

Interner Bericht  
DESY H5/71-4  
April 1971

Feldberechnungen für die Magnete

im Speicherring

DESY-Bibliothek  
21. MAI 1971

H. Wiedemann



## I n h a l t :

	Seite
1. Einleitung	1
2. Ablenkmagnete DM	3
3. Normale Quadrupole DQ	6
4. Große Quadrupole WQ	9
5. Normale Sextupole DS	12
6. Sextupol in der Wechselwirkungszone WS	19
7. Dipolfelder in den Quadrupolen DQ	22
8. Berechnung von Strahlsteuerspulen	24
9. Sextupole in den Quadrupolen DQ	27
10. Einfluß der Polbreite auf die Genauigkeit von Quadrupolen	30
11. Einfluß der Polbreite auf die Genauigkeit von Sextupolen	32



## 1. Einleitung

Mit Hilfe des Programms MARE-A wurden beim CERN die magnetischen Feldverteilungen für verschiedene Multipole, welche in den Speicherring bei DESY eingebaut werden, berechnet (s. Abb. 1).

Die Feldverteilungen wurden nur zwei-dimensional berechnet, d. h. Endfeldeinflüsse blieben unberücksichtigt.

Ziel der Berechnungen war, die Polkontur der Multipole so zu bestimmen, daß die Multipolstärken über den für den Strahl notwendigen Bereich genügend homogen werden.

Außerdem wurden spezielle Feldverteilungen zur Erzeugung eines Dipols und Sextupols in einem Quadrupol berechnet.

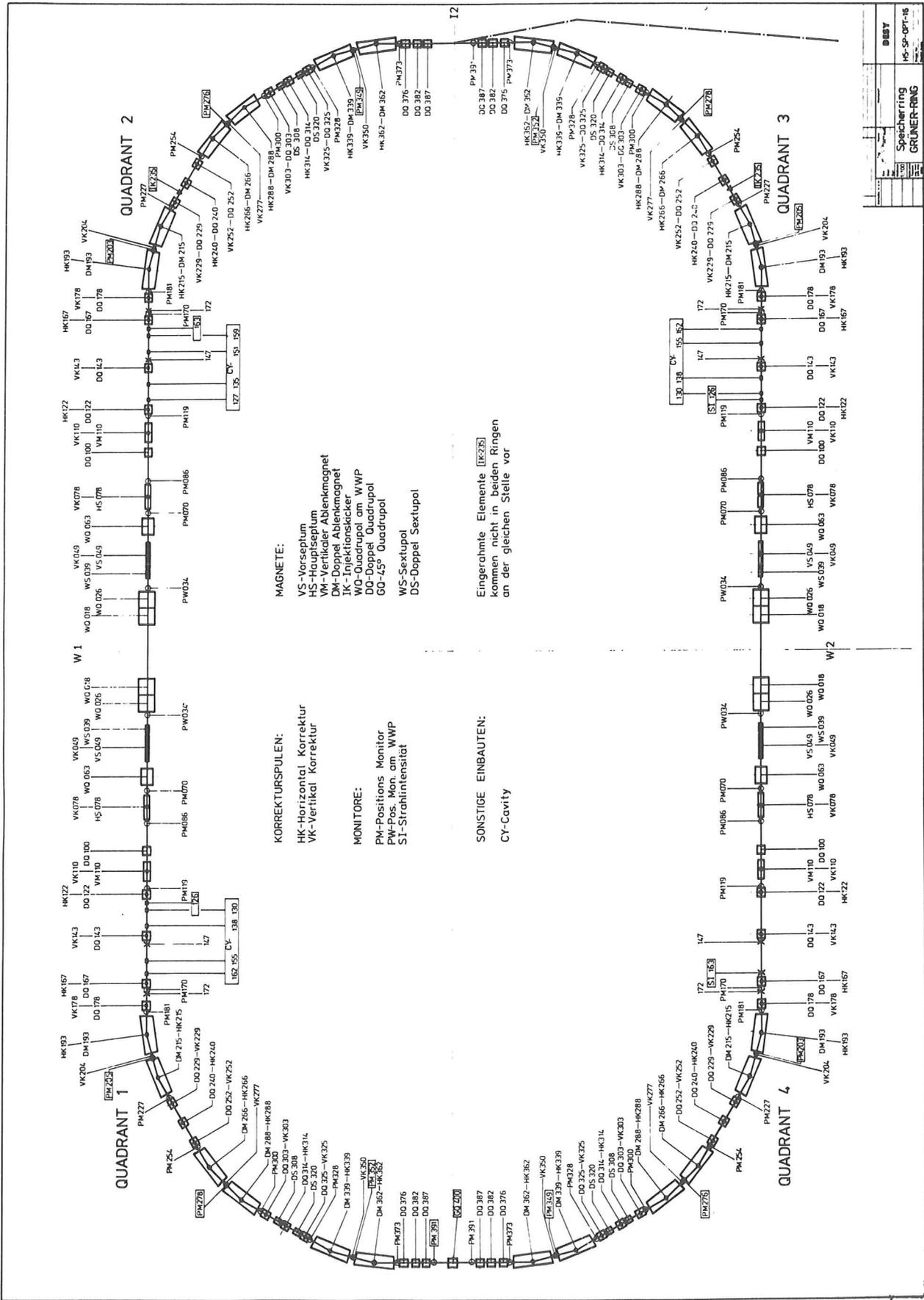


Abb. 1

## 2. Ablenkmagnete DM

Aufgrund von Feldberechnungen für verschiedene Geometrien der Polkontur und der Anordnung der Spulen (DESY-H5/1) wurde der in Abb. 2 dargestellte Querschnitt für die Ablenkmagnete DM ausgewählt.

In der Abb. 3 sind die Abweichungen des Feldes von der Feldstärke im Zentrum des Magneten aufgezeichnet. Die für den Betrieb des Speicherringes gewünschte Homogenität des Magnetfeldes von  $\pm 2 \cdot 10^{-4}$  ist in einem Bereich von  $H \times B = 76 \times 93 \text{ mm}^2$  erfüllt. Die maximale Strahlhöhe ist 40 mm und die maximale Strahlbreite unter Berücksichtigung aller Variationsmöglichkeiten der Optik beträgt 95 mm; d. h. bei extremen Arbeitspunkten wird der oben definierte Bereich geringfügig überschritten.

# Speicherringablenkmagnet DM

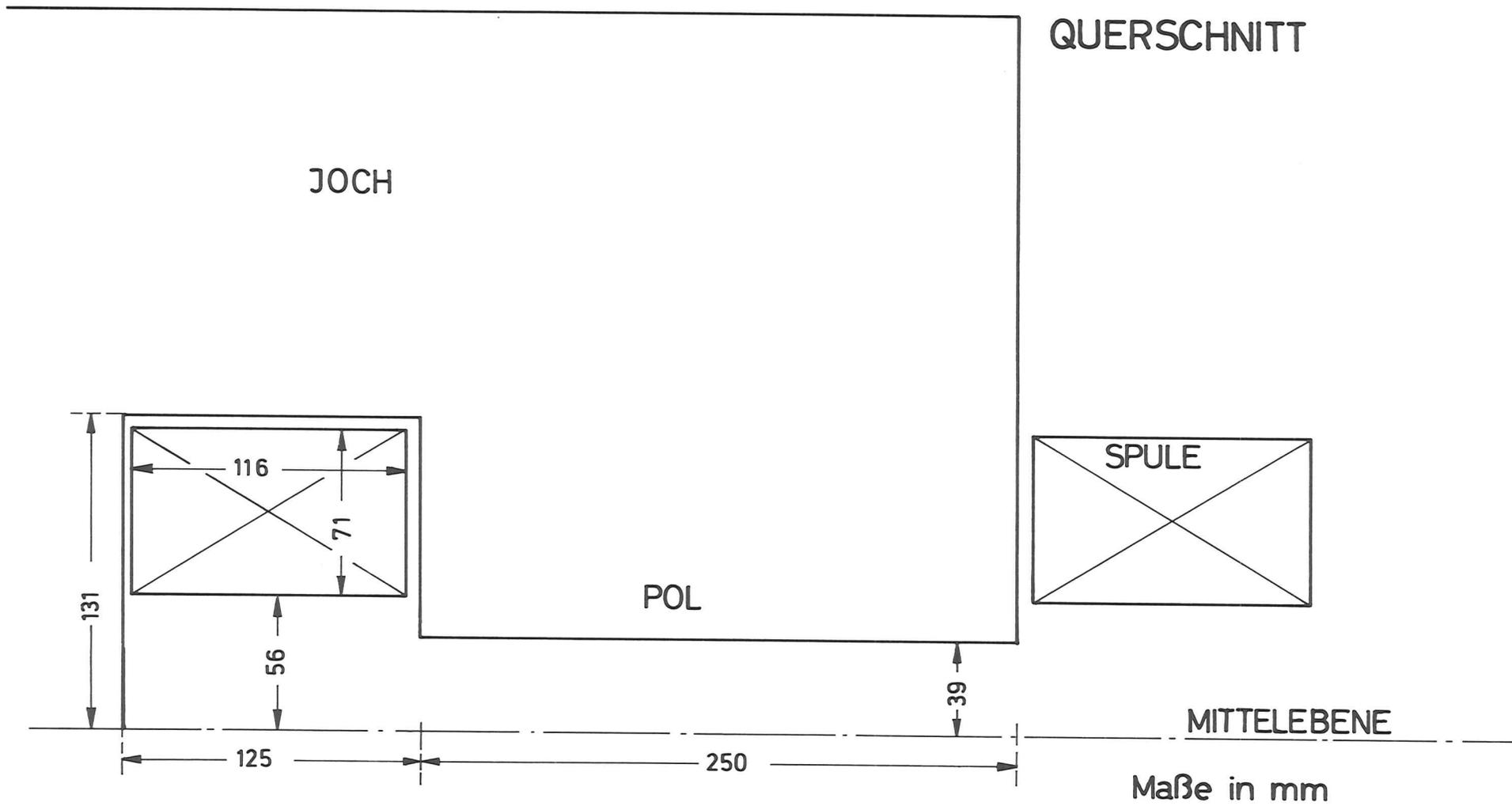


Abb. 2

# Speicherringablenkmagnet DM

PARAMETER:  $\frac{\Delta B}{B_0}$

POL

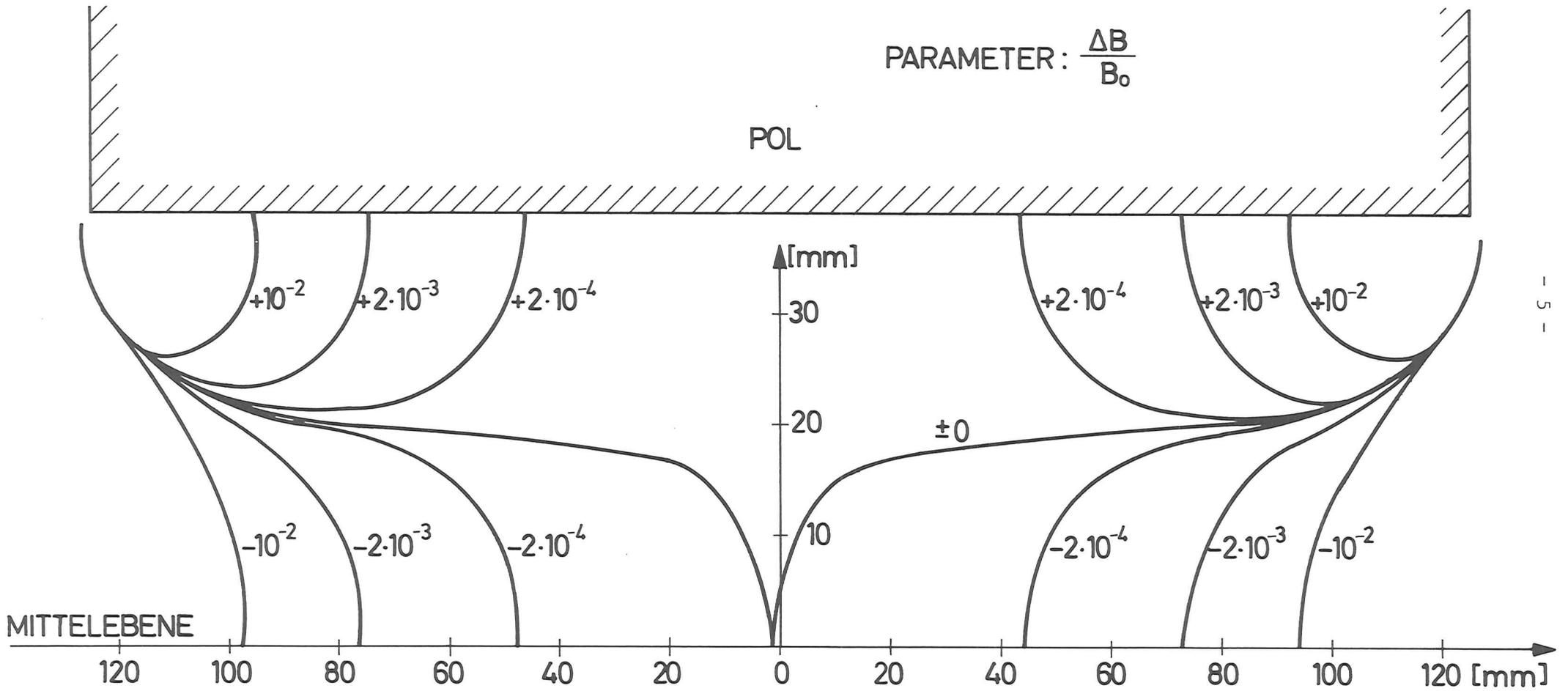


Abb. 3

### 3. Normale Quadrupole DQ

Die Apertur des normalen Quadrupols mußte gegenüber den Rechnungen von 1969 DESY-H5/1 von 6 cm auf 8 cm vergrößert werden, so daß eine neue Berechnung der Polkontur erforderlich wurde. Der Querschnitt des Quadrupols ist aus Abb. 4 ersichtlich.

In Abhängigkeit vom Tangentenansatz an die Hyperbelkontur ist in Abb. 5 der Gradientenverlauf in der vertikalen bzw. horizontalen Mittelebene aufgetragen. Der optimale Tangentenpunkt liegt nach den vorliegenden Rechnungen bei  $T = 84$  mm; die endgültige Wahl des Tangentenpunktes für den Bau der Quadrupole wird jedoch erst nach Vermessung des Prototyps getroffen.

Da die Strahldurchmesser für alle vorkommenden Variationen der optischen Parameter - ausgenommen die Injektion - kleiner als 100 mm sind, kann mit einer Homogenität des Gradienten von

$$\left| \frac{\Delta g}{g} \right| < 4 \cdot 10^{-4} \quad \text{für } r < 50 \text{ mm}$$

gerechnet werden.

Bei der Injektion jedoch durchtritt der eingeschossene Strahl in einem Abstand von 57 bis 70 mm von der Mittelebene den ersten Quadrupol nach dem Injektionsseptum. Für diesen Strahl sind die Fehler im Gradienten.

$$1 \cdot 10^{-4} < \left| \frac{\Delta g}{g} \right| < 9 \cdot 10^{-3}$$

Da die Emittanz dieses Injektionsstrahls wesentlich kleiner ist als die Akzeptanz des Speicherringes hat dieser Fehler keinen Einfluß auf den Injektionswirkungsgrad.

# Geometrie des Quadupols DQ

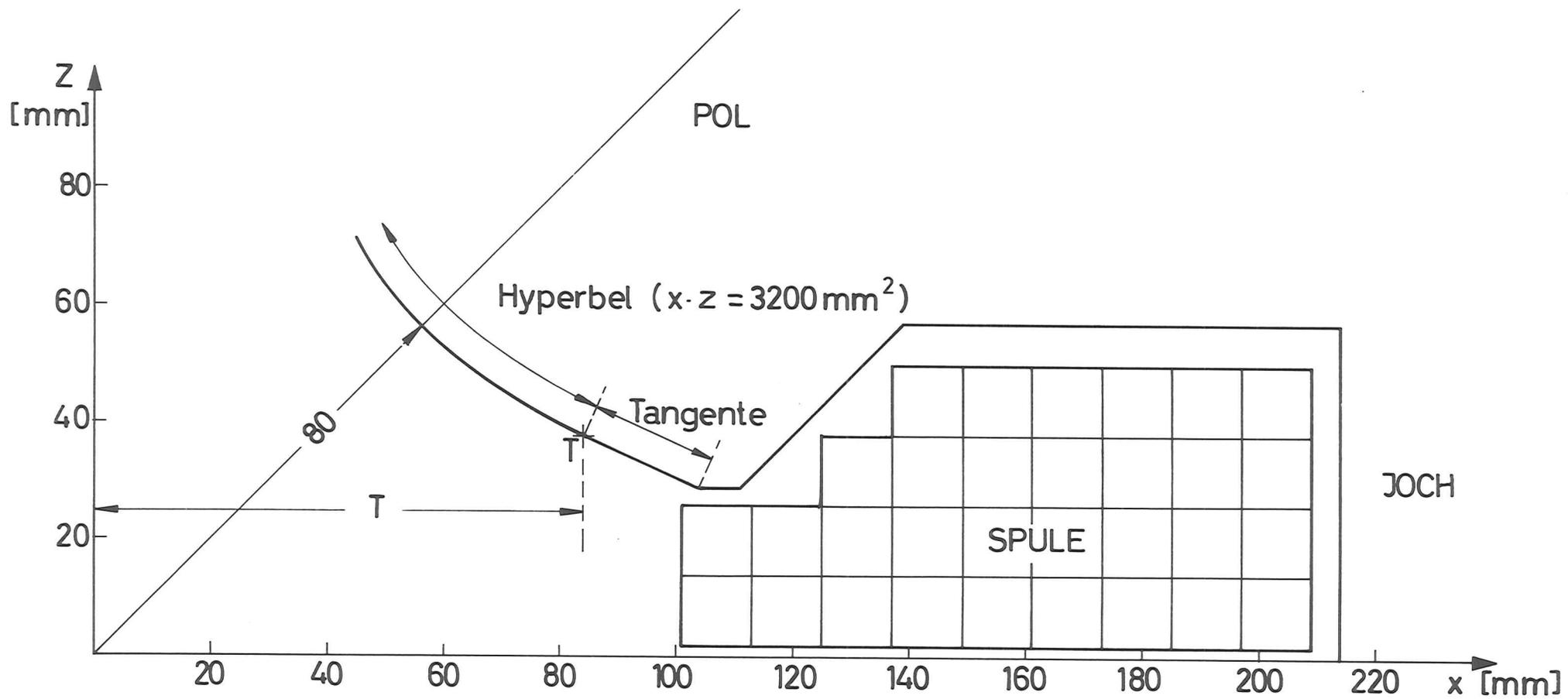


Abb. 4

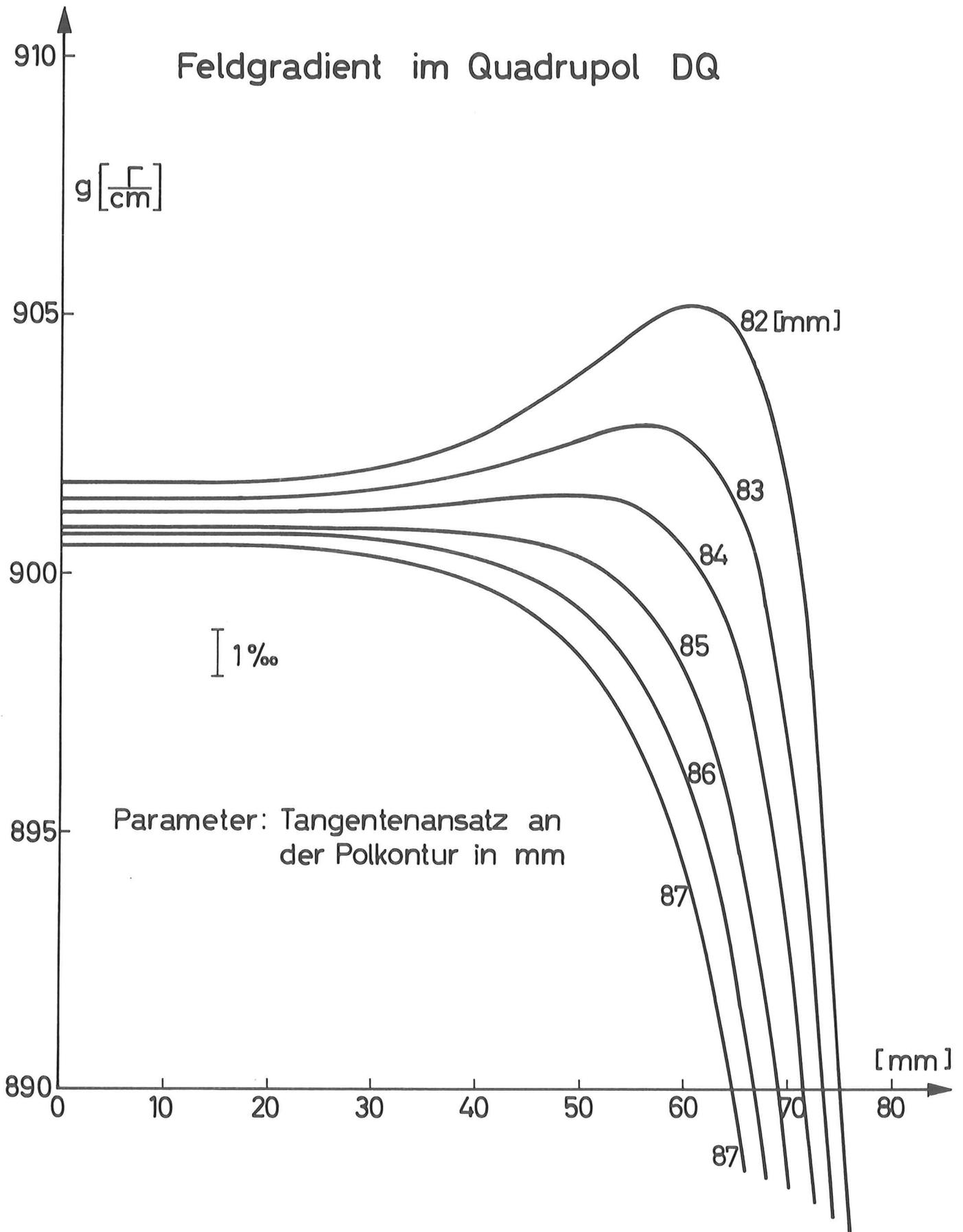


Abb. 5

#### 4. Große Quadrupole WQ

Der Querschnitt des Quadrupols WQ ist in Abb. 6 dargestellt. Analog wie beim Quadrupol DQ wurde der Tangentenansatzpunkt am Polprofil variiert. Aus der Abb. 7 ergibt sich als optimaler Tangentenansatzpunkt  $T = 198$  mm.

Für die Sollakzeptanz des Speicherringes in der vertikalen Ebene von  $\epsilon_z = 8$  mradmm und einen Kreuzungswinkel am Wechselwirkungspunkt von 12 mrad reicht der Strahl in der vertikalen Ebene bis zu  $z = 18$  cm. Wie die Abb. 7 zeigt, ist in diesem Bereich der Fehler im Gradienten schon einige Prozent groß. Da die Sollakzeptanz des Speicherringes in der vertikalen Ebene jedoch nur bei sehr niedrigen Energien vom Strahl beansprucht wird, beeinträchtigt dieser Fehler im Gradienten im allgemeinen nicht die Güte der linearen Optik. Auch bei sehr niedrigen Energien kann durch Vergrößern der Taille im Wechselwirkungspunkt die Strahldimension in den großen Quadrupolen WQ verringert werden. Die Einbuße an Luminosität ist dabei gering.

Somit ergibt sich eine Homogenität des Gradienten von

$$\left| \frac{\Delta g}{g} \right| < 2,5 \cdot 10^{-4} \quad \text{für } r < 150 \text{ mm}$$

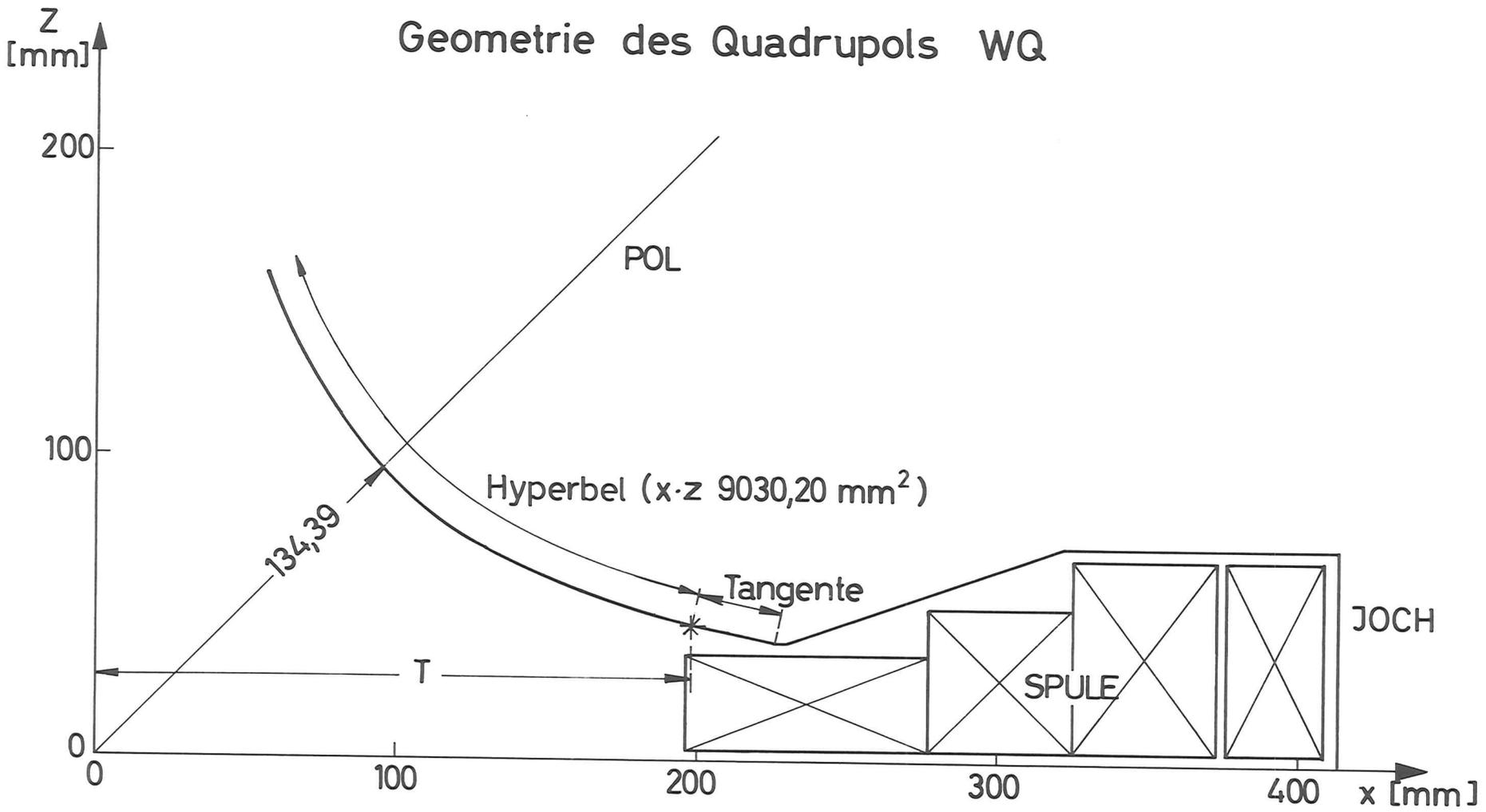


Abb. 6

# Feldgradient im Qudrupol WQ

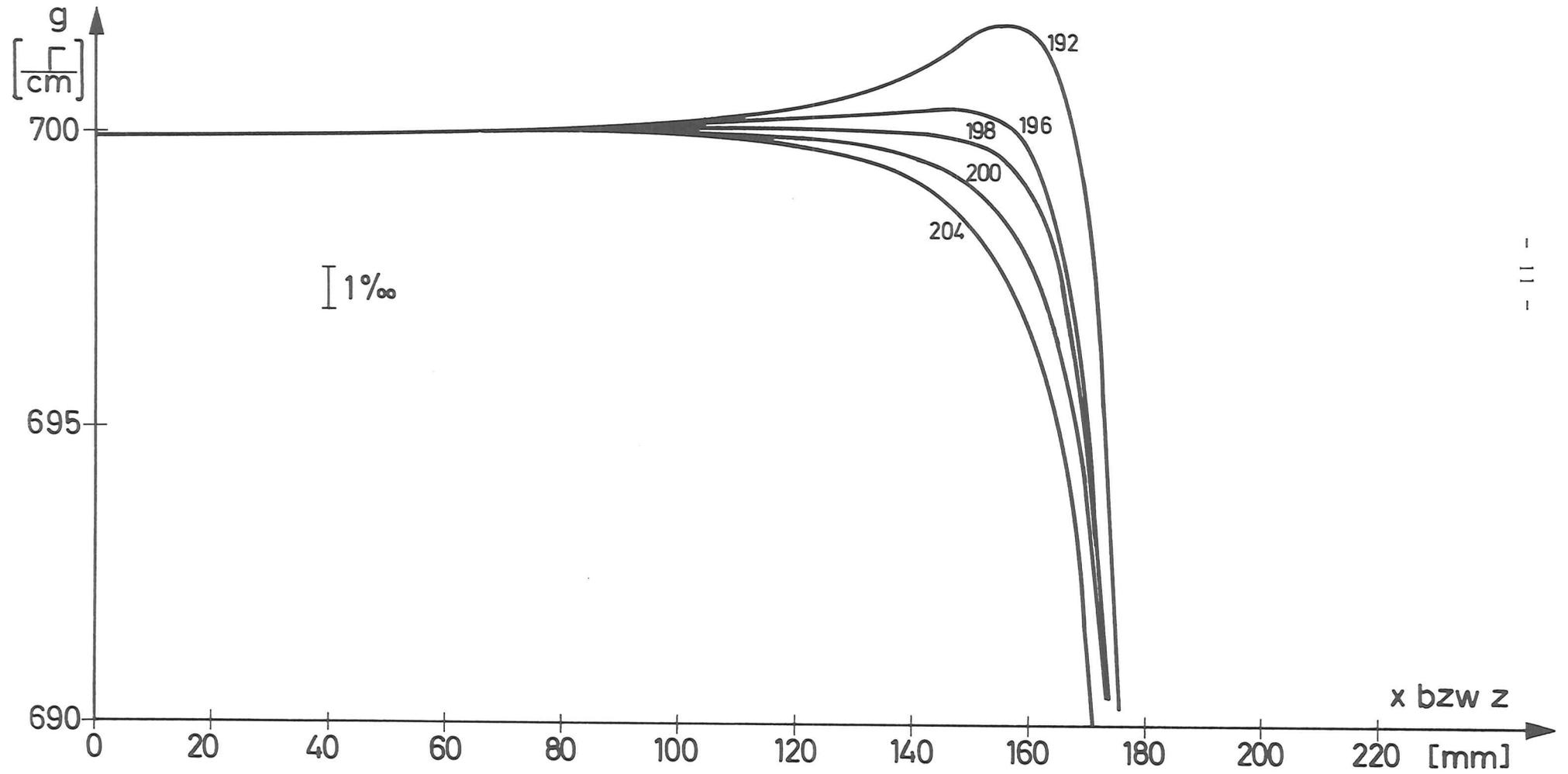


Abb. 7

## 5. Normale Sextupole

Neben den Ablenkmagneten und Quadrupolen werden im Speicherring auch Sextupole zur Korrektur der Chromatizität benötigt. Die Abb. 8 zeigt einen Querschnitt durch den normalen Sextupol.

Bei der vorgegebenen Orientierung der Pole sind die Äquipotentiallinien gegeben durch:

$$(5.1) \quad V = \text{const.} \left(x^2 - \frac{1}{3}z^2\right) z$$

Bei einem Polabstand von der Mittelachse von  $R = 80$  mm ist die Kontur eines Sextupols gegeben durch

$$(5.2) \quad \left(x^2 - \frac{1}{3}z^2\right) z = -\frac{1}{3}R^3 = 170666,67 \text{ mm}^3$$

oder

$$(5.3) \quad x = \frac{z^3 - R^3}{3z}$$

Führt man statt  $z$  eine neue Variable ein:  $z = \delta + R$ , so kann Formel (5.3) für die Polkontur vereinfacht werden ( $\delta \ll R$ ).

$$(5.4) \quad x^2 = R \cdot \delta$$

Bei den hier infrage kommenden Sextupolen ist der relative Unterschied in der Sextupolstärke zwischen dem genauen Profil (5.3) und dem Profil (5.4) kleiner als  $10^{-3}$ , kann also unbeachtet bleiben.

Analog wie beim Quadrupol wurde durch Variation des Tangentenansatzpunktes an das Sextupolprofil die Homogenität der Sextupolstärke untersucht. In Abb. 9 sind die Sextupolstärken in Richtung zur Spule bzw. in Richtung zum Pol in Abhängigkeit zum Tangentenansatzpunkt aufgetragen. Es zeigt sich, daß der Tangentenansatzpunkt bei  $T = 90$  mm liegen sollte. Dieser Fall ist in Abb. 10 noch einmal gesondert dargestellt. Bis zu einem Radius von  $r = 50$  mm ist die Sextupolstärke auf besser als 1 % konstant. Der Strahl hat am Orte

# Querschnitt durch den Sextupol DS

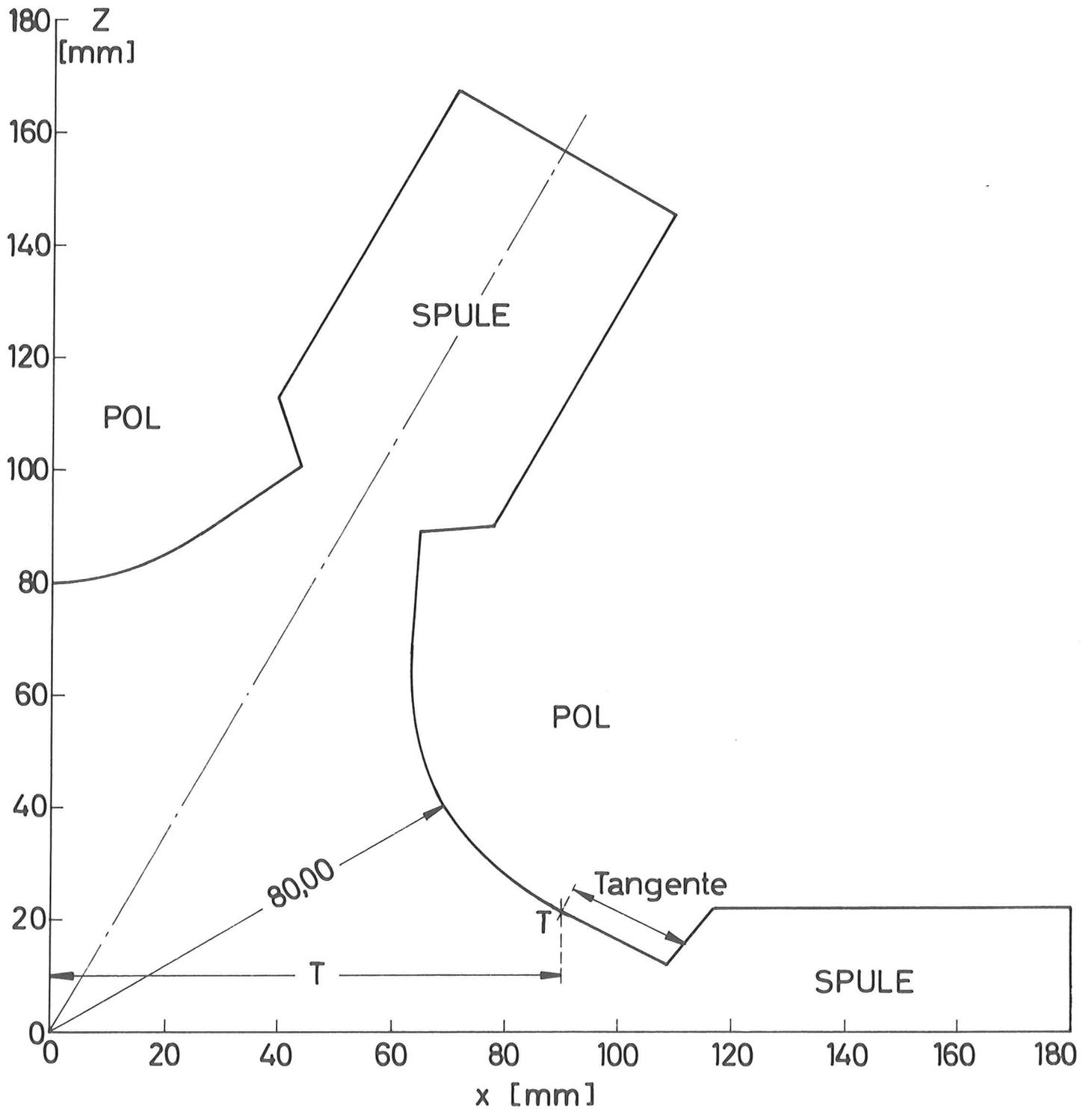


Abb. 8

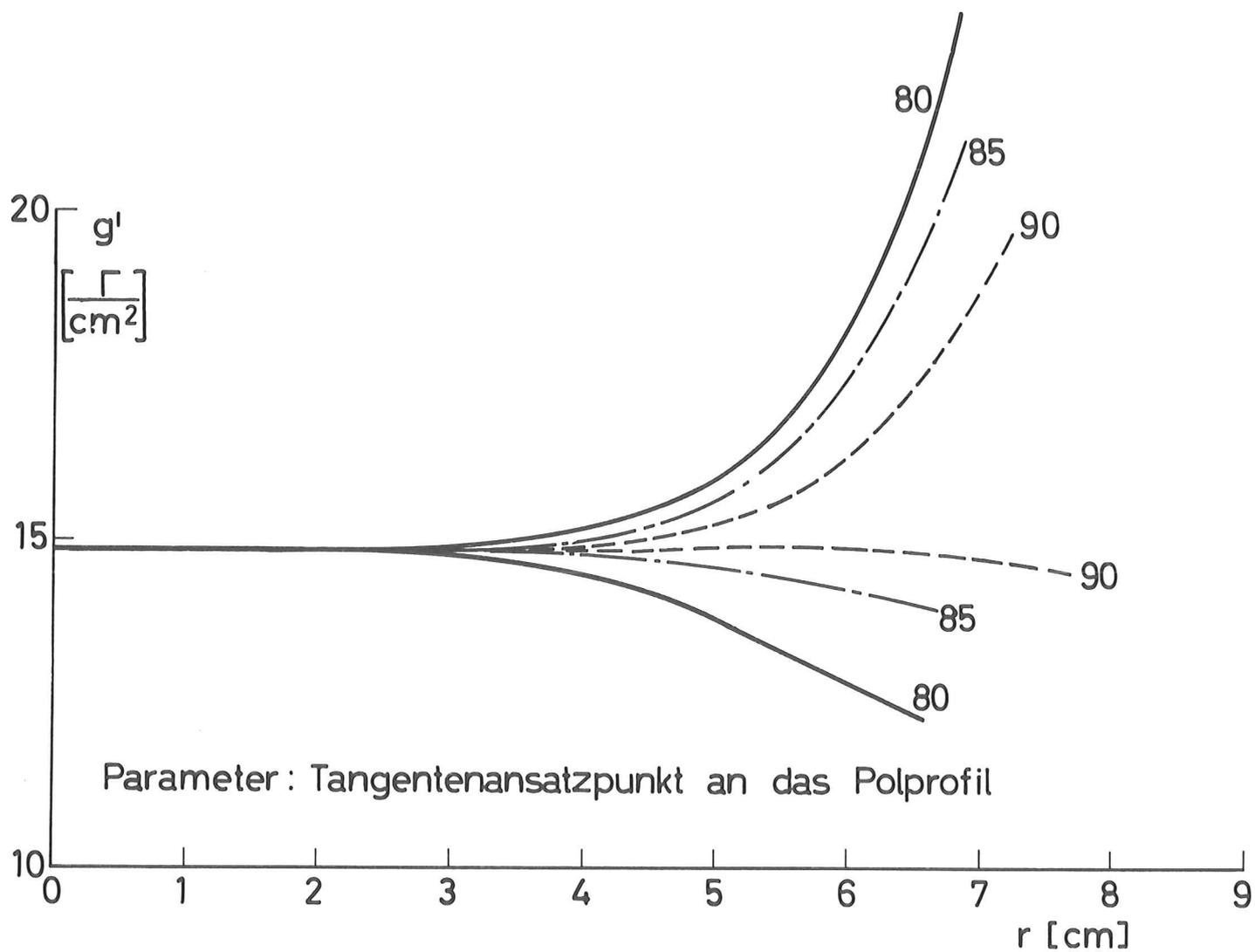


Abb. 9

# Homogenität der Sextupolstärke im DS

(T = 90 mm)

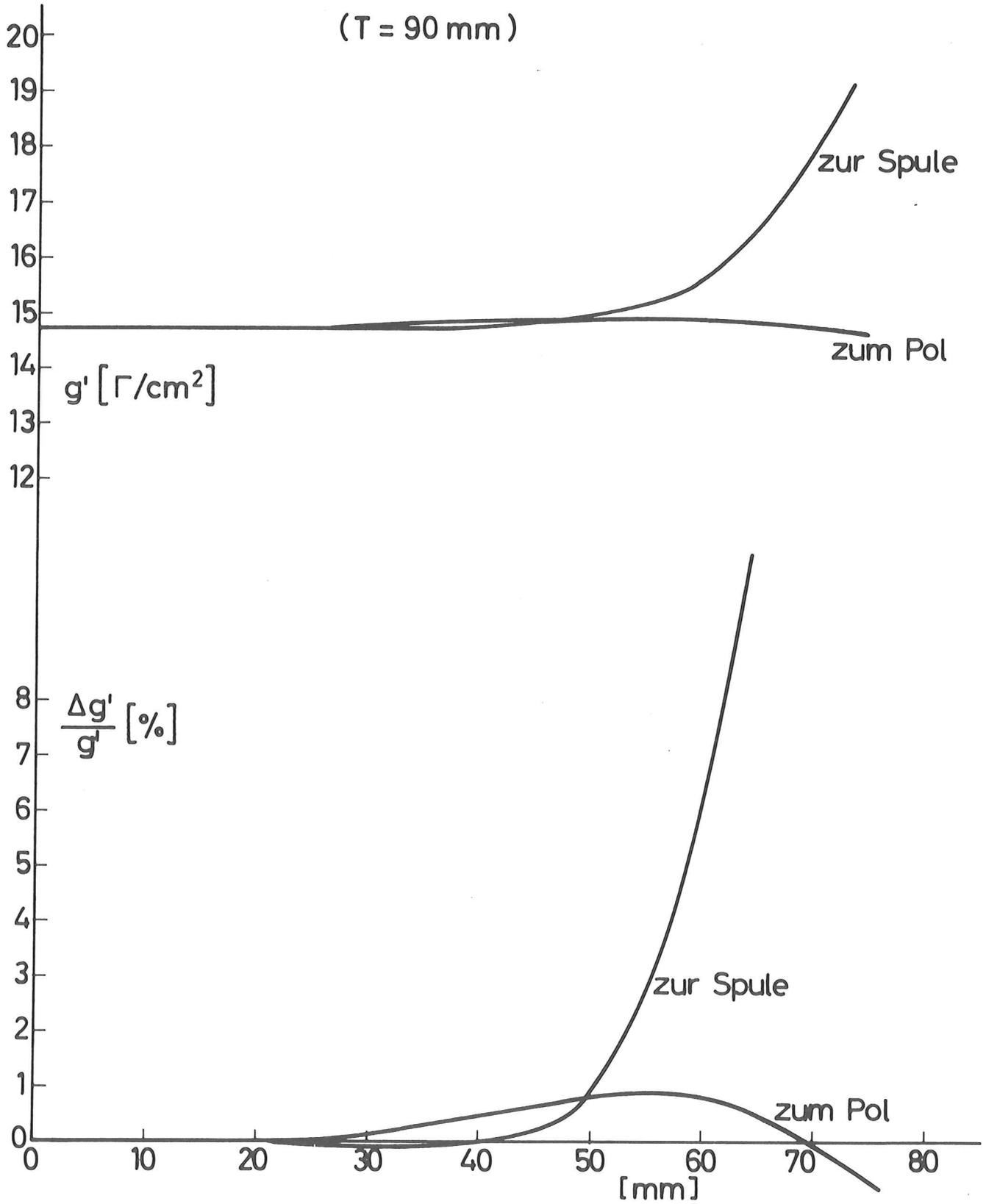


Abb. 10

dieser Sextupole maximal einen Durchmesser von 74 mm horizontal und von 29 mm vertikal. Während der Injektion wird wegen der Injektionskickerbeule der Strahl nach einer Seite maximal 45 mm ausgelenkt. In normalen Betriebsfällen kann wie Abb. 10 zeigt also mit einer Homogenität in der Sextupolstärke im Bereich des Strahls von etwa 1 ‰ gerechnet werden.

Zur Vereinfachung der Sextupolfertigung wurde die Qualität eines Sextupols mit einem Profil wie in Abb. 11 berechnet. Das Ergebnis dieser Rechnung ist in Abb. 12 dargestellt. Die Homogenität der Sextupolstärke ist wesentlich geringer, jedoch scheint eine Verbesserung durch Änderung des Winkels zwischen den begrenzenden Flächen des Polprofils möglich.

### Querschnitt durch einen Sextupol mit vereinfachtem Profil

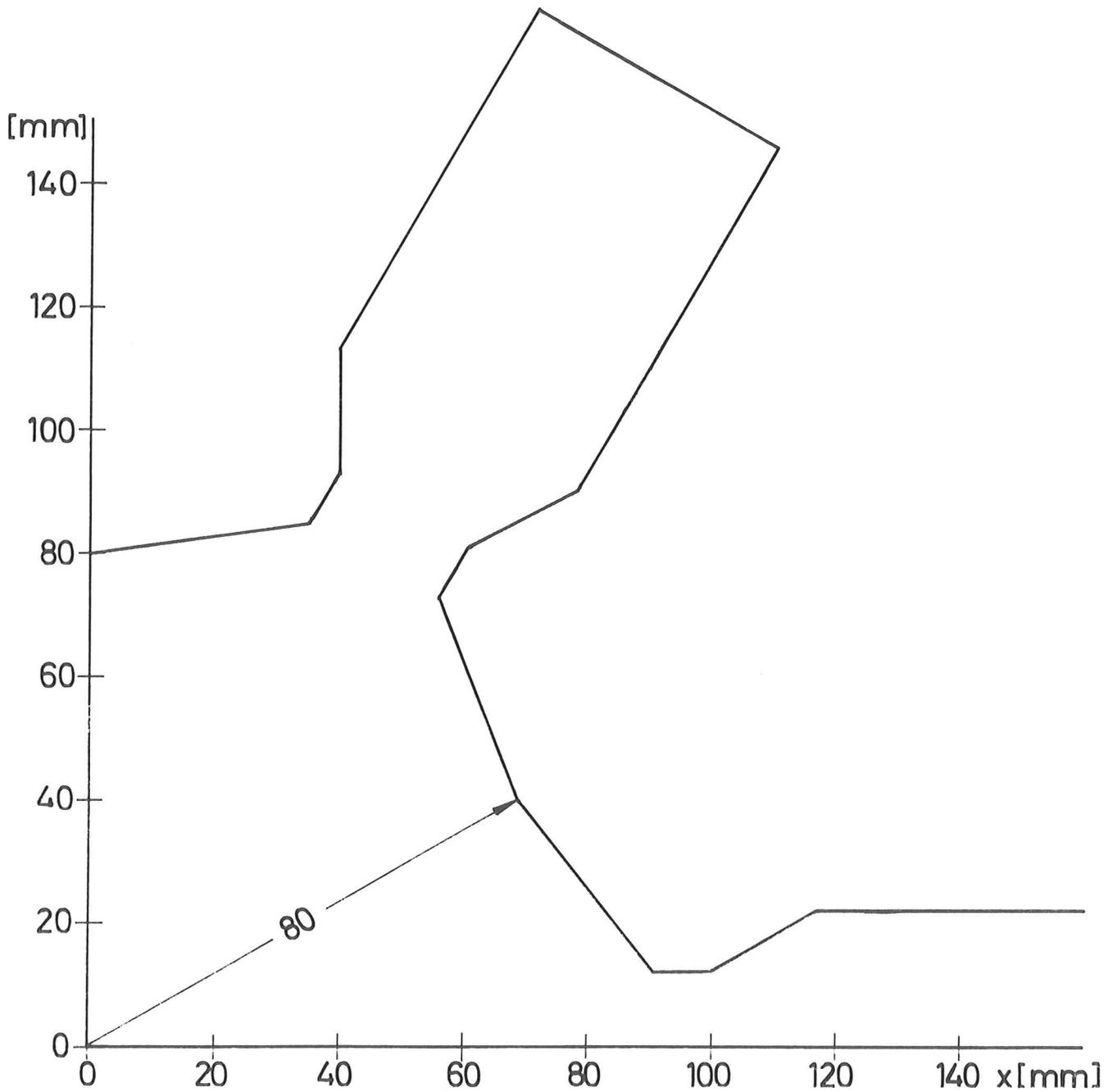


Abb. 11

# Homogenität der Sextupolstärke (vereinfachtes Polprofil)

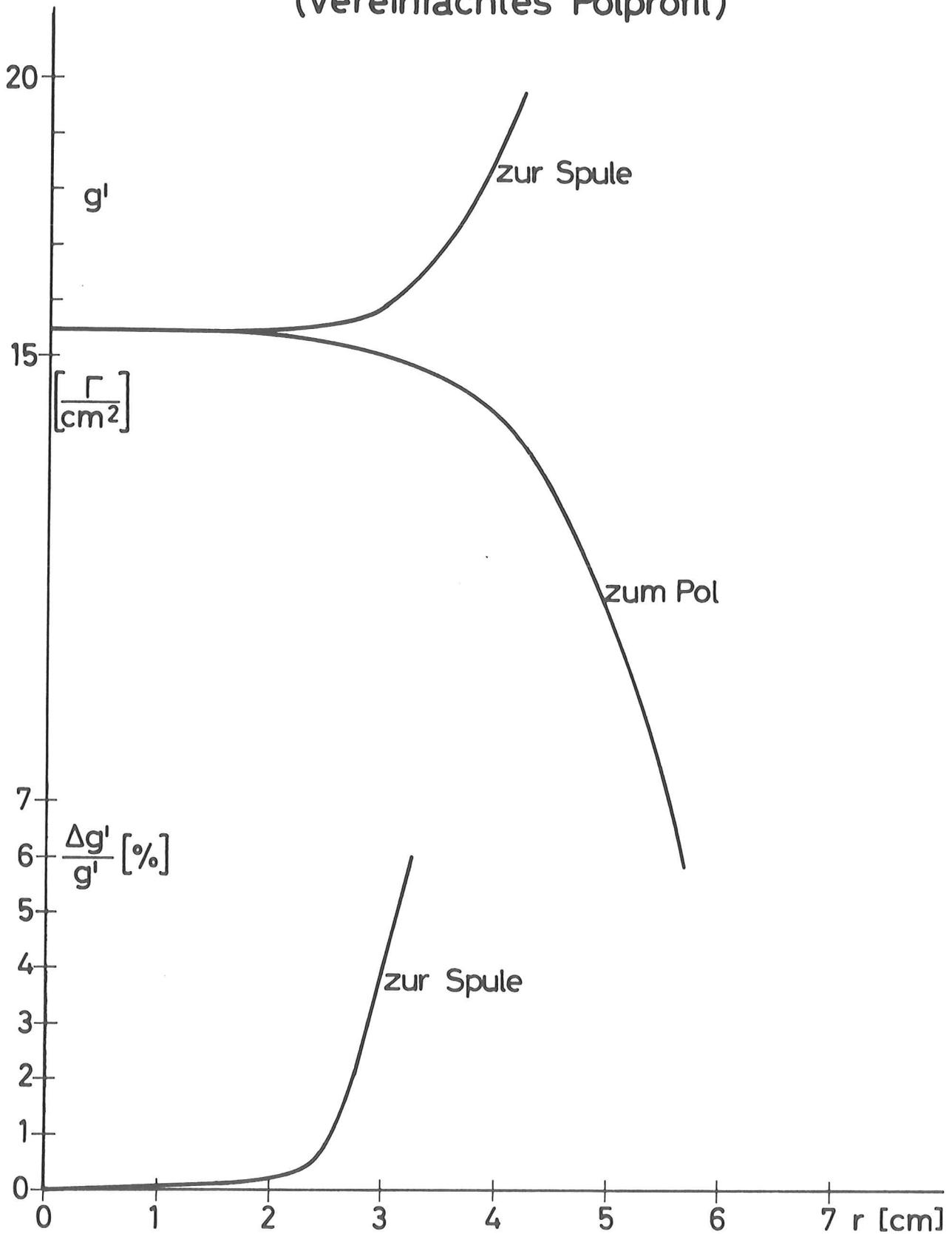


Abb. 12

## 6. Sextupol in der Wechselwirkungszone WS

Zur Korrektur der großen vertikalen Chromatizität im Speicherring wird in der Wechselwirkungszone ein Sextupol WS-039 (s. Abb. 1) benötigt. Da einerseits an dieser Stelle die beiden Strahlen vertikal sehr hoch und außerdem erst wenig getrennt sind, andererseits die Sextupole zentrisch um jeden der beiden Strahlen angeordnet sein muß, wird ein Doppelsextupol benötigt, dessen Geometrie aus Abb. 13 ersichtlich ist.

Hier wurde für konstant gehaltenen Tangentenansatzpunkt T die Stufe A (Abb. 13) an der Spule variiert und die dazugehörigen Sextupolstärken berechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 14 zusammengestellt. Es zeigt sich, daß eine einigermaßen konstante Verteilung der Sextupolstärke über die Apertur bei einer Stufe von  $A = 3,5$  mm zu erreichen ist.

Die Sextupolstärke für diesen Fall ist innerhalb eines Radius von  $r = 50$  mm auf etwa  $\pm 10$  % konstant und innerhalb eines Radius von  $r = 25$  mm, was bei voller Ausnutzung der Akzeptanz des Speicherringes etwa zwei Standardabweichungen für den Strahl bedeutet, auf etwa  $\pm 2,5$  % konstant. Die Korrektur der Chromatizität kann in diesem Fall erreicht werden, falls der Strahl die ganze Akzeptanz des Speicherrings ausfüllt. Dies ist jedoch nur bei sehr niedrigen Energien unter 1 GeV der Fall. Bei höheren Energien ist die Emittanz des Strahles wesentlich kleiner, so daß hier die Korrektur zufriedenstellend durchzuführen sein sollte.

# Querschnitt durch den Sextupol WS

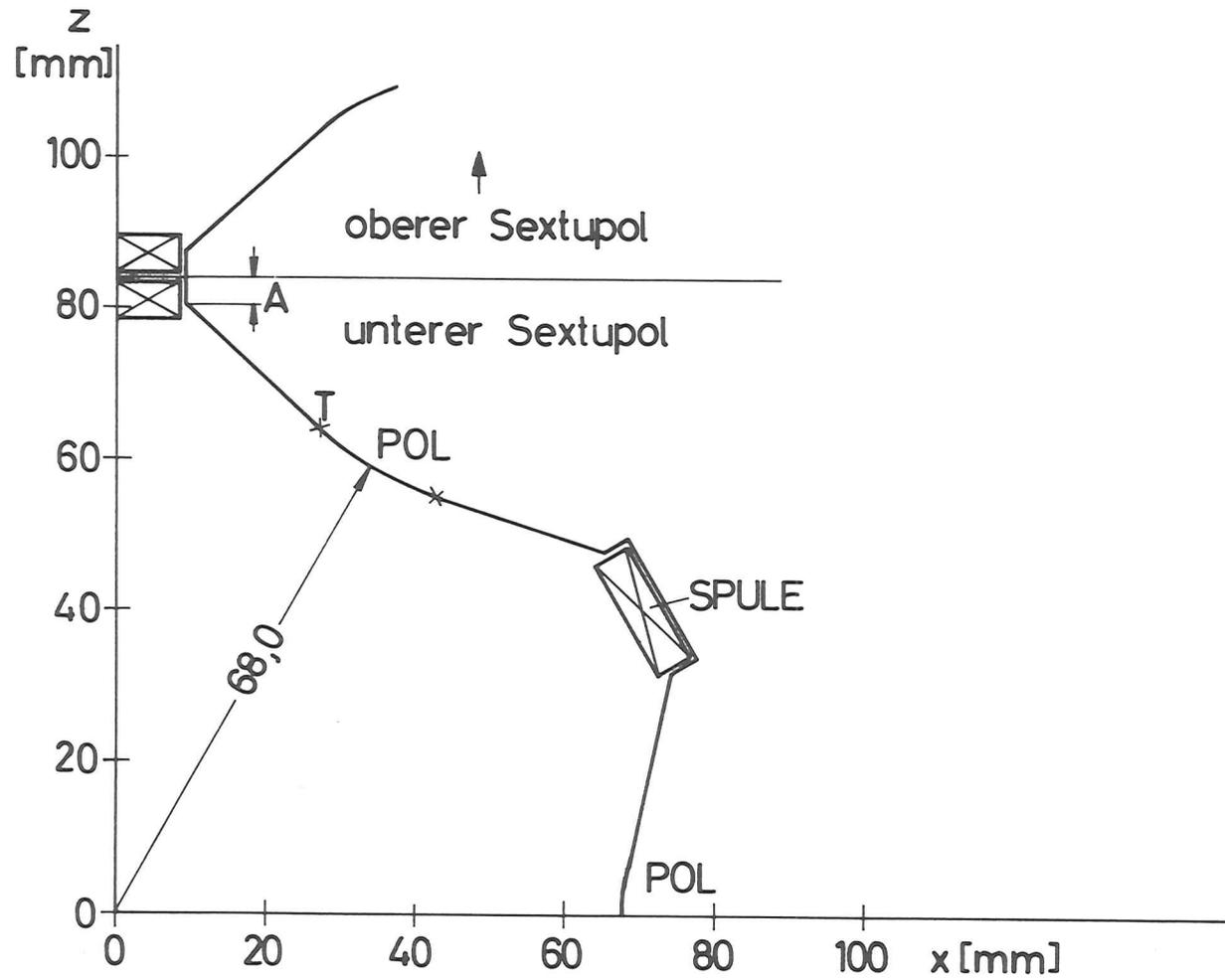


Abb. 13

# Homogenität des Sextupols WS

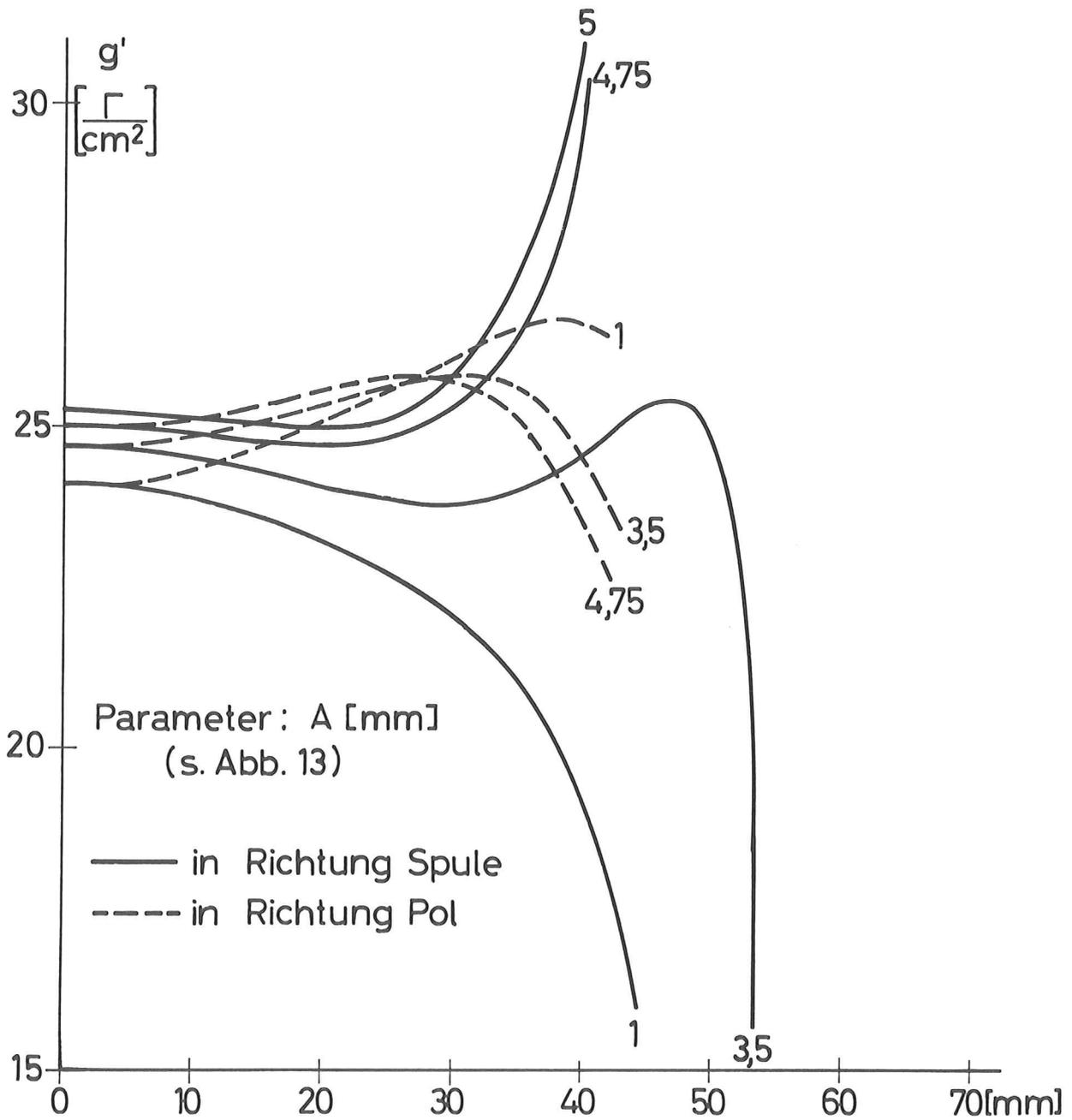


Abb. 14

## 7. Dipolfelder in den Quadrupolen DQ

Durch zusätzliche Spulen in den Quadrupolen DQ, wie sie in Abb. 15 dargestellt sind, sollen zur Korrektur der Strahlage Dipolfelder eingestellt werden können.

Um das geeignete Stromverhältnis zwischen Spule I und Spule II zu finden, wurden die Magnetfelder für beide Spulen einzeln berechnet. Als optimales Verhältnis der Amperewindungen in beiden Spulen ergibt sich:

$$f = \frac{(J \cdot w)_I}{(J \cdot w)_{II}} = 2,50$$

In absoluten Größen ergibt sich für die Feldstärke  $B_0$  auf der Mittellinie des Quadrupols:

$$B_0 = 80,00 \text{ } \Gamma \quad \text{bei } (J \cdot w)_I = 360 \text{ A} \cdot \text{Wdg.}$$
$$\text{und } (J \cdot w)_{II} = 144 \text{ A} \cdot \text{Wdg.}$$

Die Homogenität des Dipolfeldes ist in Abb. 15 dargestellt und es zeigt sich, daß das Dipolfeld innerhalb eines Radius von  $r = 50 \text{ mm}$  auf 6 % homogen ist. Die Genauigkeit reicht für die erforderlichen Korrekturen aus.

# Fehler im Dipolfeld des Quadrupols DQ

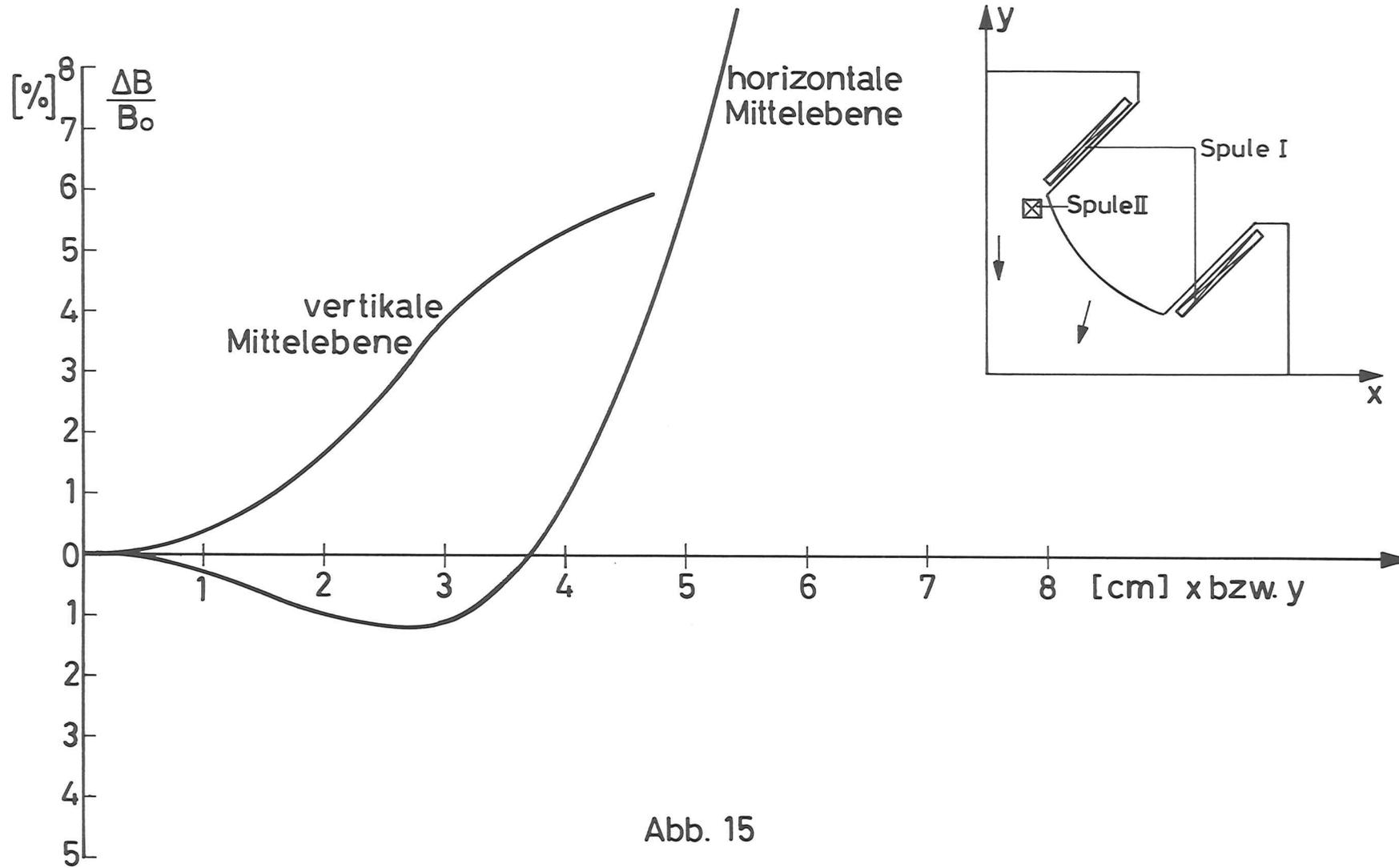


Abb. 15

## 8. Berechnung von Strahlsteuerspulen

Da im Speicherring zusätzlich zu den Dipolfeldern in den Doppelquadrupolen DQ noch separate Strahlsteuerspulen benötigt werden, wurden die Magnetfelder für solche Dipole berechnet.

Der Querschnitt für solche Steuerspulen ist aus Abb. 16 ersichtlich. Für mehrere Verhältnisse  $\frac{A}{B}$  wurden die Dipolfelder berechnet und die Abweichungen von einem zentralen Dipolfeld in Abb. 17 dargestellt. Es zeigt sich, daß bei einem Verhältnis von etwa  $\frac{A}{B} = \frac{90}{60}$  ein Optimum erreicht wird. Das Dipolfeld ist hier über eine Breite von 130 mm auf  $\pm 2\%$  homogen.

# Strahlsteuerspule

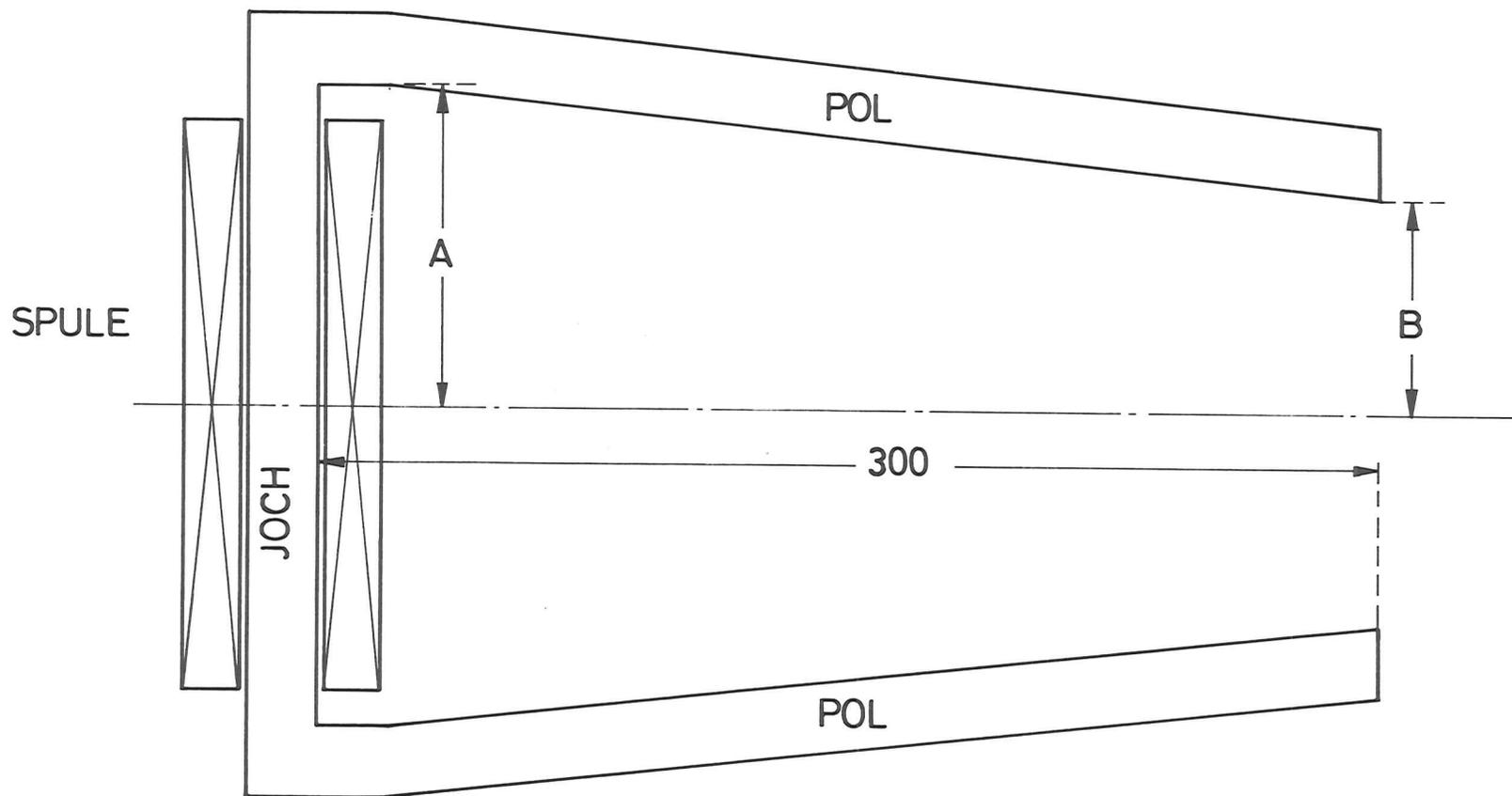


Abb. 16

# Steuerspule mit verschiedenen Profilen

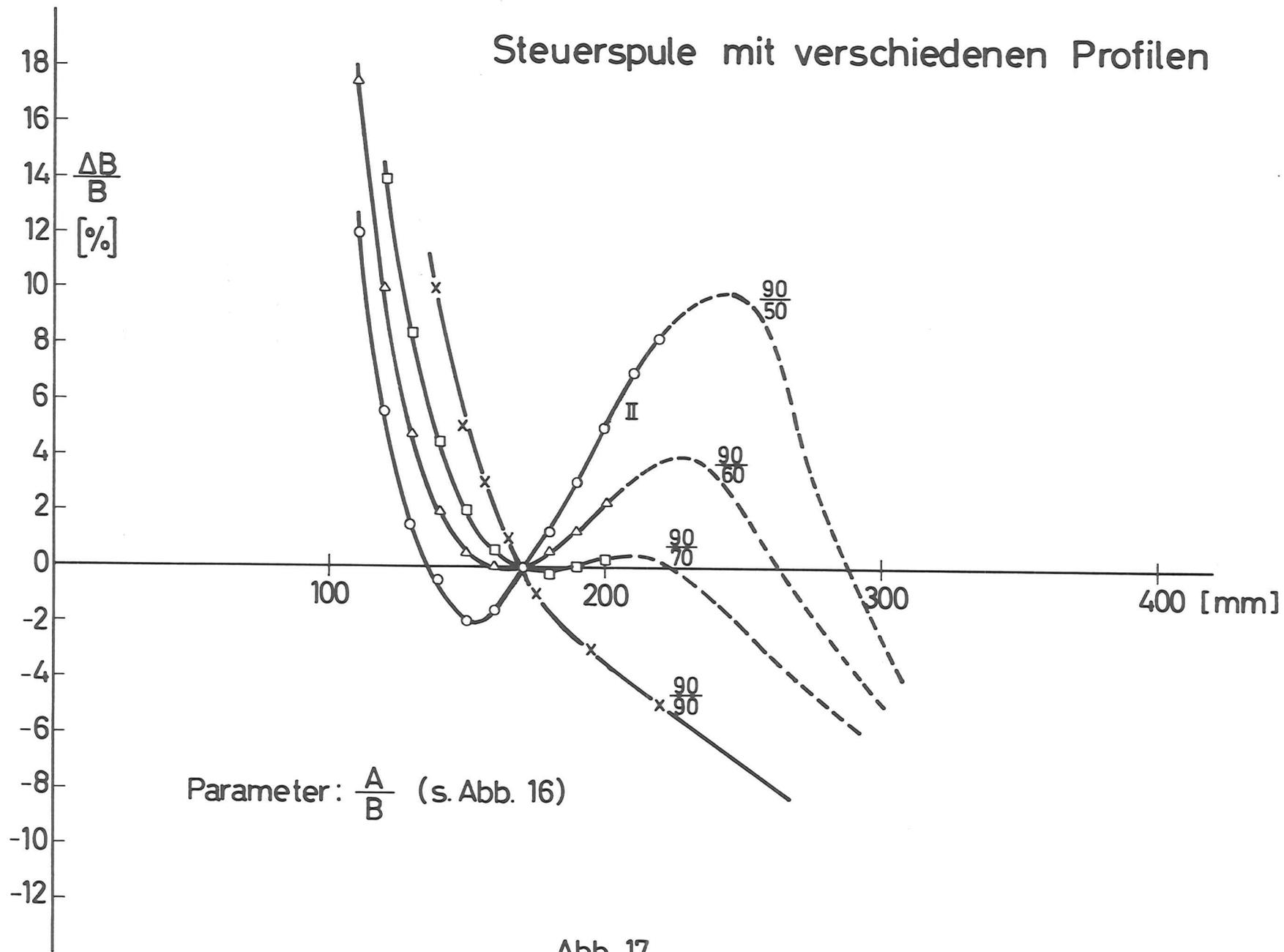


Abb. 17

## 9. Sextupolfelder in den Quadrupolen DQ

Durch geeignete Schaltung der in Absatz 7 erwähnten Zusatzspulen in den Quadrupolen DQ ist es im Prinzip möglich, auch Sextupolfelder zu erzeugen. Die Stromstärken in beiden Spulen müssen dabei so gewählt werden, daß der Dipolterm auf der im Zentrum des Quadrupols zu Null gemacht wird.

Der Dipolterm im Zentrum des Quadrupols verschwindet, falls das Verhältnis der Amperewindungen in beiden Spulen den Wert

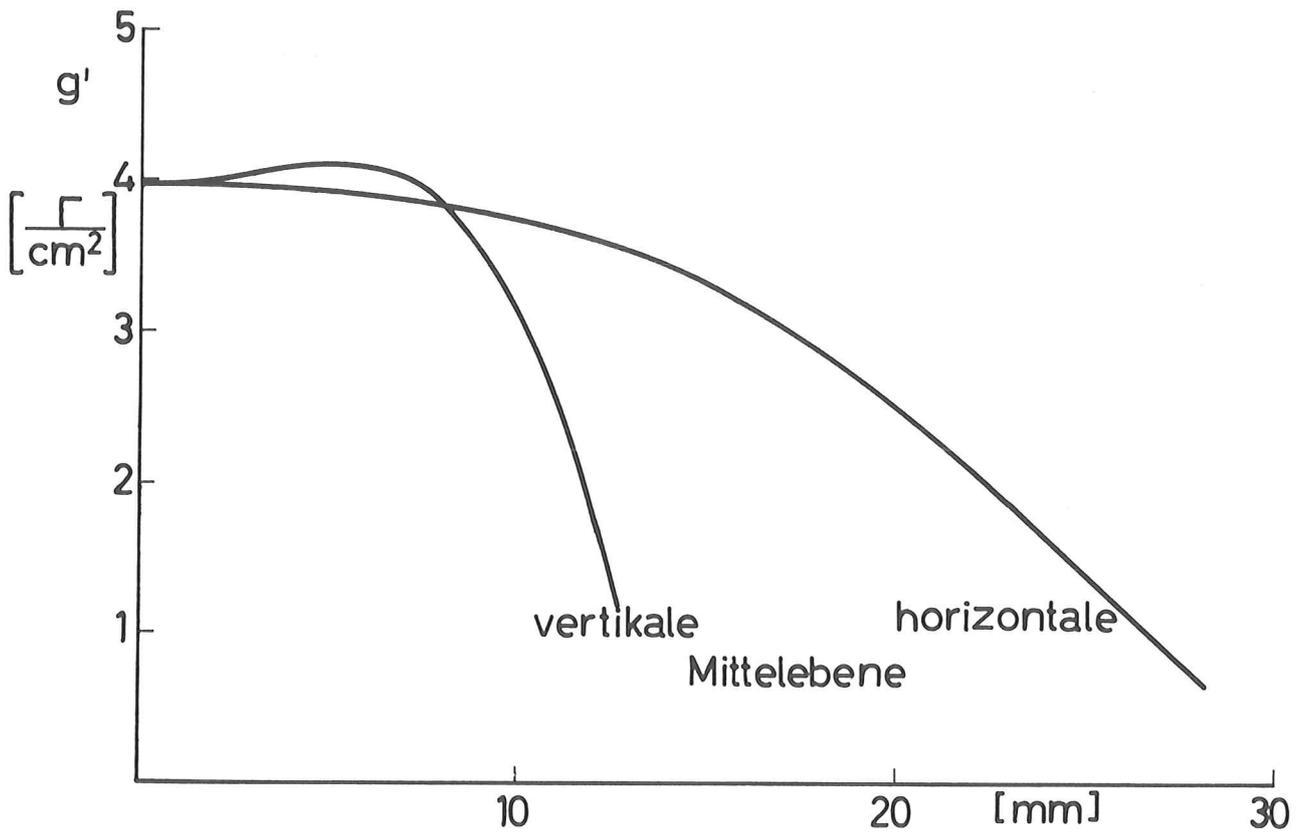
$$f = \frac{(J \cdot w)_{II}}{(J \cdot w)_I} = - 1,53$$

erhält.

Die daraus resultierende Sextupolstärke ist in Abb. 18 dargestellt.

Es zeigt sich, daß die Sextupolstärke nur in einem Bereich von  $r = 10$  mm um die Mittelachse einigermaßen homogen ist ( $\pm 15\%$ ).

### Sextupolterm im Quadrupol DQ



$$(J \cdot w)_I = 180 \text{ A} \cdot \text{Wdg.}$$

$$(J \cdot w)_{II} = 220 \text{ A} \cdot \text{Wdg.}$$

Abb. 18

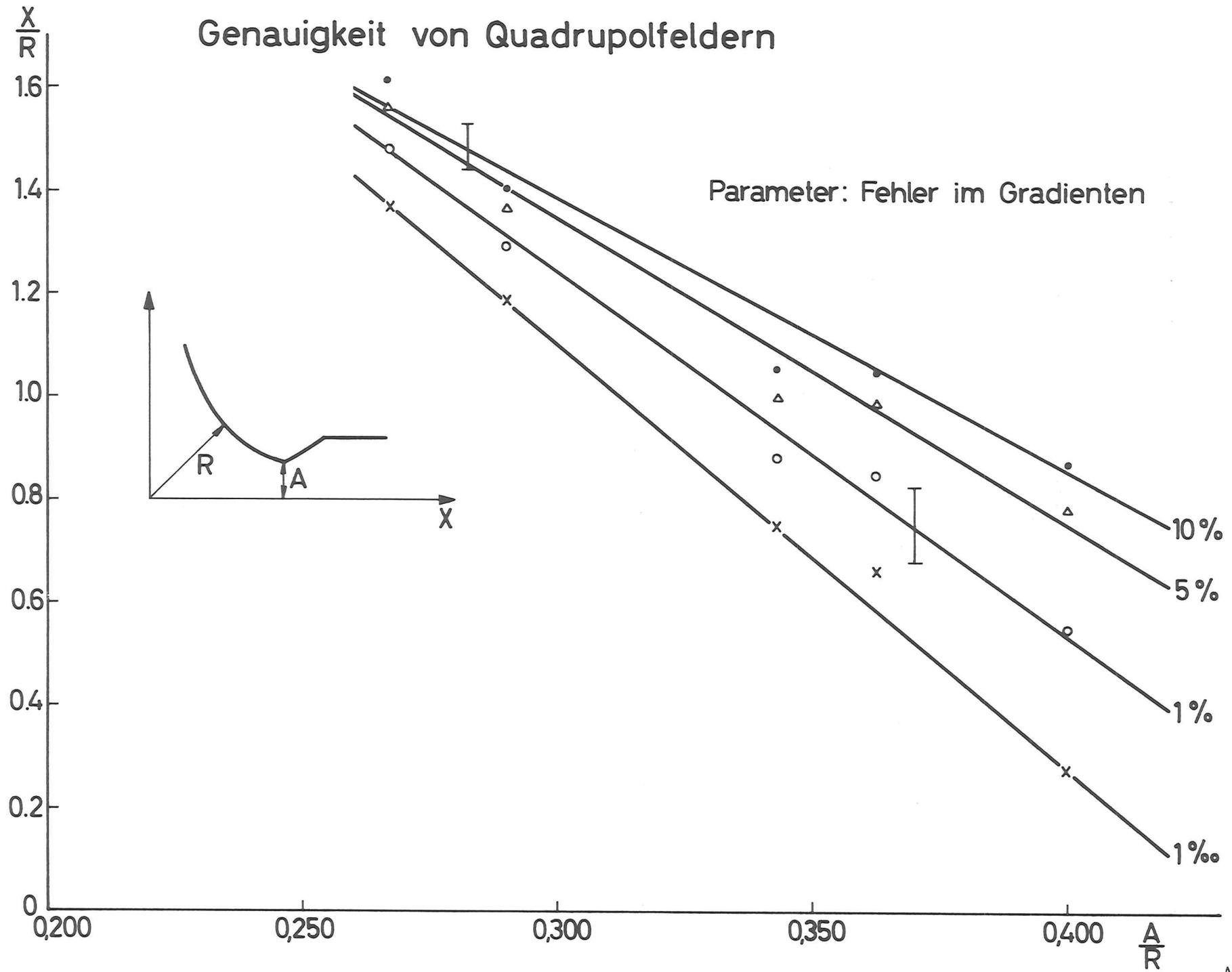
## 10. Einfluß der Polgeometrie auf die Gradientenhomogenität von Quadrupolen

Durch Berechnung der Magnetfelder für Quadrupole von verschiedenem Querschnitt ist es möglich geworden, einige quantitative Aussagen über die Qualität eines Quadrupolfeldes in Abhängigkeit von seiner Geometrie anzugeben.

Ist  $R$  der Abstand von Zentrum des Quadrupols zur Polmitte und  $A$  der geringste Abstand des Poles zu einer Mittelebene (s. Abb. 19), so ergeben sich die Fehler im Gradienten auf einer Mittelebene aus der Abb. 19. Die Ursache für die Streuung der berechneten Fehler ist nicht ganz klar, kommt jedoch vermutlich von der unterschiedlich guten Anpassung der Tangente an das Polprofil. Außerdem dürften sich die Spulen für bei großen Ablagen vom Zentrum etwas bemerkbar machen.

Die Genauigkeit der Diagramme in Abb. 19 ist nicht sehr groß, kann jedoch für die Konstruktion von Quadrupolmagneten einige Richtlinien für die Wahl der Polbreiten und der damit erreichbaren Feldlinearität geben.

# Genauigkeit von Quadrupolfeldern



## 11. Einfluß der Polbreite auf die Genauigkeit von Sextupolstärken

Ähnlich wie bei den Quadrupolen in Abschnitt 10 wurde die Abhängigkeit der Genauigkeit der Sextupolstärke von der Polbreite in Einheiten des Radius  $R_0$  untersucht und in Abb. 20 dargestellt. Es zeigt sich eine sehr starke Abhängigkeit der Fehler von der Polbreite besonders bei großen Amplituden.

# Genauigkeit von Sextupolfeldern

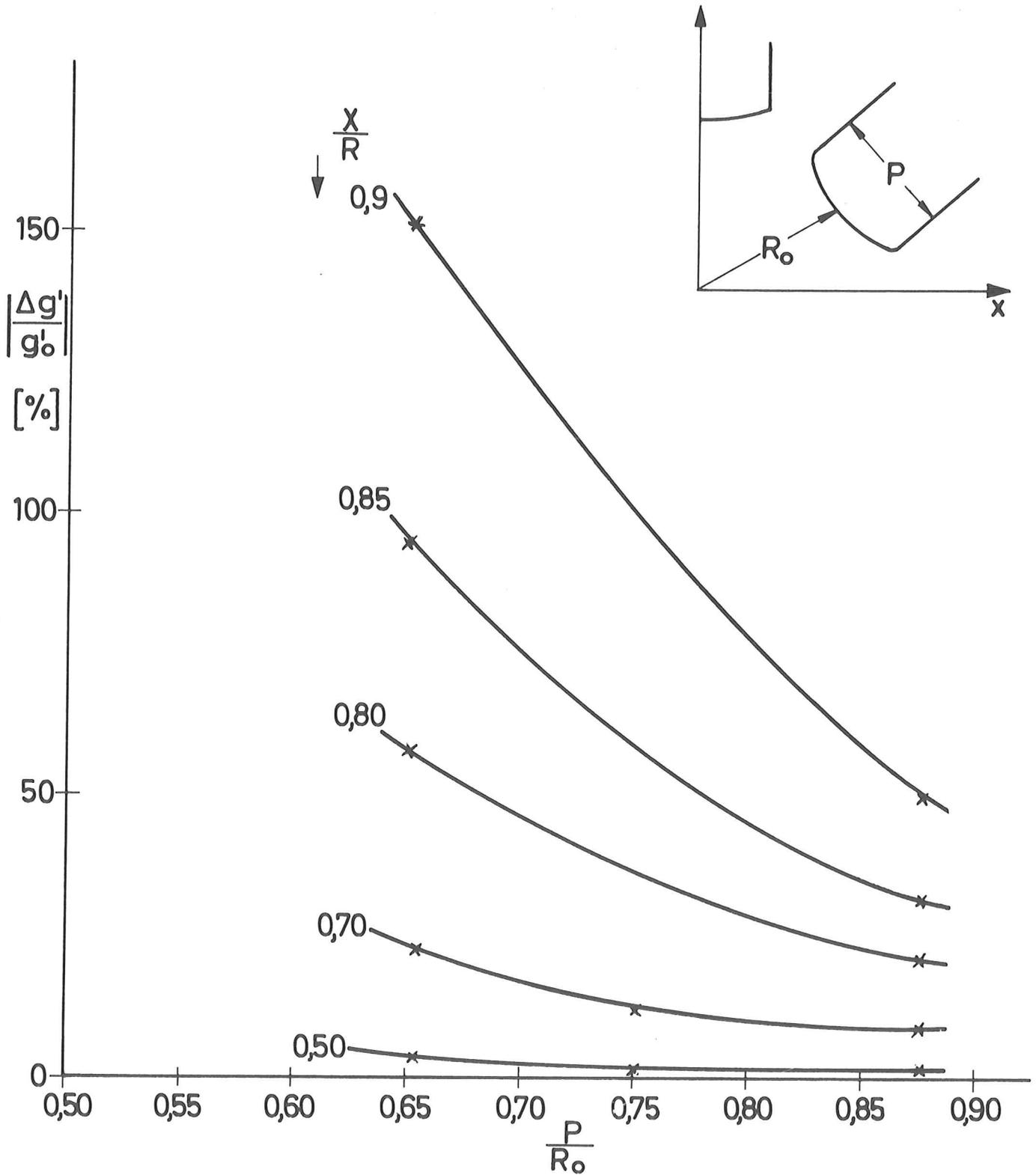


Abb. 20



