

**KERNFORSCHUNGSZENTRUM**

**KARLSRUHE**

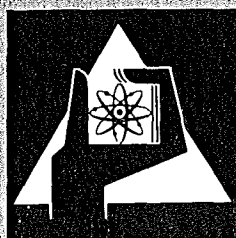
Juni 1973

KFK 1816

Zyklotron – Laboratorium

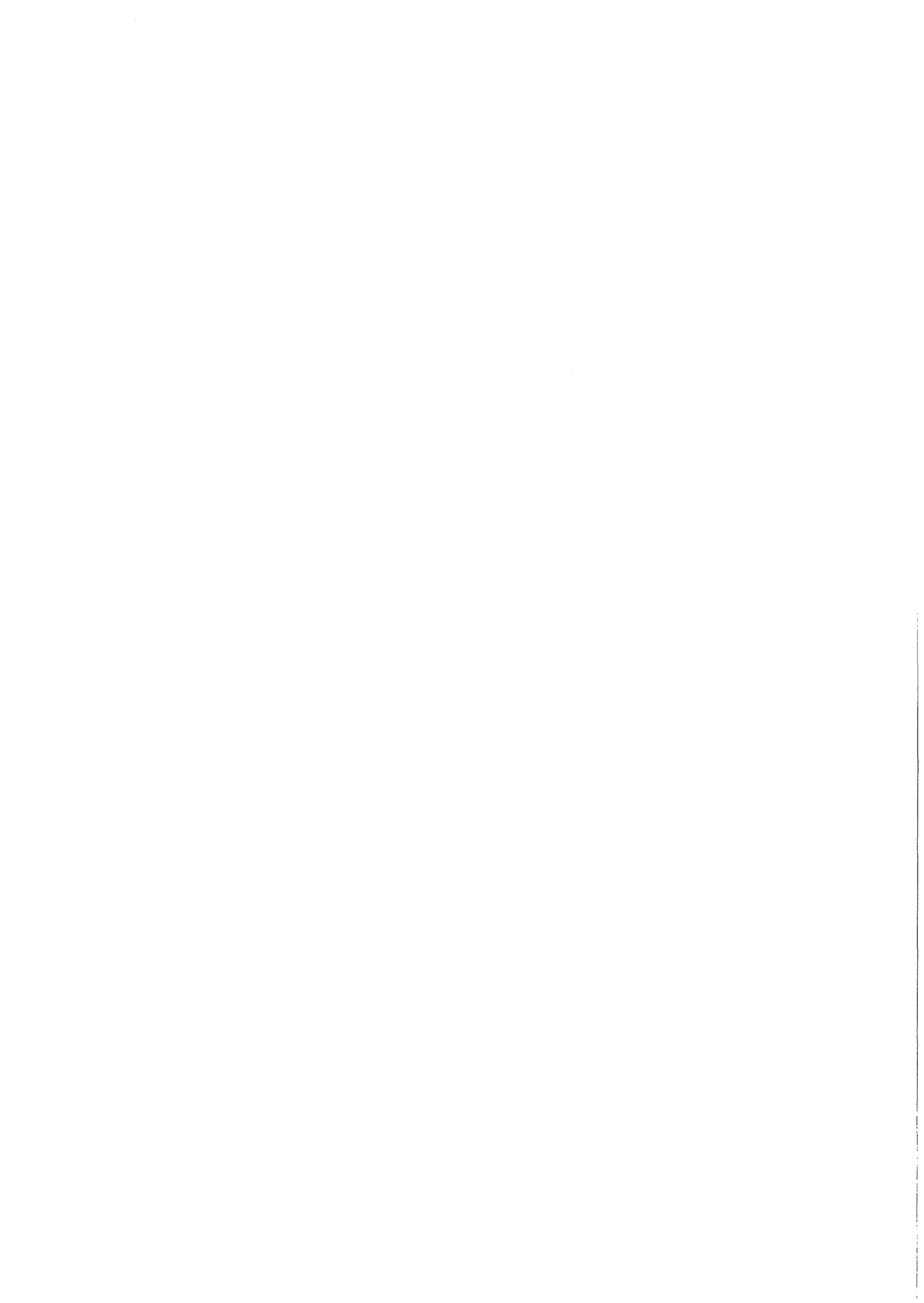
**Überlegungen zum Entwurf eines Magnetspektrometers  
für das Isochron-Zyklotron Karlsruhe**

H.J. Gils, G. Schatz



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

**KARLSRUHE**



KERNFORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

K F K 1816

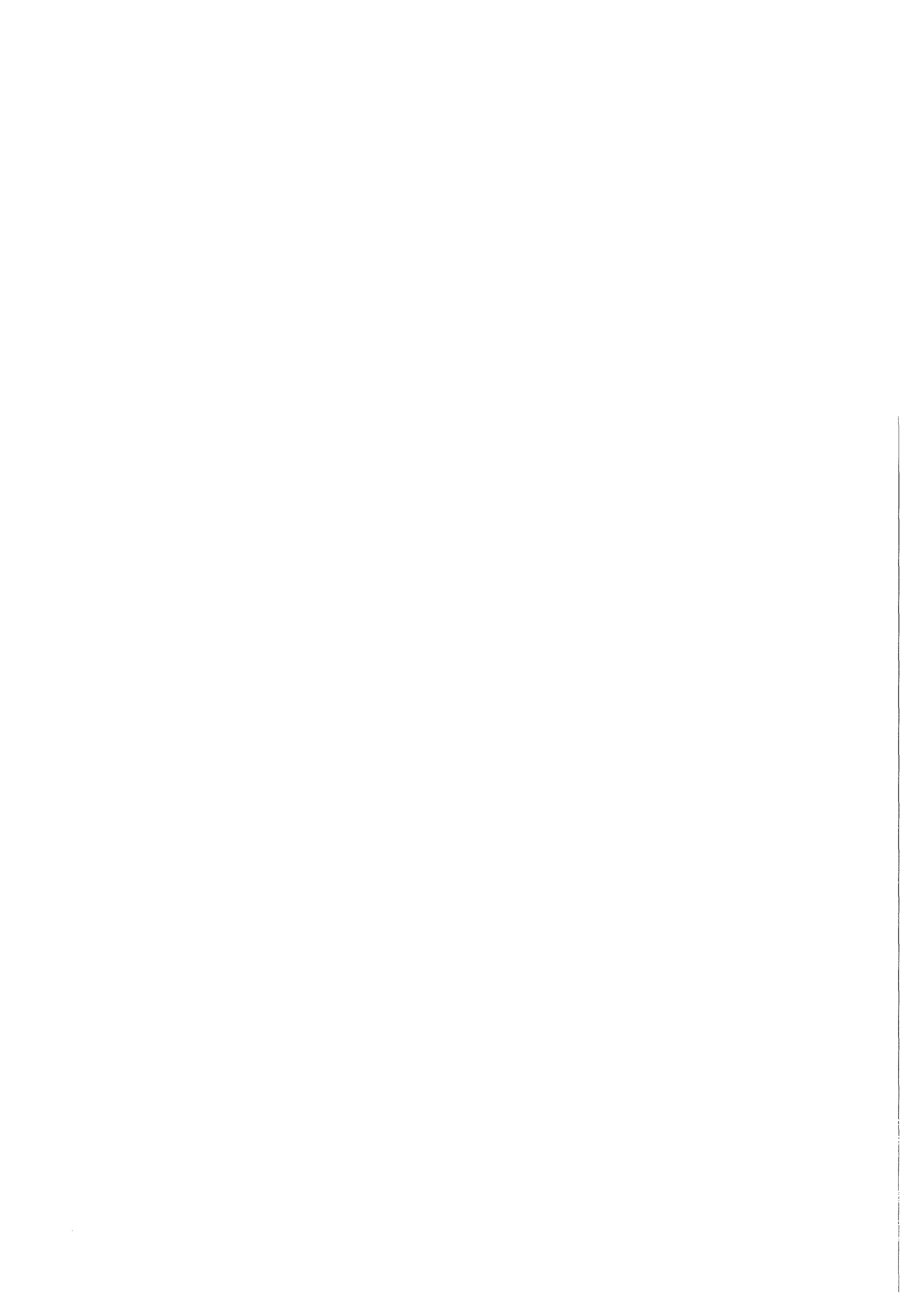
Zyklotron - Laboratorium

Überlegungen zum Entwurf eines Magnetspektrometers  
für das Isochron-Zyklotron Karlsruhe

---

H.J. Gils und G. Schatz

Gesellschaft für Kernforschung m.b.H., Karlsruhe



## Zusammenfassung

Anhand der Eigenschaften des externen Strahls wird die grundsätzliche Konzeption eines hochauflösenden Magnetspektrometers für das Isochron-Zyklotron Karlsruhe im Hinblick auf die gestellten Aufgaben diskutiert. Als geeignetes Instrument erscheint ein Energieverlust-Spektrometer mit vertikaler Strahldispersion, horizontaler Streuebene und vertikaler Impulsanalysebene. Es wird eine Anordnung vorgeschlagen, deren Eigenschaften auf der Grundlage von ionenoptischen Rechnungen bis zur zweiten Ordnung beschrieben werden.

Considerations about the Design of a Magnetic  
Spectrometer for the Karlsruhe Isochronous  
Cyclotron

## Abstract

The general concept of a high-resolution magnetic spectrometer for the Karlsruhe Isochronous Cyclotron is discussed with regard to the experiments to be performed with this apparatus taking into account the properties of the external beam. The most suitable instrument seems to be an energy loss spectrometer with a vertically dispersed beam, horizontal scattering plane and vertical momentum analysis. A special design is proposed the properties of which are described on the basis of beam transport calculations up to second order.



## Inhalt

1. Einleitung
2. Allgemeine Konzeption
  - 2.1 Prinzip der Impulsanalyse
  - 2.2 Dispersionsebene des Analysators und Streuwinkelanalyse
  - 2.3 Angestrebte Spezifikationen des Spektrometers
3. Ionenoptische Grundlagen des vorgeschlagenen Entwurfs
4. Monochromatorsystem
  - 4.1 Anordnung
  - 4.2 Eigenschaften
5. Analysator
6. Schlußbemerkungen

- Anhang A : Ionenoptische Beschreibung des Energieverlust-Prinzips  
B : Ausdruck des Programms TRANSPORT
  - B.1 Monochromator
  - B.2 Analysator





## 1. Einleitung

Das Isochron-Zyklotron Karlsruhe liefert einen externen Strahl folgender Teilchenarten und Energien:

Protonen	(als $H_2^+$ -Ionen)	mit	26	MeV
Deuteronen		mit	52	MeV
$\alpha$ -Teilchen		mit	104	MeV

In Vorbereitung befindet sich ein Strahl von dreifach positiv geladenen

${}^6\text{Li}$ -Ionen	mit	156	MeV
------------------------	-----	-----	-----

Energie sowie ein Strahl polarisierter Deuteronen.

Die Halbwertsbreite der Energieverteilung des  $\alpha$ -Strahls beträgt etwa

$$\Delta E_{\alpha} = 400 \text{ keV.}$$

Daraus resultiert eine relative Energie- bzw. Impulsunschärfe von

$$\frac{\Delta E}{E_0} \Big/ \text{FWHM} = 0.4 \% \quad \text{bzw.} \quad \frac{\Delta p}{p_0} \Big/ \text{FWHM} = 0.2 \% ,$$

die auch für die übrigen Teilchensorten gilt.

Zur Erhöhung der Energieschärfe des Strahls befindet sich im externen Strahlführungssystem ein Monochromatormagnet, hinter dessen Ausgangsschlitz der  $\alpha$ -Strahl eine Energiebreite von

$$\Delta E_{\alpha \text{ analysiert}} \approx 50 \text{ keV} \quad [\text{FWHM}]$$

hat. Die Gesamtauflösung der vorhandenen Halbleiterspektrometer<sup>1)</sup> liegt jedoch bei ca. 100 keV für 104 MeV  $\alpha$ -Teilchen. Dieser Wert wird im wesentlichen durch die Eigenauflösung der bisher verwendeten Si-Halbleiterdetektoren bestimmt. Wegen der hohen Energie des Primärstrahls müssen die Detektoren relativ dick sein, was sich nachteilig auf die Auflösung auswirkt.

Für viele Experimente - z.B. die Untersuchung von Kerndeformationen mit Hilfe der inelastischen  $\alpha$ -Streuung - genügt die Energieauflösung der Teilchenspektrometer nicht, wenn der Abstand der Kernniveaus, die man beobachten möchte, geringer ist als die Auflösung der Detektoren. Daneben hat die einfache Streuanordnung aus Monochromatormagnet und Halbleiterdetektoren den grundsätzlichen Nachteil, daß der Untergrund zumindest unter kleinen Streuwinkeln relativ hoch ist, so daß schwach angeregte Linien nur schwer zu beobachten sind. Denn insbesondere an den Blendenbacken der Austrittsblende des Monochromatormagneten entsteht ein erheblicher Anteil störender vorwärts gestreuter Sekundärteilchen.

Für zukünftige Experimente wäre aus den genannten Gründen ein untergrundarmes Teilchenspektrometer mit einer Energieauflösung von 10 bis 20 keV für  $10^4$   $\alpha$ -Teilchen wünschenswert. Das erfordert auf der einen Seite ein Monochromatorsystem mit einer Auflösung von  $\frac{\Delta E}{E} / \text{FWHM} \approx 1 \cdot 10^{-4}$ . Auf der anderen Seite kann der Impuls der gestreuten Teilchen mit der genannten hohen Auflösung und bis zu den vom Primärstrahl gegebenen Energien nicht mit Halbleiterzählern sondern nur mit einem Magnetspektrographen analysiert werden<sup>†</sup>). Neben der höheren Auflösung bietet ein Magnetspektrograph einen geringeren Untergrund als Halbleiterzähler. Im folgenden wird darüber hinaus gezeigt werden, daß bei der Wahl eines bestimmten Magnetspektrometer-Typs - nämlich des sog. Energieverlust-Spektrometers - die Gesamtluminosität der Streuanordnung bei gegebener Auflösung erheblich erhöht werden kann.

In dem vorliegenden Bericht werden zunächst die Argumente zur grundsätzlichen Konzeption eines Magnetspektrometers für das Karlsruher Zyklotron erläutert. Im Anschluß daran wird eine bestimmte Anordnung vorgeschlagen, deren Eigenschaften mit Hilfe von Strahltransportrechnungen in erster und zweiter Ordnung ermittelt wurden.

---

<sup>†</sup>Das Auflösungsvermögen von Halbleiterdetektoren für geladene Teilchen im Energiebereich um 100 MeV wird in Ref. 2) und 3) diskutiert. Einen Vergleich der Ergebnisse von Ref. 2) und 3) mit einem Magnetspektrometer liefert Ref. 4).

## 2. Allgemeine Konzeption

### 2.1 Prinzip der Impulsanalyse

Das Prinzip eines konventionellen Spektrometer-Systems ist in Fig. 1 dargestellt.

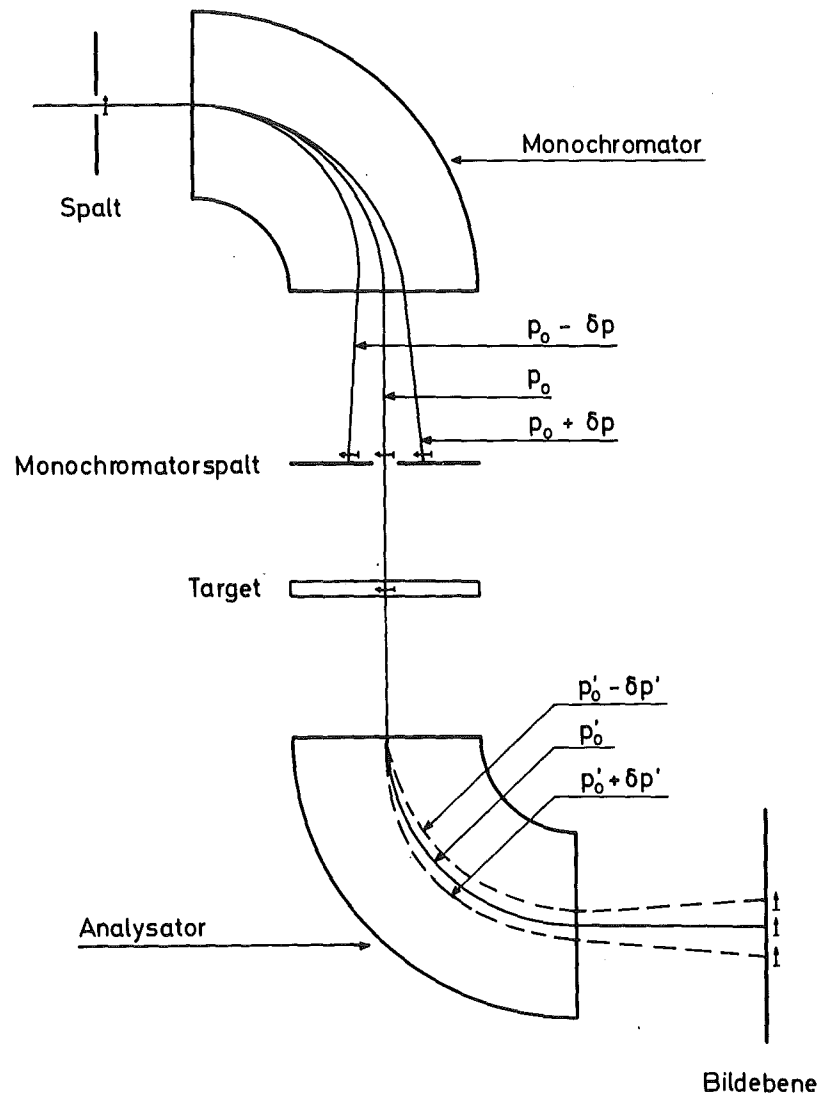


Fig. 1 Prinzip eines konventionellen Magnetspektrometers

Die Anordnung ist in zwei wesentliche Bestandteile - Monochromator und Analysator - gegliedert, die in ihrer Funktionsweise unabhängig voneinander sind. Unter der Bezeichnung "Monochromator" sind hier sämtliche ionenoptische Elemente des Strahlführungssystems zusammen-

gefaßt, die aus dem primären Beschleunigerstrahl geringer Energieschärfe einen Anteil hoher Energieschärfe ausblenden und zu einem kleinen Strahlfleck auf das Target fokussieren. Der Analysator erzeugt ein hochdispersives Bild des Targetflecks. Mit Hilfe von ortsempfindlichen Teilchendetektoren in der Bildebene wird der Impuls der aus dem Target emittierten Teilchen ermittelt.

Die Gesamtauflösung des Systems ist u.a. begrenzt durch die Energieunschärfe des Teilchenstrahls am Target, die daher möglichst gering sein sollte. Wie Fig. 1 verdeutlicht, wird die Energieschärfe des Teilchenstrahls durch den Austrittsspalt des Monochromators erhöht, der sich in einer dispersiven Bildebene des Strahlführungssystems befindet. Teilchen mit großer Energieabweichung vom zentralen Strahl können diesen Spalt nicht passieren, sondern treffen auf die Blendenbacken und werden dort gestoppt. Die Erhöhung der Energieschärfe des Strahls hat also zwangsläufig eine Reduktion der Strahlintensität zur Folge.

Eine Energieschärfe von  $\frac{\Delta E}{E} = 1 \cdot 10^{-4}$  bedeutet gegenüber dem aus dem Karlsruher Zyklotron extrahierten Strahl eine Verbesserung um etwa einen Faktor 40. Bei dem beschriebenen konventionellen System folgt daraus eine Reduktion der Strahlintensität um einen Faktor derselben Größenordnung. Die starke Verminderung der Strahlintensität bei der Erzielung einer relativen Energieschärfe von  $10^{-4}$  ist charakteristisch für einen Zyklotronstrahl, da dessen primäre Energieschärfe verhältnismäßig schlecht ist verglichen z. B. mit einem Strahl aus einem elektrostatischen Beschleuniger.

Geringe Strahlintensität ist generell unerwünscht, da sie die Experimente erschwert und einzelne sogar undurchführbar macht. Im speziellen Fall des Karlsruher Zyklotrons ist die Intensitätsfrage aus folgendem Grund von besonderer Bedeutung:

Der in Kürze erwartete Strahl von dreifach positiv geladenen  ${}^6\text{Li}$ -Ionen sowie der Strahl polarisierter Deuteronen werden voraussichtlich mit so geringer Intensität extrahiert, daß in einem hochauflösenden konventionellen Monochromatorsystem der Strahlstrom auf Werte vermindert wird, die kaum ein sinnvolles Experimentieren erlauben. Gerade aber auch mit den neuen Teilchen-

strahlen erwartet man in Verbindung mit einem Spektrometer hoher Auflösung eine wesentliche Erweiterung der experimentellen Möglichkeiten.

Einen Ausweg aus den mit einem hochaufgelösten Zyklotronstrahl verknüpften Intensitätsschwierigkeiten eröffnet das sog. Energieverlust-Spektrometer<sup>5,6,7)</sup>, dessen Prinzip in Fig. 2 dargestellt ist.

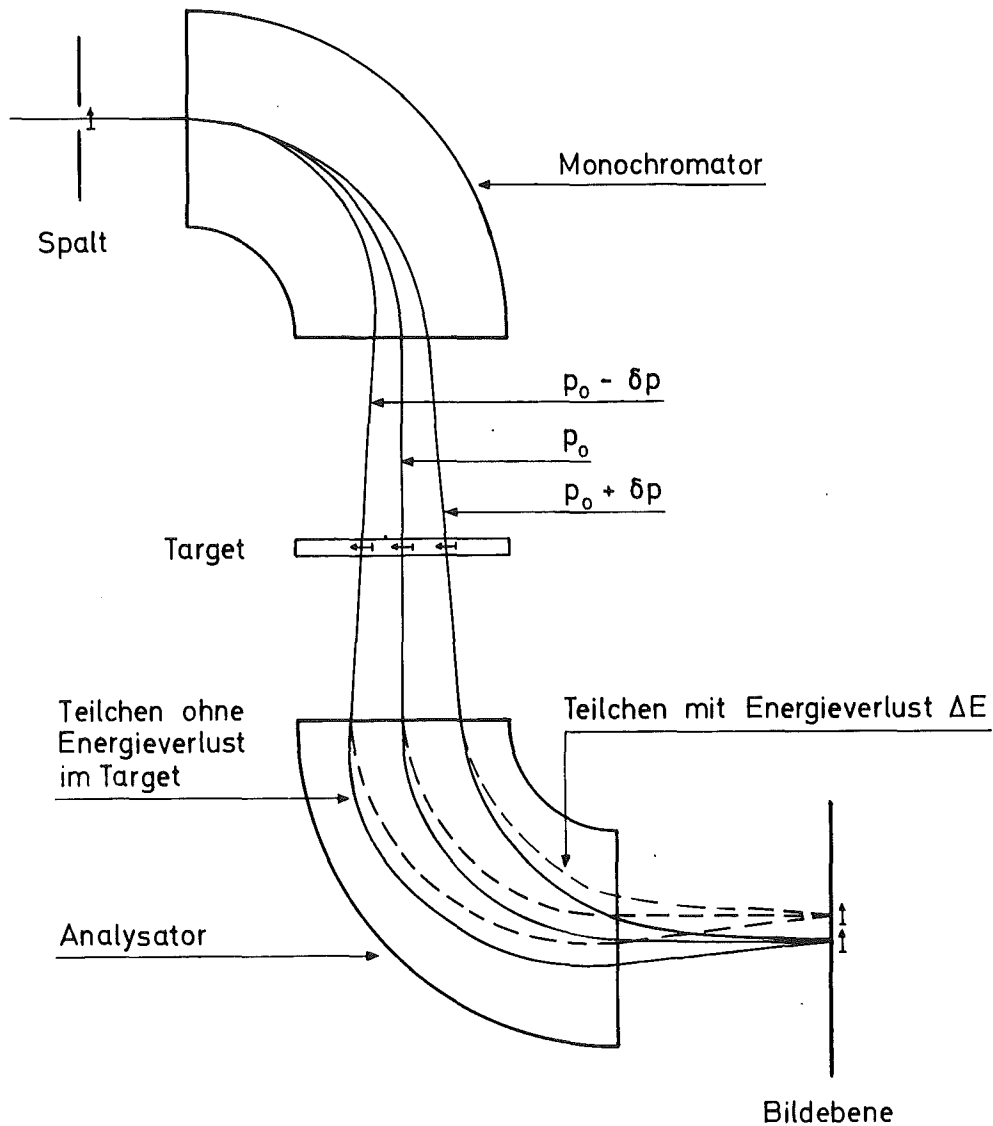


Fig. 2 Prinzip eines Energieverlust-Spektrometers

Im Gegensatz zum konventionellen System ist hierbei die Funktionsweise von Monochromator und Analysator aufeinander abgestimmt. Am Ausgang des Monochromators befindet sich kein Austrittsspalt, so daß der Strahl mit seiner vollen Intensität auf das Target auftrifft. Infolge der Strahldispersion ist der Strahlfleck am Target in radialer Ebene zu einem Strich auseinandergezogen. An verschiedenen Punkten des Strahlflecks treffen Teilchen verschiedener Energien auf. An einem bestimmten Punkt ist die Energieunschärfe jedoch sehr gering.

Der Betrag der Strahldispersion ist so an die Dispersion und Vergrößerung des Analysators (Bildspektrometer) angepaßt, daß das Gesamtsystem vom Eingang des Monochromators zur Bildebene des Analysators dispersionsfrei ist. Alle Teilchen, die das Target ohne Energieverlust durchlaufen, werden infolgedessen unabhängig von ihrer absoluten Energie auf den zentralen Punkt der Bildebene des Analysators fokussiert. Teilchen, die einem Targetkern eine bestimmte Anregungsenergie übertragen, werden dagegen auf einen anderen Punkt der Bildebene abgebildet. Der Ort, an dem ein Teilchen in der Bildebene registriert wird, ist folglich ein Maß für seinen Energieverlust im Target, nicht aber für seine absolute Energie<sup>+</sup>).

Der entscheidende Vorteil des Energieverlust-Prinzips liegt auf der Hand: Die nutzbare Strahlintensität hängt nicht von der angestrebten Auflösung ab, sondern ist praktisch gleich der vollen aus dem Beschleuniger extrahierten Intensität.

Die Realisierung des Energieverlust-Prinzips erfordert jedoch - beim Monochromator und beim Analysator - weitergehende Korrekturen der Aberrationen höherer Ordnung, als bei konventionellen Systemen notwendig ist. Im Monochromatorteil müssen insbesondere auch die chromatischen Aberrationen klein gehalten werden, was allerdings nicht notwendig eine Frage der Kosten, sondern in erster Linie der geeigneten Auslegung des Systems ist. Beim Analysator spielen neben den Öffnungsfehlern zusätzlich die Aberrationsterme eine stärkere Rolle, in die die radiale Strahlfleckausdehnung auf dem Target eingeht, die erheblich größer ist als bei konventionellen Spektrographen. Dieser Nachteil wird jedoch z.T. dadurch ausgeglichen,

---

<sup>+</sup>) Eine detailliertere ionenoptische Beschreibung des Energieverlust-Prinzips ist im Anhang A gegeben.

daß wegen der überlegenen Strahlintensität eine besonders hohe Raumwinkelakzeptanz des Spektrographen nicht unbedingt erforderlich erscheint. Die entsprechenden Terme fallen daher weniger stark ins Gewicht.

Ein weiterer Punkt ist beim Energieverlust-Spektrometer zu beachten: Die Energien der auf das Target einfallenden Teilchen überdecken einen wesentlich größeren Bereich, als der Auflösung des Spektrometers entspricht. Bei der Untersuchung von Wirkungsquerschnitten ist die Anwendung des Prinzips also nur sinnvoll, wenn die Anregungsfunktionen der untersuchten Reaktionen innerhalb der Energiebreite des Primärstrahls keine starken Änderungen aufweisen, sondern praktisch konstant sind. Für die hohen Energien des Karlsruher Zyklotronstrahls wird eine merkliche Abhängigkeit der Wirkungsquerschnitte von der Energie der Primärteilchen jedoch nicht erwartet. Aus dieser Sicht spricht also nichts gegen die Anwendung des Energieverlust-Prinzips.

Unter Berücksichtigung auch der übrigen Argumente erscheint uns für Beschleunigerstrahlen mit geringer Energieschärfe - wie beim Isochron-Zyklotron Karlsruhe - ein Energieverlust-Spektrometer grundsätzlich das geeignetste Instrument zur Teilchenspektroskopie mit hoher Auflösung zu sein.

## 2.2 Dispersionsebene des Analysators und Prinzip der Streuwinkelanalyse

Der zweite entscheidende Punkt der allgemeinen Konzeption eines Spektrometers ist die Frage, ob die Dispersionsebene des Analysators gleich der Streuebene - also der Horizontalen - sein oder senkrecht auf ihr stehen soll.

Der Vorteil einer horizontalen Dispersionsebene besteht darin, daß störende kinematische Effekte auf einfache Weise eliminiert werden können. Die kinematische Energieverschmierung der gestreuten Teilchen beträgt z.B. bei der elastischen Streuung von 104 MeV  $\alpha$ -Teilchen an  $^{58}\text{Ni}$  unter einem Laborstreuwinkel von  $45^\circ$  und bei einer Streuwinkelakzeptanz von  $\pm 15$  mrad  $\Delta E_{\text{kinem.}} \approx 300$  keV, ist also beträchtlich größer als die angestrebte Energieauflösung. Durch Verschieben der Bildebene oder mit Hilfe eines Quadrupolfeldes an geeigneter Stelle im Strahlengang des Analysators läßt sich

diese Verschmierung bei einem horizontal ablenkenden Analysator korrigieren<sup>8,9)</sup>.

Bei Anwendung des Energieverlust-Prinzips in Verbindung mit einem horizontal ablenkenden Analysator ergeben sich jedoch die folgenden Schwierigkeiten, die in Fig. 3 verdeutlicht werden.

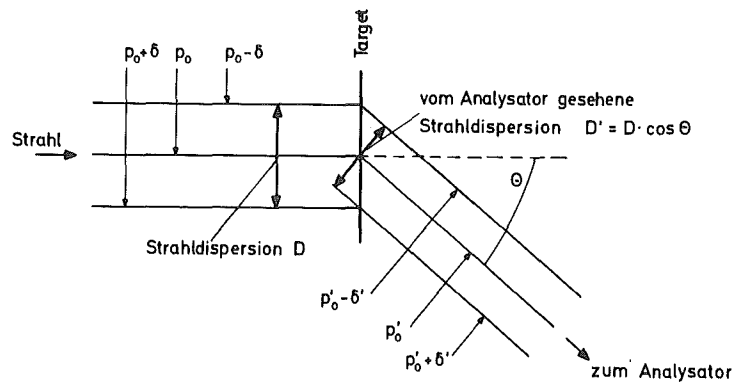


Fig. 3 Zur Problematik der Dispersionsanpassung bei horizontaler Ablenkungsebene des Analysators ( $\theta$  = Streuwinkel)

Der Analysator "sieht" bei verschiedenen Streuwinkeln verschiedene horizontale Strahlfleckausdehnungen und folglich verschiedene Strahldispersionen. Neben der unumgänglichen Dispersionsanpassung des Strahls an den Analysator aus kinematischen Gründen (s. Anhang A), die bei den am Karlsruher Zyklotron möglichen Reaktionen etwa  $\pm 10\%$  der Nominaldispersion ausmacht, erfordert die horizontale Anordnung eine zusätzliche Anpassung aus den genannten geometrischen Gründen, die erheblich größer ist. Messungen bei Rückwärtswinkeln sind nur möglich, wenn man durch zusätzliche Strahlführungselemente die Richtung der Dispersion umkehrt. Darüber hinaus erkennt man in Fig. 3, dass die Objektweite - das ist der Abstand Target-Analysator - bei normaler Targetstellung nicht für alle Strahlen gleich ist. Um eine konstante Objektweite über den gesamten Targetfleck zu erzielen, müsste das Target senkrecht zur Analysierichtung stehen und folglich die Bildebene des Strahls entsprechend gedreht werden.



Die genannten Schwierigkeiten entfallen, wenn man die Impulsanalysierebene von der Ebene der Streuwinkelanalyse trennt, d.h. den Analysator vertikal ablenkend anordnet.

Die Dispersionsebene des Strahls muß in diesem Fall ebenfalls vertikal sein. Da aus bautechnischen Gründen im Strahlführungssystem nur horizontal ablenkende Dipolmagnete vorgesehen sind, die eine horizontale Dispersion erzeugen, muß die Dispersionsebene des Strahls um  $90^\circ$  gedreht werden. Prinzipiell läßt sich das mit einem Solenoid erzielen, durch dessen Achse der Strahl läuft. Als praktikablere Lösung für die Strahldrehung erscheint jedoch - insbesondere aus Gründen der aufzuwendenden elektrischen Leistung - eine Anordnung aus mindestens fünf magnetischen Quadrupolen, die gegenüber der üblichen Lage um  $45^\circ$  um die Strahlachse gedreht angeordnet werden.

Die Frage der kinematischen Energieverschmierung der gestreuten Teilchen läßt sich bei einem vertikal angeordneten Analysator allerdings nur mit etwas größerem Aufwand lösen als bei einem horizontal stehenden. Dazu muß der Analysator ionenoptisch so ausgelegt werden, daß nicht nur in radialer Ebene eine definierte (Punkt-Punkt) Abbildungsbedingung erfüllt wird, sondern auch in axialer Ebene. Bei Parallel-zu-Punkt-Abbildung in der axialen Ebene des Analysators entsteht nämlich in der Bildebene eine Streuwinkeldispersion, die senkrecht zur Impulsdispersion steht. Durch zweidimensionale Ortsregistrierung und entsprechende Auswertung kann man den exakten Streuwinkel für jedes Teilchen ermitteln und die kinematische Korrektur berechnen. Die Methode erfordert allerdings einen etwas größeren elektronischen Aufwand.<sup>+) )</sup>

Unter Zusammenfassung der vorangegangenen Argumentation erscheint uns für die am Isochron-Zyklotron Karlsruhe geplanten Aufgaben ein Energieverlust-Spektrometer mit vertikaler Strahldispersion auf dem Target, horizontaler Streuebene und vertikaler Impulsanalysierebene die geeignetste Lösung zu sein.

---

<sup>+) )</sup> Die zweidimensionale Ortsregistrierung in der Bildebene des Analysators kann möglicherweise umgangen werden, wenn die Aberrationen höherer Ordnung - insbesondere bezüglich der axialen Abbildung hinreichend klein sind. In diesem Fall muß man einen gewöhnlichen eindimensionalen Detektor um einen gewissen Winkel, der von den kinematischen Bedingungen abhängt, um den zentralen Strahl gedreht anordnen.

### 2.3 Angestrebte Spezifikationen des Spektrometers

Die angestrebten Spezifikationen eines Magnetspektrometers stellen einen Kompromiß zwischen physikalisch Wünschenswertem auf der einen Seite und mit einem akzeptablen finanziellen Aufwand technisch Realisierbarem auf der anderen Seite dar. Ein wesentlicher Kostenfaktor ist dabei die Raumwinkelakzeptanz des Analysators. In diesem Punkt wird in der folgenden Tabelle 1 ein verhältnismäßig niedriger Wert angegeben. Dabei sollte man aber berücksichtigen, daß die Gesamtluminosität des Spektrometers infolge des Energieverlust-Prinzips auch bei erheblich kleinerer Raumwinkelakzeptanz der von vergleichbaren (in Betrieb oder in der Planung) befindlichen konventionellen Spektrometern mindestens ebenbürtig, wenn nicht überlegen ist.

Energieauflösung	$\frac{\Delta E}{E}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-4}$ (FWHM)
Winkelauflösung		$0.3^\circ$	
Energiebereich	$\frac{E_{\max}}{E_{\min}}$	1.1	1.2
Masse-Energie Produkt	$\left[ \frac{\text{amu} \cdot \text{MeV}}{Q^2} \right]$	100	300
Raumwinkel [msterad]		2	4

Tab. 1 Angestrebte Spezifikationen des Spektrometers. Die linke Spalte gibt Minimalforderungen an, während die rechte Spalte Zielwerte darstellt.

### 3. Ionenoptische Grundlagen des vorgeschlagenen Entwurfs

Die angegebene Energieauflösung  $\frac{\Delta E}{E} = 10^{-4}$  entspricht einer Impulsauflösung  $\frac{\Delta p}{p} = 5 \cdot 10^{-5}$ . Für ein Bildspektrometer ist die Impulsauflösung in erster Ordnung gegeben durch<sup>10)</sup>

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{1}{R_p} = \frac{2x_o M}{D^A}$$

Hierbei bedeuten M die Vergrößerung und  $D^A$  die Dispersion des Spektrometers;  $2x_o$  ist die Objektgröße, d.h. der radiale Strahlfleckdurchmesser auf dem Target. Beim Energieverlust-Spektrometer ist damit der Durchmesser eines Fleckes monochromatischer Teilchen

gemeint. Das Produkt  $2x_0 M$  ergibt die Größe eines monochromatischen Bildfleckes des Spektrometers. Dieser Wert sollte auf der einen Seite klein sein, um eine hohe Auflösung zu erzielen. Auf der anderen Seite ist es jedoch nicht sinnvoll, die Größe eines Bildpunktes kleiner zu machen als die Ortsauflösung der Teilchendetektoren in der Bildebene des Analysators. Mit großflächigen Vieldraht-Proportionalkammern lassen sich heute Ortsauflösungen von 0.5 bis 1mm erzielen<sup>11,12)</sup>. Diese Werte werden den weiteren Überlegungen zugrunde gelegt.

Als untere Grenze für den Durchmesser eines monochromatischen Bildfleckes erscheint damit etwa 1 mm vertretbar. Aus Gleichung (3.1) würde bei einer Impulsauflösung von  $5 \cdot 10^{-5}$  dann eine notwendige Dispersion von  $D^A = 20 \text{ cm}/\%$  folgen. Diesen Wert zu erreichen stellt keine prinzipielle Schwierigkeit dar, doch gibt es andere Argumente gegen eine zu große Dispersion. Wie in Anhang A erläutert wird, hängt die Strahldispersion auf dem Target  $D^S$  mit der Vergrößerung  $M$  und Dispersion  $D^A$  des Analysators in folgender Weise zusammen:

$$D^S = - \frac{D^A}{M} .$$

Die Vergrößerung des Analysators sollte ungefähr gleich 1 sein, da der erwünschte Bildpunktdurchmesser von etwa 1 mm auch ein sinnvoller Wert für die Objektgröße  $2x_0$  ist. Daraus folgt, daß die Strahldispersion etwa gleich der Dispersion des Analysators sein soll. Die Strahldispersion geht aber entscheidend in die radiale Strahlfleckausdehnung auf dem Target  $x_t$  ein. Es ist nämlich

$$x_t \approx D^S \cdot \frac{\Delta p}{p} / \text{Strahl} .$$

Mit der im Abschnitt 1 gegebenen Impulsunschärfe von 0.2 % und einer Strahldispersion von 20 cm/% würde der Strahlfleck also 4 cm hoch sein. Da beim Energieverlust-Spektrometer das Target möglichst dünn und äußerst homogen sein sollte, stellt ein derart großer Strahlfleck erhebliche Anforderungen an die Targettechnik.

Es muß daher bei der Festlegung der ionenoptischen Ausgangswerte ein Kompromiß zwischen der Auflösung in erster Ordnung, der Strahlfleckausdehnung auf dem Target und der Objekt- und Bildgröße getroffen werden. Folgende Werte erscheinen uns als eine gute Lösung

für die Verhältnisse am Karlsruher Zyklotron:

$$\begin{aligned} \text{Vergrößerung} \quad |M| &= 1 \\ \text{Dispersion} \quad D^A &= 15 \text{ cm/\%} \\ \text{Objektdurchmesser } 2x_0 &= 0.086 \text{ cm} \end{aligned}$$

Daraus folgt eine Impulsauflösung in erster Ordnung von

$$\frac{\Delta p}{p} = 5.73 \cdot 10^{-5}$$

was einer Energieauflösung von

$$\frac{\Delta E}{E} = 1.15 \cdot 10^{-4}$$

entspricht und damit nur wenig über dem Zielwert liegt. Der Strahlfleck auf dem Target ist in diesem Fall  $x_t = 3$  cm hoch.

#### 4. Monochromator

---

##### 4.1 Grundriß des Strahltransportsystems

In Fig. 4 ist der Grundriß des Zyklotron-Gebäudes und des geplanten Strahlführungssystems dargestellt. Vom Schaltmagnet aus laufen sieben Strahlkanäle in die Experimentierhalle. Die vorhandene Halle ist mit Abmessungen von ungefähr 15 x 15 m zu klein für die Aufnahme eines gesamten Spektrometers, bestehend aus Monochromator und Analysator, da man möglichst viele der Kanäle für andere Experimente beibehalten möchte.

Es ist daher notwendig, den Strahl aus der Experimentierhalle heraus in eine neue Spektrometerhalle zu leiten. Zur Auslenkung eignet sich am besten Kanal 1, denn er verläuft nur ein kurzes Stück in einer Ecke der vorhandenen Experimentierhalle. Dieses Stück und das anschließend gezeichnete Monochromatorsystem kann man leicht mit einer entsprechenden Abschirmung versehen, ohne dabei viel Raum in der Experimentierhalle zu verlieren. Auf diese Weise kann gefahrlos in der Experimentierhalle gearbeitet werden, während das Spektrometer über Kanal 1 in Betrieb ist.

Das mit "Auslenkung Kanal 1" bezeichnete System dient der Anpassung des Strahls an den Eingangsspalt SM des Monochromators. Da der

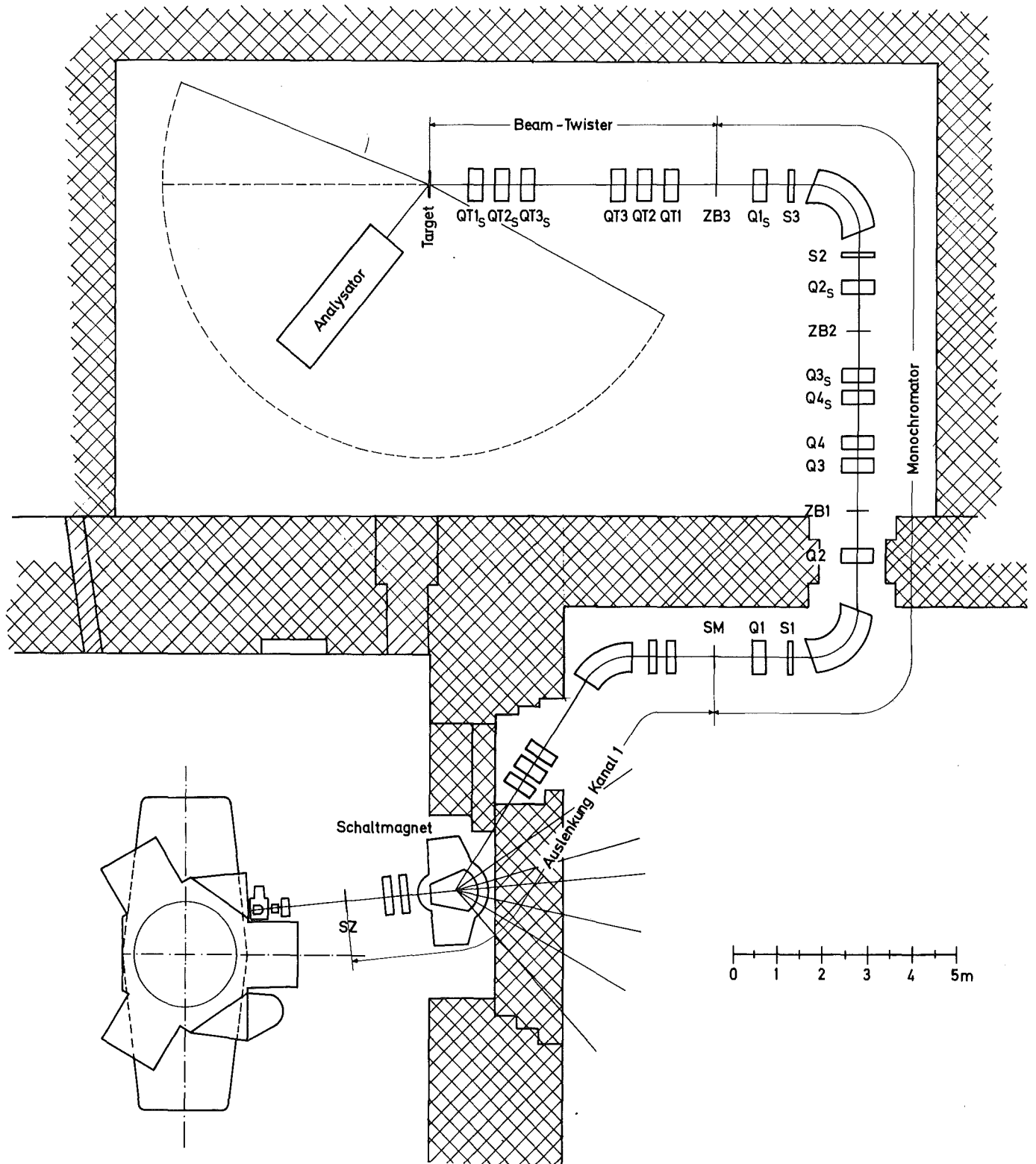


Fig. 4 Grundriß des geplanten Strahltransportsystems

Zyklotronstrahl nicht immer unter denselben Bedingungen hinsichtlich Strahlrichtung, Emittanz und Dispersion aus dem Beschleuniger extrahiert wird, erscheint es notwendig, ein möglichst flexibles System vorzusehen, das den Schaltmagneten einschließt und das auch bei sehr unterschiedlichen Extraktionsbedingungen in der Lage ist, definierte Strahleigenschaften am Eingangsspalt des Monochromators zu schaffen.

Für die geometrische Anordnung des Monochromators ist aus bautechnischen Gründen ein sogenannter C-Weg besonders geeignet. Denn bei der in Fig. 4 gezeigten Lösung ist die Spektrometerhalle in sich kompakt und bildet auch mit den vorhandenen Gebäuden eine kompakte Einheit, was kurze Versorgungsleitungen ermöglicht. Die notwendige Spektrometerhalle hat einen Grundriß von etwa 16 x 10 m, ihre Höhe muß im Bereich über dem Target ca. 8 m betragen.

Das Monochromatorsystem ist vollkommen symmetrisch aufgebaut. Es besteht aus zwei Dipolmagneten mit Ablenkwinkeln von je  $90^\circ$  und einem Ablenkradius von  $r = 1$  m, acht Quadrupolmagneten, die entsprechend der in Fig. 4 gegebenen Bezeichnung symmetrisch erregt werden, und drei Sextupolmagneten, die zur Korrektur der Aberrationen zweiter Ordnung vorgesehen sind. Die Kantenwinkel der Dipole von jeweils  $20^\circ$  wirken horizontal defokussierend.

An den Stellen ZB1, ZB2 und ZB3 befinden sich dispersive Zwischenbilder an denen der Strahl gegebenenfalls mit Blenden analysiert werden kann. Hierfür sind insbesondere die beiden ersten Zwischenbilder geeignet, da der Strahl dahinter um  $90^\circ$  abgelenkt wird, so daß die an den Blendenbacken vorwärts gestreuten Teilchen dort absepariert werden können und keinen Untergrund am Target erzeugen.

Die sechs ebenfalls symmetrisch erregten Quadrupolmagnete des "Beam-Twisters" sind gegenüber der üblichen Stellung um  $45^\circ$  um die Strahlachse gedreht aufgebaut. Sie bilden den Strahl im Verhältnis 1:1 vom Punkt ZB3 auf das Target ab und vertauschen die horizontalen und vertikalen Orts- und Winkelkomponenten, d.h. sie drehen den Strahl um  $90^\circ$  um seine Achse. Auf diese Weise entsteht die vertikale Dispersion auf dem Target.

#### 4.2 Ionenoptische Eigenschaften

Die ionenoptischen Eigenschaften des Strahltransportsystems wurden mit dem Strahltransportprogramm TRANSPORT<sup>13)</sup> berechnet, dessen

Nomenklatur - insbesondere die Bezeichnung der Matrixelemente erster Ordnung  $R_{ik}$  und zweiter Ordnung  $T_{ijk}$  - im folgenden benutzt wird. Bezüglich einer detaillierten Beschreibung der in dem Programm verwendeten Matrixtheorie 1. und 2. Ordnung wird auf die Referenzen 10) und 13) verwiesen.

a) Auslenkung Kanal 1

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt kurz erwähnt, wurde zur Berechnung der ionenoptischen Eigenschaften des Monochromators als Startbedingung am Eingangsspalt SM ein achromatischer Strahl mit bestimmten Parametern des Phasenraumellipsoids angenommen. Ziel der Berechnungen des 'Auslenkungssystems Kanal 1' war es daher, ausgehend von verschiedenen Extraktionsbedingungen am Punkt SZ zwischen Zyklotron und Schaltmagnet die Quadrupolerregungen so zu optimieren, daß am Punkt SM die gewünschten Strahleigenschaften erzielt werden.

Der horizontale und der vertikale Schnitt durch das am Spalt SM angenommene Phasenraumellipsoid sind in Fig. 5a dargestellt. Die Figuren 5b bis 5d zeigen auf der linken Seite jeweils die am Startpunkt SZ angekommenen Phasenellipsen und Strahldispersionen ( $R_{16}, R_{26}$ ) und rechts die transformierten Ellipsen am Monochromator-spalt. Man erkennt, daß trotz der sehr unterschiedlichen Startbedingungen die Zielwerte am Spalt SM in guter Näherung erreicht werden.

Diese Rechnungen wurden lediglich in erster Ordnung durchgeführt.

b) Monochromator und "Beam-Twister"

Der Monochromator wurde für eine Strahldispersion auf dem Target von  $D^S = R_{16} = 15 \text{ cm}/\%$  ausgelegt. Fig. 6 zeigt die horizontalen und vertikalen charakteristischen Trajektorien des Systems<sup>+)</sup>.

Man erkennt, daß in beiden Ebenen sowohl die sinus- als auch die cosinusförmigen Trajektorien einen symmetrischen Verlauf haben. Das hat zum einen den Vorteil; daß einige Aberrationsterme 2. Ordnung

---

<sup>+) Die Trajektorien des "Beam-Twisters" liegen in einem um  $45^\circ$  um die Strahlachse gedrehten Koordinatensystem. Wegen der Kopplung der horizontalen und vertikalen Ebene im "Beam-Twister" lassen sich die Trajektorien im üblichen Koordinatensystem nicht darstellen.</sup>

Phasenellipsen und Dispersionen								
am Punkt SZ angenommene Werte				Ergebnis der Transformation am Pkt. SM				
	$R_{16}$ (cm/%)	$R_{26}$ (mrad/%)	Horizontal	Vertikal	Horizontal	Vertikal	$R_{16}$ (cm/%)	$R_{26}$ (mrad/%)
a							0.0	0.0
b	0.0	0.0					0.0	0.0
c	0.5	2.0					-0.1	0.04
d	0.0	0.0					0.0	0.0

Fig. 5 Transformation der Phasenellipsen vom Punkt SZ zum Eingangsspalt des Monochromators SM.

a) Zur Berechnung des Monochromators angenommene Phasenellipsen am Eingangsspalt SM

b-d) Am Punkt SZ angenommene Bedingungen und transformierte Ellipsen am Punkt SM



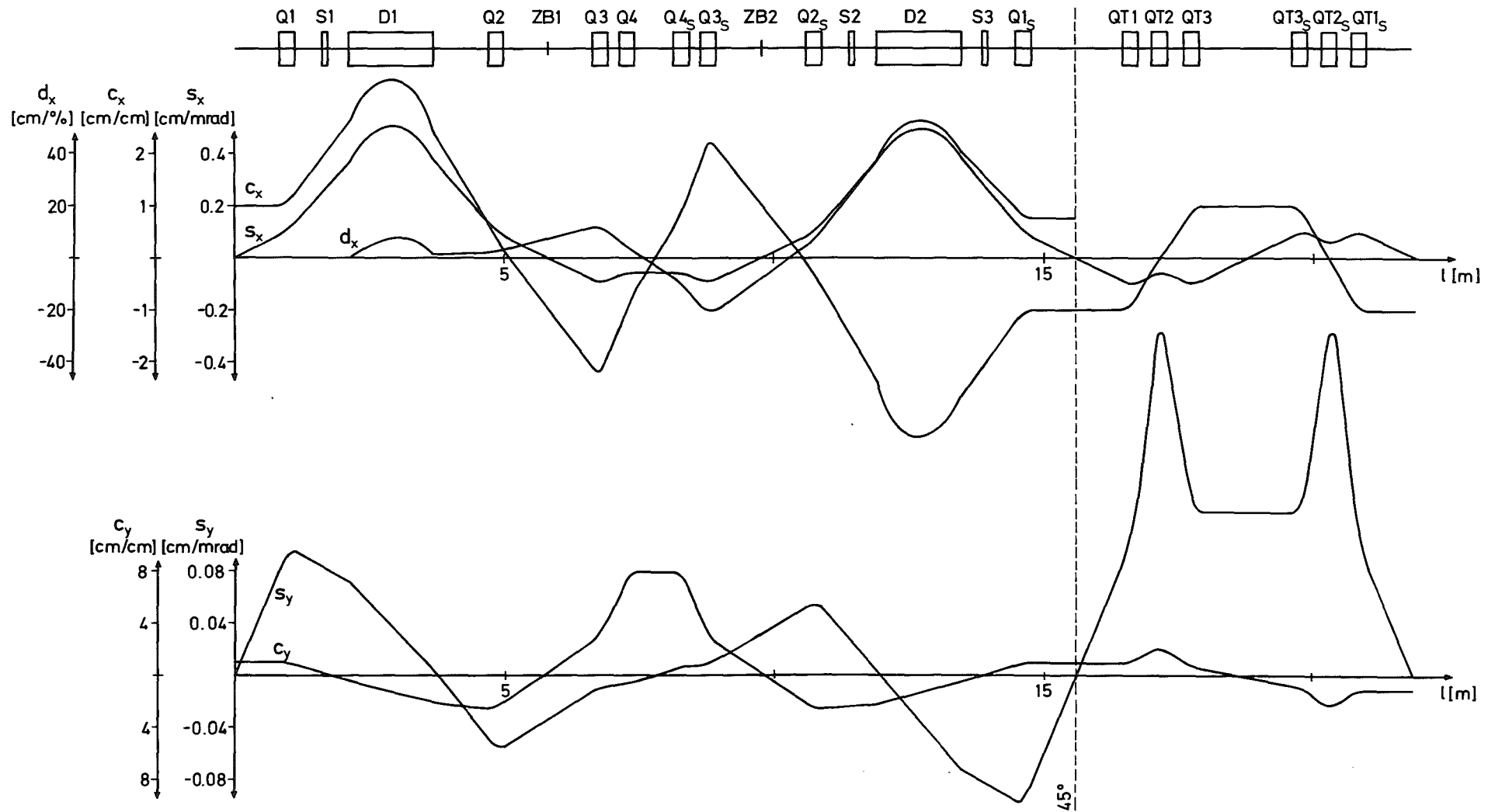


Fig. 6 Trajektorien im Monochromatorsystem. Zwischen ZB3 und dem Target sind die Trajektorien in einem um  $45^\circ$  um die Strahlachse gedrehten Koordinatensystem dargestellt. Die Dispersionsfunktion  $d_x$  wurde in diesem Teil weggelassen.

von vornherein verschwinden. Daneben wird der Eingangsspalt in beiden Ebenen im Verhältnis 1:1 zum Zwischenbild ZB3 und von dort unter einer Drehung um  $90^\circ$  auf das Target abgebildet, wobei der Strahl sowohl bei ZB3 als insbesondere auch auf dem Target in beiden Ebenen eine Taille hat. Der Durchmesser eines monochromatischen Bildpunktes auf dem Target ist folglich durch die Größe des Eingangsspalt es gegeben.

Die Lage der Zwischenbilder ZB1 und ZB2 ist am Nulldurchgang der Trajektorie  $s_x$  zu erkennen. Die Dispersion ist an diesen Stellen halb so groß wie auf dem Target.

In Abschnitt 2.2 wurde bereits erwähnt, daß die Strahldispersion in Abhängigkeit der jeweils untersuchten Reaktion und des Streuwinkels verändert werden muß (s. Anhang A). Dies geschieht durch eine veränderte Erregung der Quadrupolmagnete, wobei sich der Verlauf der Trajektorien ändert. Für die am Karlsruher Zyklotron möglichen Reaktionen beträgt der notwendige Dispersionsbereich etwa  $\pm 10\%$  der Nominaldispersion. Selbst bei Änderungen von  $\pm 20\%$  der Dispersion bleibt bei dem gezeigten System die Symmetrie der Trajektorien erhalten, wenn man die Quadrupole symmetrisch erregt. Das bedeutet, ein monochromatischer Strahlfleck hat über diesen weiteren Dispersionsbereich einen konstanten Durchmesser, der gleich dem Durchmesser des Eintrittspaltes ist.

Die Strahleinhüllenden des Monochromatorsystems sind in Fig. 7 dargestellt. Die Apertur der Quadrupolmagnete ist hinreichend groß, so daß der Strahl nicht in Gebiete nahe der Polschuhe kommt, wo Abweichungen vom idealen Quadrupolfeld im allgemeinen am größten sind.

Zur Korrektur der Aberrationen zweiter Ordnung sind drei Sextupolmagnete vorgesehen. Sextupol S1 beeinflußt nur geometrische Aberrationen, da vor dem ersten Dipol die Dispersion Null ist. Die Sextupole S2 und S3 dagegen wirken stark auf chromatische Fehler, da sie an Stellen mit hoher Dispersion liegen. Mit diesen Sextupolen werden insbesondere die Neigung der Bildebene auf dem Target  $T_{126}$  und der Term  $T_{166}$  gleichzeitig eliminiert. Die Aberrationsterme, die infolge der Symmetrie des Systems bereits ohne Korrekturlemente Null waren, werden durch die Erregung von S2 und S3 verändert. Die Anordnung der Sextupole ist jedoch so gewählt, daß bei Erregung von S1 mit dem Betrag der Summe von S2

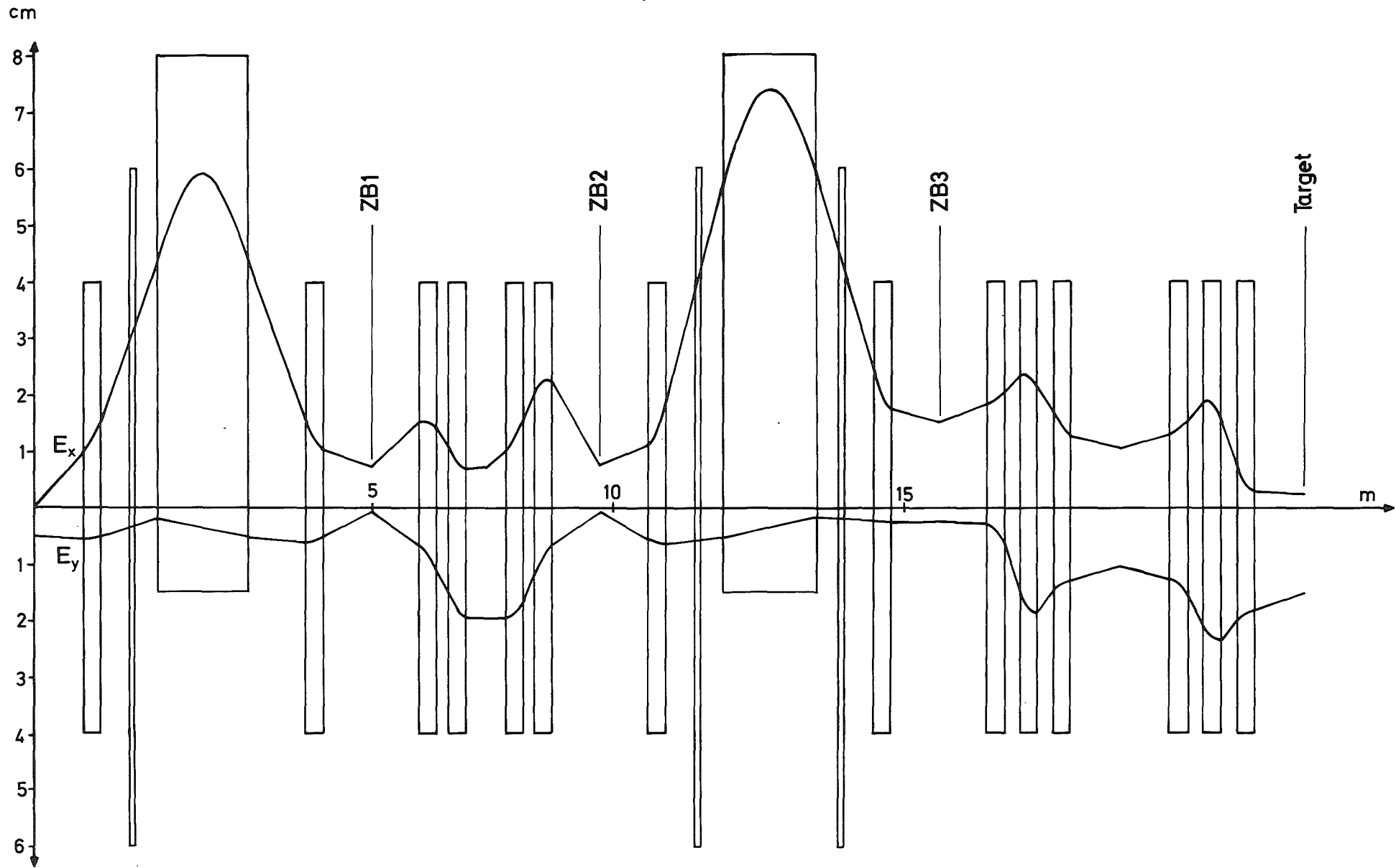


Fig. 7 Envelopen im Monochromatorsystem

und S3 diese Terme wieder eliminiert und andere zusätzlich stark reduziert werden.

Der Einfluß der Aberrationen zweiter Ordnung auf die Abbildungs- und Auflösungseigenschaften des Monochromators kann am besten anhand der Intensitätsverteilung des Strahls auf dem Target beurteilt werden. Diese Intensitätsverteilung wurde durch Transformation einer großen Anzahl (im allgemeinen  $2 \cdot 10^6$ ) von Punkten des Phasenraumellipsoids vom Eingang SM auf das Target unter voller Berücksichtigung der Terme 2. Ordnung ermittelt. Der Rechengang baut auf einer Methode auf, die in Ref. 14) beschrieben ist. Sie wurde entsprechend den Verhältnissen beim Energieverlust-Spektrometer abgewandelt. Am Startpunkt wurde dabei der Einfachheit halber eine Gleichverteilung der Intensität angenommen, und das Phasenraumellipsoid wurde durch ein Parallelepipid ersetzt. Innerhalb des Epipeds wurde die Intensität gleich 1 und außerhalb gleich Null gesetzt.

In Fig. 8 ist das Ergebnis der Rechnung für die Dispersion 15 cm/% dargestellt.

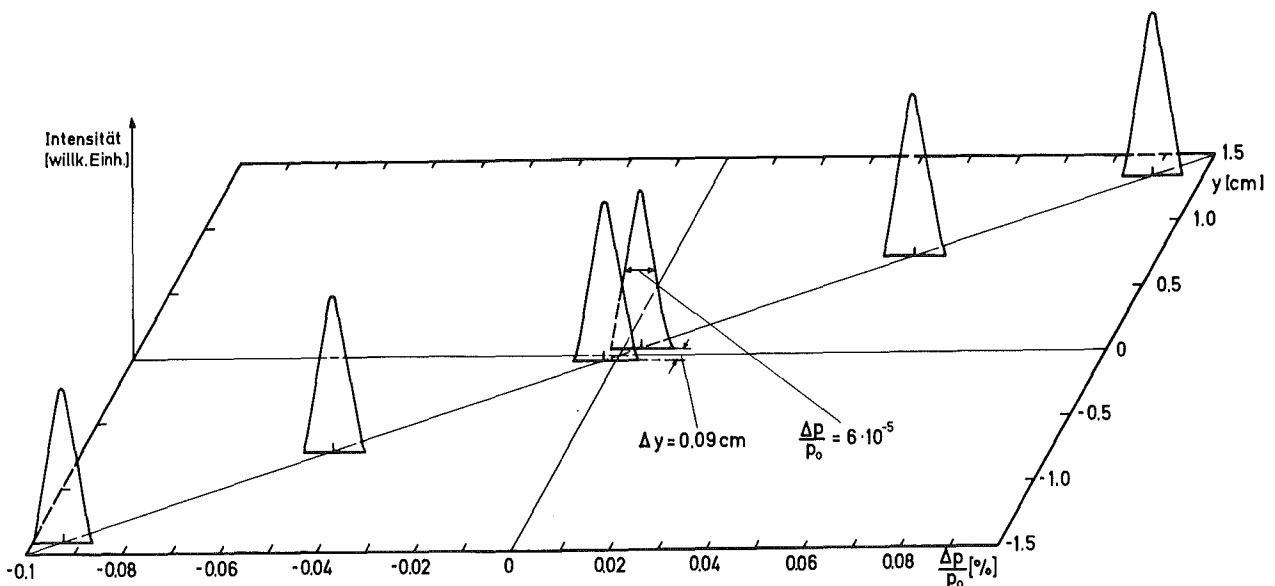


Fig. 8 Relative Strahlintensität auf dem Target in Abhängigkeit von der vertikalen Ortsabweichung  $y$  und der Impulsabweichung  $\delta = \frac{p-p_0}{p_0}$  unter Berücksichtigung der Aberrationen 2. Ordnung

Aufgetragen ist die relative Intensität des Strahles am Target über der  $y - \delta$  - Ebene.  $y$  bedeutet die vertikale Ortsachse und  $\delta = \frac{p-p_0}{p_0}$  die relative Abweichung vom mittleren Impuls des Strahles. Die Zielebene wurde in Rechteckraster der Kantenlänge  $y=0.086$  cm und  $\delta = 0.001$  % unterteilt. Die Breite der Streifen der Ortsachse entsprechen dem Durchmesser eines monochromatischen Bildfleckes in erster Ordnung.

Man erkennt auf dem Bild, daß eine genaue Proportionalität zwischen der Orts- und Impulsabweichung vorliegt. In einem Streifen der Breite 0.086 cm beträgt die Halbwertsbreite der Impulsverteilung  $\frac{\Delta p}{p_0} = 6 \cdot 10^{-5}$ . In erster Ordnung ist  $\frac{\Delta p}{p_0} = 5.73 \cdot 10^{-5}$ , also nur um 5 % geringer.

Eine noch stärkere Verdeutlichung der Genauigkeit der Strahldispersion auf dem Target erhält man, wenn man sich das Profil des Intensitätsbergrückens in Fig. 8 entlang der Diagonalen auf der Grundebene ansieht. Diese Diagonale stellt den Zusammenhang zwischen Orts- und Impulsabweichung in erster Ordnung dar

$$y = R_{16} \cdot \frac{\Delta p}{p_0} \quad (4.1)$$

Das gewünschte Profil ergibt sich, wenn man über den gesamten Ortsbereich  $y$  die Strahlintensität als Funktion von

$$\frac{p - \Delta p(y)/\text{nominal}}{p_0} \quad (4.2)$$

darstellt. Nach Gl. 4.1 bedeutet hierbei  $\frac{\Delta p}{p_0}(y)/\text{nominal} = \frac{1}{R_{16}} \cdot y$ .

In Fig. 9 ist die Einhüllende aller Schnitte durch den Intensitäts-

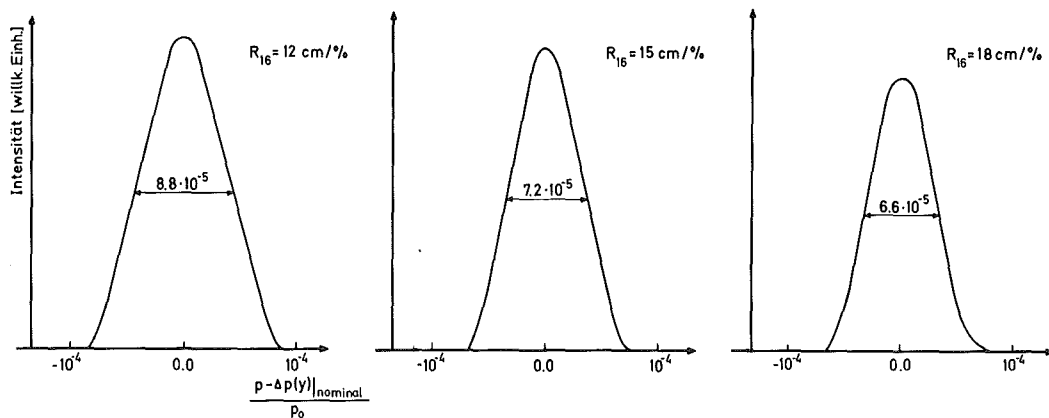


Fig. 9 Einhüllende aller Schnitte durch die Intensitätsverteilung auf dem Target bei verschiedenen Strahldispersionen  $R_{16}$ .

berg in der erläuterten Form für drei verschiedene Strahldispersionen dargestellt. Die Halbwertsbreiten der Verteilungen nehmen erwartungsgemäß mit wachsender Dispersion ab. Der Einfluß der Aberrationen ist in allen drei Fällen etwa gleich groß.

Außer den beschriebenen Betrachtungen des Monochromators aus der Sicht des Energieverlust-Prinzips wurde auch untersucht, inwieweit eine achromatische Einstellung des Systems möglich ist, um es konventionell zu betreiben. Wegen der hohen Flexibilität konnte leicht eine achromatische Fokussierung erreicht werden, wobei außer an den Zwischenbildern ZB1 und ZB2 noch zusätzlich eine Analyse des Strahls mit einem Spalt in der Symmetrie-Ebene des Systems zwischen Q4 und Q4<sub>S</sub> möglich ist. Die Impulsbreite des Strahls am Target beträgt dabei in erster Ordnung etwa  $\frac{\Delta p}{p} = 5 \cdot 10^{-5}$ . Es wurden jedoch keine Untersuchungen in Bezug auf die Transmission und die Auflösung des Monochromators in zweiter Ordnung durchgeführt.

## 5. Analysator

Als Analysator wurde eine Anordnung aus einem Quadrupol und zwei Dipolmagneten mit einem Ablenkwinkel von jeweils  $80^\circ$  und einem Ablenkradius von  $r = 1,45$  m gewählt. Fig. 10 zeigt einen vertikalen Schnitt durch den Spektrographen. Dem gezeigten System liegen Ideen des im Bau befindlichen 3,50 m -Energieverlust-Spektrometers in Los Alamos zugrunde. Die wesentlichen Daten des Systems sind in der folgenden Tabelle zusammengefaßt.

Anordnung	Quadrupol-Dipol-Dipol (QDD)
Ablenkradius	1 45 m
Gaphöhe	9 cm
Energieauflösung $\frac{\Delta E}{E}$ 1.Ordnung	$1,12 \cdot 10^{-4}$
Winkelauflösung	$\pm 1$ mrad
Energiebereich $\frac{E_{\max}}{E_{\min}}$	1.1
Masse-Energie-Produkt $\left[ \frac{AE}{Q^2} \right]$	$270 \left[ \frac{\text{amu} \cdot \text{MeV}}{Q^2} \right]$
Raumwinkelakzeptanz	3 msterad
Dispersion	15 cm/ %

Tab. 2 : Spezifikationen des 1,45 m QDD Spektrometers

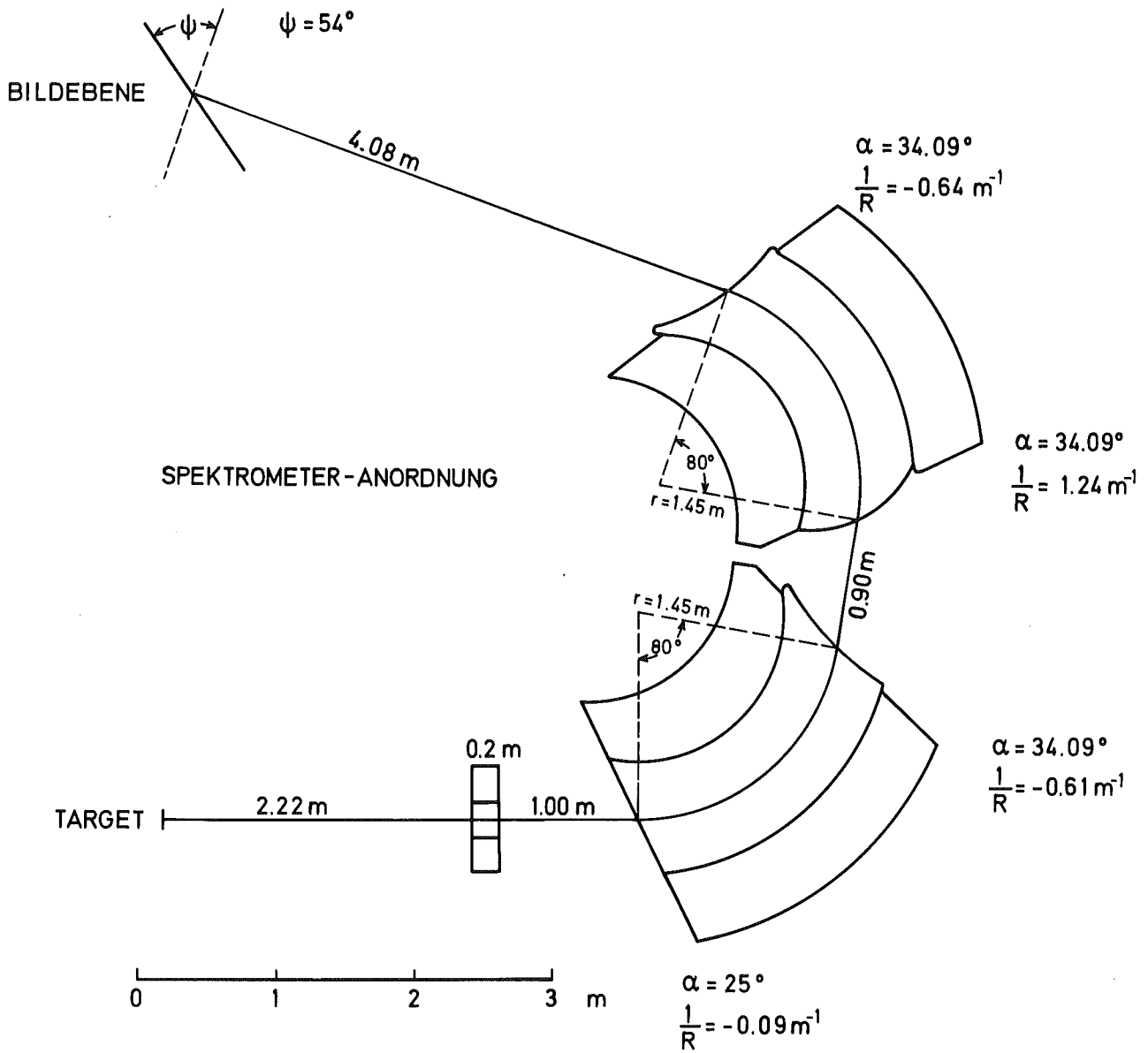


Fig. 10 Vertikaler Schnitt durch den Spektrographen

Bei dem genannten Ablenkradius und einer maximalen Feldstärke von ca. 16 kG, also einem  $B \cdot \rho$ -Wert von 24 kG·m, lassen sich

	Deuteronen	bis	ca. 135 MeV
und	Tritonen	bis	ca. 90 MeV

spektroskopieren. Die maximal erreichbaren Energien für emittierte Protonen,  $\alpha$ -Teilchen,  ${}^3\text{He}$ -Teilchen und  ${}^6\text{Li}^{3+}$ -Ionen liegen weit innerhalb des akzeptierten Masse-Energie-Produkts.

Die Trajektorien und Enveloppen des Systems sind in Fig. 11 dargestellt. Die mit x bezeichnete Ebene ist die radiale. In dieser Ebene liegt Punkt-zu-Punkt Abbildung mit einer Vergrößerung vom Betrag 1 vor.

Die Trajektorie  $c_y$  charakterisiert die Parallel-zu-Punkt-Abbildung in der axialen Ebene, die die eingangs erwähnte Streuwinkeldispersion erzeugt. Alle Teilchen, die in axialer Ebene parallel zum zentralen Strahl in den Analysator laufen, werden zum Punkt  $y=0$  fokussiert. Teilchen, die unter einem anderen Winkel eintreffen, also nicht exakt um den Winkel  $\theta$  gestreut wurden, auf den das Spektrometer eingestellt ist, werden auf einen Punkt in der Bildebene mit  $y \neq 0$  abgebildet. Die Ermittlung des exakten Streuwinkels für jedes Teilchen wird im Zusammenhang mit der Betrachtung der Intensitätsverteilung in der Bildebene noch verdeutlicht.

Zur Korrektur der Aberrationen zweiter Ordnung werden die Polschuhkanten der Dipolmagnete gekrümmt. Wegen der Streuwinkeldispersion gehen nicht nur die radialen, sondern auch die axialen Aberrationen in die Gesamtauflösung ein, letztere jedoch mit wesentlich geringem Gewicht. Die optimale Korrektur der Aberrationen ergibt sich bei einer Neigung der Bildebene von  $54^\circ$  und den in Fig. 10 angegebenen Krümmungsradien der Magnetkanten.

In ähnlicher Weise wie beim Monochromator wurde auch beim Analysator die Intensitätsverteilung in der Bildebene unter Berücksichtigung der Aberrationen 2. Ordnung berechnet. In dem im folgenden beschriebenen Beispiel sind die kinematischen Bedingungen der Streuung von 104 MeV  $\alpha$ -Teilchen an  ${}^{58}\text{Ni}$  unter einem Laborstreuwinkel von  $45^\circ$  zugrunde gelegt. Um gleichmäßig über die gesamte Bildebene verteilt Anregungslinien zu erhalten, wurden fiktive Zustände bei 2,4,6 und 8 MeV angenommen. Das Spektrometer ist so eingestellt, daß die Linie bei 4 MeV in der Mitte der Bildebene liegt.



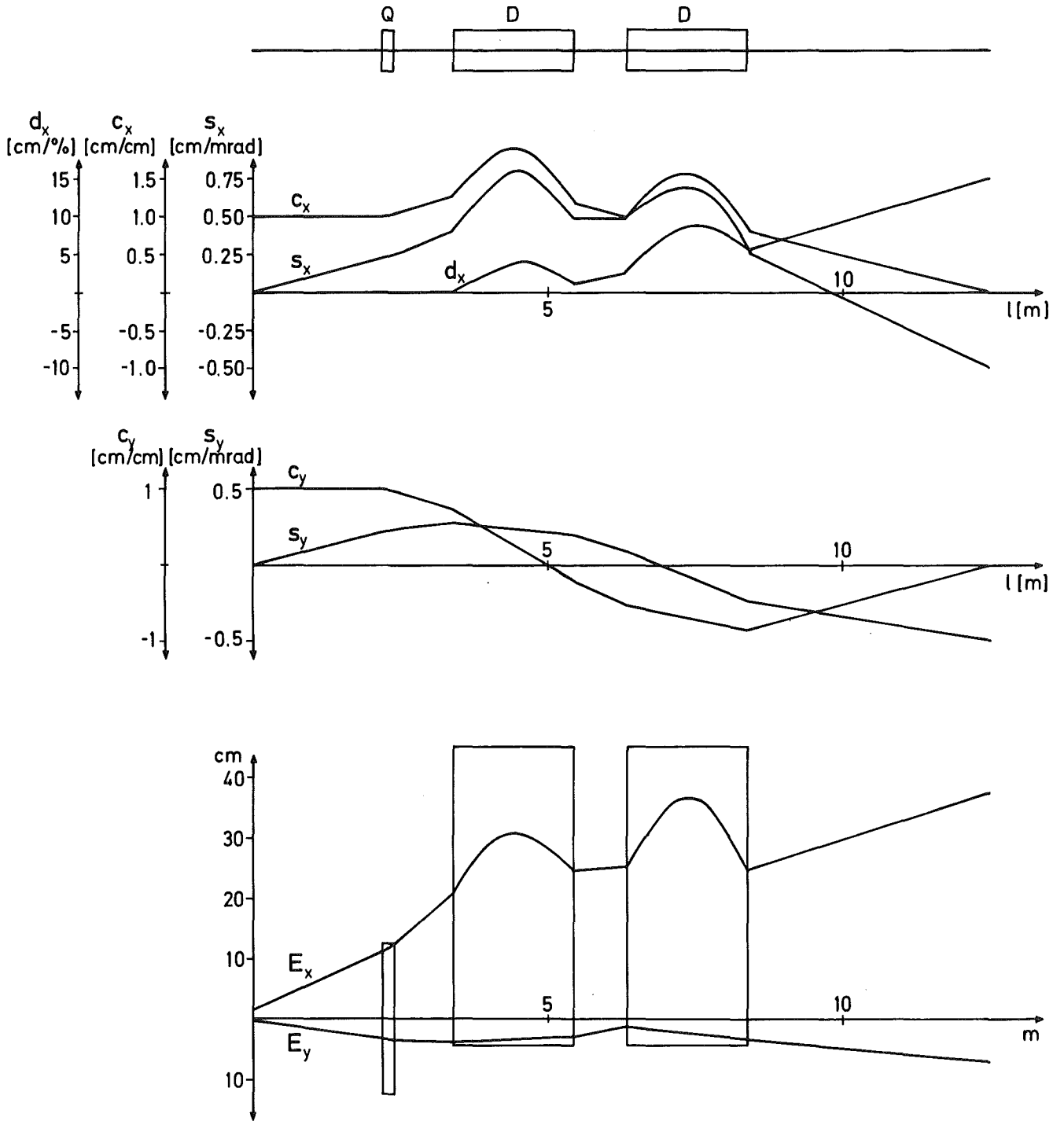


Fig. 11 Trajektorien und Enveloppen im Spektrographen

Zur Berechnung der in Fig. 12 dargestellten Intensitätsverteilung wurde angenommen, daß die Teilchen von jedem Punkt des Targetflecks mit der gleichen Intensität in den gesamten Raumwinkel des Spektrometers emittiert werden. Die in Fig. 8 und 9 gezeigte Unschärfe des primären Strahls an einem bestimmten Punkt des Targetflecks wurde durch eine Rechteckverteilung berücksichtigt, deren Halbwertsbreite gleich dem in Fig. 8 angegebenen Wert ist.

Fig. 12 zeigt die gesamte Bildebene, über die die Intensitätsverteilung der Teilchen aufgetragen ist, die den Targetkernen innere Anregungsenergien von 0 (elastisch), 2,4,6 bzw. 8 MeV übertragen haben. Die Streukinematik ist dabei bereits berücksichtigt. In der radialen Achse des Teilchendetektors wurde eine Ortsauflösung von 0.086 cm und in der axialen Richtung eine Auflösung von 0.5 cm angenommen. Das Bild verdeutlicht die Wirkung der Parallelzu-Punkt Abbildung in der axialen Ebene des Spektrometers. Eine Anregungslinie wird als strichförmige Intensitätsverteilung wiedergegeben. Der Winkel zwischen dem Strich und dem Koordinatensystem des Teilchendetektors ist charakteristisch für die kinematischen Verhältnisse der betrachteten Reaktion. Die Krümmung des Intensitätsverlaufs ist eine Folge der axialen Aberrationen.

Simuliert man nun die Aufgabe des an den ortsempfindlichen Teilchendetektor angeschlossenen On-line-Computers, die zweidimensionale Intensitätsverteilung zu einem gewöhnlichen eindimensionalen Spektrum umzusortieren, so erhält man das im unteren Teil von Fig. 12 dargestellte Resultat.

Die Kanalbreite des Spektrums ist gegeben durch die Ortsauflösung des Detektors und beträgt 115 keV/Kanal. Die Halbwertsbreite der Anregungslinie bei 4 MeV, auf die das Spektrometer eingestellt wurde, beträgt 20 keV. Bei dem gezeigten Beispiel wurden bewußt keine besonders günstigen Verhältnisse bezüglich der Streukinematik ausgewählt, wie sie etwa bei schweren Targetkernen vorliegen. Eine Vorstellung der optimalen Auflösung des Spektrometers vermittelt Fig. 13, auf der die elastische Linie der Streuung von 104 MeV  $\alpha$ -Teilchen an  $^{208}\text{Pb}$  unter einem Streuwinkel von  $20^\circ$  aufgetragen ist. Hierbei wurden für den Monochromator Gaussverteilungen als Startbedingung angenommen und die daraus resultierende Intensität auf dem Target der Berechnung des gezeigten Spektrums zugrunde gelegt. Die Ortsauflösung des Teilchendetektors wurde zu 0.043 cm

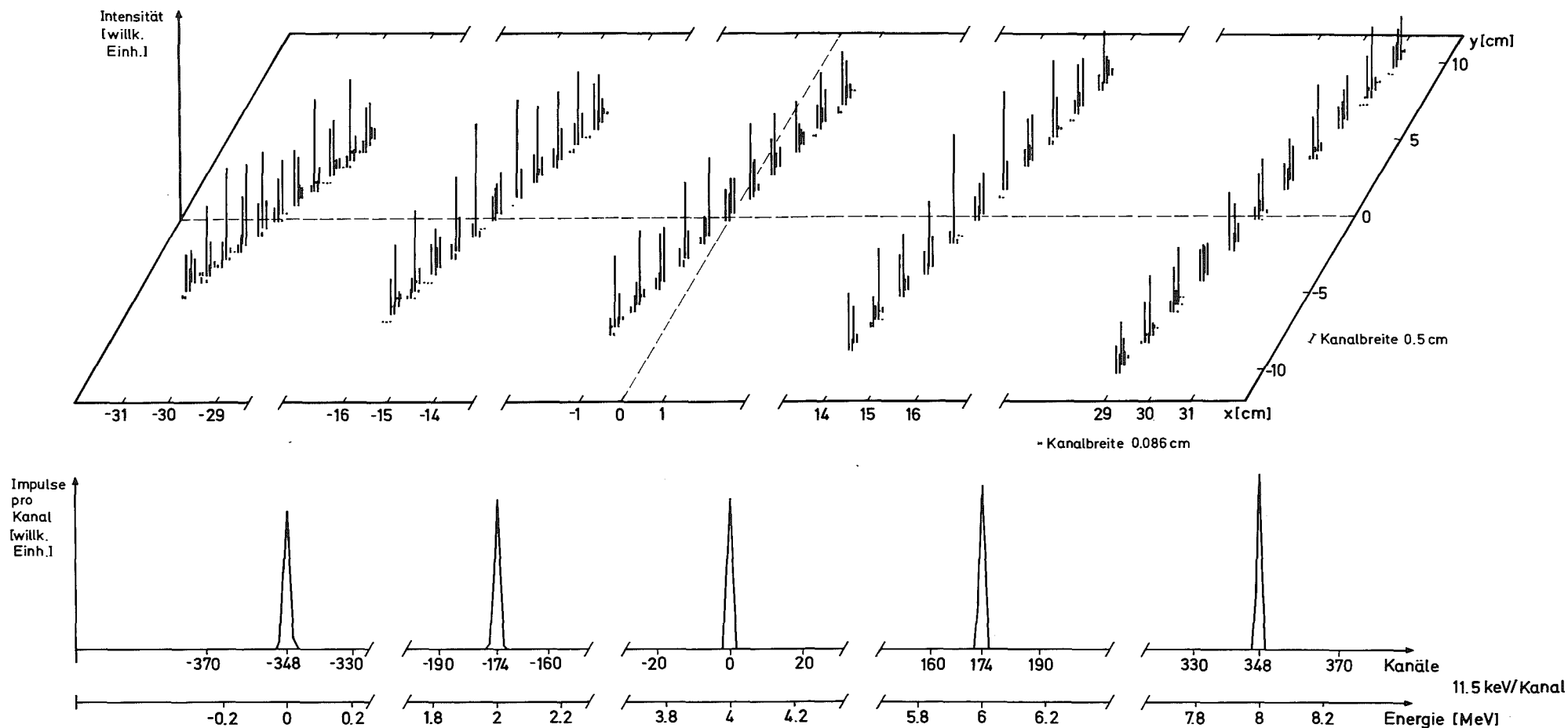


Fig. 12 Oben: Intensitätsverteilung in der Bildebene des Analysators bei der Streuung von 104 MeV  $\alpha$ -Teilchen an  $^{58}\text{Ni}$  unter einem Laborstreuwinkel von  $\theta = 45^\circ$ . Das Spektrometer ist so eingestellt, daß der zentrale Strahl einer fiktiven Anregungsenergie von 4 MeV entspricht.

Unten: Energiespektrum der Teilchen, das sich aus der im oberen Teil gezeigten Intensitätsverteilung ergibt.

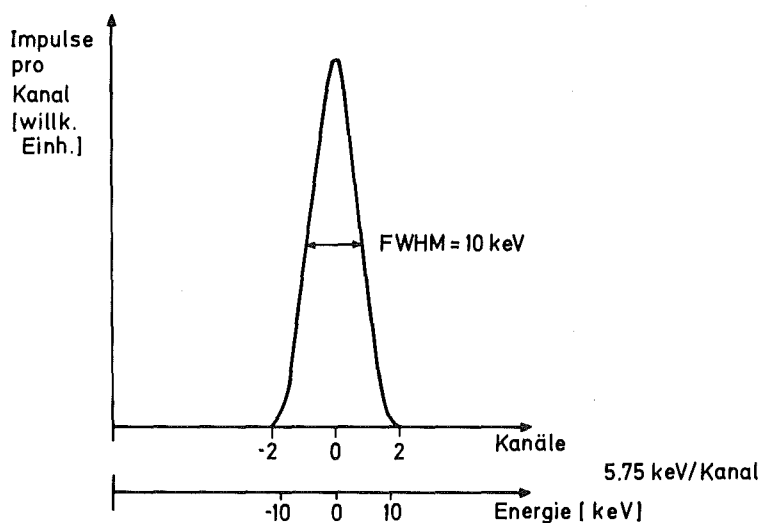


Fig. 13 Elastische Linie bei der Streuung von  $10^4$  MeV  $\alpha$ -Teilchen an  $^{208}\text{Pb}$ . Angenommene Ortsauflösung des Detektors in der Dispersionssebene: 0.043 cm; senkrecht zur Dispersionssebene 0.25 cm

(radial) und 0.25 cm (axial) angenommen. Die angenommene Halbwertsbreite ist mit 10 keV geringer als der theoretische Wert 1. Ordnung von 11.5 keV und selbst die Basisbreite beträgt nur 20 keV. Dies bestätigt die zufriedenstellende Korrektur der Terme höherer Ordnung.

## 6. Schlußbemerkungen

Der vorliegende ionenoptische Entwurf eines Energieverlust-Spektrometers sollte ein Gefühl dafür vermitteln, auf welche Weise und unter welchem technischen Aufwand die im Abschnitt 2.3 gestellten Spezifikationen für ein hochauflösendes Teilchenspektrometer am Strahl des Isochronzyklotrons Karlsruhe erzielt werden können. Mit dem vorgeschlagenen Konzept werden alle Mindestanforderungen erfüllt und die erwünschten Zielwerte in den meisten Punkten erreicht oder

sogar übertroffen.

Eine reine ionenoptische Betrachtung kann selbstverständlich nicht als einzige Grundlage für die Konstruktion der erforderlichen Magnete und zur Abschätzung der Gesamtkosten eines derartigen Systems dienen. Insbesondere für den Analysator sind dazu umfassende Strahltransportrechnungen in höherer als der zweiten Ordnung notwendig, sowie eingehende Untersuchungen zur technischen Realisierung der erforderlichen Magnetfelder und zur Kostenoptimierung des Geräts. Doch kann man durch Vergleich mit ähnlichen bestehenden oder im Bau bzw. in der Planung befindlichen Systemen unter Berücksichtigung des derzeitigen Preisniveaus Richtwerte für die Kosten gewinnen. Für den Monochromatorteil einschließlich des "Beam Twister" bilden die vorgelegten Rechnungen sogar eine recht gute Basis zur Kostenabschätzung, weil die Magnete dieses Teils nicht so hohe Spezifikationen erfüllen müssen und vergleichbare Elemente in größerer Zahl für die Strahltransportsysteme sowohl des Karlsruher Zyklotrons als auch anderer Beschleuniger gebaut wurden.

Provisorische Rechnungen<sup>15)</sup> ausgehend von der Marktlage im Frühjahr 1973 ergeben folgende Kosten für die Magnete einschließlich Versorgung

Monochromator und "Beam-Twister"	ca. 400 000,-	DM
Analysator	ca. 1 300 000,-	DM
<hr/>		
Magnetsystem insgesamt	ca. 1 700 000,-	DM

Zu diesen Kosten sind noch die Investitionen für die notwendigen neuen Gebäude, Nachweisgeräte u.a. zu addieren.

Die experimentellen Möglichkeiten im Bereich der Niederenergiephysik mit Beschleunigern werden hauptsächlich bestimmt durch die Energie und die Sorte der beschleunigten Teilchen, die Intensität des Strahls und das Auflösungsvermögen des Teilchenspektrometers. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren würde das Isochronzyklotron Karlsruhe mit dem beschriebenen Energieverlust-Spektrometer auch in Zukunft mit an vorderster Stelle unter den Beschleunigern dieser Größenordnung stehen, selbst wenn man noch nicht verwirklichte

Projekte an anderen Beschleunigern in den Vergleich einbezieht. Insbesondere würde mit dem Strahl von 156 MeV  ${}^6\text{Li}$ -Ionen in Verbindung mit dem Spektrometer ein neues umfangreiches Forschungsgebiet erschlossen. Die erforderlichen Aufwendungen für das Spektrometer scheinen daher - besonders im Vergleich mit ähnlichen Projekten - äußerst lohnend zu sein.

Wir danken Dr. Th. Walcher von der Technischen Hochschule Darmstadt für zahlreiche wertvolle Hinweise und klärende Diskussionen sowie Dr. S. Martin von der Kernforschungsanlage Jülich für die Abschätzung der Magnetkosten.

## Anhang A

### Ionenoptische Beschreibung des Energieverlust-Prinzips

Das Energieverlust-Prinzip beruht darauf, daß der Spektrograph die Funktion des zweiten Teiles einer achromatischen Strahltransportsystems übernimmt, in dessen dispersivem Fokus sich das Target befindet. Die Ortsabweichung eines Teilchens in der Bildebene des Spektrographen ist eine Funktion des Energieverlustes im Target, aber nicht der absoluten Teilchenenergie, wie im folgenden gezeigt wird.

Für das Spektrometer ist die radiale Ortsabweichung  $x_f$  eines Teilchens in der Fokalebene als Funktion seiner Koordinaten am Target (Index t) in erster Ordnung gegeben durch

$$x_f = R_{11} x_t + R_{12} \theta_t + R_{16} \delta_t \quad (\text{A-1})$$

Die Matrixelemente  $R_{ij}$  entsprechen hierbei der TRANSPORT-Notation<sup>10)</sup>.  $x_t$  und  $\theta_t$  sind die radialen Orts- bzw. Winkelabweichungen des Teilchens vom zentralen Strahl und  $\delta_t = \frac{p_f - p_{fo}}{p_{fo}}$  ist die Impulsabweichung des Teilchens vom Impuls  $p_{fo}$ , auf den der zentrale Strahl des Spektrometers eingestellt ist.  $p_{fo}$  ist eine Funktion der betrachteten Reaktion und des Streuwinkels. Bei einem Bildspektrometer (Punkt-Punkt-Abbildung) ist  $R_{12} = 0$ . Die Position eines Teilchens auf dem Target  $x_t$  ist bei einem Monochromatorsystem mit Punkt-Punkt-Abbildung gegeben durch

$$x_t = r_{11} x_o + r_{16} \delta_s \quad (\text{A-2})$$

Hierbei bedeuten  $r_{ij}$  die Matrixelemente des Monochromators,  $x_o$  die Ortsabweichung des Teilchens am Eintrittsspalt des Monochromators und  $\delta_s = \frac{p_i - p_{io}}{p_{io}}$  die Impulsabweichung des Teilchens vom mittleren Impuls des einlaufenden Strahls  $p_{io}$ . Aus den Gleichungen (A-1) und (A-2) folgt

$$x_f = R_{11} r_{11} x_o + R_{11} r_{16} \delta_s + R_{16} \delta_t \quad (\text{A-3})$$

Der Q-Wert einer Reaktion oder inelastischen Streuung ist eine Funktion des einlaufenden und des auslaufenden Impulses  $p_i$  bzw.  $p_f$ , sowie des Streuwinkels  $\theta$ . Entwickelt man den Q-Wert bei festem

Streuwinkel formal in einer Taylor-Reihe nach  $p_i$  und  $p_f$ :

$$(Q - Q_0) = p_{i0} \frac{\partial Q}{\partial p_i} \delta_s + p_{f0} \frac{\partial Q}{\partial p_f} \delta_t \quad (\text{A-4})$$

so erhält man für  $\delta_t$

$$\delta_t = \frac{(Q - Q_0)}{p_{f0} \frac{\partial Q}{\partial p_f}} - \frac{p_{i0} \frac{\partial Q}{\partial p_i}}{p_{f0} \frac{\partial Q}{\partial p_f}} \delta_s \quad (\text{A-5})$$

Einsetzen in (A-3) ergibt

$$x_f = R_{11} r_{11} x_0 + \left[ R_{11} r_{16} - R_{16} \frac{p_{i0} \frac{\partial Q}{\partial p_i}}{p_{f0} \frac{\partial Q}{\partial p_f}} \right] \delta_s + R_{16} \frac{Q - Q_0}{p_{f0} \frac{\partial Q}{\partial p_f}} \quad (\text{A-6})$$

Der erste Term dieser Gleichung ist unabhängig von den Teilchenimpulsen und geht lediglich in die Größe eines monoenergetischen Bildpunktes ein. Im Faktor  $\delta_s$  des zweiten Termes ist der tatsächliche Impuls des auf das Target auftreffenden Teilchens enthalten. Davon soll aber  $x_f$  gerade unabhängig sein. Die Bedingung für die Funktion des Energieverlust-Spektrometers lautet also

$$R_{11} r_{16} - R_{16} \frac{p_{i0} \frac{\partial Q}{\partial p_i}}{p_{f0} \frac{\partial Q}{\partial p_f}} = 0 \quad (\text{A-7})$$

$$r_{16} = \frac{R_{16}}{R_{11}} \frac{p_{i0} \frac{\partial Q}{\partial p_i}}{p_{f0} \frac{\partial Q}{\partial p_f}} \quad (\text{A-8})$$

Der dritte Term von (A-6) schließlich liefert den gewünschten Zusammenhang zwischen der Abweichung vom mittleren auslaufenden Impuls  $p_{f0}$  bzw. dem mittleren Energieverlust  $Q_0$ , auf den das Spektrometer eingestellt ist und der Ortsabweichung in der Bildebene.

Bei der elastischen Streuung nicht-relativistischer Teilchen<sup>+</sup>) ist der Faktor

---

<sup>+</sup>) Für den Strahl des Karlsruher Zyklotron gilt  $\frac{v}{c} \approx 0.23$



$$F = \frac{p_{i0} \frac{\partial Q}{\partial p_i}}{p_{f0} \frac{\partial Q}{\partial p_f}} \quad (A-9)$$

gleich 1. Die Strahldispersion  $r_{16}$  muß in diesem Falle also für alle Streuwinkel gleich  $\frac{R_{16}}{R_{11}}$  sein. Bei der inelastischen Streuung und bei Kernreaktionen ist  $F$  jedoch eine Funktion des Streuwinkels. In Fig. 14 ist der Korrekturfaktor  $F$  für die Reaktionen  $^{12}\text{C}(^6\text{Li},d)^{16}\text{O}$ ,  $^{27}\text{Al}(\alpha,t)^{28}\text{Si}$  und die inelastische Streuung  $^{58}\text{Ni}(\alpha,\alpha')^{58}\text{Ni}$  für die fiktive Anregungsenergie 4 MeV in Abhängigkeit vom Streuwinkel aufgetragen. Die notwendigen Abweichungen von der Nominaldispersion (bei elastischer Streuung) sind bei den für das Karlsruher Zyklotron charakteristischen Prozessen von der Größenordnung  $\pm 10\%$ .

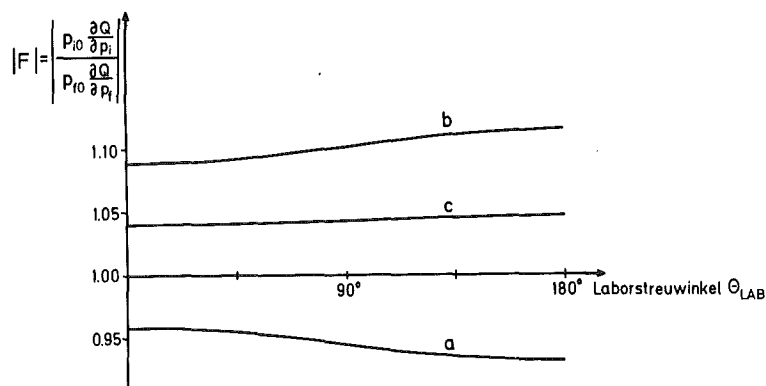


Fig. 14 Korrekturfaktor für die Abweichung der Strahldispersion vom Nominalwert bei elastischer Streuung bei den Reaktionen

- a)  $^{12}\text{C}(^6\text{Li},d)^{16}\text{O}$
- b)  $^{27}\text{Al}(\alpha,t)^{28}\text{Si}$
- c)  $^{58}\text{Ni}(\alpha,\alpha')^{58}\text{Ni}$  (4 MeV Anregungsenergie)



Anhang B

Ausdruck des Strahltransport Programms TRANSPORT

B 1 Monochromator

\*PRINT-OUT OF INPUT\*

11111111112222222222333333333344444444445555555555666666666677777777778  
COLUMN 1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

```
CARD -----<
1 > ' MONOCHROMATOR ' <
2 > 0 <
3 > ( C - WEG , 2 MAL 90 GRAD ) <
4 > ( Q D Q : Q Q - Q Q : Q D Q ) <
5 > ( MAGNETRADIUS R = 1.0 M ) <
6 > ( ZWEITE ORDNUNG ) <
7 > (-----) <
8 > 1. 0.043 11.6 0.25 2.0 0.0 0.1 0.4403 ; <
9 > 17. 'SEC' ; <
10 > 3.0 0.8245 'DR1' ; <
11 > 5.0 0.3 -2.6189 4.0 'Q1' ; <
12 > 3.0 0.5 'DR21' ; <
13 > 18. 0.1 -1.19077 6.0 'S1' ; <
14 > 3.0 0.4205 'DR22' ; <
15 > 16. 4. 8. ; <
16 > 16. 5. 1.5 ; <
17 > 2.0 20. 'ROT' ; <
18 > 4.0 1.5708 14.697 0.0 'D' ; <
19 > 2.0 20. 'ROT' ; <
20 > 3.0 1.0205 'DR2' ; <
21 > 5.0 0.3 -2.6189 4.0 'Q2' ; <
22 > 3.0 0.8245 'DR1' ; <
23 > 13. 4. ; <
24 > 3.0 0.8271 'DR3' ; <
25 > 5.0 0.3 3.9995 4.0 'Q3' ; <
26 > 3.0 0.1993 'DR4' ; <
27 > 5.0 0.3 -2.5874 4.0 'Q4' ; <
28 > 3.0 0.3468 'DR5' ; <
29 > 13. 4. ; <
30 > 3.0 0.3468 'DR5' ; <
31 > 5.0 0.3 -2.5874 4.0 'Q4' ; <
32 > 3.0 0.1993 'DR4' ; <
33 > 5.0 0.3 3.9995 4.0 'Q3' ; <
34 > 3.0 0.8271 'DR3' ; <
35 > 3.0 0.8245 'DR1' ; <
36 > 5.0 0.3 -2.6189 4.0 'Q2' ; <
37 > 3.0 0.5 'DR21' ; <
38 > 18. 0.1 -0.54955 6.0 'S2' ; <
39 > 3.0 0.4205 'DR22' ; <
40 > 16. 4. 8. ; <
41 > 16. 5. 1.5 ; <
42 > 2.0 20. 'ROT' ; <
43 > 4.0 1.5708 14.697 0.0 'D' ; <
44 > 2.0 20. 'ROT' ; <
45 > 3.0 0.4205 'DR22' ; <
46 > 18. 0.1 -0.403615 6.0 'S3' ; <
47 > 3.0 0.5 'DR21' ; <
48 > 5.0 0.3 -2.6189 4.0 'Q1' ; <
49 > 3.0 0.8245 'DR1' ; <
50 > 13. 4. ; <
51 > 20. 45. ; <
52 > 3.0 0.8521 'DT1' ; <
53 > 5.0 0.3 3.7340 4.0 'QT1' ; <
54 > 3.0 0.2785 'DT2' ; <
55 > 5.0 0.3 -4.5206 4.0 'QT2' ; <
56 > 3.0 0.2785 'DT2' ; <
57 > 5.0 0.3 3.7340 4.0 'QT1' ; <
58 > 3.0 0.8521 'DT1' ; <
59 > 13. 4. ; <
60 > 3.0 0.8521 'DT1' ; <
61 > 5.0 0.3 3.7340 4.0 'QT1' ; <
62 > 3.0 0.2785 'DT2' ; <
63 > 5.0 0.3 -4.5206 4.0 'QT2' ; <
64 > 3.0 0.2785 'DT2' ; <
65 > 5.0 0.3 3.7340 4.0 'QT1' ; <
66 > 3.0 0.8521 'DT1' ; <
67 > 20. -45. ; <
68 > 13. 4. ; <
69 > SENTINEL <
```

\*END OF INPUT\*

MONOCHROMATOR

0

C - WEG , 2 MAL 90 GRAD

Q D Q : Q Q - Q O : Q D Q

MAGNETRADIUS R = 1.0 M

ZWEITE DRUNUNG

---

1.00000	0.04300	11.60000	0.25000	2.00000	0.0	0.10000	0.44030
17.00000	1.00000	0.0	3.00000				
	LABEL = SEC						
3.00000	0.82450						
	LABEL = DR1						
5.00000	0.30000	-2.61890	4.00000				
	LABEL = Q1						
3.00000	0.50000						
	LABEL = DR21						
18.00000	0.10000	-1.19077	6.00000				
	LABEL = S1						
3.00000	0.42050						
	LABEL = DR22						
16.00000	4.00000	8.00000					
16.00000	5.00000	1.50000					
2.00000	20.00000						
	LABEL = RNT						
4.00000	1.57080	14.69700	0.0				
	LABEL = D						
2.00000	20.00000						
	LABEL = RNT						
3.00000	1.02050						
	LABEL = DR2						
5.00000	0.30000	-2.61890	4.00000				
	LABEL = Q2						
3.00000	0.82450						
	LABEL = DR1						
13.00000	4.00000						
3.00000	0.92710						
	LABEL = DR3						
5.00000	0.30000	3.99950	4.00000				
	LABEL = Q3						
3.00000	0.19930						
	LABEL = DR4						
5.00000	0.30000	-2.58740	4.00000				
	LABEL = Q4						
3.00000	0.34680						
	LABEL = DR5						
13.00000	4.00000						
3.00000	0.34680						
	LABEL = DR5						
5.00000	0.30000	-2.58740	4.00000				
	LABEL = Q4						
3.00000	0.19930						
	LABEL = DR4						
5.00000	0.30000	3.99950	4.00000				
	LABEL = Q3						
3.00000	0.82710						
	LABEL = DR3						
3.00000	0.82450						
	LABEL = DR1						
5.00000	0.30000	-2.61890	4.00000				
	LABEL = Q2						
3.00000	0.50000						
	LABEL = DR21						
18.00000	0.10000	-0.54955	6.00000				
	LABEL = S2						
3.00000	0.42050						
	LABEL = DR22						

16.00000	4.00000	8.00000	
16.00000	5.00000	1.50000	
2.00000	20.00000		
LABEL = ROT			
4.00000	1.57080	14.63700	0.0
LABEL = D			
2.00000	20.00000		
LABEL = ROT			
3.00000	0.42050		
LABEL = DR22			
18.00000	0.10000	-0.40361	6.00000
LABEL = S3			
3.00000	0.50000		
LABEL = DR21			
5.00000	0.30000	-2.61890	4.00000
LABEL = Q1			
3.00000	0.82450		
LABEL = DR1			
13.00000	4.00000		
20.00000	45.00000		
3.00000	0.85210		
LABEL = DT1			
5.00000	0.30000	3.73400	4.00000
LABEL = QT1			
3.00000	0.27850		
LABEL = DT2			
5.00000	0.30000	-4.52060	4.00000
LABEL = QT2			
3.00000	0.27850		
LABEL = DT2			
5.00000	0.30000	3.73400	4.00000
LABEL = QT1			
3.00000	0.85210		
LABEL = DT1			
13.00000	4.00000		
3.00000	0.85210		
LABEL = DT1			
5.00000	0.30000	3.73400	4.00000
LABEL = QT1			
3.00000	0.27850		
LABEL = DT2			
5.00000	0.30000	-4.52060	4.00000
LABEL = QT2			
3.00000	0.27850		
LABEL = DT2			
5.00000	0.30000	3.73400	4.00000
LABEL = QT1			
3.00000	0.85210		
LABEL = DT1			
20.00000	-45.00000		
13.00000	4.00000		
SENTINEL			



\*DRIFT\* 3.0 1.0205 M  
LABEL = DR2

4.7 M  
0.074 1.549 CM  
-1.000 27.750 MR -0.979  
0.0 0.642 CM 0.0 0.0  
0.0 1.281 MR 0.0 0.0 0.767  
-0.582 8.742 CM -0.989 0.997 0.0 0.0  
0.0 0.100 PC 0.154 0.049 0.0 0.0 -0.007

\*QUAD\* 5.00 0.30000 M -2.6189 KG 4.000 CM ( -0.700 M )  
t LABEL = Q2

5.0 M  
0.058 1.016 CM  
-0.151 12.675 MR -0.731  
0.0 0.545 CM 0.0 0.0  
0.0 7.257 MR 0.0 0.0 -0.991  
-0.594 8.744 CM -0.947 0.910 0.0 0.0  
0.0 0.100 PC 0.327 0.400 0.0 0.0 -0.007

\*DRIFT\* 3.0 0.8245 M  
LABEL = DR1

5.9 M  
0.045 0.756 CM  
-0.151 12.675 MR 0.399  
0.0 0.093 CM 0.0 0.0  
0.0 7.257 MR 0.0 0.0 0.624  
-0.603 8.745 CM -0.015 0.910 0.0 0.0  
0.0 0.100 PC 0.992 0.400 0.0 0.0 -0.007

\*TRANSFORM\* 1  
-1.00016 -0.00002 0.0 0.0 0.0 7.50044  
-13.50436 -1.00016 0.0 0.0 0.0 50.64024  
0.0 0.0 0.24621 -0.03259 0.0 0.0  
0.0 0.0 28.82036 0.24621 0.0 0.0  
-5.06403 -0.75004 0.0 0.0 1.00000 -0.57081  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.00000

\*2ND ORDER TRANSFORM \*

1 11 6.659E-02  
1 12 1.232E-02 1 22 4.084E-04  
1 13 0.0 1 23 0.0 1 33 -1.076E-01  
1 14 0.0 1 24 0.0 1 34 -3.374E-03 1 44 -5.384E-04  
1 15 0.0 1 25 0.0 1 35 0.0 1 45 0.0 1 55 0.0  
1 16 2.056E-01 1 26 2.954E-02 1 36 0.0 1 46 0.0 1 56 0.0 1 66 -1.120E-01  
  
2 11 2.648E-01  
2 12 3.321E-02 2 22 -6.447E-04  
2 13 0.0 2 23 0.0 2 33 -6.757E-01  
2 14 0.0 2 24 0.0 2 34 -2.095E-02 2 44 -3.360E-03  
2 15 0.0 2 25 0.0 2 35 0.0 2 45 0.0 2 55 0.0  
2 16 1.387E 00 2 26 1.933E-01 2 36 0.0 2 46 0.0 2 56 0.0 2 66 -9.090E-01  
  
3 11 0.0  
3 12 0.0 3 22 0.0  
3 13 5.666E-02 3 23 7.832E-03 3 33 0.0  
3 14 2.720E-03 3 24 3.751E-04 3 34 0.0 3 44 0.0  
3 15 0.0 3 25 0.0 3 35 0.0 3 45 0.0 3 55 0.0  
3 16 0.0 3 26 0.0 3 36 -6.467E-02 3 46 -1.254E-03 3 56 0.0 3 66 0.0  
  
4 11 0.0  
4 12 0.0 4 22 0.0  
4 13 3.262E-01 4 23 4.423E-02 4 33 0.0  
4 14 2.195E-01 4 24 3.022E-02 4 34 0.0 4 44 0.0  
4 15 0.0 4 25 0.0 4 35 0.0 4 45 0.0 4 55 0.0  
4 16 0.0 4 26 0.0 4 36 -3.297E-01 4 46 -3.847E-02 4 56 0.0 4 66 0.0  
  
5 11 -2.315E-01  
5 12 -6.331E-02 5 22 -4.445E-03  
5 13 0.0 5 23 0.0 5 33 -5.267E-02  
5 14 0.0 5 24 0.0 5 34 -7.241E-04 5 44 1.139E-04  
5 15 0.0 5 25 0.0 5 35 0.0 5 45 0.0 5 55 0.0  
5 16 1.377E-01 5 26 1.362E-02 5 36 0.0 5 46 0.0 5 56 0.0 5 66 -1.180E-01  
  
6 11 0.0  
6 12 0.0 6 22 0.0  
6 13 0.0 6 23 0.0 6 33 0.0  
6 14 0.0 6 24 0.0 6 34 0.0 6 44 0.0  
6 15 0.0 6 25 0.0 6 35 0.0 6 45 0.0 6 55 0.0  
6 16 0.0 6 26 0.0 6 36 0.0 6 46 0.0 6 56 0.0 6 66 0.0

\*DRIFT\* 3.0 0.8271 M  
LABEL = DR3

6.7 M  
0.033 1.518 CM  
-0.151 12.675 MR 0.890  
0.0 0.662 CM 0.0 0.0  
0.0 7.257 MR 0.0 0.0 0.994  
-0.611 8.745 CM 0.621 0.910 0.0 0.0  
0.0 0.100 PC 0.770 0.400 0.0 0.0 -0.007

\*QUAD\* 5.00 0.30000 M 3.9995 KG 4.000 CM ( 0.543 M )  
LABEL = Q3

7.0 M  
0.019 1.390 CM  
-0.686 20.354 MR -0.951  
0.0 1.115 CM 0.0 0.0  
0.0 24.509 MR 0.0 0.0 1.000  
-0.615 8.746 CM 0.706 -0.451 0.0 0.0  
0.0 0.100 PC 0.695 -0.880 0.0 0.0 -0.007

\*DRIFT\* 3.0 0.1993 M  
LABEL = DR4

7.2 M 0.006 1.012 CM  
-0.686 20.354 MR -0.904  
0.0 1.603 CM 0.0 0.0  
0.0 24.509 MR 0.0 0.0 1.000  
-0.625 8.746 CM 0.788 -0.451 0.0 0.0  
0.0 0.100 PC 0.601 -0.880 0.0 0.0 -0.007

\*QUAD\* 5.00 0.30000 M -2.5874 KG 4.000 CM ( -0.709 M )  
LABEL = Q4

7.5 M -0.015 0.688 CM  
-0.752 13.115 MR -0.229  
0.0 1.984 CM 0.0 0.0  
0.0 0.267 MR 0.0 0.0 -0.020  
-0.640 8.746 CM 0.969 0.015 0.0 0.0  
0.0 0.100 PC 0.231 -0.992 0.0 0.0 -0.007

\*DRIFT\* 3.0 0.3468 M  
LABEL = DR5

7.8 M -0.041 0.733 CM  
-0.752 13.115 MR 0.405  
0.0 1.983 CM 0.0 0.0  
0.0 0.267 MR 0.0 0.0 -0.015  
-0.643 8.746 CM 0.919 0.015 0.0 0.0  
0.0 0.100 PC -0.398 -0.992 0.0 0.0 -0.007

\*TRANSFORM\* 1  
-0.00021 -0.05766 0.0 0.0 0.0 -2.91807  
17.34439 0.00026 0.0 0.0 0.0 -130.07736  
0.0 0.0 7.88852 0.00011 0.0 0.0  
0.0 0.0 -0.00001 0.12677 0.0 0.0  
-5.06403 -0.75004 0.0 0.0 1.00000 -0.57081  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.00000

\*2ND ORDER TRANSFORM \*

1 11 -3.655E-02  
1 12 -7.675E-03 1 22 -3.551E-04  
1 13 0.0 1 23 0.0 1 33 4.482E-02  
1 14 0.0 1 24 0.0 1 34 1.418E-03 1 44 2.254E-04  
1 15 0.0 1 25 0.0 1 35 0.0 1 45 0.0 1 55 0.0  
1 16 -1.254E-01 1 26 -1.361E-02 1 36 0.0 1 46 0.0 1 56 0.0 1 66 2.859E-01

2 11 -1.155E 00  
2 12 -2.137E-01 2 22 -7.084E-03  
2 13 0.0 2 23 0.0 2 33 1.867E 00  
2 14 0.0 2 24 0.0 2 34 5.851E-02 2 44 9.338E-03  
2 15 0.0 2 25 0.0 2 35 0.0 2 45 0.0 2 55 0.0  
2 16 -4.096E 00 2 26 -5.315E-01 2 36 0.0 2 46 0.0 2 56 0.0 2 66 4.947E 00

3 11 0.0  
3 12 0.0 3 22 0.0  
3 13 1.938E-01 3 23 2.656E-02 3 33 0.0  
3 14 8.173E-02 3 24 8.499E-03 3 34 0.0 3 44 0.0  
3 15 0.0 3 25 0.0 3 35 0.0 3 45 0.0 3 55 0.0  
3 16 0.0 3 26 0.0 3 36 -2.162E-01 3 46 -1.221E-02 3 56 0.0 3 66 0.0

4 11 0.0  
4 12 0.0 4 22 0.0  
4 13 -1.969E-01 4 23 -2.723E-02 4 33 0.0  
4 14 -3.116E-03 4 24 -4.272E-04 4 34 0.0 4 44 0.0  
4 15 0.0 4 25 0.0 4 35 0.0 4 45 0.0 4 55 0.0  
4 16 0.0 4 26 0.0 4 36 8.415E-01 4 46 3.486E-03 4 56 0.0 4 66 0.0

5 11 -2.685E-01  
5 12 -6.602E-02 5 22 -4.518E-03  
5 13 0.0 5 23 0.0 5 33 -3.367E-01  
5 14 0.0 5 24 0.0 5 34 -1.765E-03 5 44 1.101E-04  
5 15 0.0 5 25 0.0 5 35 0.0 5 45 0.0 5 55 0.0  
5 16 5.559E-01 5 26 2.661E-02 5 36 0.0 5 46 0.0 5 56 0.0 5 66 -1.357E 00

6 11 0.0  
6 12 0.0 6 22 0.0  
6 13 0.0 6 23 0.0 6 33 0.0  
6 14 0.0 6 24 0.0 6 34 0.0 6 44 0.0  
6 15 0.0 6 25 0.0 6 35 0.0 6 45 0.0 6 55 0.0  
6 16 0.0 6 26 0.0 6 36 0.0 6 46 0.0 6 56 0.0 6 66 0.0

\*DRIFT\* 3.0 0.3468 M  
LABEL = DR5

8.2 M -0.067 1.007 CM  
-0.752 13.115 MR 0.747  
0.0 1.983 CM 0.0 0.0  
0.0 0.267 MR 0.0 0.0 -0.011  
-0.646 8.746 CM 0.676 0.015 0.0 0.0  
0.0 0.100 PC -0.738 -0.992 0.0 0.0 -0.007

\*QUAD\* 5.00 0.30000 M -2.5874 KG 4.000 CM ( -0.709 M )  
LABEL = Q4

8.5 M -0.105 1.552 CM  
-1.842 28.045 MR 0.979  
0.0 1.603 CM 0.0 0.0  
0.0 24.512 MR 0.0 0.0 -1.000  
-0.648 8.746 CM 0.532 0.351 0.0 0.0  
0.0 0.100 PC -0.845 -0.932 0.0 0.0 -0.007





\*ROTAT\* 2.0 20.00 0  
 LABEL = PNT

13.5 M 0.442 5.956 CM  
 -3.849 35.490 MR -0.995  
 0.0 0.253 CM 0.0 0.0  
 0.0 3.207 MR 0.0 0.0 -0.302  
 -2.043 19.240 CM -0.948 0.971 0.0 0.0  
 0.0 0.100 PC 0.671 -0.603 0.0 0.0 -0.400

\*DRIFT\* 3.0 0.4205 M  
 LABEL = DR22

13.9 M 0.280 4.473 CM  
 -3.849 35.490 MR -0.992  
 0.0 0.248 CM 0.0 0.0  
 0.0 3.207 MR 0.0 0.0 0.236  
 -2.069 19.245 CM -0.938 0.971 0.0 0.0  
 0.0 0.100 PC 0.692 -0.603 0.0 0.0 -0.400

\*SEXT\* 18.00 0.1000 M -0.404 KG 6.0  
 LABEL = S?

14.0 M 0.249 4.122 CM  
 -2.459 35.274 MR -0.993  
 0.0 0.257 CM 0.0 0.0  
 0.0 3.217 MR 0.0 0.0 0.346  
 -2.075 19.246 CM -0.935 0.971 0.0 0.0  
 0.0 0.100 PC 0.699 -0.607 0.0 0.0 -0.400

\*DRIFT\* 3.0 0.5000 M  
 LABEL = DR21

14.5 M 0.126 2.381 CM  
 -2.459 35.274 MR -0.978  
 0.0 0.347 CM 0.0 0.0  
 0.0 3.217 MR 0.0 0.0 0.719  
 -2.106 19.252 CM -0.899 0.971 0.0 0.0  
 0.0 0.100 PC 0.760 -0.607 0.0 0.0 -0.400

\*QUAD\* 5.00 0.30000 M -2.6180 KG 4.030 CM (-0.700 M)  
 LABEL = Q1

14.8 M 0.073 1.786 CM  
 -1.196 11.754 MR -0.542  
 0.0 0.351 CM 0.0 0.0  
 0.0 3.062 MR 0.0 0.0 -0.691  
 -2.125 19.255 CM -0.833 0.916 0.0 0.0  
 0.0 0.100 PC 0.940 0.000 0.0 0.0 -0.400

\*DRIFT\* 3.0 0.8245 M  
 LABEL = DR1

15.7 M -0.026 1.501 CM  
 -1.196 11.754 MR 0.001  
 0.0 0.254 CM 0.0 0.0  
 0.0 3.062 MR 0.0 0.0 0.040  
 -2.130 19.256 CM -0.399 0.916 0.0 0.0  
 0.0 0.100 PC 0.999 0.000 0.0 0.0 -0.400

\*TRANSFORM\* 1  
 -1.00000 -0.00003 0.0 0.0 0.0 14.99934  
 -0.00741 -1.00000 0.0 0.0 0.0 0.05585  
 0.0 0.0 0.99999 0.00003 0.0 0.0  
 0.0 0.0 0.00000 1.00000 0.0 0.0  
 -0.00558 -1.49993 0.0 0.0 1.00000 -77.05682  
 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.00000

\*2ND ORDER TRANSFORM \*

1 11 4.379E-02  
 1 12 1.866E-02 1 22 -4.784E-07  
 1 13 0.0 1 23 0.0 1 33 -3.635E-01  
 1 14 0.0 1 24 0.0 1 34 2.294E-03 1 44 -8.291E-04  
 1 15 0.0 1 25 0.0 1 35 0.0 1 45 0.0 1 55 0.0  
 1 16 5.443E-01 1 26 -1.041E-02 1 36 0.0 1 46 0.0 1 56 0.0 1 66 5.752E-03

2 11 -7.871E-01  
 2 12 -8.751E-02 2 22 -9.335E-03  
 2 13 0.0 2 23 0.0 2 33 -8.769E-01  
 2 14 0.0 2 24 0.0 2 34 6.147E-02 2 44 1.902E-03  
 2 15 0.0 2 25 0.0 2 35 0.0 2 45 0.0 2 55 0.0  
 2 16 -5.675E-01 2 26 -5.444E-01 2 36 0.0 2 46 0.0 2 56 0.0 2 66 1.087E 01

3 11 0.0  
 3 12 0.0 3 22 0.0  
 3 13 6.148E-02 3 23 -2.319E-03 3 33 0.0  
 3 14 3.821E-03 3 24 1.658E-03 3 34 0.0 3 44 0.0  
 3 15 0.0 3 25 0.0 3 35 0.0 3 45 0.0 3 55 0.0  
 3 16 0.0 3 26 0.0 3 36 -5.739E-01 3 46 5.720E-02 3 56 0.0 3 66 0.0

4 11 0.0  
 4 12 0.0 4 22 0.0  
 4 13 1.754E 00 4 23 -7.270E-01 4 33 0.0  
 4 14 -6.146E-02 4 24 2.300E-03 4 34 0.0 4 44 0.0  
 4 15 0.0 4 25 0.0 4 35 0.0 4 45 0.0 4 55 0.0  
 4 16 0.0 4 26 0.0 4 36 -3.823E 01 4 46 5.728E-01 4 56 0.0 4 66 0.0

5 11 -1.258E 00									
5 12 -1.855E-01	5 22 -1.433E-02								
5 13 0.0	5 23 0.0	5 33 5.071E-01							
5 14 0.0	5 24 0.0	5 34 3.499E-02	5 44 5.697E-03						
5 15 0.0	5 25 0.0	5 35 0.0	5 45 0.0	5 55 0.0					
5 16 2.076E 00	5 26 -9.119E-01	5 36 0.0	5 46 0.0	5 56 0.0	5 66 -2.538E 01				

6 11 0.0									
6 12 0.0	6 22 0.0								
6 13 0.0	6 23 0.0	6 33 0.0							
6 14 0.0	6 24 0.0	6 34 0.0	6 44 0.0						
6 15 0.0	6 25 0.0	6 35 0.0	6 45 0.0	6 55 0.0					
6 16 0.0	6 26 0.0	6 36 0.0	6 46 0.0	6 56 0.0	6 66 0.0				

\*Z RD\* 20.0 45.00 0  
15.7 M  
-0.018 1.076 CM  
-0.846 8.588 MR 0.003  
0.018 1.076 CM -0.944 0.000  
0.846 8.588 MR 0.000 -0.873 0.003  
-2.130 19.256 CM -0.394 0.886 0.394 -0.886  
0.0 0.100 PC 0.985 0.000 -0.985 -0.000 -0.400

\*DRIFT\* 3.0 0.8521 M  
LABEL = DT1  
16.5 M  
-0.090 1.303 CM  
-0.846 8.588 MR 0.564  
0.090 1.303 CM -0.919 -0.490  
0.846 8.588 MR -0.490 -0.873 0.564  
-2.136 19.258 CM 0.172 0.886 -0.172 -0.886  
0.0 0.100 PC 0.814 0.000 -0.814 -0.000 -0.400

\*QUAD\* 5.00 0.30000 M 3.7340 KG 4.000 CM ( 0.578 M )  
LABEL = QT1  
16.8 M  
-0.089 1.097 CM  
0.966 19.714 MR -0.904  
0.146 1.868 CM -0.907 0.855  
3.017 34.828 MR -0.999 0.793 0.990  
-2.138 19.258 CM 0.338 0.084 -0.291 -0.419  
0.0 0.100 PC 0.704 -0.931 -0.738 -0.638 -0.400

\*DRIFT\* 3.0 0.2785 M  
LABEL = DT2  
17.1 M  
-0.062 0.645 CM  
0.966 19.714 MR -0.686  
0.230 2.832 CM -0.830 0.836  
3.017 34.828 MR -0.855 0.793 0.996  
-2.160 19.259 CM 0.646 0.084 -0.335 -0.419  
0.0 0.100 PC 0.404 -0.931 -0.706 -0.638 -0.400

\*QUAD\* 5.00 0.30000 M -4.5206 KG 4.000 CM ( -0.387 M )  
LABEL = QT2  
17.4 M  
-0.052 0.643 CM  
-0.273 19.680 MR 0.683  
0.234 2.832 CM -0.303 0.416  
-2.724 34.809 MR 0.223 -0.493 -0.996  
-2.183 19.260 CM 0.971 0.661 -0.363 0.277  
0.0 0.100 PC -0.404 -0.932 -0.684 0.748 -0.400

\*DRIFT\* 3.0 0.2785 M  
LABEL = DT2  
17.7 M  
-0.059 1.094 CM  
-0.273 19.680 MR 0.903  
0.159 1.869 CM -0.014 0.374  
-2.724 34.809 MR -0.116 -0.493 -0.990  
-2.205 19.262 CM 0.902 0.661 -0.406 0.277  
0.0 0.100 PC -0.705 -0.932 -0.649 0.748 -0.400

\*QUAD\* 5.00 0.30000 M 3.7340 KG 4.000 CM ( 0.578 M )  
LABEL = QT1  
18.0 M  
-0.051 1.300 CM  
0.813 8.589 MR -0.561  
0.117 1.305 CM 0.030 0.722  
-0.202 8.561 MR -0.783 0.001 -0.561  
-2.228 19.263 CM 0.825 -0.886 -0.513 -0.394  
0.0 0.100 PC -0.816 -0.000 -0.551 0.985 -0.400

\*DRIFT\* 3.0 0.8521 M  
LABEL = DT1  
18.8 M  
0.018 1.076 CM  
0.813 8.589 MR 0.003  
0.099 1.080 CM -0.001 0.873  
-0.202 8.561 MR -0.944 0.001 -0.002  
-2.235 19.264 CM 0.394 -0.886 -0.886 -0.394  
0.0 0.100 PC -0.985 -0.000 -0.000 0.985 -0.400

\*TRANSFORM\* 1  
0.70710 0.00003 -0.70710 -0.07002 0.0 -10.60611  
0.00517 0.70711 0.00001 -0.70710 0.0 -0.03855  
0.00061 0.08891 -0.00005 0.08891 0.0 -0.00418  
-5.62368 -0.00022 -5.62366 -0.00021 0.0 84.35165  
-0.00558 -1.49993 0.0 0.0 1.00000 -77.05682  
0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.00000

\*2ND ORDER TRANSFORM \*  
1 11 -3.096E-02  
1 12 -1.320E-02 1 22 3.730E-07  
1 13 -4.348E-02 1 23 1.643E-03 1 33 2.570E-01  
1 14 -2.701E-03 1 24 -1.173E-03 1 34 -1.622E-03 1 44 5.862E-04  
1 15 0.0 1 25 0.0 1 35 0.0 1 45 0.0 1 55 0.0  
1 16 -3.849E-01 1 26 5.781E-03 1 36 4.059E-01 1 46 -3.887E-02 1 56 0.0 1 66 -4.029E-03

2 11	5.566E-01										
2 12	6.188E-02	2 22	6.601E-03								
2 13	-1.241E 00	2 23	5.141E-01	2 33	6.201E-01						
2 14	4.346E-02	2 24	-1.626E-03	2 34	-4.347E-02	2 44	-1.345E-03				
2 15	0.0	2 25	0.0	2 35	0.0	2 45	0.0	2 55	0.0		
2 16	6.220E-01	2 26	3.850E-01	2 36	2.681E 01	2 46	-4.050E-01	2 56	0.0	2 66	-1.100E 01

3 11	6.999E-02										
3 12	7.781E-03	3 22	8.299E-04								
3 13	1.560E-01	3 23	-6.464E-02	3 33	7.795E-02						
3 14	-5.464E-03	3 24	2.044E-04	3 34	-5.465E-03	3 44	-1.691E-04				
3 15	0.0	3 25	0.0	3 35	0.0	3 45	0.0	3 55	0.0		
3 16	9.652E-02	3 26	5.430E-02	3 36	-3.353E 00	3 46	5.682E-02	3 56	0.0	3 66	-1.657E 00

4 11	2.462E-01										
4 12	1.049E-01	4 22	-3.172E-06								
4 13	-3.459E-01	4 23	1.308E-02	4 33	-2.044E 00						
4 14	-2.148E-02	4 24	-9.326E-03	4 34	1.290E-02	4 44	-4.662E-03				
4 15	0.0	4 25	0.0	4 35	0.0	4 45	0.0	4 55	0.0		
4 16	3.434E 00	4 26	-1.257E-02	4 36	3.602E 00	4 46	-2.757E-01	4 56	0.0	4 66	-5.564E 00

5 11	-1.294E 00										
5 12	-1.892E-01	5 22	-1.467E-02								
5 13	-1.548E-02	5 23	-3.737E-03	5 33	4.921E-01						
5 14	-3.739E-03	5 24	-4.010E-04	5 34	3.125E-02	5 44	5.364E-03				
5 15	0.0	5 25	0.0	5 35	0.0	5 45	0.0	5 55	0.0		
5 16	2.928E 00	5 26	-8.558E-01	5 36	2.322E-01	5 46	5.606E-02	5 56	0.0	5 66	-3.102E 01

6 11	0.0										
6 12	0.0	6 22	0.0								
6 13	0.0	6 23	0.0	6 33	0.0						
6 14	0.0	6 24	0.0	6 34	0.0	6 44	0.0				
6 15	0.0	6 25	0.0	6 35	0.0	6 45	0.0	6 55	0.0		
6 16	0.0	6 26	0.0	6 36	0.0	6 46	0.0	6 56	0.0	6 66	0.0

\*DRIFT\* 3.0 0.8521 M  
LABEL = DT1

19.7 M	0.088	1.303 CM									
	0.813	8.589 MR	0.564								
	0.082	1.302 CM	-0.030	0.775							
	-0.202	8.661 MR	-0.779	0.001	0.558						
	-2.241	19.264 CM	-0.172	-0.886	-0.955	-0.394					
	0.0	0.100 PC	-0.914	-0.000	0.552	0.985	-0.400				

\*QUAD\* 5.00 0.30000 M 3.7340 KG 4.000 CM ( 0.578 M )  
LABEL = DT1

20.0 M	0.086	1.097 CM									
	-0.941	19.714 MR	-0.904								
	0.100	1.865 CM	0.015	0.375							
	1.440	34.725 MR	-0.115	0.493	0.990						
	-2.243	19.265 CM	-0.338	-0.084	-0.927	-0.876					
	0.0	0.100 PC	-0.704	0.931	0.650	0.749	-0.400				

\*DRIFT\* 3.0 0.2785 M  
LABEL = DT2

20.3 M	0.059	0.645 CM									
	-0.941	19.714 MR	-0.686								
	0.140	2.825 CM	0.304	0.416							
	1.440	34.725 MR	0.225	0.493	0.996						
	-2.264	19.267 CM	-0.646	-0.084	-0.912	-0.876					
	0.0	0.100 PC	-0.404	0.931	0.685	0.749	-0.400				

\*QUAD\* 5.00 0.30000 M -4.5206 KG 4.000 CM ( -0.387 M )  
LABEL = DT2

20.6 M	0.050	0.644 CM									
	0.248	19.680 MR	0.683								
	0.133	2.825 CM	0.836	0.941							
	-1.861	34.745 MR	-0.860	-0.798	-0.996						
	-2.288	19.270 CM	-0.970	-0.661	-0.901	0.931					
	0.0	0.100 PC	0.404	0.932	0.707	-0.639	-0.400				

\*DRIFT\* 3.0 0.2785 M  
LABEL = DT2

20.8 M	0.056	1.094 CM									
	0.248	19.680 MR	0.903								
	0.082	1.864 CM	0.913	0.860							
	-1.861	34.745 MR	-0.906	-0.798	-0.990						
	-2.309	19.273 CM	-0.902	-0.661	-0.882	0.931					
	0.0	0.100 PC	0.705	0.932	0.739	-0.639	-0.400				

\*QUAD\* 5.00 0.30000 M 3.7340 KG 4.000 CM ( 0.578 M )  
LABEL = DT1

21.1 M	0.048	1.300 CM									
	-0.780	8.589 MR	-0.561								
	0.044	1.300 CM	0.925	-0.493							
	-0.736	8.590 MR	-0.492	0.873	-0.561						
	-2.333	19.277 CM	-0.824	0.886	-0.824	0.885					
	0.0	0.100 PC	0.816	0.000	0.815	0.000	-0.400				

\*DRIFT\* 3.0 0.8521 M  
LABFL = DT1

22.0 M	-0.018	1.076 CM							
	-0.780	8.589 MR	0.003						
	-0.018	1.076 CM	0.944	-0.001					
	-0.736	8.590 MR	-0.001	0.873	0.002				
	-2.339	19.278 CM	-0.393	0.886	-0.394	0.885			
	0.0	0.100 PC	0.985	0.000	0.985	0.000	-0.400		

\*2 RD\* 20.0 -45.00 D

22.0 M	0.000	0.254 CM							
	-0.031	3.056 MR	0.040						
	-0.026	1.501 CM	0.000	0.000					
	-1.072	11.757 MR	0.001	-0.000	0.001				
	-2.339	19.278 CM	0.001	0.000	-0.399	0.915			
	0.0	0.100 PC	-0.000	0.000	0.999	0.000	-0.400		

\*TRANSFORM\* 1

0.00000	0.00000	1.00000	0.00004	0.0	-0.00004
-0.00051	0.00000	-0.00059	1.00000	0.0	0.00740
-0.99999	-0.00004	-0.00000	-0.00000	0.0	14.99930
-0.00671	-1.00000	0.00048	-0.00000	0.0	0.04573
-0.00558	-1.49993	0.0	0.0	1.00000	-77.05682
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.00000

\*2ND ORDER TRANSFORM \*

1 11	3.010E-06										
1 12	3.323E-07	1 22	3.872E-08								
1 13	6.151E-02	1 23	-2.330E-03	1 33	3.379E-06						
1 14	3.820E-03	1 24	1.658E-03	1 34	-2.518E-07	1 44	-5.026E-09				
1 15	0.0	1 25	0.0	1 35	0.0	1 45	0.0	1 55	0.0		
1 16	-3.520E-05	1 26	-5.939E-03	1 36	-5.744E-01	1 46	4.680E-02	1 56	0.0		
									1 66	1.709E-04	
2 11	2.138E-05										
2 12	9.099E-06	2 22	3.074E-08								
2 13	1.754E 00	2 23	-7.270E-01	2 33	-1.780E-04						
2 14	-6.146E-02	2 24	2.299E-03	2 34	1.032E-06	2 44	-3.973E-07				
2 15	0.0	2 25	0.0	2 35	0.0	2 45	0.0	2 55	0.0		
2 16	2.055E-01	2 26	8.439E-06	2 36	-3.740E 01	2 46	5.727E-01	2 56	0.0	2 66	-3.079E 00
3 11	4.378E-02										
3 12	1.866E-02	3 22	-6.154E-07								
3 13	-7.120E-06	3 23	2.988E-06	3 33	-3.635E-01						
3 14	2.267E-07	3 24	-6.678E-09	3 34	2.295E-03	3 44	-8.290E-04				
3 15	0.0	3 25	0.0	3 35	0.0	3 45	0.0	3 55	0.0		
3 16	5.444E-01	3 26	-4.339E-06	3 36	1.415E-04	3 46	5.939E-03	3 56	0.0	3 66	5.501E-03
4 11	-7.972E-01										
4 12	-8.752E-02	4 22	-9.335E-03								
4 13	3.086E-05	4 23	5.904E-07	4 33	-8.767E-01						
4 14	1.828E-06	4 24	7.895E-07	4 34	6.147E-02	4 44	1.902E-03				
4 15	0.0	4 25	0.0	4 35	0.0	4 45	0.0	4 55	0.0		
4 16	-1.397E 00	4 26	-5.444E-01	4 36	-2.056E-01	4 46	1.383E-05	4 56	0.0	4 66	2.331E 01
5 11	-1.309E 00										
5 12	-1.955E-01	5 22	-1.499E-02								
5 13	-3.184E-02	5 23	-9.814E-07	5 33	4.566E-01						
5 14	-5.161E-06	5 24	-7.863E-04	5 34	3.499E-02	5 44	5.039E-03				
5 15	0.0	5 25	0.0	5 35	0.0	5 45	0.0	5 55	0.0		
5 16	3.593E 00	5 26	-9.118E-01	5 36	4.782E-01	5 46	4.345E-05	5 56	0.0	5 66	-3.676E 01
6 11	0.0										
6 12	0.0	6 22	0.0								
6 13	0.0	6 23	0.0	6 33	0.0						
6 14	0.0	6 24	0.0	6 34	0.0	6 44	0.0				
6 15	0.0	6 25	0.0	6 35	0.0	6 45	0.0	6 55	0.0		
6 16	0.0	6 26	0.0	6 36	0.0	6 46	0.0	6 56	0.0	6 66	0.0

\*LNGTH\* 21.9903 M

B 2 Analysator

\*PRINT-OUT OF INPUT\*

```
11111111112222222222333333333344444444445555555555666666666677777777778
COLUMN 1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
CARD -----)
1 > ' ANALYSATOR '
2 > 0
3 > ( Q D D )
4 > ( 2 MAL 80 GRAD )
5 > ( MAGNETRADIUS R = 1.45 M )
6 > ( ZWEITE ORDNUNG )
7 > (-----)
8 > 1.0 1.5 50. 0.25 15. 0.0 2.5 0.4403 ;
9 > 17. 'SEC' ;
10 > 3.0 2.2237 'DR1' ;
11 > 5.0 0.2 -2.3232 12.5 'Q' ;
12 > 3.0 1.0033 'DR2' ;
13 > 16. 4. 50. ;
14 > 16. 5. 4.5 ;
15 > 16. 12. -0.0857242 ;
16 > 16. 13. -0.606116 ;
17 > 2.0 25. 'K1' ;
18 > 4.0 2.02458 10.1287 0.0 'D1' ;
19 > 2.0 34.09 'K2' ;
20 > 3.0 0.45 'DR3' ;
21 > 13. 4. ;
22 > 3.0 0.45 'DR3' ;
23 > 16. 4. 50. ;
24 > 16. 5. 4.5 ;
25 > 16. 12. 1.23844 ;
26 > 16. 13. -0.636814 ;
27 > 2.0 34.09 'K3' ;
28 > 4.0 2.02458 10.1287 0.0 'D2' ;
29 > 2.0 34.09 'K4' ;
30 > 3.0 4.0818 'DR4' ;
31 > 16. 15. 54.03201 ;
32 > 3.0 0.0 ;
33 > 13. 4. ;
34 > SENTINEL
```

\*END OF INPUT\*

ANALYSATOR

0

Q D D

2 MAL 80 GRAD

MAGNETRADIUS R = 1.45 M

ZWEITE ORDNUNG

---

1.00000	1.50000	50.00000	0.25000	15.00000	0.0	2.50000	0.44030
17.00000	1.00000	0.0	3.00000				
LABEL = SEC							
3.00000	2.22370						
LABEL = DR1							
5.00000	0.20000	-2.32320	12.50000				
LABEL = Q							
3.00000	1.00330						
LABEL = DR2							
16.00000	4.00000	50.00000					
16.00000	5.00000	4.50000					
16.00000	12.00000	-0.08572					
16.00000	13.00000	-0.60612					
2.00000	25.00000						
LABEL = K1							
4.00000	2.02458	10.12870	0.0				
LABEL = D1							
2.00000	34.09000						
LABEL = K2							
3.00000	0.45000						
LABEL = DR3							
13.00000	4.00000						
3.00000	0.45000						
LABEL = DR3							
16.00000	4.00000	50.00000					
16.00000	5.00000	4.50000					
16.00000	12.00000	1.23844					
16.00000	13.00000	-0.63681					
2.00000	34.09000						
LABEL = K3							
4.00000	2.02458	10.12870	0.0				
LABEL = D2							
2.00000	34.09000						
LABEL = K4							
3.00000	4.08180						
LABEL = DR4							
16.00000	15.00000	54.03200					
3.00000	0.0						
13.00000	4.00000						

SENTINEL

ANALYSATOR

```

*BEAM*      1.000000    0.44 GEV
                                0.0 M      0.0    1.500 CM
                                                0.0    50.000 HR      0.0
                                                0.0    0.250 CM      0.0    0.0
                                                0.0    15.000 HR      0.0    0.0    0.0
                                                0.0    0.0 CM        0.0    0.0    0.0    0.0
                                                0.0    2.500 PC      0.0    0.0    0.0    0.0    0.0

*2ND ORDER 17.0    MOM    1.0 0.0 3.0
  LABEL = SEC

*DRIFT*     3.0    2.2237 M
  LABEL = DR1
                                2.2 M      0.0    11.219 CM
                                                0.0    50.000 HR      0.991
                                                0.0    3.345 CM      0.0    0.0
                                                0.0    15.000 HR      0.0    0.0    0.997
                                                -0.303  0.395 CM      0.0    0.0    0.0    0.0
                                                0.0    2.500 PC      0.0    0.0    0.0    0.0    0.0

*QUAD*     5.00    0.20000 M    -2.3232 KG    12.500 CM    ( -3.918 M )
  LABEL = Q
                                2.4 M      0.0    12.504 CM
                                                0.0    79.744 HR      0.997
                                                0.0    3.557 CM      0.0    0.0
                                                0.0    6.286 HR      0.0    0.0    0.985
                                                -0.330  0.430 CM      0.0    0.0    0.0    0.0
                                                0.0    2.500 PC      0.0    0.0    0.0    0.0    0.0

*DRIFT*     3.0    1.0033 M
  LABEL = DR2
                                3.4 M      0.0    20.491 CM
                                                0.0    79.744 HR      0.999
                                                0.0    4.180 CM      0.0    0.0
                                                0.0    6.286 HR      0.0    0.0    0.989
                                                -0.651  0.880 CM      0.0    0.0    0.0    0.0
                                                0.0    2.500 PC      0.0    0.0    0.0    0.0    0.0

*PARAM*     16.0    4.0 5.000E 01
* G/2 *     16.0    5.0 4.500E 00
* 1/R1 *    16.0    12.0-8.572E-02
* 1/R2 *    16.0    13.0-6.061E-01

*ROTAT*     2.0    25.00 D
  LABEL = K1
                                3.4 M      -0.241  20.496 CM
                                                1.089  145.628 HR      0.999
                                                0.0    4.182 CM      0.0    0.0
                                                0.0    6.357 HR      0.0    0.0    -0.928
                                                -0.651  0.880 CM      0.021 -0.008  0.0    0.0
                                                0.0    2.500 PC      0.0    0.0    0.0    0.0    0.0

*BEND*     4.000    2.02458 M    10.129 KG    0.0000 ( 79.999 D )
  LABEL = D1
                                5.5 M      -0.606  24.554 CM
                                                -9.242  117.153 HR      -0.934
                                                0.0    3.058 CM      0.0    0.0
                                                0.0    6.357 HR      0.0    0.0    -0.822
                                                -2.693  37.827 CM      -0.987  0.968  0.0    0.0
                                                0.0    2.500 PC      0.122  0.210  0.0    0.0    -0.039

*ROTAT*     2.0    34.09 D
  LABEL = K2
                                5.5 M      0.299  24.549 CM
                                                -30.268  56.066 HR      0.065
                                                0.0    3.108 CM      0.0    0.0
                                                0.0    19.169 HR      0.0    0.0    -0.988
                                                -2.693  37.827 CM      -0.993  0.045  0.0    0.0
                                                0.0    2.500 PC      0.122  0.689  0.0    0.0    -0.039

*DRIFT*     3.0    0.4500 M
  LABEL = DR3
                                5.9 M      -1.063  24.841 CM
                                                -30.268  56.066 HR      0.166
                                                0.0    2.259 CM      0.0    0.0
                                                0.0    19.169 HR      0.0    0.0    -0.977
                                                -2.735  37.827 CM      -0.976  0.045  0.0    0.0
                                                0.0    2.500 PC      0.191  0.689  0.0    0.0    -0.039

*TRANSFORM* 1
  1.08291  0.48572  0.0    0.0    0.0    1.89302
  -2.05776 0.00046  0.0    0.0    0.0    15.44062
  0.0    0.0    -0.37482  0.14516  0.0    0.0
  0.0    0.0    -3.72677 -1.22466  0.0    0.0
  -2.06162 -0.74990  0.0    0.0    1.00000 -0.59659
  0.0    0.0    0.0    0.0    0.0    1.00000

```



\*2ND ORDER TRANSFORM \*

1 11 -4.779E-03								
1 12 -2.675E-03	1 22 -3.803E-04							
1 13 0.0	1 23 0.0	1 33 1.377E-04						
1 14 0.0	1 24 0.0	1 34 1.244E-03	1 44 4.221E-05					
1 15 0.0	1 25 0.0	1 35 0.0	1 45 0.0	1 55 0.0				
1 16 1.104E-02	1 26 4.625E-03	1 36 0.0	1 46 0.0	1 56 0.0	1 66 -1.772E-02			

2 11 -6.558E-02								
2 12 -5.375E-02	2 22 -1.133E-02							
2 13 0.0	2 23 0.0	2 33 -1.413E-02						
2 14 0.0	2 24 0.0	2 34 -1.072E-02	2 44 2.343E-05					
2 15 0.0	2 25 0.0	2 35 0.0	2 45 0.0	2 55 0.0				
2 16 -5.245E-02	2 26 -3.232E-02	2 36 0.0	2 46 0.0	2 56 0.0	2 66 -2.879E-01			

3 11 0.0								
3 12 0.0	3 22 0.0							
3 13 -7.864E-03	3 23 -3.982E-03	3 33 0.0						
3 14 -1.250E-03	3 24 -7.523E-04	3 34 0.0	3 44 0.0					
3 15 0.0	3 25 0.0	3 35 0.0	3 45 0.0	3 55 0.0				
3 16 0.0	3 26 0.0	3 36 5.720E-03	3 46 4.821E-03	3 56 0.0	3 66 0.0			

4 11 0.0								
4 12 0.0	4 22 0.0							
4 13 2.651E-03	4 23 -2.759E-03	4 33 0.0						
4 14 1.224E-02	4 24 6.598E-03	4 34 0.0	4 44 0.0					
4 15 0.0	4 25 0.0	4 35 0.0	4 45 0.0	4 55 0.0				
4 16 0.0	4 26 0.0	4 36 -7.139E-02	4 46 5.690E-02	4 56 0.0	4 66 0.0			

5 11 -3.524E-03								
5 12 -3.617E-03	5 22 -1.017E-03							
5 13 0.0	5 23 0.0	5 33 -6.497E-03						
5 14 0.0	5 24 0.0	5 34 -3.154E-03	5 44 -6.630E-04					
5 15 0.0	5 25 0.0	5 35 0.0	5 45 0.0	5 55 0.0				
5 16 1.334E-02	5 26 3.190E-03	5 36 0.0	5 46 0.0	5 56 0.0	5 66 -5.364E-03			

6 11 0.0								
6 12 0.0	6 22 0.0							
6 13 0.0	6 23 0.0	6 33 0.0						
6 14 0.0	6 24 0.0	6 34 0.0	6 44 0.0					
6 15 0.0	6 25 0.0	6 35 0.0	6 45 0.0	6 55 0.0				
6 16 0.0	6 26 0.0	6 36 0.0	6 46 0.0	6 56 0.0	6 66 0.0			

\*DRIFT\* 3.0 0.4500 M  
LABEL = DR3

6.4 M	-2.425	25.381	CM					
	-30.268	56.066	MR	0.262				
	0.0	1.428	CM	0.0	0.0			
	0.0	19.169	MR	0.0	0.0	-0.942		
	-2.776	37.827	CM	-0.951	0.045	0.0	0.0	
	0.0	2.500	PC	0.255	0.689	0.0	0.0	-0.039

\*PARAM\* 16.0 4.0 5.000E 01

\* G/2 \* 16.0 5.0 4.500E 00

\* 1/R1 \* 16.0 12.0 1.238E 00

\* 1/R2 \* 16.0 13.0-6.368E-01

\*ROTAT\* 2.0 34.09 D  
LABEL = K3

6.4 M	-3.417	25.578	CM					
	6.093	134.667	MR	0.919				
	0.0	1.413	CM	0.0	0.0			
	0.0	24.213	MR	0.0	0.0	-0.971		
	-2.776	37.827	CM	-0.939	-0.861	0.0	0.0	
	0.0	2.500	PC	0.253	0.511	0.0	0.0	-0.039

\*BEND\* 4.000 2.02458 M 10.129 KG 0.0000 ( 79.999 D )  
LABEL = D2

8.4 M	-0.831	25.035	CM					
	15.795	147.547	MR	-0.842				
	0.0	3.568	CM	0.0	0.0			
	0.0	24.213	MR	0.0	0.0	0.961		
	-1.982	77.314	CM	-0.925	0.966	0.0	0.0	
	0.0	2.500	PC	0.557	-0.050	0.0	0.0	-0.228

\*ROTAT\* 2.0 34.09 D  
LABEL = K4

8.4 M	0.073	25.147	CM					
	-7.495	77.706	MR	-0.129				
	0.0	3.537	CM	0.0	0.0			
	0.0	11.669	MR	0.0	0.0	0.790		
	-1.982	77.314	CM	-0.923	0.463	0.0	0.0	
	0.0	2.500	PC	0.554	0.743	0.0	0.0	-0.228

\*DRIFT\* 3.0 4.0818 M

LABEL = DR4

12.5 M

-2.986	37.849	CM							
-7.495	77.706	MR	0.752						
0.0	7.863	CM	0.0	0.0					
0.0	11.669	MR	0.0	0.0	0.961				
-3.196	77.301	CM	-0.223	0.464	0.0	0.0			
0.0	2.500	PC	0.991	0.743	0.0	0.0			-0.228

\*FOTILT\* 16.0 15.0 5.403E 01

\*DRIFT\* 3.0 0.0 M

12.5 M

0.007	37.529	CM							
-7.495	77.706	MR	0.745						
0.0	8.050	CM	0.0	0.0					
0.0	11.669	MR	0.0	0.0	0.975				
-3.196	77.301	CM	-0.225	0.464	0.0	0.0			
0.0	2.500	PC	0.999	0.743	0.0	0.0			-0.228

\*TRANSFORM\* 1

-1.00000	-0.00000	0.0	0.0	0.0	14.99973
-3.76844	-1.00001	0.0	0.0	0.0	23.08386
0.0	0.0	0.00002	-0.48764	0.0	0.0
0.0	0.0	2.05072	-0.62079	0.0	0.0
-3.34417	-1.49997	0.0	0.0	1.00000	-7.03908
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.00000

\*2ND ORDER TRANSFORM \*

1 11	-4.745E-04								
1 12	4.837E-04	1 22	-2.302E-06						
1 13	0.0	1 23	0.0	1 33	-1.346E-02				
1 14	0.0	1 24	0.0	1 34	9.659E-04	1 44	-1.401E-04		
1 15	0.0	1 25	0.0	1 35	0.0	1 45	0.0	1 55	0.0
1 16	3.927E-03	1 26	6.246E-07	1 36	0.0	1 46	0.0	1 56	0.0
									1 66 7.460E-03
2 11	7.770E-03								
2 12	7.965E-03	2 22	4.385E-04						
2 13	0.0	2 23	0.0	2 33	-1.190E-02				
2 14	0.0	2 24	0.0	2 34	9.118E-03	2 44	5.985E-04		
2 15	0.0	2 25	0.0	2 35	0.0	2 45	0.0	2 55	0.0
2 16	1.227E-01	2 26	-3.573E-02	2 36	0.0	2 46	0.0	2 56	0.0
									2 66 -1.399E 00
3 11	0.0								
3 12	0.0	3 22	0.0						
3 13	3.511E-02	3 23	1.306E-02	3 33	0.0				
3 14	3.512E-03	3 24	-5.128E-04	3 34	0.0	3 44	0.0		
3 15	0.0	3 25	0.0	3 35	0.0	3 45	0.0	3 55	0.0
3 16	0.0	3 26	0.0	3 36	-1.301E-01	3 46	-8.889E-02	3 56	0.0
									3 66 0.0
4 11	0.0								
4 12	0.0	4 22	0.0						
4 13	5.946E-02	4 23	1.447E-02	4 33	0.0				
4 14	7.890E-03	4 24	-1.637E-04	4 34	0.0	4 44	0.0		
4 15	0.0	4 25	0.0	4 35	0.0	4 45	0.0	4 55	0.0
4 16	0.0	4 26	0.0	4 36	-5.394E-01	4 46	-1.867E-01	4 56	0.0
									4 66 0.0
5 11	6.073E-03								
5 12	1.180E-03	5 22	-7.686E-04						
5 13	0.0	5 23	0.0	5 33	-4.548E-03				
5 14	0.0	5 24	0.0	5 34	-3.115E-03	5 44	-1.144E-03		
5 15	0.0	5 25	0.0	5 35	0.0	5 45	0.0	5 55	0.0
5 16	-7.558E-03	5 26	-1.991E-02	5 36	0.0	5 46	0.0	5 56	0.0
									5 66 -1.648E-01
6 11	0.0								
6 12	0.0	6 22	0.0						
6 13	0.0	6 23	0.0	6 33	0.0				
6 14	0.0	6 24	0.0	6 34	0.0	6 44	0.0		
6 15	0.0	6 25	0.0	6 35	0.0	6 45	0.0	6 55	0.0
6 16	0.0	6 26	0.0	6 36	0.0	6 46	0.0	6 56	0.0
									6 66 0.0

\*LENGTH\* 12.4579 M

## Literaturverzeichnis

- 1) H.Rebel, G.W.Schweimer, G.Schatz, J.Specht, R.Löhken, G.Hauser, D.Habs and H. Klewe-Nebenius; Nucl. Phys. A182(1972)145
- 2) G.Riepe and D.Protić; Nucl.Instr. and Meth. 101 (1972) 77
- 3) D.Dorcioman, R.Bertini, M.Hage-Ali, P.Siffert and L.Stab; Nucl. Instr. and Meth. 101 (1972) 91
- 4) "Ein Magnetspektrograph für das Zyklotron des Instituts für Kernphysik", Report, Kernforschungsanlage Jülich (1972)
- 5) B.L. Cohen; Rev. Sci. Instr. 30 (1959) 415
- 6) C. Schaerf and R. Scrimaglio; Nucl. Instr. and Meth. 30(1964)359
- 7) S.Kowalski, W.Bertozzi and C.P.Sargent in Medium Energy Nuclear Physics with Electron Linear Accelerators, MIT 1967 Summer Study, Edited by W.Bertozzi and S.Kowalski, TID-24667,p.39
- 8) J.E.Spencer and H.A.Enge; Nucl.Instr. and Meth.49 (1967) 181
- 9) H.A.Enge; 3<sup>rd</sup> Int.Conf. on Magnet Technology, Hamburg 1970
- 10) K.L.Brown; "A First and Second-Order Matrix Theory for the Design of Beam Transport Systems and Charged Particle Spectrometers", SLAC Report No. 75, Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, Stanford, California (1970)
- 11) G.Charpak, R.Bouclier, T.Bressani, J.Favier and Č.Zupančič; Nucl. Instr. and Meth. 62 (1968) 262
- 12) A.H.Walenta, J.Heintze and B.Schürlein; Nucl. Instr. and Meth. 92 (1971) 373
- 13) K.L.Brown and S.K.Howry; "TRANSPORT/360, A Computer Program for Designing Charged Particle Beam Transport Systems"; SLAC Report No. 91, Stanford Linear Accelerator Center, Stanford University, Stanford, California (1970)
- 14) F.Hinterberger, Report ISKP 1970/71, Bonn 1970
- 15) Die Berechnung der Magnetkosten wurde freundlicherweise von Dr. S.Martin, Institut für Kernphysik der KFA Jülich durchgeführt.

