyse Absorber 4.....	17
Synchrotronstrahlung in Quadrupolen.....	20
Temperaturabschätzung in den Absorbern.....	23
Zusammenfassung.....	30

## Einleitung

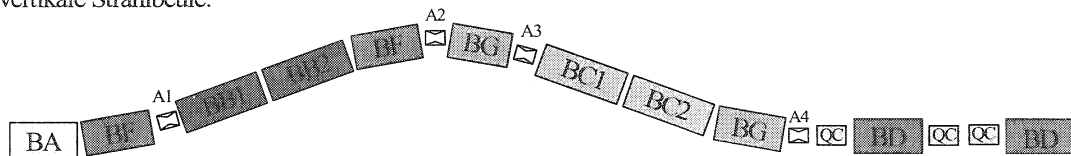
Bei HERA am Desy in Hamburg werden 920 GeV Protonen mit 27.5 GeV Elektronen zur Kollision gebracht. Diese Kollision erfolgt auf insgesamt 4 jeweils 360 m langen geraden Teilstücken des 6,335 km langen Rings. In den Dipolmagneten der Kurven wird der Spin der Elektronen durch die Emission von Synchrotronstrahlung vertikal ausgerichtet, antiparallel zu den magnetischen Feldlinien (Sokolov-Ternov-Effekt) [1]. Für die Experimente ist es jedoch wichtig, dass der Spin an den Wechselwirkungspunkten möglichst gut longitudinal ausgerichtet ist. Um dies zu erreichen werden um den Wechselwirkungspunkt (WWP) Spinrotatoren eingesetzt. Diese drehen vor dem Wechselwirkungspunkt den vertikalen Spin um  $90^\circ$  in einen longitudinalen und danach den longitudinal ausgerichteten Spin wieder um  $90^\circ$  zurück in einen vertikalen Spin. Da die Spinrotatoren aus Dipolmagneten aufgebaut sind, wird in ihnen Synchrotronstrahlung erzeugt. Um empfindliche Teile des Strahlrohres, wie die beweglichen Faltenbälge [2] vor dieser Strahlung zu schützen, sind an bestimmten Stellen im Rotator Synchrotronstrahlungsabsorber eingebaut. Im Jahr 2005 war es während des Betriebs von HERA wiederholt zu Überhitzungen einzelner Absorber gekommen, die dann zu Undichtigkeiten im Vakuumsystem führten. Aus diesem Grund soll überprüft werden, welche Synchrotronstrahlungsleistung auf die Absorber trifft, und wie diese Leistung von der Strahlage und -richtung am Eingang des Spinrotators abhängt. Auch wird die Synchrotronstrahlungsleistung abgeschätzt, die in den vor dem Rotator angeordneten Quadrupolmagneten entsteht. Hierbei wird allen Berechnungen und Simulationen eine konstante Elektronenenergie von 27.5 GeV zugrunde gelegt. Außerdem wird eine Abschätzung der im Absorber auftretenden Temperaturen gemacht.

## Aufbau des Rotators

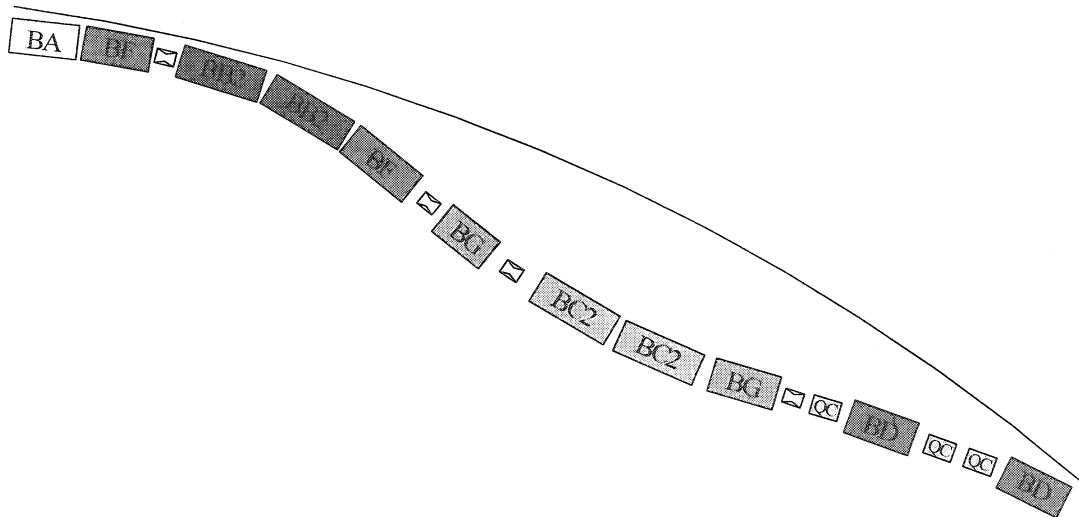
Aufgebaut ist der Spinrotator aus 8 unterschiedlichen Typen von horizontal und vertikal ablenkenden Dipolmagneten. Diese erzeugen eine Ineinanderfaltung eines horizontalen und vertikalen beam bumps. Vom Wechselwirkungspunkt kommend sind die verschiedenen Magnete wie folgt angeordnet:

**BA - BF - BB1 - BB2 - BF - BG - BC1 - BC2 - BG - QC - BD - QC - QC - BD**

Vertikale Strahlbeule:



Horizontale Strahlbeule:

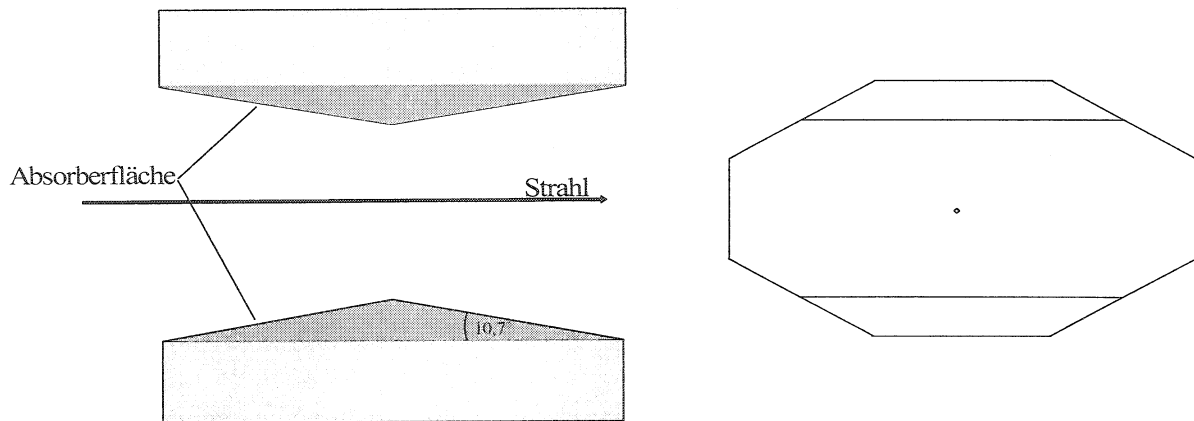


*Abb.1 : Spinrotator mit allen Dipol- und Quadrupolmagneten und den Synchrotronstrahlungsabsorbern (A). Gleiche Magnettypen haben gleiche Farbe. Die obere Abbildung zeigt die vertikale Strahlbeule und die untere die horizontale.*

Die Magnete BA, BB, BC und BD sind horizontal ablenkende Dipolmagnete, die Magnete BF und BG sind vertikale Dipolmagnete. Abbildung 1 zeigt alle Dipol- und Quadrupolmagnete des Rotators und die Lage der Absorber.

Da die Magnete und die Kammer selbst gerade sind, gibt es zwischen den geraden Teilstücken jeweils Knicks. Zwischen den Dipolen gleichen Typs (BB1-BB2 und BC1-BC2) befindet sich jeweils ein fester Knick, sonst werden zwischen zwei Magneten biegsame Schiebestücke (Faltenbälge) verwendet. Diese etwas elastischen Verbindungen ermöglicht es horizontale und vertikale Magnetverstellungen vorzunehmen. Außerdem werden die bei Erwärmung auftretenden Winkel- und Längenänderungen aufgenommen.

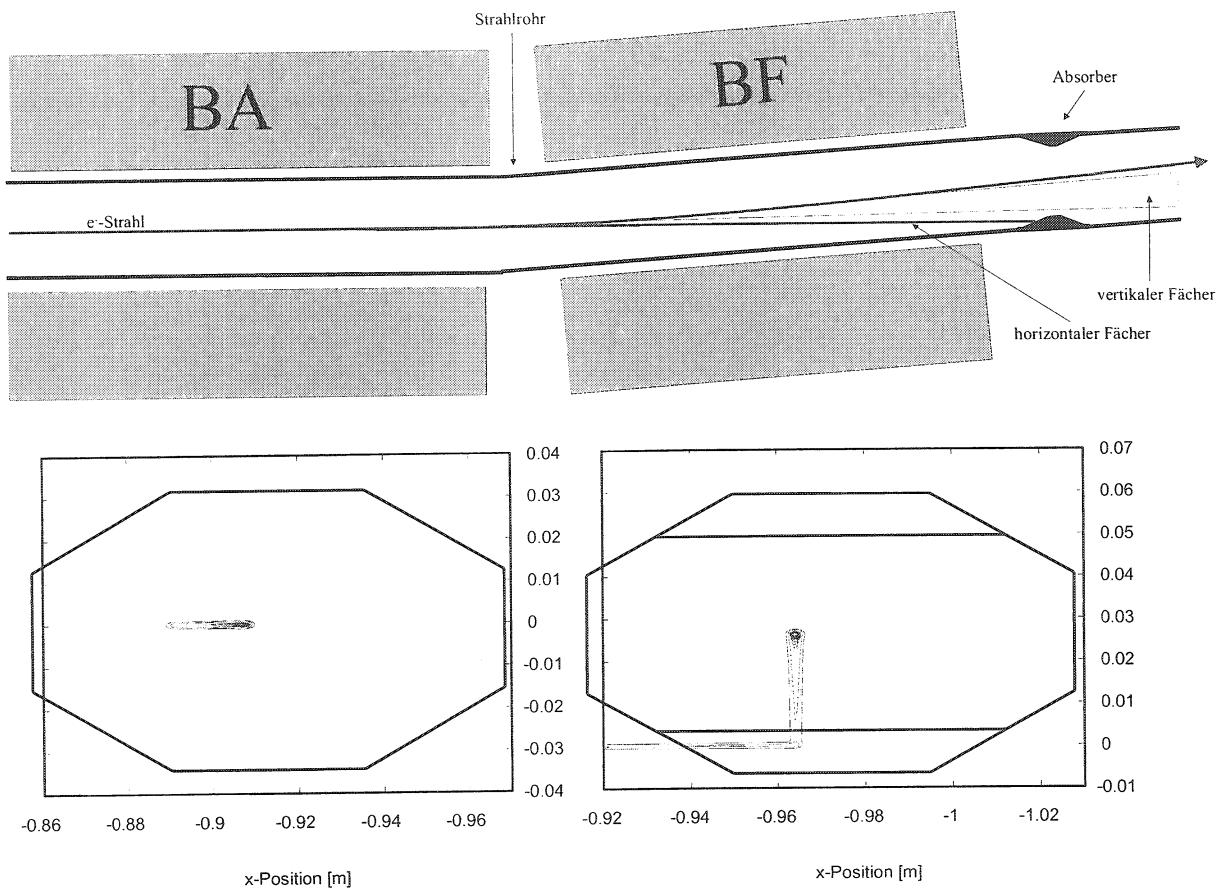
Um diese Bälge vor der in den Dipolmagneten auftretenden Synchrotronstrahlung zu schützen, werden in das Strahlrohr Synchrotronstrahlungsabsorber eingebaut. Insgesamt gibt es vier solcher Absorber innerhalb eines Rotators. Diese befinden sich jeweils hinter den BF- und BG-Magneten. Die Absorber sind so konstruiert, dass sie die Höhe des Strahlrohres von 66 mm auf 46 mm reduzieren. Dabei geschieht dies nicht auf einmal, also in einer Stufe, sondern die Synchrotronstrahlung trifft auf eine schräge Fläche die um einen Winkel von  $10.7^\circ$  gegenüber der Strahlachse gekippt ist. Damit wird die Intensität der Strahlung verringert, weil sich diese beim Auftreffen auf eine größere Fläche verteilt. Abbildung 2 zeigt schematisch den Aufbau eines Absorbers. Wegen der sehr hohen Wärmeleitfähigkeit sind die Absorber aus Kupfer hergestellt. Sie sind wassergekühlt, um die durch die Synchrotronstrahlung erzeugte Wärme effektiv abtransportieren zu können.



*Abb. 2 : Schematischer Aufbau der Absorber von der Seite und in Strahlrichtung betrachtet*

#### **Absorber 1 bei $y=143,725$ m nach WWP**

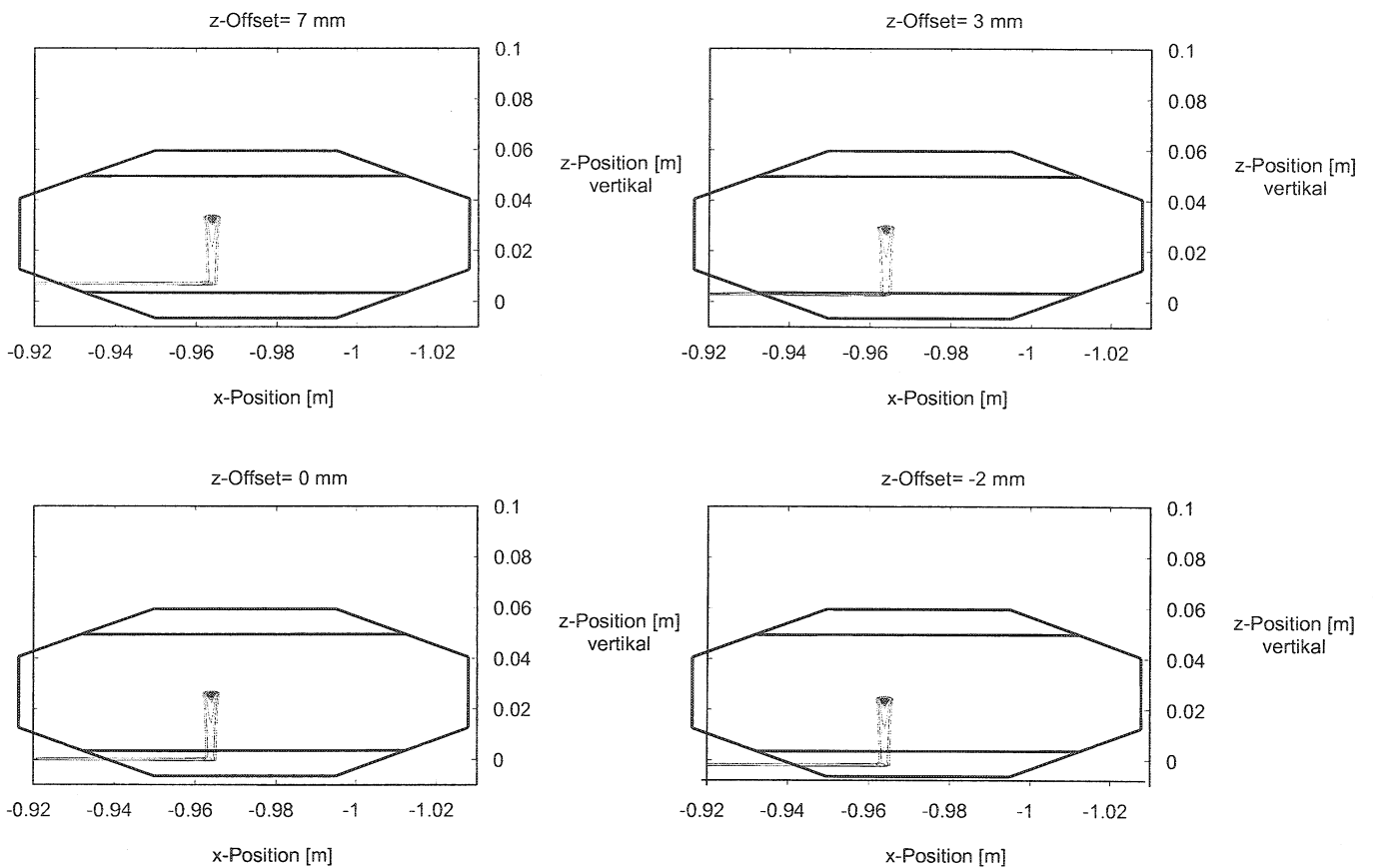
Dieser Absorber ist der Synchrotronstrahlung der Magnete BA (hor. Strahlungsfächer) und BF (vert. Fächer) ausgesetzt. Die Gesamtstrahlungsleistung des Magnets BA beträgt 3.57 kW und die des BF-Magneten 6.14 kW. Da der Magnet BF nach oben geneigt ist, scheint der horizontale Synchrotronstrahlungsfächer von BA nach dem BF-Magneten sehr tief im Strahlrohr zu liegen. Nach dem Magneten BA liegt dieser Fächer noch etwa in der Mitte des Strahlrohres, durch den Anstieg der Kammer im Verlauf des BF-Magneten kann dieser Fächer jedoch den unteren Absorber treffen. Je nachdem wie der Strahl in den Rotator eintritt, ändert sich die Lage der Synchrotronstrahlungsfächer. Die Leistung die auf die Absorberflächen trifft, hängt deswegen von den Anfangsbedingungen beim Eintritt in den Rotator ab. Je nachdem wie die Anfangsbedingungen sind, kann es sein dass ein Teil des Fächers den Absorber trifft, der ganze Fächer trifft oder der Synchrotronstrahlungsfächer auch ganz am Absorber vorbeigeht.



**Abb. 3:** Strahlrohr mit  $e^-$ -Strahl und die Synchrotronstrahlung nach dem BA-Magneten (linke Abbildung) und nach dem BF-Magneten (rechts)

Der obere Teil von Abbildung 3 zeigt eine Schemazeichnung der ersten beiden Magnete des Spinrotators. Man erkennt, dass der horizontale Synchrotronstrahlungsfächer je nach Lage den Absorber treffen kann. Die untere linke Abbildung zeigt einen Querschnitt durch das Strahlrohr an der Stelle zwischen den beiden Magneten BA und BF und die Projektion der Synchrotronstrahlung auf diese Ebene. Hier ist nur die horizontale Strahlung des BA-Magneten zu erkennen, die etwa in der Mitte der Kammer liegt. Die rechte Abbildung zeigt denselben Schnitt auf der Höhe des Absorbers, nach beiden Magneten. Der horizontale Fächer erscheint deutlich tiefer im Strahlrohr und es kommt der vertikale Fächer

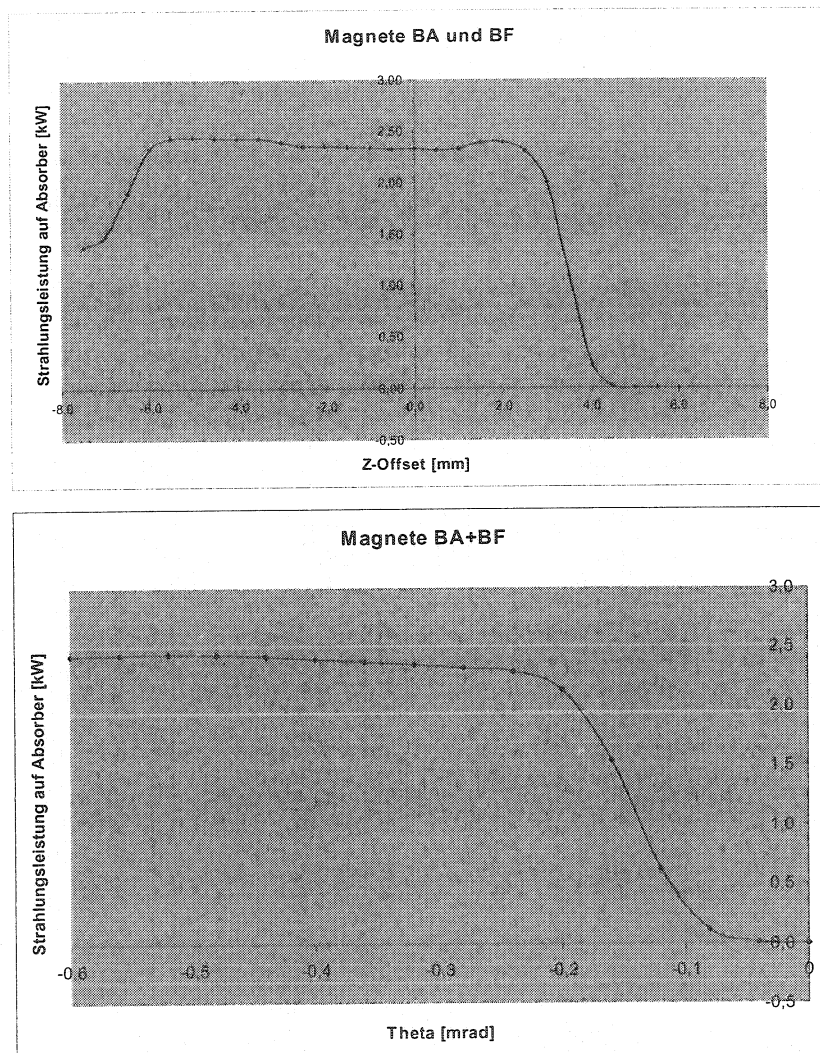
des BF-Magneten hinzu. Ob der Absorber getroffen wird oder nicht, hängt vor allem von der vertikalen Richtung und Ablage des Strahls beim Eintritt in den Rotator ab. Abbildung 4 zeigt Simulationen von verschiedenen solchen Situationen.



**Abb. 4:** Dargestellt sind die Synchrotronstrahlungsfächer der Magnete BA (horizontaler Teil) und BF (vertikaler Teil) für verschiedene vertikale Abweichungen des Strahls von der Sollbahn am Anfang des Rotators. Der horizontale Synchrotronstrahlungsfächer erscheint auch außerhalb der Strahlrohrbegrenzung, weil das Simulationsprogramm keine Schatteneffekte berücksichtigt. Der außerhalb der Strahlrohrbegrenzung liegende Teil würde in Wirklichkeit vorher an der Strahlrohrwand hängenbleiben. Die max. Intensität beträgt in allen Fällen etwa  $1.9 \text{ kW/cm}^2$ .

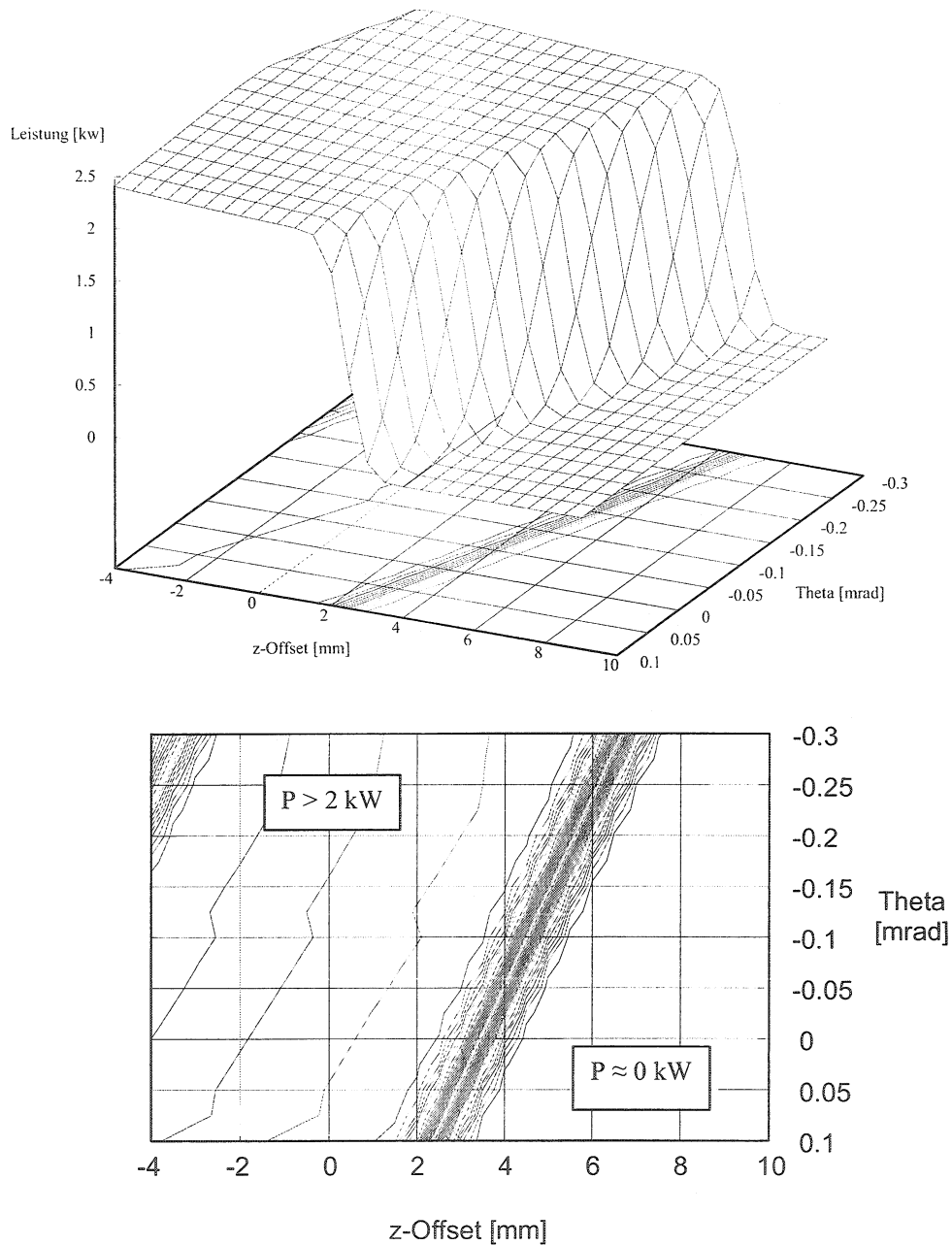


Sollte die Strahlung am Absorber vorbeigehen, dann trifft sie auf die Innenwände des Strahlrohres im nachfolgenden BF-Magneten. Da die Winkel zwischen den geraden Teilstücken sehr klein sind (einige mrad), trifft das Licht in einem sehr kleinen Winkel auf die Kammerwand. Die hieraus resultierende Intensität ist so gering, dass sie um ein vielfaches unterhalb dessen liegt, was auf die Absorberfläche trifft. Die folgende Abbildung zeigen wie die Leistung, die auf den Absorber Al trifft, von der vertikalen Ablage und von der vertikalen Richtung beim Eintritt in den Rotator abhängt.



**Abb. 5:** Abhängigkeit der Strahlungsleistung auf den Absorber von der vertikalen Ablage und Richtung. Dargestellt ist die Summe der Leistungen von den Magneten BA und BF.

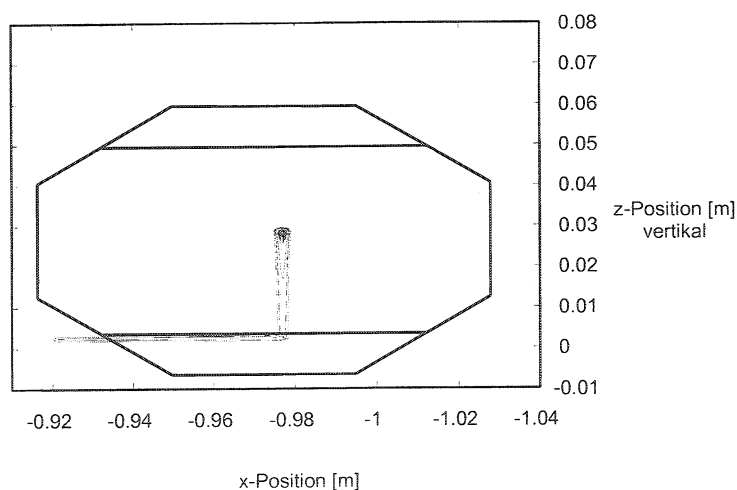
Ändert man sowohl den vertikalen Eintrittswinkel Theta als auch die vertikale Ablage, so erhält man ein Profil welches zwei Plateaus enthält.



**Abb. 6:** *Abhängigkeit der Synchrotronstrahlung auf den Absorber von der Strahlrichtung und -position beim Eintritt in den Rotator. Die untere Abbildung zeigt den Kontourplot der oberen Grafik in der Draufsicht*

Der Kontourplot erlaubt die einfache Bestimmung der Leistung, wenn man die Anfangsbedingungen kennt. Die Fläche in Abbildung 6 besteht im Wesentlichen aus zwei Plateaus und einem engen Übergangsbereich. Das untere Plateau beschreibt den Bereich wo der Strahlungsfächer den Absorber nicht trifft und hat deswegen Werte um null. Das obere Plateau beschreibt den Bereich wo der Absorber getroffen wird. Dieses Plateau hat deswegen Werte von über 2 kW. Dazwischen gibt es einen Übergangsbereich in dem die Leistung mit etwa  $2.1 \text{ kW/mm}_{\text{Offset}}$  bzw.  $21 \text{ kW/mrad}$  ansteigt.

Betrachtet man einmal den ungünstigsten Fall der eintreten kann, so erhält man die theoretisch maximal mögliche Strahlungsleistung auf den Absorber. Dieser Fall tritt ein, wenn der horizontale Fächer gerade den Absorber trifft und der Strahl dazu noch eine große negative Ablage in horizontaler Richtung hat. Dann nämlich ist die Länge des Teils des Fächers der den Absorber trifft maximal groß, und eine minimale Leistung trifft auf dem Weg dorthin die Kammerwand. In Abbildung 7 ist dieser Fall simuliert.



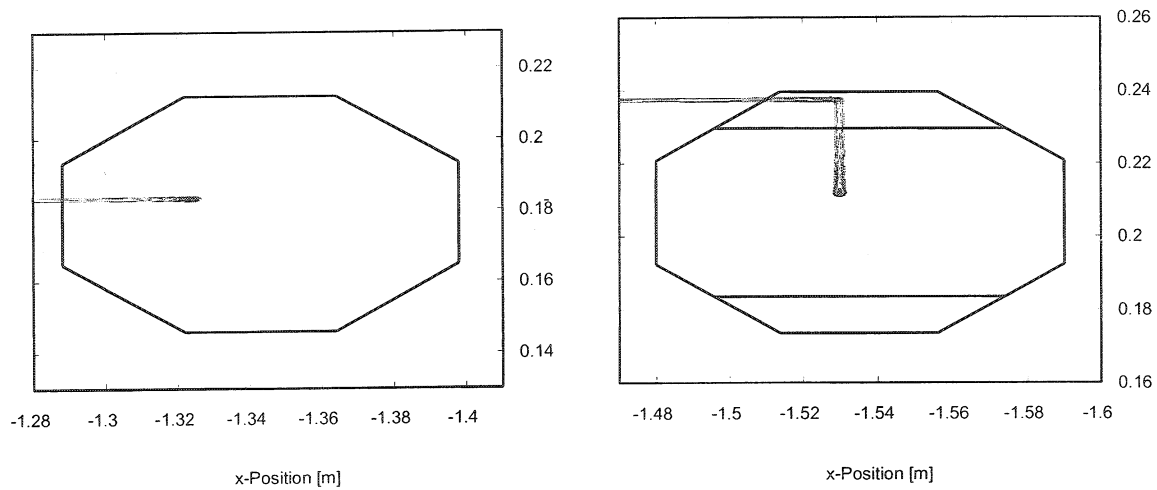
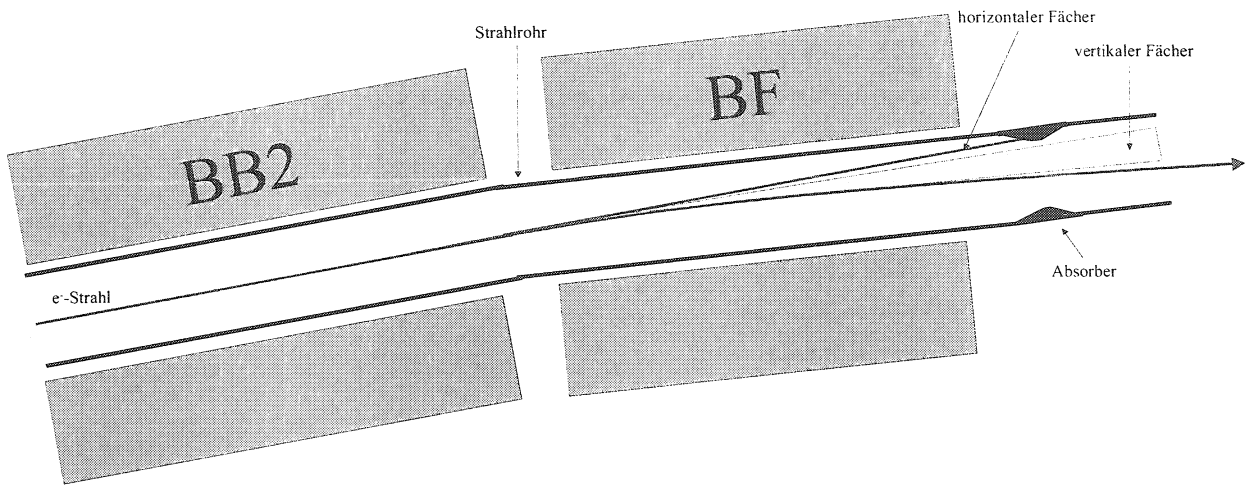
**Abb. 7:** Max. Strahlungsleistung trifft den Absorber ( $\Delta x = -8 \text{ mm}$ ,  $\Delta z = +2.5 \text{ mm}$ )

Dieser Fall tritt allerdings nur dann ein, wenn den Strahl mit einer großen negativen horizontalen Strahlablage (8 mm) in den Rotator eintritt, und die vertikalen Bedingungen so sind, dass der Absorber überhaupt getroffen wird. Dann aber trifft die max. Leistung von fast 3.1 kW auf den Absorber.

#### **Absorber 2 bei $y=164,725$ m nach WWP**

Dieser Absorber wird von der Synchrotronstrahlung der Magnete BB2 und BF getroffen. Die Strahlung von BB1 bleibt an der Kammerwand im Verlauf von BB2 hängen. Die Simulation zeigt, dass sich dieser Fächer auf einer Länge von mehr als 7 m auf die Kammerwand verteilt und somit keine nennenswerte Strahlungsintensität erzeugt. Dieser Absorber ist also der Synchrotronstrahlung ausgesetzt, die von den Magneten BB2 und dem nachfolgenden BF stammt. Da der Magnet BF im Vergleich zum vorangehenden BB2 weniger stark vertikal ansteigt, wird diesmal der obere Absorber getroffen. In Abbildung 8 ist dies noch einmal verdeutlicht. Auch hier sind es vor allem die vertikale Richtung und die vertikale Ablage des Strahls am Anfang des Rotators, die bestimmen welche Leistung den Absorber trifft. Da der Magnet BB2 sehr lang ist, erzeugt er sehr viel Synchrotronleistung, so dass die zu absorbierende Strahlung insgesamt höher ist als beim ersten Absorber.

Es zeigt sich auch, dass es praktisch nicht möglich ist die Strahlparameter so einzustellen, dass der horizontale Synchrotronstrahlungsfächer des BA-Magneten den ersten Absorber nicht trifft und gleichzeitig der Fächer des BB2-Magneten den zweiten Absorber verfehlt. In der Praxis wird es vielmehr so sein, dass mindestens einer oder beide Absorber getroffen werden.



**Abb. 8:** Strahlrohr mit  $e^-$ -Strahl und die Synchrotronstrahlung nach dem BB1-Magneten (linke Abbildung) und nach dem BF-Magneten (rechts)

Ändert man den vertikalen Eintrittswinkel und die vertikale Lage des Strahls am Anfang des Rotators, so erhält man ein ähnliches Profil wie zuvor. Abbildung 9 zeigt dieses Profil mit den Plateaus. Es gibt jetzt drei Niveaus, eins wenn keine Strahlung den Absorber trifft, das zweite wenn beide Strahlungsfächer den Rotator treffen und das dritte, wenn der horizontale Fächer schon vorher an der Kammerwand hängen bleibt und nur der vertikale Fächer des BF-Magneten trifft.

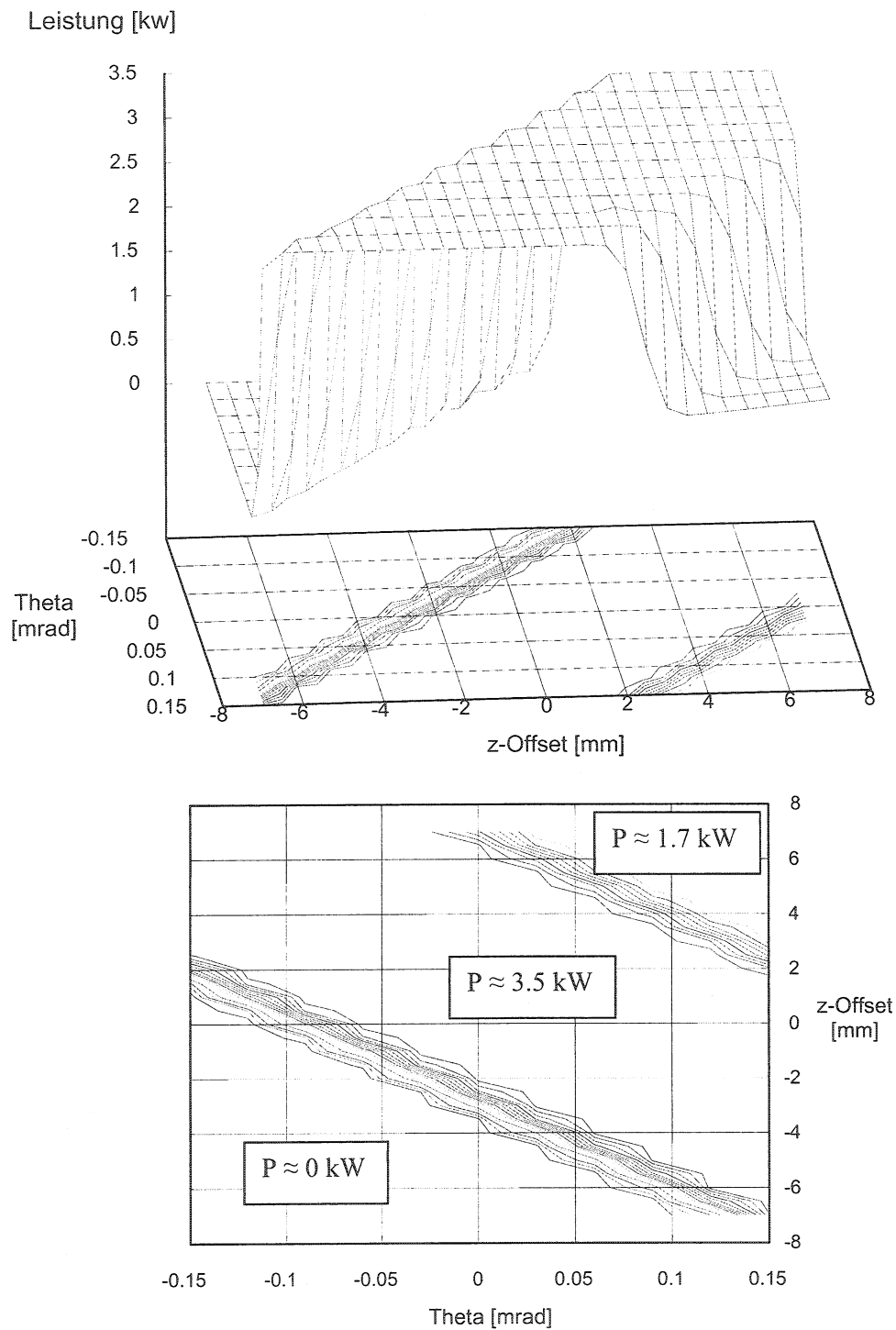
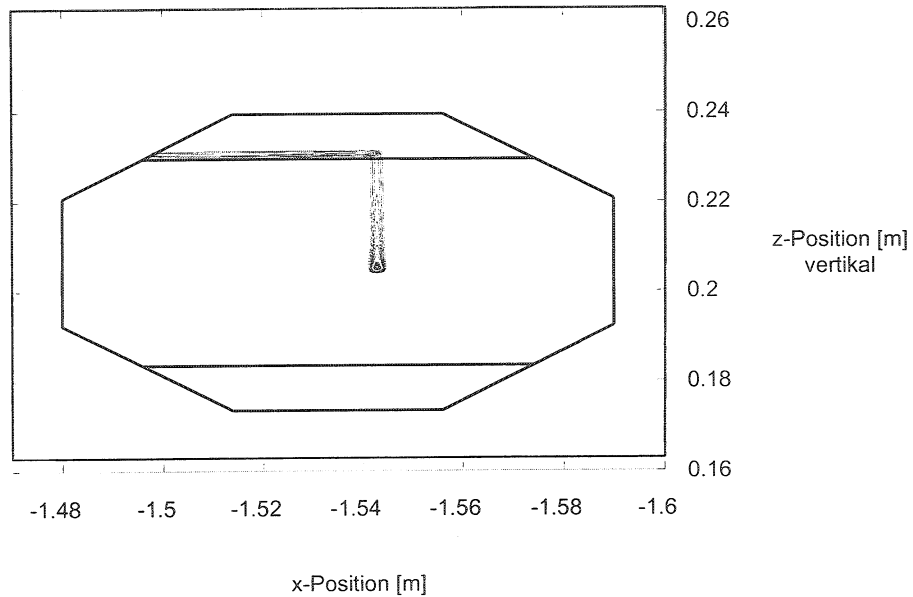


Abb. 9: Abhängigkeit der Synchrotronstrahlung auf den Absorber von der Strahlrichtung und -position beim Eintritt in den Rotator. Die untere Abbildung zeigt den Kontourplot der oberen Grafik in der Draufsicht

Die max. Gesamtleistung die auf diesen Absorber fallen kann beträgt fast 4 kW (bei einer negativen Ablage von -8 mm des Strahls beim Eintritt in den Rotator). Die höchste Intensität beträgt hier 2.36 kW/cm<sup>2</sup>.

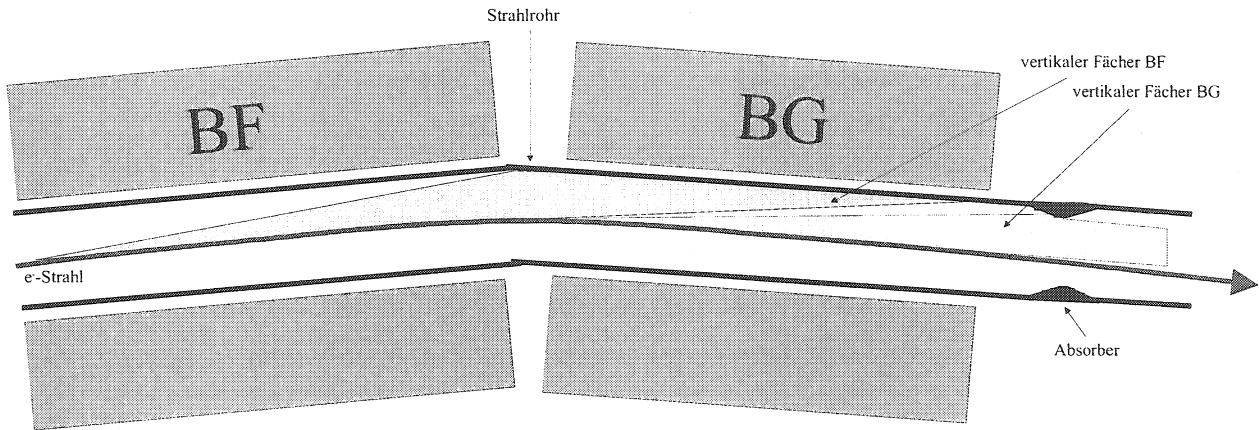


*Abb. 10: Max. Strahlungsleistung trifft den Absorber ( $\Delta x = -8$  mm,  $\Delta z = -2$  mm)*

### **Absorber 3 bei $y = 171.25$ m nach WWP**

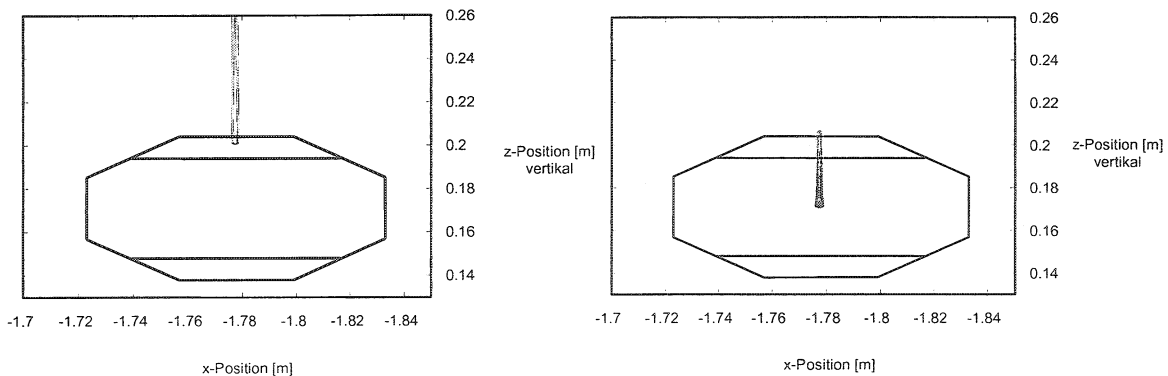
Dieser Absorber ist nach dem vertikal ablenkenden Magneten BG angeordnet. Die Situation ist hier etwas anders als bei den beiden Absorbern zuvor, weil es hier keinen horizontalen Strahlungsfächer gibt, der diesen Absorber treffen könnte. Selbst wenn die Synchrotronstrahlung des Magneten BB2 den nachfolgenden Absorber verfehlen sollte, so trifft sie in einem flachen Winkel die Kammerwand.

Lediglich die vertikalen Synchrotronstrahlungsfächer von BF und BG können den Absorber 3 treffen.



*Abb. 11: Strahlrohr mit  $e^-$ -Strahl und den beiden vertikalen Synchrotronstrahlungsfächern der Magnete BF und BG*

Die Leistung die den Absorber trifft, ist nahezu unabhängig von der horizontalen Ablage und Richtung des Strahls. Auch die vertikale Ablage und Richtung lässt die Leistung, die den Absorber trifft, nur wenig variieren. Insgesamt treffen immer zwischen 0.9 kW und 1.3 kW auf diesen Absorber. Dies ist deutlich weniger als bei den beiden ersten Synchrotronstrahlungsabsorbern.



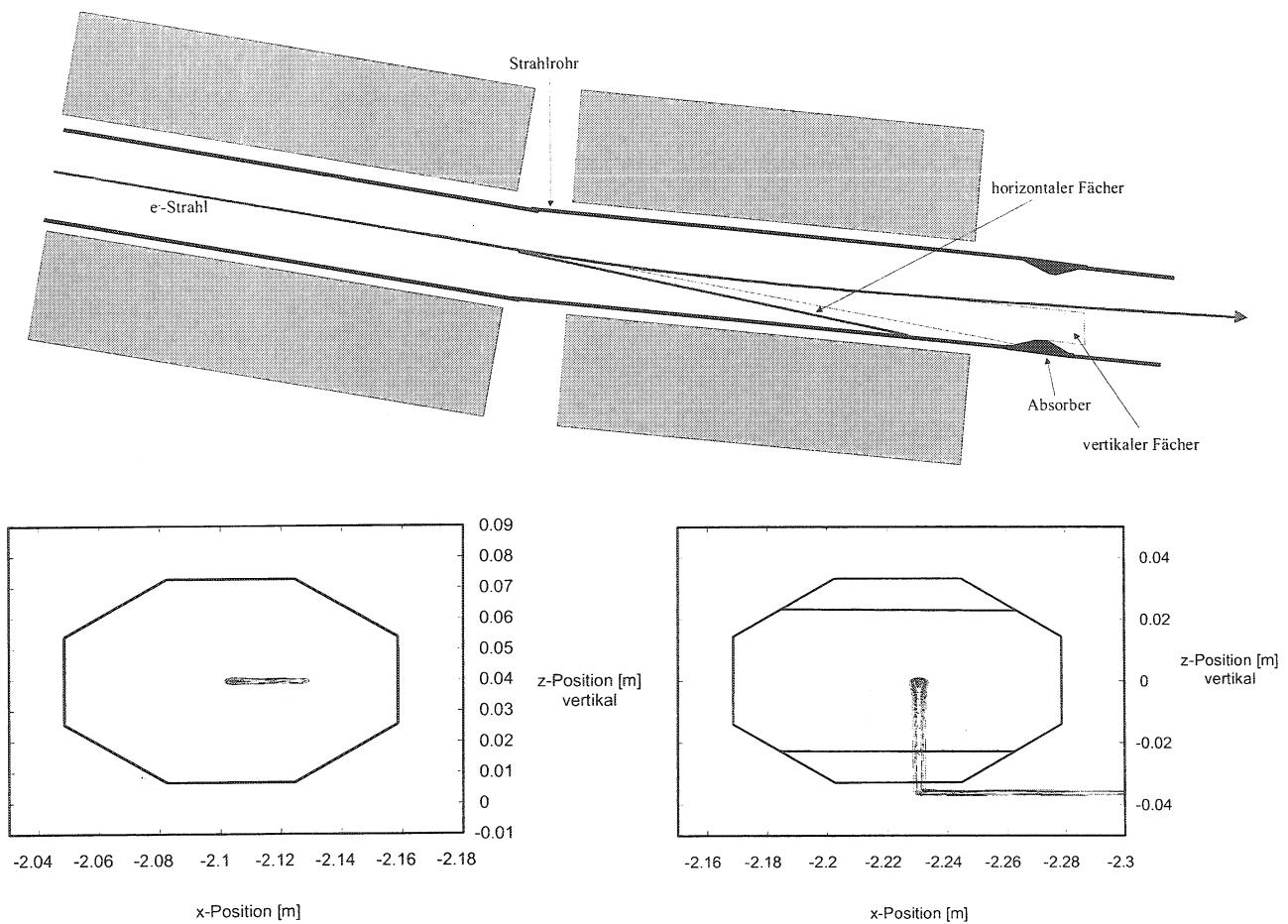
*Abb. 12: BF- und BG-Synchrotronstrahlungsfächer bei  $y = 171.25$  m*



Vom Magneten BF können maximal ca. 500 W auf den Absorber treffen. die maximale Intensität der Strahlung beträgt in diesem Fall 840 W/cm<sup>2</sup>. Die max. Leistung vom BG-Magneten liegt bei ca. 1.2 kW bei einer maximalen Intensität von ca. 1.3 kW/cm<sup>2</sup>. Beide Maximalwerte treten aber nicht gemeinsam ein, deswegen ist die größtmögliche Gesamtleistung auf ca. 1.3 kW limitiert.

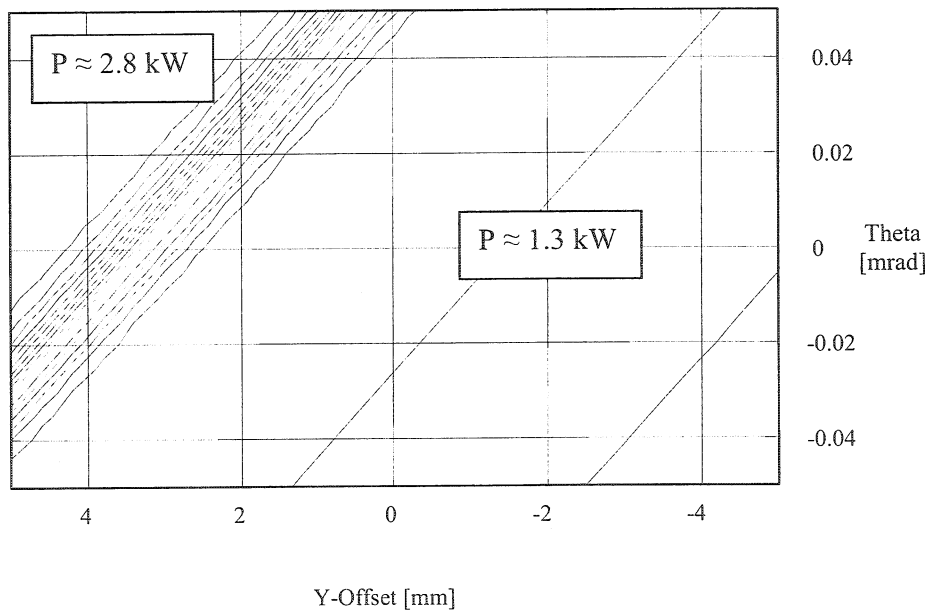
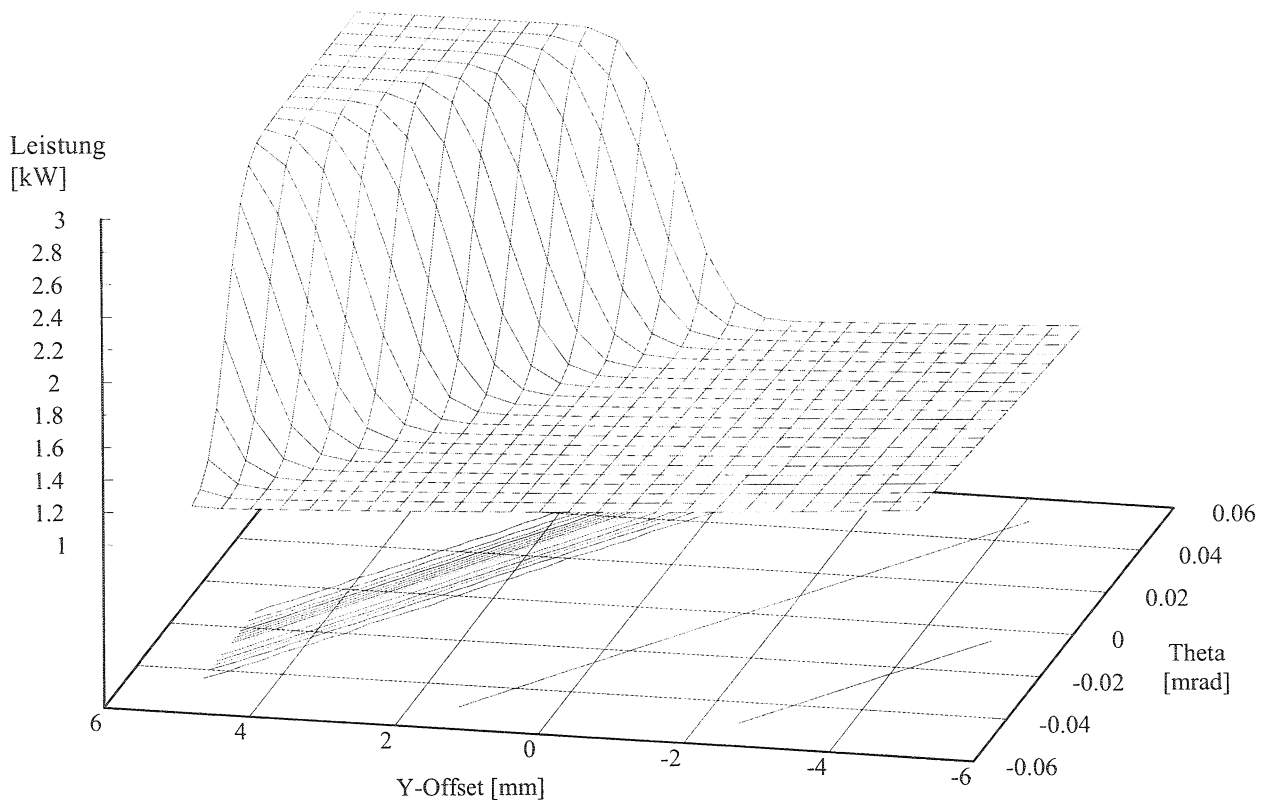
#### **Absorber 4 bei y=189.26 m nach WWP**

Der Absorber hinter dem BG-Magneten ist der letzte innerhalb des Rotators. Er sitzt am Ende der vertikalen und horizontalen Strahlbeule. Dieser Absorber ist der Strahlung ausgesetzt, die in den Magneten BC2 und BG entsteht. Die Synchrotronstrahlung die in BC1 erzeugt wird, kann den Absorber nicht treffen, weil sie vorher an der Kammerinnenwand innerhalb des Magneten BC2 hängenbleibt. Sie trifft hier in einem sehr kleinen Winkel auf und verteilt sich auf mehrere Meter, so dass die hieraus resultierenden Intensitäten vergleichsweise gering sind. Da die Kammer innerhalb des BG-Magneten weniger stark nach unten geneigt ist als im BC-Magneten, kann dessen horizontaler Strahlungsfächer den Absorber treffen. Abbildung 13 verdeutlicht die Situation, die mit der des ersten Synchrotronstrahlungsabsorbers vergleichbar ist. Es gibt Eingangsparemeter, bei denen der horizontale Synchrotronstrahlungsfächer des Magneten BC den Rotator gar nicht trifft, und solche bei denen der Absorber einer ganz erheblichen Leistung ausgesetzt ist. Der vertikale Fächer des Magneten BG trifft den Absorber allerdings immer.



**Abb. 13:** Strahlrohr mit  $e^-$ -Strahl und die Synchrotronstrahlung nach dem BC2-Magneten (linke Abbildung) und nach dem BG-Magneten (rechts)

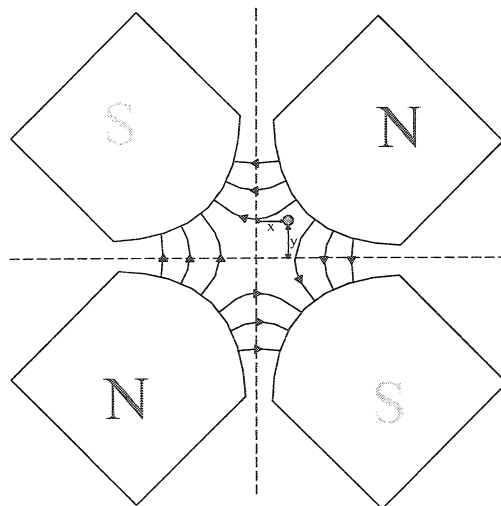
Wie die Leistung die auf diesen Absorber trifft von der vertikalen Richtung und Ablage des Strahls am Anfang des Rotators abhängt, zeigt Abbildung 14 auf der nächsten Seite. Die Maximalleistung die den Absorber treffen kann, wird dann erreicht, wenn den Strahl eine große positive horizontale und vertikale Ablage und eine positive vertikale Richtung hat. Sie beträgt 2.8 kW (bei einer hor. und vert. Ablage von 8 mm und einem vertikalen Eintrittswinkel von 0.05 mrad in den Rotator). Die max. Intensität ist dabei 1.26 kW/cm<sup>2</sup>.



**Abb. 14:** *Abhängigkeit der Synchrotronstrahlung auf den Absorber von der Strahlrichtung und -position beim Eintritt in den Rotator. Die untere Abbildung zeigt den Kontourplot der oberen Grafik in der Draufsicht*

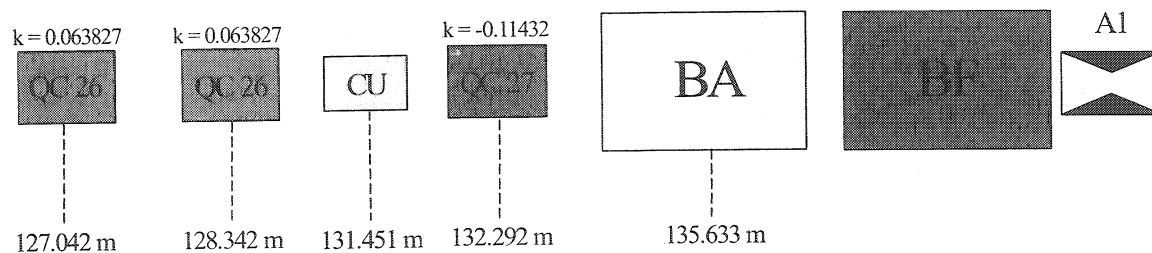
## Synchrotronstrahlung der Quadrupolmagnete

Bevor der  $e^-$ -Strahl in den Rotator eintritt, durchläuft er einige zur Strahlfokussierung notwendige Quadrupolmagnete. Zwar verschwindet das Magnetfeld eines Quadrupols auf der Strahlachse, aber bei einer Abweichung des Strahls von der Sollbahn wächst das Feld linear mit dem Abstand an. Es soll eine Obergrenze für die hierbei erzeugte Synchrotronstrahlungsleistung abgeschätzt werden, um zu ersehen, ob diese in Quadrupolen erzeugte Strahlung, einen wesentlichen Beitrag zur Strahlung liefert, die auf die Absorber trifft. In dieser Abschätzung werden alle Quadrupole berücksichtigt, die sich weniger als 20 m vor dem ersten Rotatormagneten befinden. Die Strahlung aller anderen Quadrupole kann den Absorber A1 schon aus geometrischen Gründen nicht erreichen.



*Abb. 15: Feldlinienverlauf innerhalb eines Quadrupolmagneten. Auf der Strahlachse ist das Feld  $B=0$ . Sonst sieht das Elektron ein B-Feld, das seinem Abstand von der Strahlachse proportional ist.*

Vor dem Rotator befinden sich ein horizontal fokussierender (QC27) und zwei vertikal fokussierende (QC26) Magnete. Die Korrekturspule CU hat ein so schwaches Feld, dass sie keine nennenswerte Strahlung erzeugt.



*Abb. 16: Magnetstruktur vor dem Spinrotator*

Bei der Abschätzung der Synchrotronstrahlung wird angenommen, dass die vertikale und horizontale Ablage des Strahls max. 7 mm beträgt und sich während des Aufenthalts im Magnetfeld nicht verringert. Die radiale Entfernung  $r=(x^2+y^2)^{1/2}$  des Strahls vom Orbit beträgt also max. 10 mm. Die Feldstärke, die in dieser Entfernung herrscht, kann aus dem Feldgradienten berechnet werden:

$$|k| = \frac{e}{p} \cdot \frac{\partial B_x}{\partial y} = \frac{e}{p} \cdot \frac{\partial B_y}{\partial x} \quad (1)$$

Mit  $E=pc$  für hochrelativistische Elektronen und der Entfernung  $r$  von der Strahlachse folgt für das B-Feld:

$$B = \frac{\partial B_x}{\partial y} \cdot r = \frac{|k| \cdot E}{e \cdot c} \cdot r \quad (2)$$

Für den Magneten QC27 erhält man einen Feldgradienten von  $B=10.48$  T/m. In 10 mm Entfernung entspricht das einem Feld von 0.1048 T. Ein einzelnes Elektron würde bei einem solchen Magnetfeld die Leistung  $P_s$  abstrahlen [3]:

$$P_s = \frac{2 \cdot e^2 \cdot c^3 \cdot r_e}{3 \cdot (m_e \cdot c^2)^3} \cdot E^2 \cdot B^2 \quad (3)$$

Hierbei sind  $r_e$  der klassische Elektronenradius und  $m_e$  die Elektronenmasse. Die Energie  $E$  der Elektronen ist 27.5 GeV. Damit ist  $P_s = 501$  nW. Während seines Aufenthalts im Bereich des Magnetfeldes strahlt jedes Elektron also 500 nW Synchrotronstrahlung ab. Im Mittel verbringt das Elektron den Anteil  $L_M/U$  seiner Flugzeit im Magneten.  $L_M$  ist dabei die Länge des Magneten und  $U$  der Umfang des HERA-Rings. Um diesen Faktor ist die mittlere Strahlungsleistung reduziert. Drückt man die Gesamtstrahlungsleistung mit Hilfe des Strahlstromes  $I$  aus, so gilt:

$$P = \frac{2 \cdot e^2 \cdot c^3 \cdot r_e}{3 \cdot (m_e \cdot c^2)^3} \cdot \frac{I}{e \cdot f} \cdot \frac{L_M}{U} \cdot E^2 \cdot B^2 = \frac{2 \cdot e \cdot c^2 \cdot r_e}{3 \cdot (m_e \cdot c^2)^3} \cdot I \cdot L_M \cdot E^2 \cdot B^2 \quad (4)$$

$$P = \frac{2 \cdot r_e}{3 \cdot e \cdot (m_e \cdot c^2)^3} \cdot I \cdot L_M \cdot E^4 \cdot |k|^2 \cdot r^2 \quad (5)$$

Die Gesamtstrahlungsleistung für den Magneten QC27 beträgt bei einem Strahlstrom von 58 mA  $P_{QC27} = 634$  W. Für die beiden Magneten QC26 ergibt sich jeweils eine Strahlungsleistung von  $P_{QC26} = 198$  W. Diese Werte sind gering im Vergleich zu der von den Dipolmagneten des Rotators erzeugten Strahlungsleistung. Selbst diese relativ niedrige Strahlungsleistung tritt nur auf, wenn der Strahl 10 mm vom Orbit entfernt ist. Bei kleineren Abständen nimmt die Leistung quadratisch mit dem Abstand ab, so dass bei einer Strahlablage von z. B. 5 mm  $P_{QC27} = 159$  W und  $P_{QC26} = 50$  W ist. Dazu kommt, dass der Quadrupol QC27 etwa 12 Meter und die Quadrupole QC26 sogar ca. 16 Meter vom ersten Absorber entfernt sind.

## Abschätzung der Absorbentemperatur

Die exakte Temperaturverteilung in den einzelnen Absorbern ist äußerst kompliziert, da diese einerseits ortsabhängig geheizt werden (bestimmt durch die räumliche Lage der Synchrotronstrahlungsfächer), andererseits durch verschiedenste Prozesse aber gekühlt werden. Die Prozesse die grundsätzlich zur Kühlung des Absorbers beitragen könnten sind im Einzelnen: Abstrahlung von Wärmestrahlung durch den erhitzten Absorber, Kühlung durch Luftströmung an der Außenseite, Kühlung durch das Kühlwasser und Wärmeleitung innerhalb des Kupferrohrs. In einem vereinfachten Modell wird angenommen dass die Synchrotronstrahlung vollständig absorbiert wird, und die Kühlung nur durch das Kühlwasser erfolgt. Dies ist insofern gerechtfertigt, als dass man zeigen kann, dass die anderen Kühlprozesse keinen großen Beitrag zur Temperaturänderung des Absorbers beitragen. Die Kühlung durch Luftströmung an der Außenseite wird durch die Bleiabschirmung des Absorbers praktisch völlig ausgeschaltet. Auch die Kühlung durch Abstrahlen von Wärmestrahlung führt nur zu einer geringen Temperaturänderung. Nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz ist die Wärmestrahlungsleistung proportional zur vierten Potenz der Temperatur, also effektiv nur für hohe Temperaturen. Nimmt man für den Absorber eine abstrahlende Oberfläche von  $0.05 \text{ m}^2$  und eine Temperatur von  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  an, so beträgt die abgestrahlte Wärmemenge:

$$P = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 = 0.7 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \cdot 0.05 \text{ m}^2 \cdot (373 \text{ K})^4 = 39 \text{ W} \quad (6)$$

$\varepsilon$  ist der Emissionsgrad ( $\approx 0.7$ ) einer nicht blankpolierten Kupferoberfläche. Diese Leistung kann man im Vergleich zur Heizrate, die ja im kW-Bereich liegt,

vernachlässigen. Die Kühlung des Absorbers erfolgt also hauptsächlich durch das Kühlwasser. Dieses fließt in Ausfräsungen die spiralförmig um den Absorber herumlaufen. Im Folgenden wird ein Modell betrachtet bei dem die Wärmeabfuhr nur durch die Seite des Absorbers erfolgt, auf der die Synchrotronstrahlung trifft. Abbildung 17 verdeutlicht die Situation. In dem dort dargestellten Fall gibt es nur einen Wärmestrom  $j$  nach unten. Die Seitenbereiche des Absorbers leiten nur einen kleinen Teil der Wärme nach oben, weil sie einen relativ großen Wärmewiderstand besitzen. Der Wärmeübergang von der Metallfläche des Absorbers auf das Kühlwasser ist im Detail ein äußerst komplizierter Vorgang, der von vielen Größen abhängt, vor allem aber vom Strömungszustand des Wassers. In einem Modell wird angenommen, dass zwischen der Metalloberfläche des Absorbers und dem vorbeiströmenden Kühlwasser ein Temperatursprung herrscht. Der Wärmeübergang ist dann proportional der Kontaktfläche und dem Temperatursprung. Die Proportionalitätskonstante ist die Wärmeübergangszahl  $\alpha$ .

$$j = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \quad (7)$$

Die Kontaktfläche ist etwa  $110 \text{ cm}^2$  groß. Die Wärmeübergangszahl  $\alpha$  hängt von der Strömungsgeschwindigkeit des Wassers ab. Die Geschwindigkeit beträgt ca.  $2.35 \text{ m/s}$ . Damit ist  $\alpha \approx 5000 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ . Die Temperaturdifferenz zwischen Metallfläche und Wasser lässt sich somit berechnen:

$$P = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \quad (8)$$

$$\Delta T = \frac{P}{\alpha \cdot A} = \frac{3000 \text{ W}}{5000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \cdot 0.011 \text{ m}^2} = 55 \text{ K} \quad (9)$$

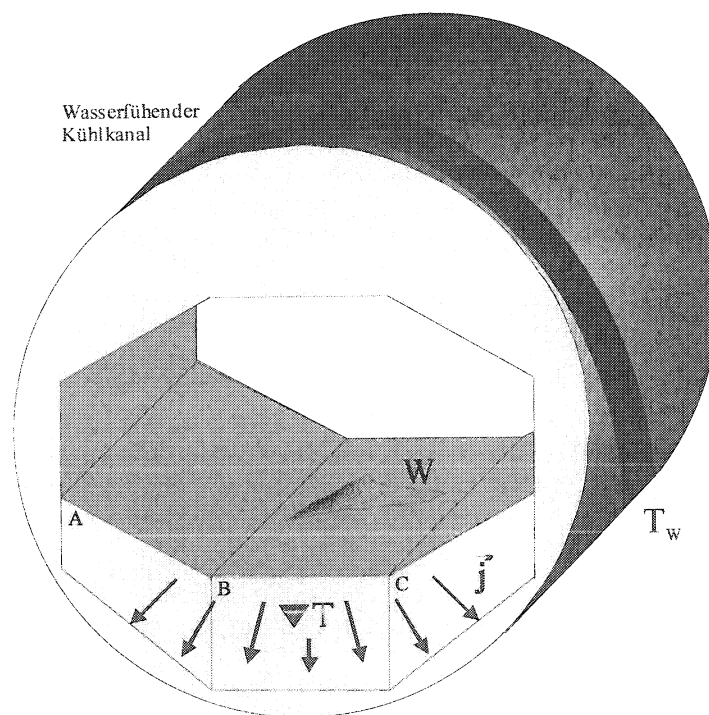
Der Temperaturgradient zwischen Metall und Wasser muss also  $55 \text{ K}$  sein, damit das Wasser  $3000 \text{ W}$  Wärmeleistung abtransportieren kann. Die absolute Absorber-



temperatur erhält man, wenn man zu dieser Temperaturdifferenz noch die Wassertemperatur  $T_w$  dazuaddiert. Dabei muss beachtet werden, dass sich das Wasser bei Durchströmen des Absorbers um  $\Delta T$  erwärmt. Der Volumenstrom des Wassers beträgt  $\approx 200$  ml/s. Die damit verbundene Erwärmung ist gegeben durch:

$$\Delta T = \frac{3000 \text{ W}}{4.2 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}} \cdot 200 \frac{\text{g}}{\text{s}}} = 3.6 \text{ K} \quad (10)$$

Strömt das Wasser durch den Absorber und nimmt dabei die gesamte von der Synchrotronstrahlung erzeugte Wärme auf, so wird es sich dabei also um 3.6 K erwärmen.



*Abb. 17: Vereinfachte Darstellung der Temperaturverhältnisse in einem Absorber. Die Synchrotronstrahlung stellt eine Wärmequelle der Leistung  $W$  dar. Hieraus resultiert ein Temperaturgradient  $\nabla T$  und ein Wärmestrom  $j$ .*

Das anströmende Wasser hat bereits eine Temperatur von  $T_w=30^\circ\text{C}$ , so dass sich die Absorbtemperatur an den Kühlkanälen zu  $30^\circ\text{C}+3.6^\circ\text{C}+55^\circ\text{C}=89^\circ\text{C}$  aufaddiert. Hinzu kommt noch ein Temperaturgradient im Absorbermaterial selber, der von dessen Wärmewiderstand herrührt (der Absorber ist an der Auftreffstelle der Synchrotronstrahlung am heißesten und an der Kontaktstelle zum Kühlwasser am kältesten). Um den Temperaturgradienten und damit die maximale Temperatur im Absorber zu erhalten, muss der Wärmewiderstand des Absorbers in diesem Bereich berechnet werden. Dieser wird dazu in drei Teilbereiche A, B und C eingeteilt (s. Abbildung 17) und dann für jeden Teil der Wärmewiderstand einzeln berechnet. Bei einer Länge des Absorbers von 11 cm ergibt sich für die beiden Seitenteile A und C ein Wärmewiderstand  $R_{\text{Th}}^{\text{A,C}}$  von:

$$R_{\text{Th}} \approx \frac{d}{\lambda \cdot A} = \frac{0.022 \text{ m}}{384 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \cdot 0.00385 \text{ m}^2} = 0.0149 \frac{\text{K}}{\text{W}} \quad (11)$$

Hierbei ist  $d$  die mittlere Dicke und  $A$  die Querschnittsfläche in Richtung des Wärmestroms.  $\lambda$  ist die Wärmeleitfähigkeit von Kupfer. Der mittlere Teil hat den Wärmewiderstand  $R_{\text{Th}}^{\text{B}}$  :

$$R_{\text{Th}}^{\text{B}} = \frac{d}{\lambda \cdot A} = \frac{0.0269 \text{ m}}{384 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \cdot 0.00462 \text{ m}^2} = 0.0152 \frac{\text{K}}{\text{W}} \quad (12)$$

Der Gesamtwärmewiderstand ergibt sich aus der Addition der Kehrwerte der einzelnen Widerstände:

$$\frac{1}{R_{\text{Th}}} = \frac{1}{R_{\text{Th}}^{\text{A}}} + \frac{1}{R_{\text{Th}}^{\text{C}}} + \frac{1}{R_{\text{Th}}^{\text{B}}} \Rightarrow R_{\text{Th}} = 0.005 \frac{\text{K}}{\text{W}}. \quad (13)$$

Mit diesem Wärmewiderstand kann nun der Temperaturgradient innerhalb des Absorbers berechnet werden. Für den Zusammenhang zwischen Temperaturdifferenz, Wärmefluss und Wärmewiderstand gilt:

$$j = \frac{\Delta T}{R_{\text{Th}}} \Rightarrow \Delta T = 0.005 \frac{\text{K}}{\text{W}} \cdot 3000 \text{ W} = 15 \text{ K}. \quad (14)$$

Der Temperaturunterschied von dem Ort wo die Synchrotronstrahlung den Absorber trifft bis zum Kühlwasser beträgt also 15 K. An seiner heißesten Stelle kann der Absorber deswegen bis zu  $89^\circ\text{C} + 15^\circ\text{C} = 104^\circ\text{C}$  heiß werden, wenn 3 kW Synchrotronstrahlung auf ihn treffen.

Thermische Belastungen der Kammer entstehen vor allem dadurch, dass bei Strahlverlust die Heizwirkung der Synchrotronstrahlung schlagartig nachlässt und die Absorbtemperatur durch die kühlende Wirkung des Wassers schnell sinkt.

Näherungsweise lässt sich der Abkühlvorgang durch eine Exponentialfunktion beschreiben [4]:

$$T_{\text{Abs}}(t) = (T_{\text{Abs},0} - T_{\text{W}}) \cdot e^{-\frac{\alpha \cdot A}{C_{\text{Cu}} \cdot m_{\text{Abs}}} t} + T_{\text{W}} \quad (15)$$

Hierin bedeuten  $T_{\text{Abs}}$  die zeitanhängige Absorbtemperatur nach dem Strahlverlust (also nach dem Verlust der Wärmequelle),  $T_{\text{Abs},0}$  die Temperatur des Absorbers während der Einstrahlung von Synchrotronstrahlung (Anfangsbedingung),  $T_{\text{W}}$  ist die Kühlwassertemperatur,  $C_{\text{Cu}}$  ist die spezifische Wärmekapazität von Kupfer und  $m_{\text{Abs}}$  die Masse des Absorbers.

Es wird hier wieder nur der Teil des Absorbers betrachtet in dem die Synchrotronstrahlung auftrifft (also der untere Teil in Abb. 17). Einsetzen der numerischen Werte ergibt für den Abkühlvorgang:

$$T_{\text{Abs}}(t) = (T_{\text{Abs},0} - T_{\text{W}}) \cdot e^{-\frac{\alpha \cdot A}{C_{\text{Cu}} \cdot m_{\text{Abs}}} \cdot t} + T_{\text{W}} = (T_{\text{Abs},0} - T_{\text{W}}) \cdot e^{-\frac{t}{19\text{s}}} + T_{\text{W}} \quad (16)$$

Nach etwa 19 Sekunden hat sich die Temperaturdifferenz zwischen dem Absorber und dem Wasser auf den 1/e-ten Teil reduziert. Für den Fall der 3 kW-Strahlung heißt das, dass der Absorber bei Strahlverlust innerhalb von einer Minute um 72 K abkühlt. Diese schnelle Temperaturänderung hat ihren physikalischen Grund vor allem in dem großen Unterschied der Wärmekapazitäten des Kühlmittels (Wasser,  $C_{\text{W}}=4.2 \text{ Jg}^{-1}\text{k}^{-1}$ ) und des zu kühlenden Materials (Kupfer,  $C_{\text{Cu}}=0.381 \text{ Jg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ), die sich um mehr als einen Faktor 11 unterscheiden. Schließlich endet der Abkühlungsvorgang bei einer Temperatur, die der des Kühlwassers entspricht. Beim Wiederanschalten des e<sup>-</sup>-Strahls steigt die Temperatur dann wieder auf ihren stationären Wert an. Der Absorber ändert bei der Reduktion seiner Temperatur vom Maximalwert bei 3kW Synchrotronstrahlung auf die Kühlwassertemperatur seine Länge um  $\Delta L$ :

$$\Delta L = \eta \cdot L_{\text{Abs}} \cdot \Delta T = 16.5 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{K}} \cdot 11 \text{ cm} \cdot 75 \text{ K} = 136 \mu\text{m} \quad (17)$$

Bei jedem Strahlverlust ändert sich die Länge des Absorbers aufgrund der Abkühlung also um 0.136 mm innerhalb kurzer Zeit. Ist der Strahl wieder vorhanden, dann beginnt die Temperatur wieder zu steigen und der Absorber dehnt sich wieder aus. Das Material ist also vor allem beim Verlust des Strahls großen thermischen Belastungen ausgesetzt.

Zu einem extremen Temperaturanstieg in sehr kurzer Zeit würde es kommen, wenn die Kühlung aus irgendeinem Grund ausbleibt (Verlust von Kühlwasser, verstopfte Leitung,...). Dann nämlich würde die Synchrotronstrahlungsenergie nicht mehr abtransportiert werden und zu einer sehr raschen Erwärmung des Absorbers

führen. Am Anfang steigt die Absorbtemperatur linear mit der Zeit an, solange, bis sie durch die Aussendung von Wärmestrahlung und Wärmeleitung begrenzt wird. Wenn man annimmt, dass ein 3 kW-Strahlungsfächer den Absorber trifft, so ist die Rate, mit der die Temperatur nach einem Ausbleiben des Kühlwassers ansteigt, gegeben durch:

$$3000 \text{ W} = C_{\text{Cu}} \cdot m_{\text{Abs}} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (18)$$

Damit folgt für die Temperaturänderung mit der Zeit:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{3000 \text{ W}}{C_{\text{Cu}} \cdot m_{\text{Abs}}} = \frac{3000 \text{ W}}{0.381 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot \text{K}} \cdot 5500 \text{ g}} = 1.4 \frac{\text{K}}{\text{s}} \quad (19)$$

Im Fall eines Kühlwasserausfalls steigt die Absorbtemperatur also extrem schnell an, etwa 1.4 K pro Sekunde (bei 3 kW Strahlung).

## Zusammenfassung

Es wurde die Synchrotronstrahlung untersucht, die entsteht, wenn sich der  $e^-$ -Strahl durch die Magnete bewegt, die im HERA-Ring den Spinrotator bilden. Hierbei wurde simuliert, welcher Anteil der Strahlung auf die hinter einzelnen Magneten angeordneten Synchrotronstrahlungsabsorber entfällt, und wie stark diese Synchrotronstrahlungsleistung mit einem Abweichen des Strahls von der Sollbahn variiert. Es zeigt sich, dass die einzelnen Absorber sehr unterschiedlichen Strahlungsleistungen ausgesetzt sind. Dies hängt davon ab, ob ein horizontaler oder vertikaler Synchrotronstrahlungsfächer den Absorber trifft, und davon, hinter welchen Magneten sich der Absorber befindet. Die Magnete erzeugen aufgrund ihrer unterschiedlichen Längen und Feldstärken unterschiedliche Strahlungsleistungen. Die maximalen Strahlungsleistungen auf die einzelnen Absorber sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Absorber	Entfernung vom WWP [m]	Magnete	$I_{\max}$ [kW/cm <sup>2</sup> ]	$P_{\max}$ [kW]
A1	143,7	BA + BF	1.87	3.1
A2	164,7	BB2 + BF	2.36	4.0
A3	171,2	BF + BG	0.84	1.3
A4	189,2	BC2 + BG	1.26	2.8

*Tab. 1: Max. Strahlungsleistung und Intensität auf die Absorber und die sie erzeugende Magneten. Dabei ist angenommen, dass die Strahlablage beim Eintritt in den Rotator max. 8 mm ist.*

Die Synchrotronstrahlung die durch die vor dem Rotator angeordneten Quadrupolmagnete entsteht, ist auch für große Strahlablagen vergleichsweise gering.

Die thermische Belastung der Absorber macht sich nicht nur in einer konstant hohen Temperatur der Absorber bemerkbar, sondern vor allem auch in schnellen thermischen Kontraktionen und Expansionen bei Strahlverlust, weil es dann innerhalb des Absorbermaterials zu schnellen Temperaturänderungen kommt.

#### Danksagung:

Mike Seidel und Joachim Keil sei herzlich für die Bereitstellung der Simulationssoftware gedankt.

#### Literatur:

- [1] A. A. Sokolov and I.M. Ternov , Sov. Phys. Doklady 8, 1203 (1964)
- [2] Klaus Steffen "Aufbau der Vakuumkammer im Rotatorbereich", DESY HERA 87-21 (August 1987)
- [3] John David Jackson, "Classical Electrodynamics", 1999 John Wiley & Sons, New York
- [4] Bohrmann, Pitka, Stöcker, Terlecki; "Physik für Ingenieure", Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main (1993)