

DEUTSCHES ELEKTRONEN-SYNCHROTRON **DESY**

DESY-Bibliothek  
9. MAI 1968 ✓

DESY 68/3  
Januar 1968

Die Strahlführungssysteme  
für den 300 MeV - Linearbeschleuniger

H. Wiedemann

2 HAMBURG 52 · NOTKESTIEG 1

Die Strahlführungssysteme  
für den 300 MeV - Linearbeschleuniger

H. Wiedemann

Zusammenfassung

Es wird die Optik und Geometrie der Einschüßwege vom 300 MeV - Linearbeschleuniger in das Synchrotron dargestellt. Neben der Optik wird auch das gesamte Strahlbeobachtungs- und Korrektursystem diskutiert. Darüber hinaus werden die besonderen Anforderungen für die Positronenstrahlführung im Linearbeschleuniger beschrieben.

Abstract

The optics and geometry of the beam transport system between the 300 MeV - Linac and the synchrotron are described, including the beam observation and correction system. In addition, the special systems for positron focussing in the linac are discussed.

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Einleitung	
2. Gesamtanordnung	2
3. Strahlführung im Linearbeschleuniger	4
3.1. Fokussierung auf das Konvertertarget	4
3.2. Positronenkonverter	6
3.3. Positronenstrahlführung in den Linearbeschleunigerabschnitten 6 bis 12	7
3.4. Strahlbeobachtung und Korrekturen	14
4. Strahlführungen außerhalb des Linacs	16
4.1. Strahlführung G und M	17
4.2. Die Injektionswege R und L in das Synchrotron	24
4.2.1. Strahloptik	24
4.2.2. Strahlbeobachtung und Korrekturen	38
4.2.3. Energieüberwachung	45
4.3. Ejektion aus dem Synchrotron (Strahl E)	48
5.1. Lineare Quadrupolkorrekturen	48
5.2. Magnete	52
5.3. Kontrollen und Empfindlichkeit des Strahlführungssystems.	56

## 1. Einleitung

Für die strahloptische Verbindung zwischen dem 300 MeV-Linearbeschleuniger und dem Synchrotron ist eine umfangreiche Strahlführung erforderlich. Einerseits muß die große Entfernung zwischen beiden Beschleunigern ( $\sim 170$  m) überbrückt werden und andererseits aus dem Teilchenstrahl des Linearbeschleunigers die Akzeptanz und Energiebreite des Synchrotrons herausgefiltert und angepaßt werden. Zusammen mit einer Reihe von Strahlablenkungen, die durch die verschiedenen Strahlwege und durch bestehende Gebäude notwendig wurden, ergab sich daraus eine verhältnismäßig komplexe Strahlführung, die jedoch relativ unempfindlich gegenüber Einstellungsfehlern gemacht werden konnte.

Alle Strahlführungsrechnungen wurden zunächst an einem Analogrechner durchgeführt und dann an der IBM 7044 optimalisiert. Wo nicht anders vermerkt, wurde stets der strahloptische Formalismus und die Bezeichnungen aus "High Energy Beam Optics" von K. G. Steffen verwendet. (STE 65)

## 2. Gesamtanordnung

Der 300 MeV-Linearbeschleuniger wurde an den Rand eines freien Geländes gelegt, um für einen geplanten Speicherring genügend Fläche frei zu lassen. Damit kam die in Abb. 1 gezeigte Anordnung mit ihren verhältnismäßig langen Strahlführungswegen zustande.

Es sind folgende fünf Strahlführungswege ersichtlich:

### Strahl G:

Dieser Weg führt vom Linearbeschleuniger ohne Ablenkung in eine im Erdreich versenkte Strahlfalle. Er dient besonders zum Einfahren des Beschleunigers und zur groben Energieermittlung des Teilchenstrahls.

### Strahl M:

Über eine  $90^\circ$ -Ablenkung führt dieser Weg vom Linearbeschleuniger in einen Meßraum, in dem die Eigenschaften des Linacstrahls ausgemessen werden können.

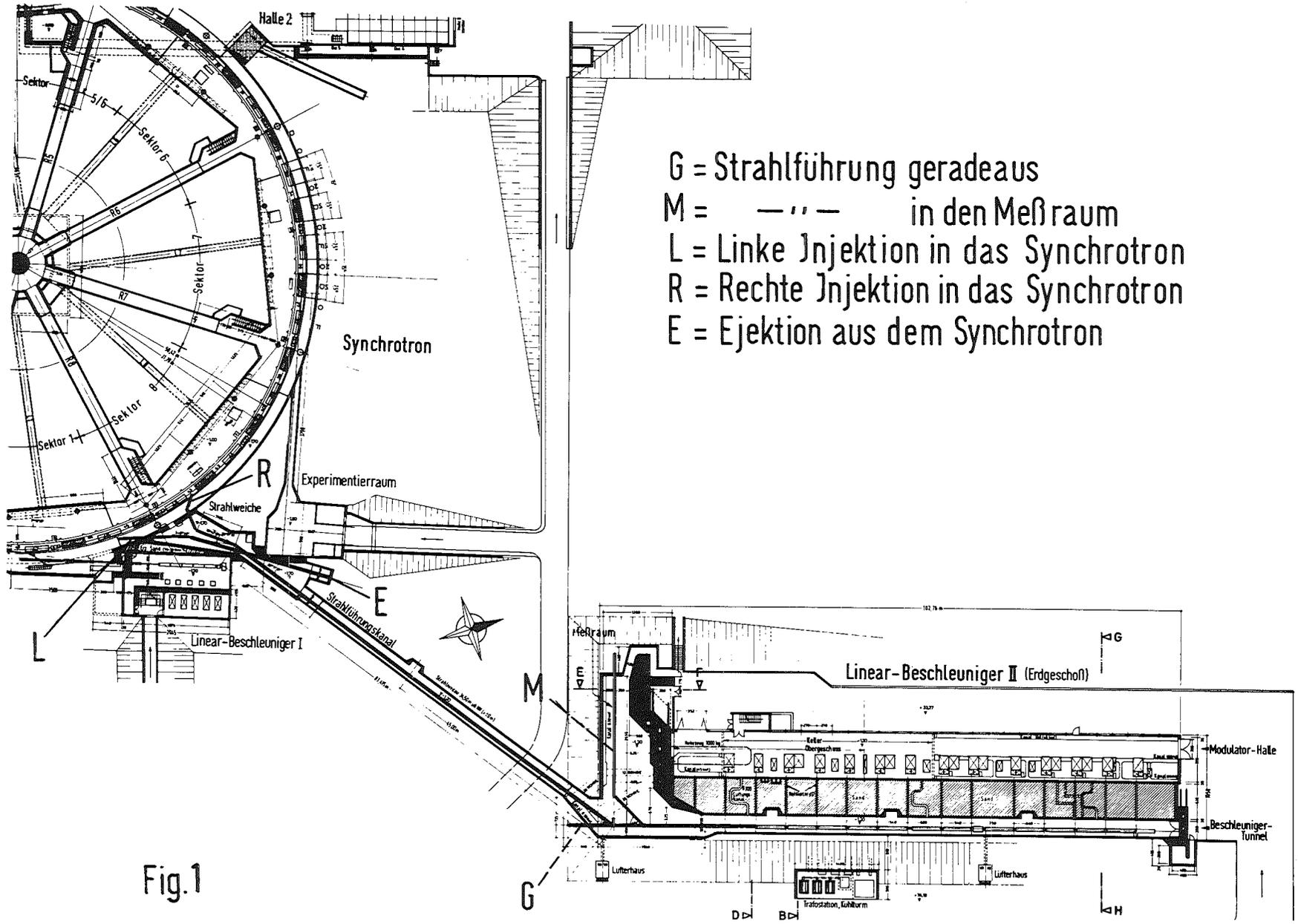
### Strahl L und Strahl R:

Die Strahlführungen L und R stellen den eigentlichen Injektionsweg in das Synchrotron in zwei verschiedenen Umlaufsrichtungen dar.

### Strahl E:

Ein über den Strahlweg R injizierter Strahl kann durch schnelle Ejektion auf dem Weg E aus dem Synchrotron herausgeführt werden.

Neben diesen Strahlführungen wird auch die Positronenstrahlführung im Linearbeschleuniger besprochen, da sie von den bisher üblichen Methoden abweicht.



G = Strahlführung geradeaus  
M = — " — in den Meßraum  
L = Linke Injektion in das Synchrotron  
R = Rechte Injektion in das Synchrotron  
E = Ejektion aus dem Synchrotron

Fig.1

### 3. Strahlführung im Linearbeschleuniger

In diesem Kapitel werden die besonderen Elemente zur Positronenstrahlführung beschrieben. Die Auslegung der Elektronenstrahlführung im Injektionsteil und in den ersten 5 Beschleunigerabschnitten vor dem Konverter wurde der Firma Varian überlassen.

#### 3.1. Fokussierung auf das Konvertertarget

Nach dem fünften Beschleunigerabschnitt ist zum Einbau eines Positronenkonverters eine freie Strecke von 2,3 m vorgesehen. Da einerseits der Elektronenstrahl nach dem fünften Linacabschnitt einen Durchmesser von etwa 12 mm hat, andererseits die Positronen aus optischen Gründen möglichst in einer Punktquelle erzeugt werden sollen, muß der Elektronenstrahl durch ein Quadrupoldublett auf das Konvertertarget fokussiert werden. Die Abb. 2 zeigt diese Fokussierung, die am Target einen Strahldurchmesser von 1 mm erzielt. Man sieht, daß der Strahlquerschnitt am Target noch wesentlich kleiner gemacht werden könnte, wenn man die Strahltaillen in beiden Ebenen an den Ort des Targets bringt. Dadurch treten jedoch bei einer gepulsten Strahlleistung von bis zu 70 MW im Targetmaterial thermische Belastungen auf, die das Target schnell zerstören würden. Der Elektronenstrahldurchmesser von 1 mm am Target stellt also einen Kompromiß zwischen positronenstrahloptischen Forderungen und materialtechnischen Möglichkeiten dar. Die Quadrupolstärken im Dublett D1 wurden so eingestellt, daß die Strahltaillen in der vertikalen und horizontalen Ebene hinter bzw. vor dem Target liegen. Dadurch wird vermieden, daß sich der Brennfleck auf dem Target durch Variation der Elektronenstrahlenergie und damit der Brennweite des Dubletts in beiden Richtungen zugleich verkleinert.

Die wesentlichen strahloptischen Daten dieses Abschnitts sind in Tabelle 1 zusammengestellt:

Tabelle 1

Elektronenenergie	$E_e = 216 \text{ MeV}$
Elektronenstrom	$I_e = 320 \text{ mA}$
bei einer HF-Leistung in Abschnitt 1-5 von 22 MW/Abschnitt max. Strahlleistung am Target	$N = 69 \text{ MW}$
Linsenstärken: $k_{D1A}, k_{D1B}$	23,70 bzw. 25,93 $\text{m}^{-2}$
Gradienten: $g_{D1A}, g_{D1B}$	1,738 bzw. 1,9/2 $\text{kG/cm}$

# Fokussierung der Elektronen auf das Konvertiertarget

$\epsilon = 0.16 \text{ mradcm}$

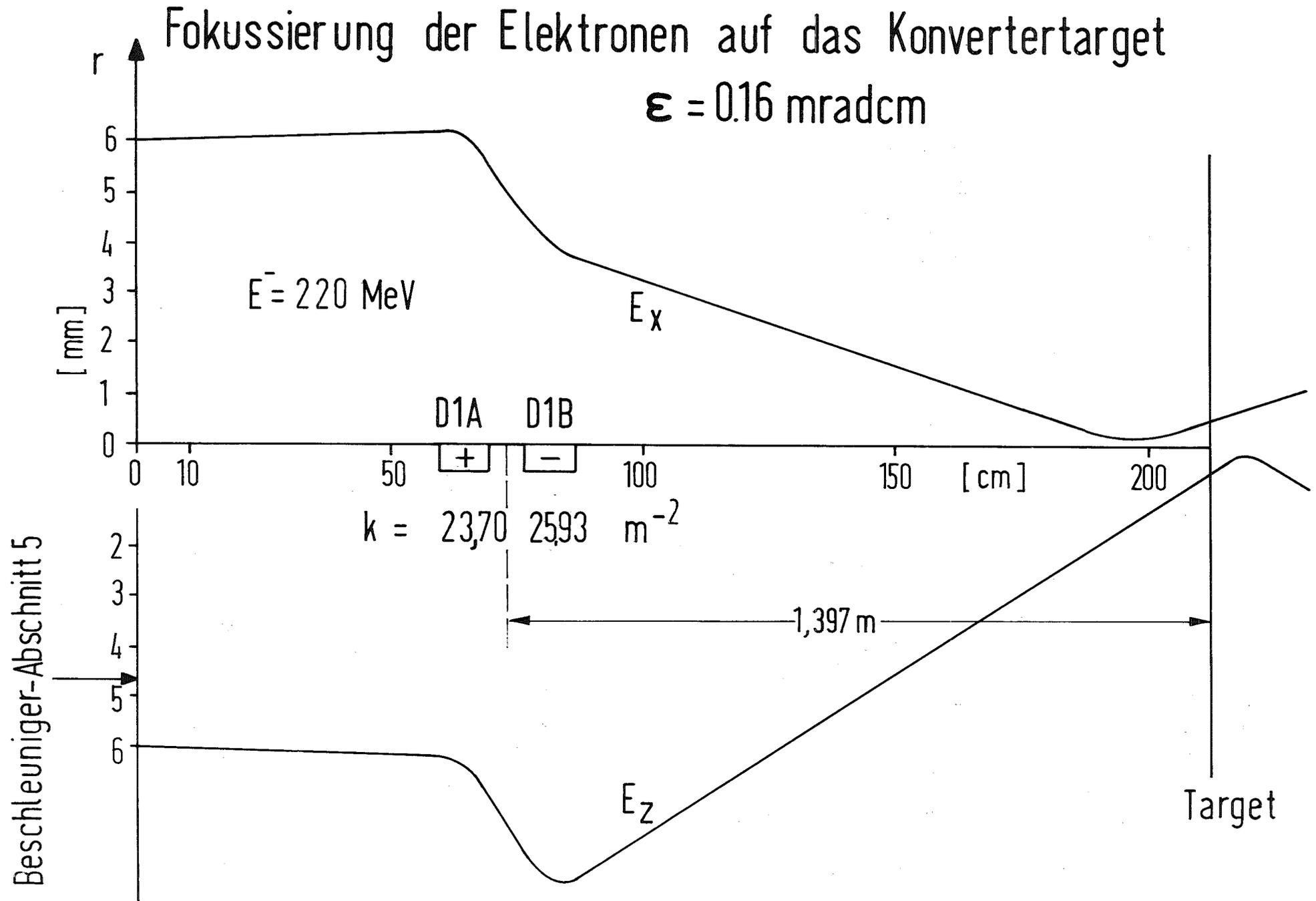


Fig.2

### 3.2. Positronenkonverter

Im neuen 300 MeV-Linearbeschleuniger werden zwei Positronenkonvertersysteme zum Einsatz kommen, Zunächst ein bereits technisch erprobter Konverter, wie er z.B. schon im 300 MeV-Linearbeschleuniger in Frascati eingebaut ist (Am 63). Später soll ein neues System, das Positronenhorn (Wi 65, Wi 66) benutzt werden, das zur Zeit entwickelt wird und einen höheren Positronenstrom zu liefern verspricht.

Der von Varian gebaute "Frascati-Konverter" besteht im wesentlichen aus einem Solenoid mit der hohen Feldstärke von 17,7 k G zur Erstfokussierung der Positronen in Verwärtsrichtung und einem exzentrisch bewegten Wolframring als Target. Im Positronenhorn werden dagegen die Positronen durch ein koaxiales Magnetfeld in Vorwärtsrichtung fokussiert.

Die wesentlichen optischen Daten beider Systeme, so wie sie für DESY vorgesehen sind, sind in Tabelle 2 zusammengestellt:

		<u>Tabelle 2</u>	Frascati- konverter	Positronen- horn
Positronenenergie	$E_0^+$ : [MeV]		$10 \pm 2$	$6 \pm 2$
eff. Targetdurchmesser	$2\rho$ : [mm]		2	2,6
magn. Feldstärke	B : [kG]		17,7	$3/r$ [cm]
axiale Ausdehnung des Feldes	$\ell$ : [cm]		6,2	4,5
einfangbarer Raumwinkel	$\Omega$ : [std]		0,2	2,3
Emittanz	$\epsilon$ : [mradcm]		26	100
Admittanz	A : [mc · cm]		$0,5\pi$	$1,2\pi$
analysierter Positronenstrom*	$i_+$ : [mA]		0,55	3
Positronenstrom total	$I_+$ : [mA]		4,5	20
Wirkungsgrad	$\eta$ :		0.008	0,043

Es ergibt sich daraus, daß die weitere Strahlführung für die Positronen mindestens eine Admittanz von  $1,2\pi$  mc · cm haben muß, um die Positronen aus beiden Konvertersystemen durch die Linearbeschleunigerstruktur führen zu können.

\* Positronenstrom innerhalb  $\epsilon = 2$  mradcm,  $\frac{\Delta p}{p} = \pm 0,5\%$  bei  $E_+ = 300$  MeV

### 3.3. Positronenstrahlführung in den Linearbeschleunigerabschnitten 6 bis 12

Als Möglichkeiten der Positronenfokussierung längs des Linearbeschleunigers bieten sich ein Solenoidfeld oder ein FODO-Kanal aus alternierend gepolten Quadrupolen an. Wie bereits an anderer Stelle (Wi 67) erläutert, ist ein FODO-Kanal einem Solenoidfeld vorzuziehen. Es ist jedoch nicht möglich, unterhalb einer Energie von etwa 100 MeV mit einem FODO-Kanal zu beginnen, da die einzelnen Quadrupole nicht beliebig dicht gesetzt werden können.

Wir haben deshalb für die Fokussierung in den Abschnitten 6 und 7 ein Solenoidfeld von 4kG Stärke vorgesehen, dessen Akzeptanz bei einem Strahldurchmesser von 20mm gegeben ist durch:

$$\epsilon = \frac{600}{E[\text{MeV}]} \text{ mrad cm}$$

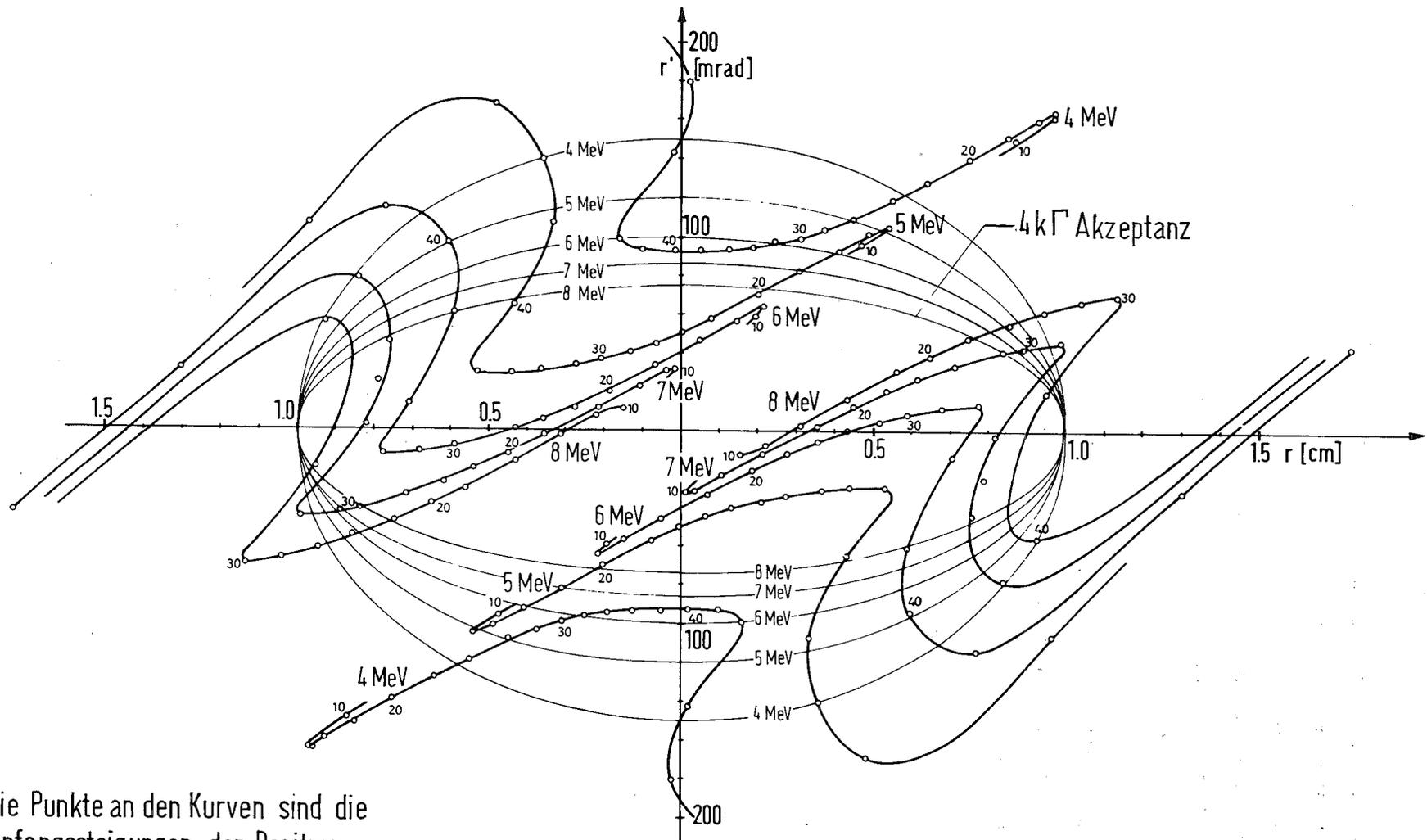
Abb. 3 zeigt diese Akzeptanz für verschiedene Energien zusammen mit der Emittanz des Positronenhorns.

Die Beschleunigerabschnitte haben eine freie Apertur von 31 mm am Anfang und 24 mm am Ende eines jeden Abschnittes. Bei einem Strahldurchmesser von ca. 20 mm bleibt damit noch ein geringer Abstand von der Beschleunigungsstruktur. In den Abschnitten 6 und 7 erhalten die Positronen einen Energiezuwachs von wenigstens 108 MeV (Garantiewert der Firma Varian). Am Ende von Abschnitt 7 sind also folgende Strahlparameter für Positronenhornbetrieb gegeben:

Energie :	$E_+$	=	114	MeV
Emittanz :	$\epsilon$	=	5,26	mrad · cm
Envelope:	$E$	=	1,1	cm
	$E'$	=	0	mrad

Beim Betrieb mit dem Frascati-Konverter ist die Emittanz wesentlich kleiner, so daß die folgende Strahlführung automatisch angepaßt ist.

Zwischen Abschnitt 7 und 8 ist ein Quadrupoldublett D2 vorgesehen, das den Positronenstrahl an die Akzeptanz des FODO-Kanals anpaßt. In Abb. 4 ist die Optik hierzu für  $\epsilon = 5,26$  mradcm aufgezeichnet. Die Linsenstärken



Die Punkte an den Kurven sind die Anfangssteigungen der Positronen aus dem Target in Schritten von 2 Grad

Emittanz des Positronenhorns 8 cm nach dem Target

Fig.3

Anpassung von Solenoid zu FODO-Kanal  
zwischen Abschnitt 7 und 8  
 $E_+ = 114 \text{ MeV}$

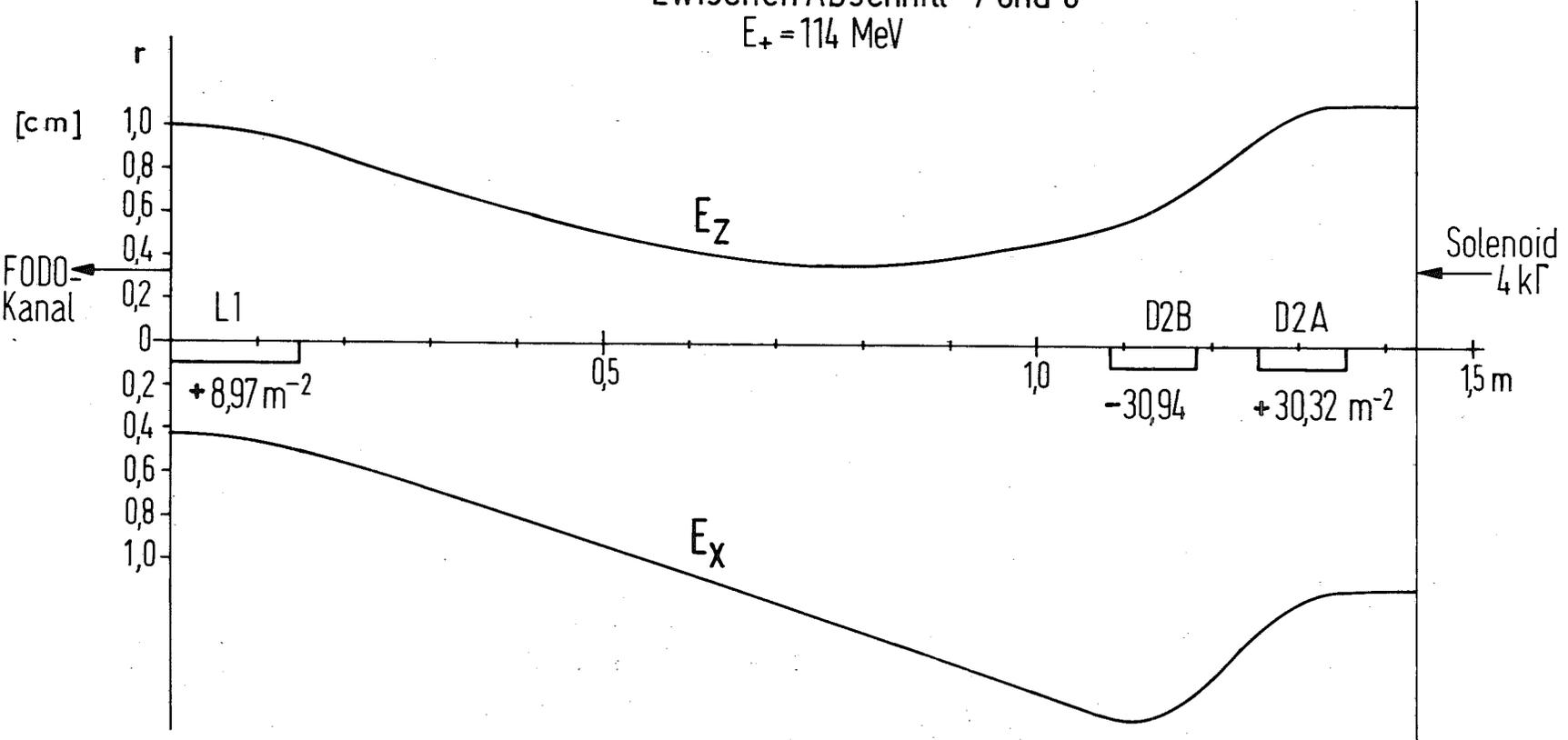


Fig. 4

betragen:

$$\begin{aligned}k_{D2A} &= + 30.32 \text{ m}^{-2} \\k_{D2B} &= - 30.94 \text{ m}^{-2}\end{aligned}$$

Die Strahlführung von Positronen in einem Linearbeschleuniger durch einen FODO-Kanal ist von Helm (He 62) für dünne Linsen durchgerechnet worden. Für endlich lange Quadrupole und große Strahlemittanzen - d.h. kleine Quadrupolabstände - ist jedoch eine allgemeinere Berechnung (Wi 68) nötig, um nicht längs des Linearbeschleunigers eine empfindliche Einbuße an Strahlintensität zu erleiden. Mit Hilfe der IBM 360 wurde ein FODO-Kanal maximaler Emittanz bei gegebener Apertur und geringstem Aufwand an Quadrupolen berechnet. Dieser theoretisch optimale FODO-Kanal mit stetig ansteigenden Quadrupolabständen interferiert jedoch mit den Driftstrecken zwischen den Beschleunigungsabschnitten. Da diese wegen der HF-Hohlleiter, Pumpanschlüsse und anderer Zuleitungen frei bleiben müssen, wurde der FODO-Kanal leicht abgeändert, sodaß die Quadrupole nur über den Beschleunigerabschnitten angeordnet sind. Dies war ohne Verlust an Emittanz durch leichtes Abändern der Linsenstärken und -abstände möglich. Aus Abb. 5 ersieht man die Verteilung der Quadrupole längs des Linearbeschleunigers. Die angegebenen Positionen der Quadrupolmitten beziehen sich auf einen Nullpunkt, der durch die Mitte des Einkoppelcavities im Abschnitt 6 definiert ist. Der Berechnung des FODO-Kanals mußte eine bestimmte Beschleunigung im Linac zu Grunde gelegt werden. Etwas willkürlich wurde der für eine HF-Leistung von 17,6 MW pro Beschleunigerabschnitt von Varian garantierte Energiegewinn eingesetzt, der eine Endenergie von 360 MeV ergibt. Für diesen Fall sind in Tabelle 3 und 3a alle wichtigen Daten zusammengefaßt. Bei einer Änderung der Beschleunigung, insbesondere bei einer Variation der HF-Leistung von Abschnitt zu Abschnitt, wird die Optik leicht verändert. Um trotzdem immer die optimale Einstellung des FODO-Kanals zu gewährleisten, wurde ein Rechenprogramm entworfen, das in Abhängigkeit von den HF-Leistungen in den einzelnen Abschnitten die optimalen Linsenstärken errechnet. Dieses Programm kann in den linacinternen Prozessorrechner eingegeben werden, der dann mit Hilfe der ebenfalls von ihm ständig registrierten HF-Leistungen den FODO-Kanal korrigieren kann.

Im Folgenden werden wir jedoch grundsätzlich eine Endenergie des Linearbeschleunigers von 360 MeV und damit eine Positronenemittanz für das Positronenhorn von  $\epsilon = 1,67 \text{ mradcm}$  am Ende des Linacs zu Grunde legen.

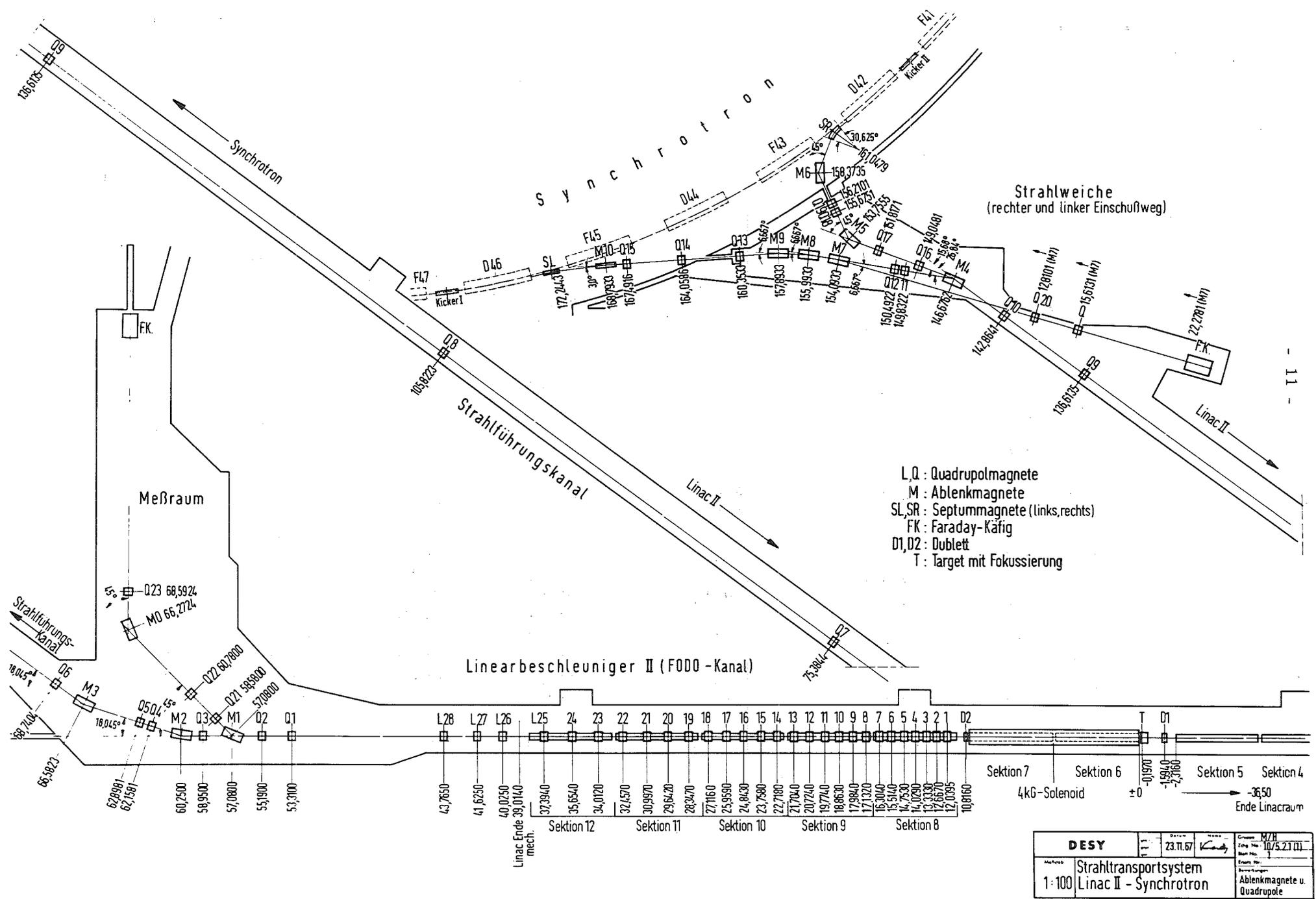


Fig. 5

T A B E L L E 3

Nr.	Position	Abstand	Energie	Linsenstärke	Gradient	Enveloppe		
	[m]	$\Delta L$ [m]	E[MeV]	$k$ [m <sup>-2</sup> ]	g[kG/cm]	E[mm]	E[mm]	
L	1	12.0395	0.6275	120.1	8.970	373.8	10.0	4.3
	2	12.6670	0.666	126.1	8.893	373.9	10.0	4.3
	3	13.3330	0.696	132.5	8.384	370.3	10.0	4.2
	4	14.0290	0.724	139.2	7.989	370.6	10.0	4.2
	5	14.753	0.761	146.1	7.557	368.0	10.0	4.2
	6	15.514	0.790	153.4	7.185	367.3	10.0	4.2
	7	16.304	0.832	160.9	6.793	364.4	10.0	4.2
	8	17.132	0.852	166.4	6.552	363.4	10.0	4.2
	9	17.984	0.879	174.5	6.230	362.5	10.0	4.2
	10	18.863	0.911	183.0	5.939	362.2	9.8	4.2
	11	19.774	0.950	191.7	5.678	362.8	9.6	4.2
	12	20.724	0.980	200.8	5.376	359.8	9.8	4.2
	13	21.704	1.014	210.1	5.145	360.4	9.8	4.2
	14	22.718	1.040	217.4	4.964	359.7	9.5	4.3
	15	23.758	1.085	227.3	4.743	359.4	9.4	4.3
	16	24.843	1.116	237.7	4.522	358.3	9.6	4.2
	17	25.959	1.157	248.4	4.422	366.1	9.6	4.3
	18	27.116	1.231	259.5	4.130	357.2	9.4	4.2
	19	28.347	1.295	268.8	3.979	356.5	9.4	4.2
	20	29.642	1.355	281.2	3.819	357.9	9.8	4.2
	21	30.997	1.460	294.1	3.670	359.8	9.9	4.1
	22	32.457	1.555	308.1	3.403	349.4	9.8	3.8
	23	34.012	1.642	320.5	3.316	354.2	10.0	4.1
	24	35.654	1.740	336.2	3.165	354.7	10.4	4.1
	25	37.394		352.8	3.015	354.6	10.4	3.6
Linac Ende	38.200		360.0					

T A B E L L E 3a

Enveloppen für Positronen verschiedener Energie  
im FODO-Kanal

---

Sollenergie:  $E_0^+ = 6 \text{ MeV}$

Energie $E^+$ (MeV)		4	5	6	7	8
Quadrupol		Enveloppen E (mm)				
L	1	10.1	10.1	10.0	10.0	10.0
	2	10.1	10.1	10.0	10.0	9.9
	3	10.2	10.1	10.0	9.9	9.9
	4	10.2	10.1	10.0	10.0	9.9
	5	10.1	10.0	10.0	10.0	9.9
	6	10.0	10.0	10.0	9.9	9.9
	7	10.1	10.0	10.0	9.9	9.9
	8	10.2	10.1	10.0	9.9	9.9
	9	10.1	10.0	10.0	10.0	9.9
	10	9.7	9.8	9.8	9.8	9.8
	11	9.7	9.7	9.6	9.6	9.5
	12	10.0	9.9	9.8	9.7	9.7
	13	9.8	9.8	9.8	9.8	9.8
	14	9.5	9.5	9.5	9.5	9.5
	15	9.5	9.5	9.4	9.4	9.4
	16	9.8	9.7	9.6	9.6	9.6
	17	9.6	9.6	9.6	9.5	9.5
	18	9.4	9.4	9.4	9.4	9.3
	19	9.5	9.4	9.4	9.4	9.4
	20	9.9	9.9	9.8	9.8	9.9
	21	10.0	9.9	9.9	9.9	9.9
	22	9.7	9.8	9.8	9.8	9.7
	23	10.1	10.1	10.0	10.0	10.0
	24	10.5	10.4	10.4	10.4	10.4
	25	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4

### 3.4. Strahlbeobachtung und Korrekturen

Durch Erdfeld, Aufstellungsfehler der Solenoide und der Quadrupole und andere Unsymmetrien können Strahlverbiegungen im Linearbeschleuniger hervorgerufen werden. Zur Korrektur dieser Fehler in vertikaler und horizontaler Ebene sind von Varian am Anfang und zum Teil auch am Ende eines jeden Beschleunigungsabschnittes Steuerspulen vorgesehen. Neben diesen Steuerspulen sind zur Strahlbeobachtung drei Positionsmonitore hinter den Abschnitten 5, 7 und 12 vorgesehen. (s. Abb. 6).

Die Steuerspulen und Positionsmonitore am Ende des fünften Abschnittes dienen hauptsächlich dazu, den leistungsstarken Elektronenstrahl genau auf das Target zu justieren, was durch eine Brennfleckbeobachtung kontrolliert werden kann.

Um den geringen, aber fast die ganze Apertur ausfüllenden Positronenstrahl ohne wesentliche Verluste zu beschleunigen, ist ein eindeutiges Korrektursystem von Steuerspulen und Strahlmonitoren notwendig, d.h. jeder Steuerspule sollte ein Strahlmonitor zugeordnet sein. Im Positronenteil des Linacs sind jedoch nur zwei Lagemonitore vorgesehen, deren Empfindlichkeit für Positronen durch einen hohen Elektronenuntergrund (s. unten) herabgesetzt wird. Aus diesem Grunde ist am Ende eines jeden Beschleunigungsabschnittes ein Scintillationszähler als Spillmonitor vorgesehen, wie sie sich auch schon an anderen Beschleunigern bewährt haben. Ein Auftreffen des Strahls auf die Beschleunigungsstruktur kann über den erzeugten Schauer sofort bemerkt und korrigiert werden.

Bei Positronenbetrieb wird die Strahlbeobachtung durch Monitore durch einen hohen Elektronenuntergrund erschwert. Messungen von H. De Staebler (DST 64) in Stanford haben gezeigt, daß etwa gleich viel Elektronen wie Positronen mit  $180^\circ$  Phasenverschiebung beschleunigt werden. Der Übergang von Solenoid zu Quadrupolfokussierung macht es jedoch möglich, einen Teil dieser Elektronen zu eliminieren. Da die Elektronen im Anpassungsdublett D2 in der horizontalen Ebene genauso fokussiert werden wie die Positronen in der vertikalen Ebene und umgekehrt, können sie durch einen an den Positronenstrahl angepaßten Kollimator zum großen Teil (70%) eliminiert werden. Mit Hilfe dieses Kollimators ist zu hoffen, daß auch die Lage und Intensität des Positronenstrahls im Linearbeschleuniger gemessen werden kann.

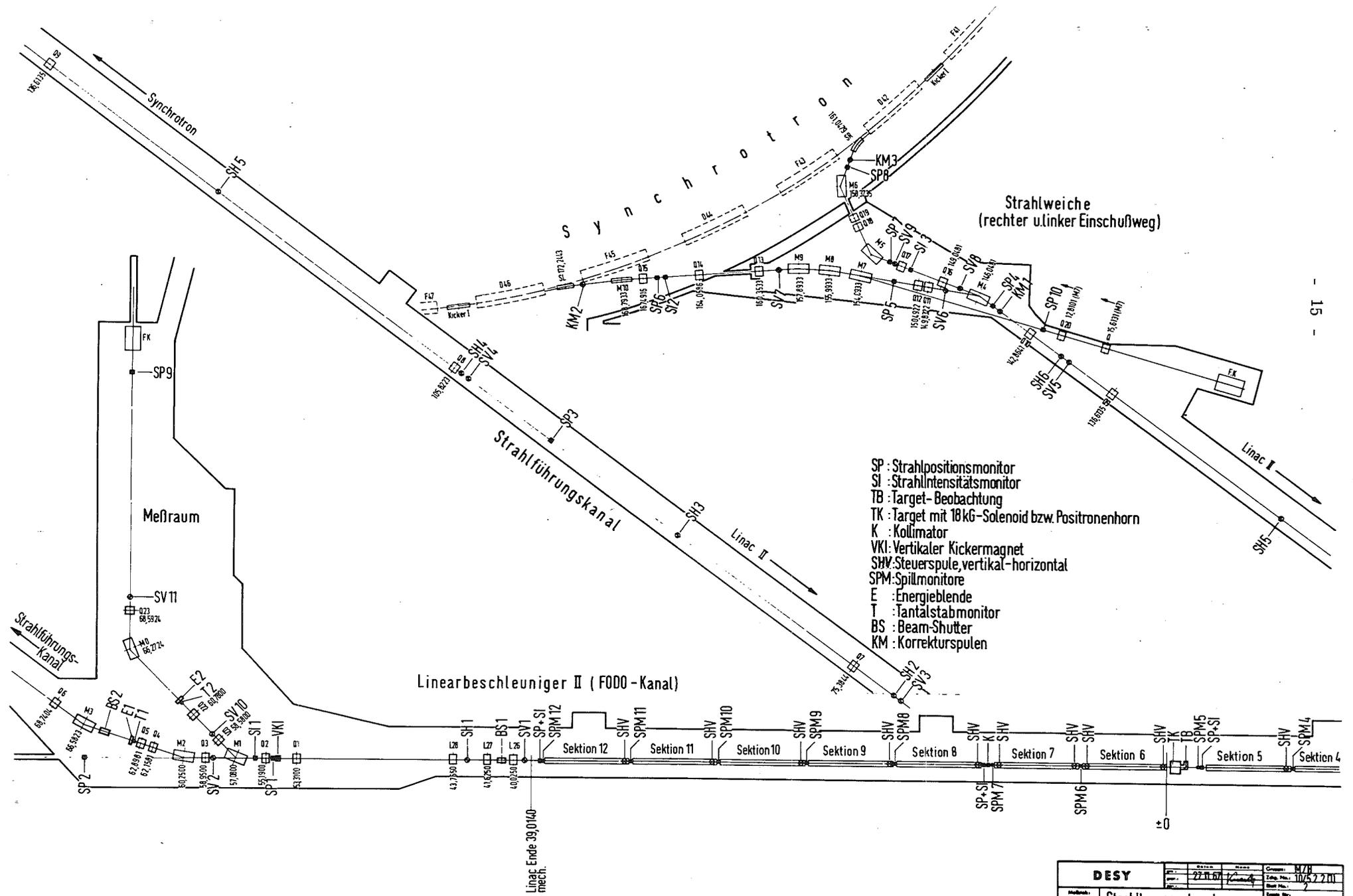


Fig.6

<b>DESY</b>		Blatt: 27.11.67 Blatt Nr.: 2	Gezeichnet: M/Z Zeich. Nr.: 10/52211
Maßstab:	Strahltransportsystem Linac II - Synchrotron	Spalten Nr.: Benutzungen: Blenden, Monitore, Spulen, Target u.a.	

#### 4. Strahlführungen außerhalb des Linacs

Zur optischen Anpassung des Linacstrahls an die verschiedenen Strahlführungswege dienen die Quadrupole L26, L27, L28, Q1, Q2 und Q3 (s. Abb. 5). Wie bereits hervorgehoben, können die Emittanzellipsen am Ende des FODO-Kanals je nach Betriebsbedingungen des Linacs schwach variieren. Mit Hilfe eines bei DESY bestehenden Optimalisierungsprogramms\* kann jederzeit über den Prozessrechner sehr schnell die optimale Anpassung gefunden und eingestellt werden.

Bei den für diese Arbeit festgelegten Betriebsbedingungen erhalten wir folgende charakteristische Daten am Ende des FODO-Kanals.

$$\begin{aligned} \text{Position: } & 39.055 \text{ m} \\ \varepsilon & = 1,67 \text{ mradcm} \\ E_x & = 1,09 \text{ cm} \\ E_z & = 0,38 \text{ cm} \\ E'_x & = 4,80 \text{ mrad} \\ E'_z & = 2,44 \text{ mrad} \end{aligned}$$

Die hierdurch definierte Emittanzellipse muß auf die in Tabelle 4 festgelegten Akzeptanzellipsen angepaßt werden. Die hierzu gehörende Optik ist in den Fig. 7, 9 und 10 mit aufgezeigt.

T A B E L L E 4

$$\varepsilon = 1,67 \text{ mrad} \cdot \text{cm}$$

##### 1. Strahl L und R

Strahlparameter am Ende des Q3

Position: 59.1015 m

$$\begin{array}{ll} E_x = 4,13 \text{ cm} & E_z = 1,14 \text{ cm} \\ E'_x = -10,87 \text{ mrad} & E'_z = 2,04 \text{ mrad} \end{array}$$

##### 2. Strahl M

Strahlparameter am Ende des Q1

Position: 53.4615 m

$$\begin{array}{ll} E_x = 2,21 \text{ cm} & E_z = 3,06 \text{ cm} \\ E'_x = 11,67 \text{ mrad} & E'_z = -13,06 \text{ mrad} \end{array}$$

---

\* Fr1. I. Borchardt danke ich herzlich für die Überlassung des Programms.

#### 4.1. Strahlführung Q und M

Für Test- und Meßversuche am Linearbeschleuniger sind die beiden Strahlwege G und M vorgesehen.

Die Strahlführung G ist die gerade Fortsetzung der Linearbeschleunigerachse und führt in eine 4 m tief im Erdreich gelegene Strahlfalle (Abb. 1 und 7). Sie wird zum Einfahren des Beschleunigers und für eine grobe Energieermittlung des Strahls benutzt werden. Die genaue Energie des Linearbeschleunigers kann zumindest am Anfang nicht unmittelbar eingestellt werden und ist daher beim Einschalten unbekannt. Der Strahl würde also im allgemeinen wegen der falschen Einstellung der Ablenkmagnete irgendwo auf die Vakuumkammerwand treffen, was man bei der hohen Strahlleistung gern vermeiden möchte. Mit Hilfe eines kleinen zwischen Q1 und Q2 eingebauten vertikalen Ablenkmagneten VKI und eines Strahlpositionsmonitors SP2 (s. Abb. 6) läßt sich die Strahlenergie durch schwache Ablenkung innerhalb der Vakuumkammer grob feststellen. Diese Ablenkung ist im Detail in Abb. 8 dargestellt und beträgt am Monitor 12 mm pro 1 mrad Ablenkwinkel.

Die Strahlenveloppe und die freie Apertur lassen zumindest eine Ablage von etwa 25 mm zu. Beträgt die Genauigkeit der Positionsmessung  $\pm 2,5\%$ , so läßt sich die Energie nach der beschriebenen Methode mit der gleichen Genauigkeit bestimmen. Diese Genauigkeit reicht für die Einstellung der Ablenkmagnete in den Meßarm aus, um den Strahl von der Vakuumkammer fernzuhalten und im wesentlichen auf die Backen der Energieblende E2 zu führen.

Der Meßraum dient zusammen mit der Ablenkung M1 - M0 dazu, die wesentlichen Parameter des Linearbeschleunigerstrahls zu messen und zu überwachen. Es sind dazu Meßgeräte vorgesehen, die die Strahlintensität in Abhängigkeit von der Energieverteilung und der Emittanz zu messen gestatten.

In Abb. 9 ist die für die Energiebestimmung optimale Strahloptik zwischen M1 und M0 ersichtlich. Infolge der großen Ablenkung von 45 Grad ist die Dispersion sehr groß und läßt bei einer kleinen Strahltaille eine genaue Energiedefinition zu. Die maximal mögliche Energieauflösung ist hier gegeben durch (STE 65):

$$\left| \frac{\Delta p}{p} \right|_{\min} = \frac{\epsilon}{E \cdot \sin \frac{\phi}{2}} = \pm 0,1\%$$

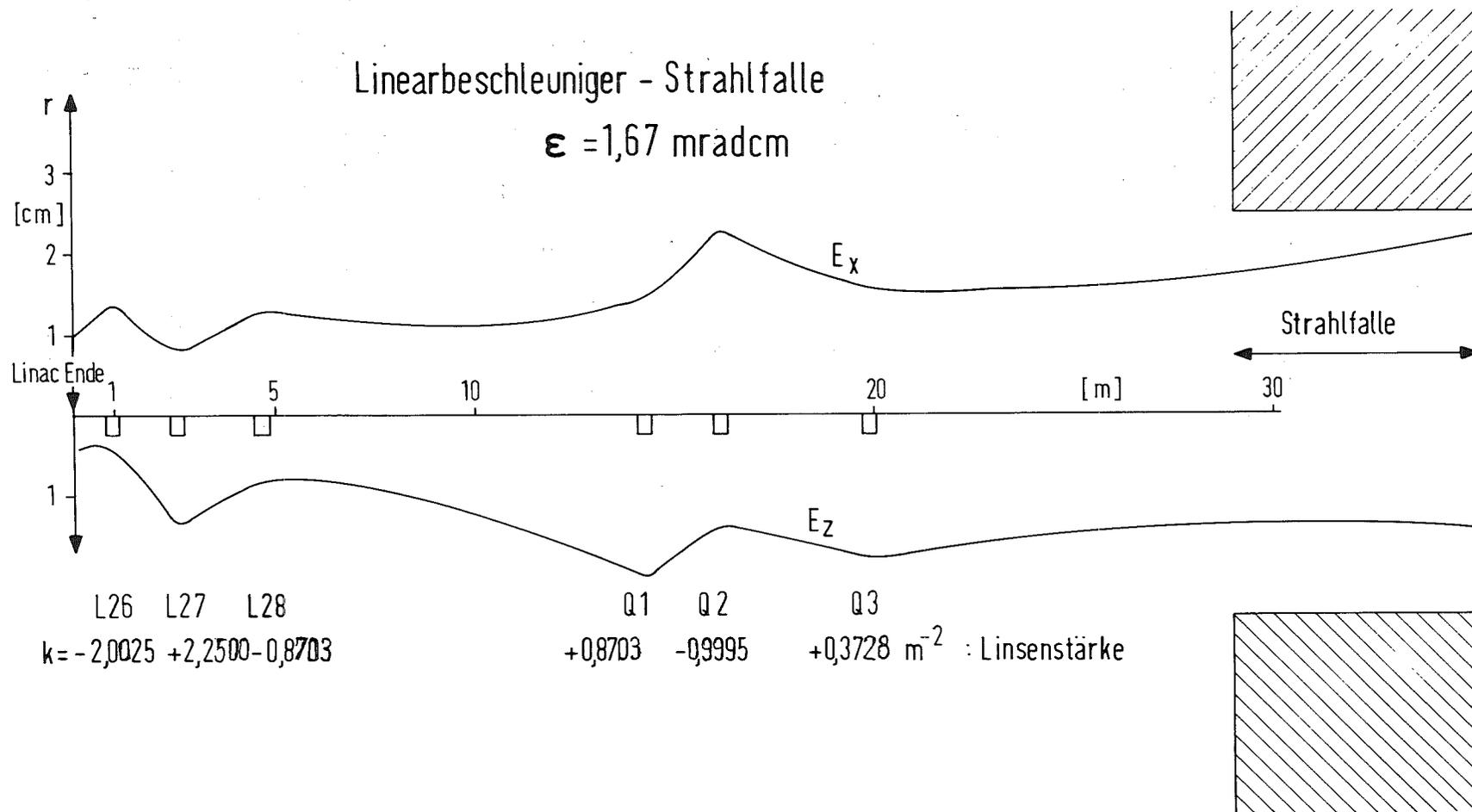


Fig.7

# Grobe Energiebestimmung im Strahl G

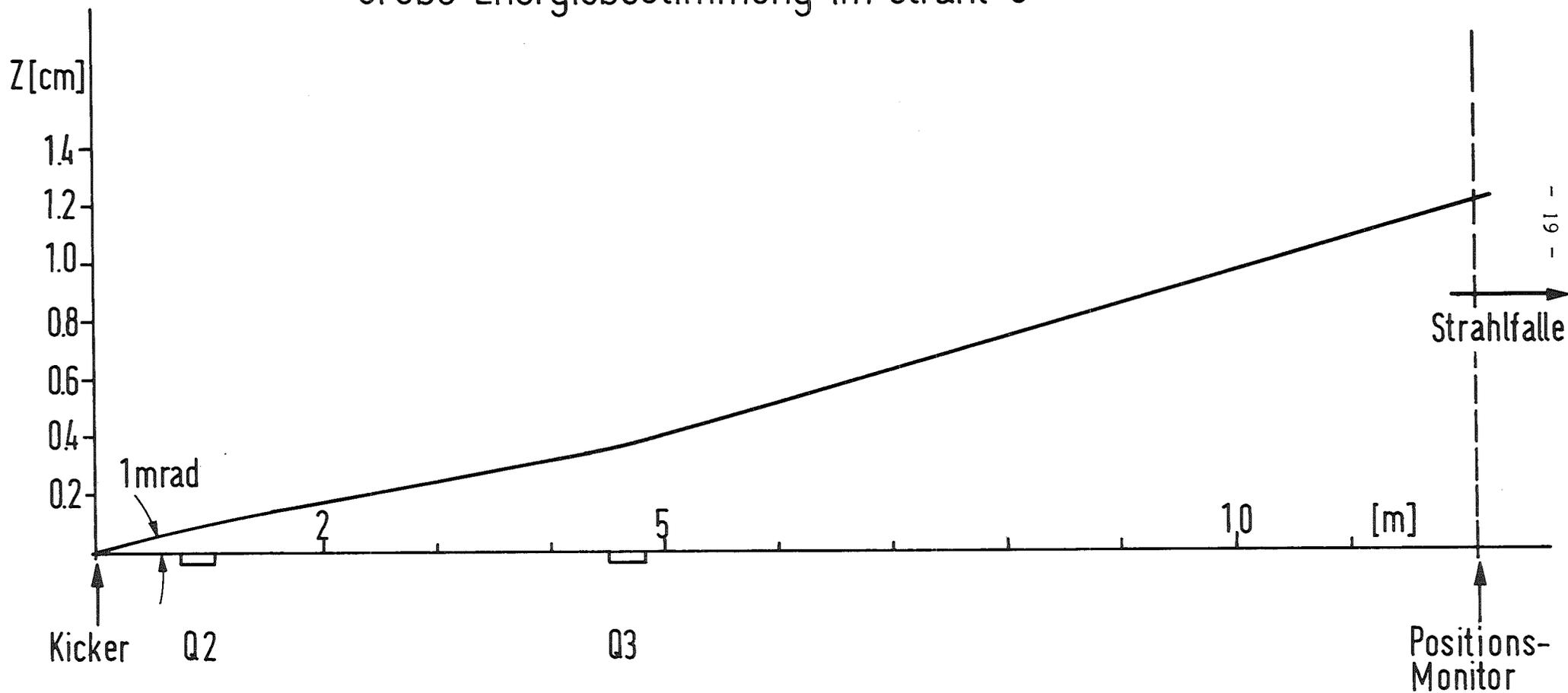


Fig.8

# Linearbeschleuniger - Messraum

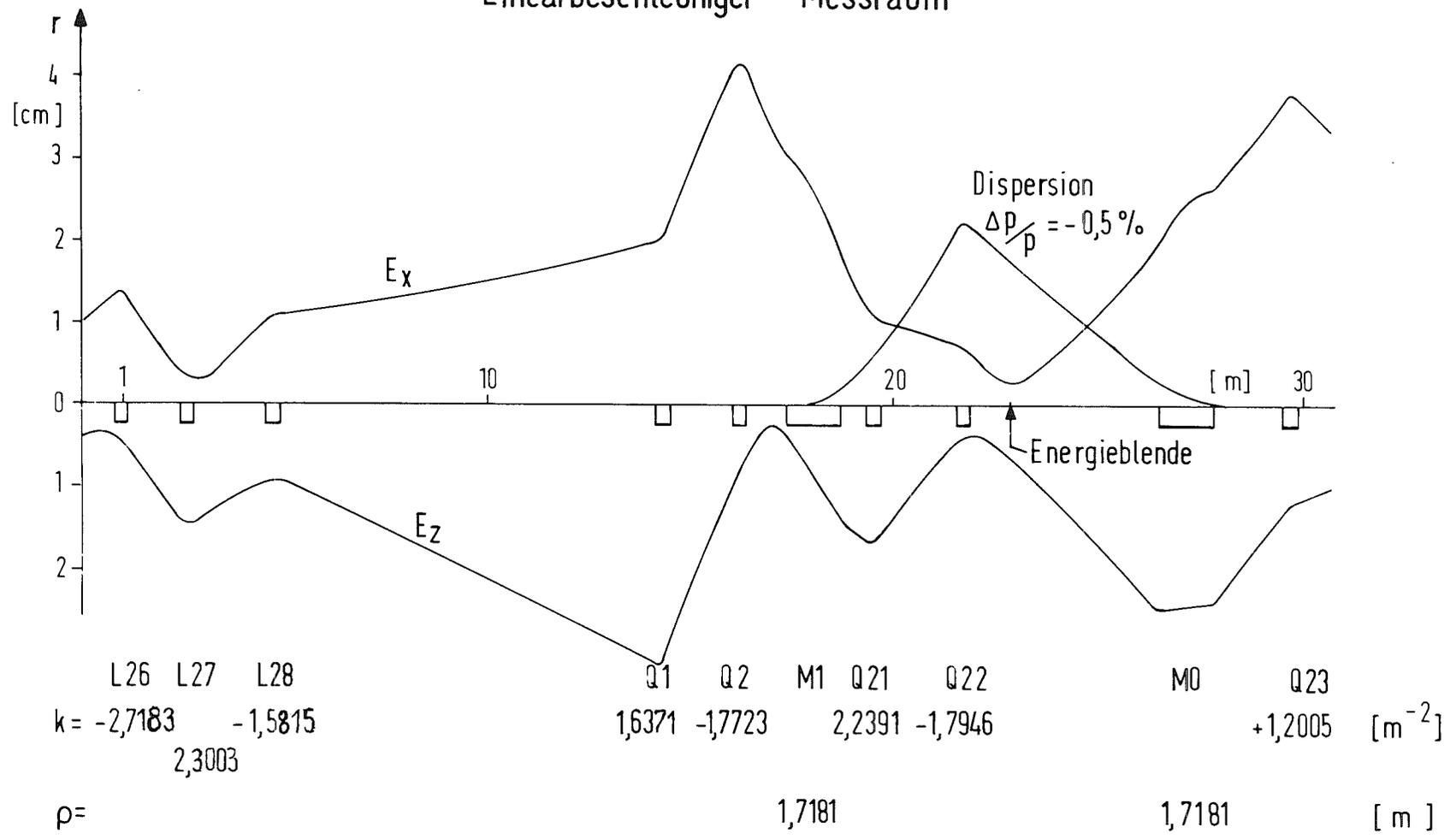


Fig.9

wenn E die Enveloppe in der Mitte des Ablenkmagneten M1 und  $\phi$  der Ablenkwinkel ist. Bei gegebenem Ablenkwinkel  $\phi$  und gegebener Emittanz  $\epsilon$  ist also das Auflösungsvermögen um so größer, je größer die Enveloppe im Ablenkmagneten ist. Diese Abhängigkeit wurde sowohl in der Ablenkung M1 - M0 als auch in M2 - M3 so gut als möglich ausgenutzt. (s. Abb. 9 und 10) An der in Abb. 9 bezeichneten Stelle ist eine Energieblende vorgesehen, deren Apertur auf 0,1 mm genau von 0 bis 70 mm verändert werden kann. Außerdem kann die Aperturmitte mit derselben Genauigkeit horizontal um  $\pm 30$  mm verschoben werden. Da die Blendenbacken außerdem elektrisch isoliert sind, können sie als SEM benutzt werden, wodurch sich die Energiestabilität des Linearbeschleunigers genau verfolgen läßt. Es lassen sich aber mit Hilfe dieser Energieblende sehr schmale Energieintervalle ausblenden und in einem nachfolgenden Faraday-Käfig die Strahlintensität in diesem Intervall messen. Die Messung einer Energieverteilungskurve ist sehr genau möglich, nimmt aber eine längere Zeit in Anspruch.

Um nur einen Überblick über die Energieverteilung zu bekommen ist unmittelbar vor der Energieblende ein in den Strahl einschiebbarer Monitor T2 vorgesehen, der aus einer Reihe quer zum Strahl angeordneter vertikaler Tantalstäbe nach Art eines Rechens besteht. Die einzelnen Stäbe sind elektrisch isoliert, sodaß die Strahlintensität über den ganzen Querschnitt beobachtet werden kann. Da an der vorgesehenen Stelle die Strahlenveloppe sehr klein, die Dispersion jedoch sehr groß ist, stellt die beobachtete Intensitätsverteilung zugleich die Energieverteilung dar. Im Anschluß an die Ablenkung M1 - M0 steht ein Raum von etwa 15 m Länge für beliebige Messungen zur Verfügung. Insbesondere ist hier der Einbau eines Emittanzfilters (STE 66) vorgesehen. Zusammen mit dem Faraday-Käfig kann also die Intensitätsverteilung über die Strahlemittanz gemessen werden.

Neben diesen Messungen ist auch z.B. daran gedacht, die Intensitätsverteilung über den Strahlquerschnitt mit Hilfe von Silberphosphatgläsern (EC 67) zu bestimmen.

In Tabelle 5 ist die Strahloptik mit Angabe des Enveloppen für den Strahl G zusammengestellt. Die angegebenen Enveloppen beziehen sich immer auf das Ende der jeweiligen Elemente.

Die Tabelle 6 gibt die entsprechenden Werte für die Ablenkung in den Meßarm an. Zusätzlich sind auch die Dispersion für  $\frac{\Delta p}{p} = -0,5\%$  und die En-

T A B E L L E 5

## Linearbeschleuniger - Strahlfalle

Element	magn. Länge [m]	k [m <sup>-2</sup> ]	E <sub>h</sub> [cm]	E <sub>v</sub> [cm]	E <sub>h</sub> · E <sub>v</sub> [cm <sup>2</sup> ]
D	0,8185		1,34	0,45	1,34 · 0,45
L 26	0,3030	-2,0025	1,34	0,57	1,34 · 0,57
D	1,2970		0,80	1,44	0,81 · 1,44
L 27	0,3030	2,2500	0,77	1,49	0,78 · 1,49
D	1,8370		1,13	0,94	1,14 · 0,95
L 28	0,3030	-0,84410	1,15	0,89	1,17 · 0,90
D	9,2420		1,45	2,27	1,46 · 2,28
Q 1	0,3030	0,8703	1,54	2,25	1,55 · 2,25
D	1,5770		2,34	1,65	2,36 · 1,66
Q 2	0,3030	-0,9995	2,39	1,61	2,41 · 1,62
D	3,4570		1,68	2,08	1,69 · 2,09
Q 3	0,3030	0,3728	1,65	2,09	1,66 · 2,10
D	3,000		1,65	1,85	1,65 · 1,86
D	3,000		1,70	1,67	1,71 · 1,68
D	3,000		1,81	1,57	1,81 · 1,58
D	3,000		1,96	1,58	1,97 · 1,58
D	3,000		2,14	1,68	2,15 · 1,69

$$\varepsilon = 1,67 \text{ mrad} \cdot \text{cm}$$

T A B E L L E 6

## Meßarm

Element	magn. Länge	$\rho$ [m]	$k$ [m <sup>-2</sup> ]	$E_h$ [cm]	$E_v$ [cm]	$D_h$ [cm]	$E_h \cdot E_v$ [cm <sup>2</sup> ]
D	0,8185			1,33	0,40	0	1,33 · 0,40
L 26	0,3030		-2,7906	1,28	0,52	0	1,29 · 0,52
D	1,2970			0,41	1,41	0	0,42 · 1,42
L 27	0,3030		2,2505	0,30	1,48	0	0,31 · 1,48
D	1,8370			1,02	0,96	0	1,04 · 0,97
L 28	0,3030		-1,5792	1,11	0,95	0	1,13 · 1,08
D	9,2420			2,02	3,23	0	2,04 · 3,27
Q 1	0,3030		1,6342	2,21	3,06	0	2,23 · 3,11
D	1,5770			4,05	1,00	0	4,09 · 1,02
Q 2	0,3030		-1,7723	4,07	0,67	0	4,11 · 0,69
D	1,0268			3,00	0,33	0	3,04 · 0,35
M 1	1,3150	1,7181		1,73	1,38	-0,25	2,03 · 1,40
D	0,6368			1,07	1,69	-0,56	1,63 · 1,70
Q 21	0,3030		2,2391	0,87	1,66	-0,70	1,60 · 1,66
D	1,8970			0,40	0,44	-2,25	2,66 · 0,47
Q 22	0,3030		-1,7946	0,40	0,32	-2,31	2,75 · 0,36
D	4,6292			1,97	2,47	-0,28	2,30 · 2,71
MO	1,3150	1,7181		2,48	2,40	0	2,52 · 2,69
D	1,3568			3,05	1,56	0	3,13 · 1,85
Q 23	0,3030		-1,2005	3,00	1,46	0	3,10 · 1,76
D	4,0000			0,34	1,95	0	0,40 · 1,95
$\frac{\Delta p}{p}$ :				0	0	+0,5%	± 0,5%

$$\varepsilon = 1,67 \text{ mrad} \cdot \text{cm}$$

veloppen mit chromatischer Aberration für positive und negative Energieabweichung angegeben.

## 4.2. Die Injektionswege R und L in das Synchrotron

### 4.2.1. Strahloptik

Die Injektionswege in das Synchrotron lassen sich grob in zwei Teile zerlegen: Die optische Strahlführung vom Linac bis zum Q8 (s. Abb. 5), die für Strahl L und Strahl R identisch ist, und die Strahlführung nach dem Q8, welche zunächst nur optisch, nach dem M4 aber auch geometrisch verschieden verläuft. In Abb. 10 ist zunächst die Optik bis zum M3 gezeigt. Neben der optischen Anpassung durch die Quadrupole L26 bis Q3 ist der wichtigste Teil dieser Strahlführung der Einbau eines möglichst genauen Energiefilters in die Ablenkung M2 - M3, dessen Möglichkeiten weiter unten noch eingehender besprochen werden sollen. Optisch ist dazu wieder, wie bei der Ablenkung in den Meßraum, eine große Enveloppe im Ablenkmagneten M2 und eine möglichst kleine Taille an einer Stelle mit großer Dispersion notwendig. Die Ablenkung wurde auf zwei Magnete aufgeteilt, um eine nahezu dispersionsfreie Ablenkung zu erzielen. Dies ist notwendig, da einerseits eine Dispersion im langen Strahlführungskanal den Strahlquerschnitt stark vergrößert und andererseits Dispersion und Enveloppen zusammen nicht leicht zu handhaben sind.

Die großen Enveloppen im Ablenkteil werden im anschließenden Strahlführungskanal zum Synchrotron beibehalten. (s. Abb. 11 und 12), wodurch es bei der gegebenen Apertur von 125 mm möglich wird, eine 80 m lange Strahlführung mit nur fünf Quadrupolen zu überbrücken.

Ab Quadrupol Q8 unterscheiden sich die Linsenstärken für den linken bzw. rechten Einschubweg, da bereits hier mit der Anpassung des Strahls an die Akzeptanz des Synchrotrons begonnen werden muß. Zur Anpassung der sechs Strahlparameter  $E_x$ ,  $E'_x$ ,  $E_z$ ,  $E'_z$ ,  $D$  und  $D'$  sind sechs Einstellgrößen notwendig. Wie ein Blick auf Abb. 5 andeutet, ist es in der Strahlweiche nicht möglich, die Anordnung der Quadrupole nach rein strahloptischen Gesichtspunkten vorzunehmen. Eine Reihe nahe benachbarter Strahlrohre, Ablenkmagnete, Pumpanschlüsse und Monitore lassen nur noch feste Positionen für die Quadrupole zu. Die Anpassung muß also unter Berücksichtigung der

# Linearbeschleuniger - M2 - M3

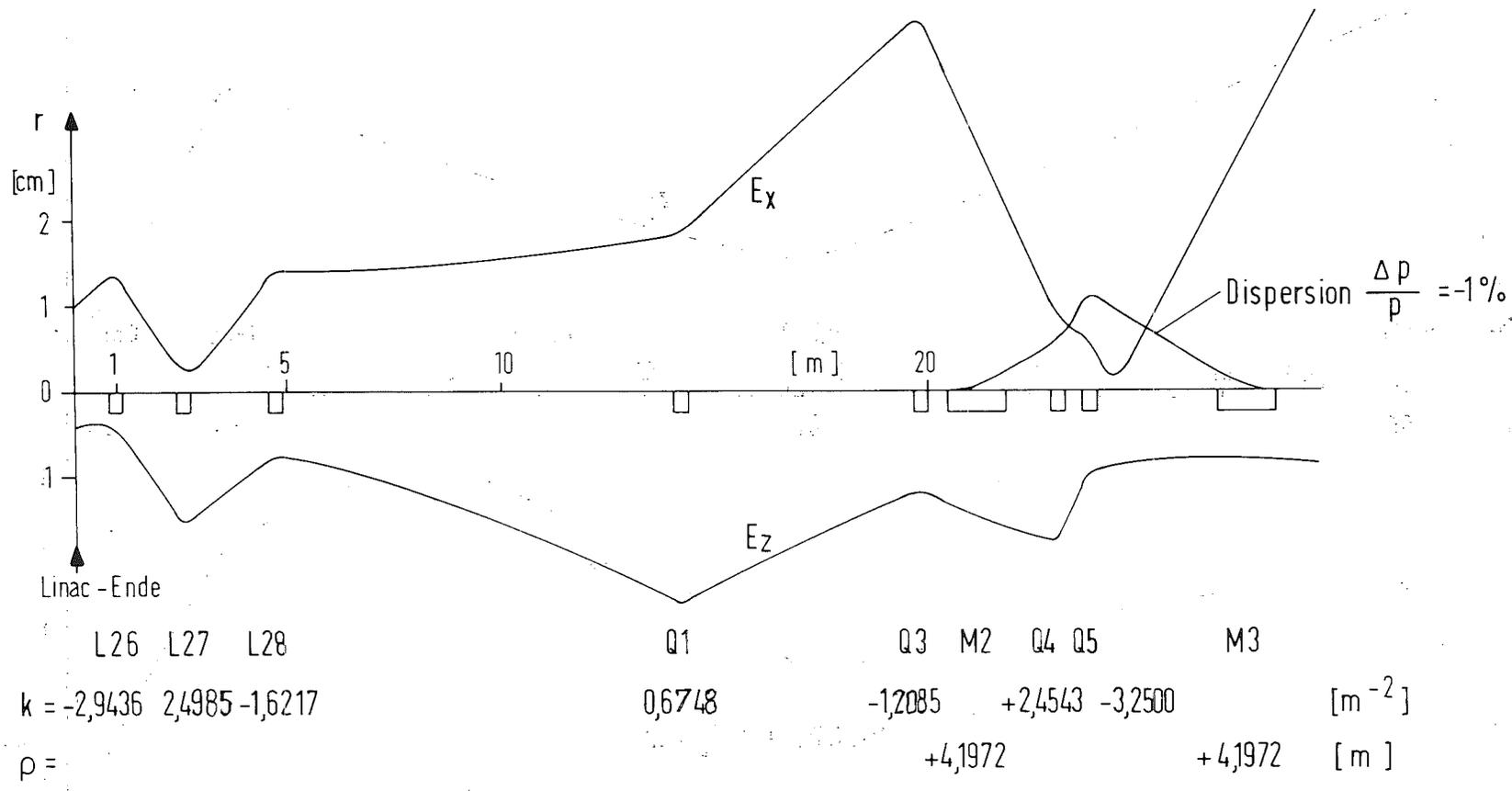


Fig. 10

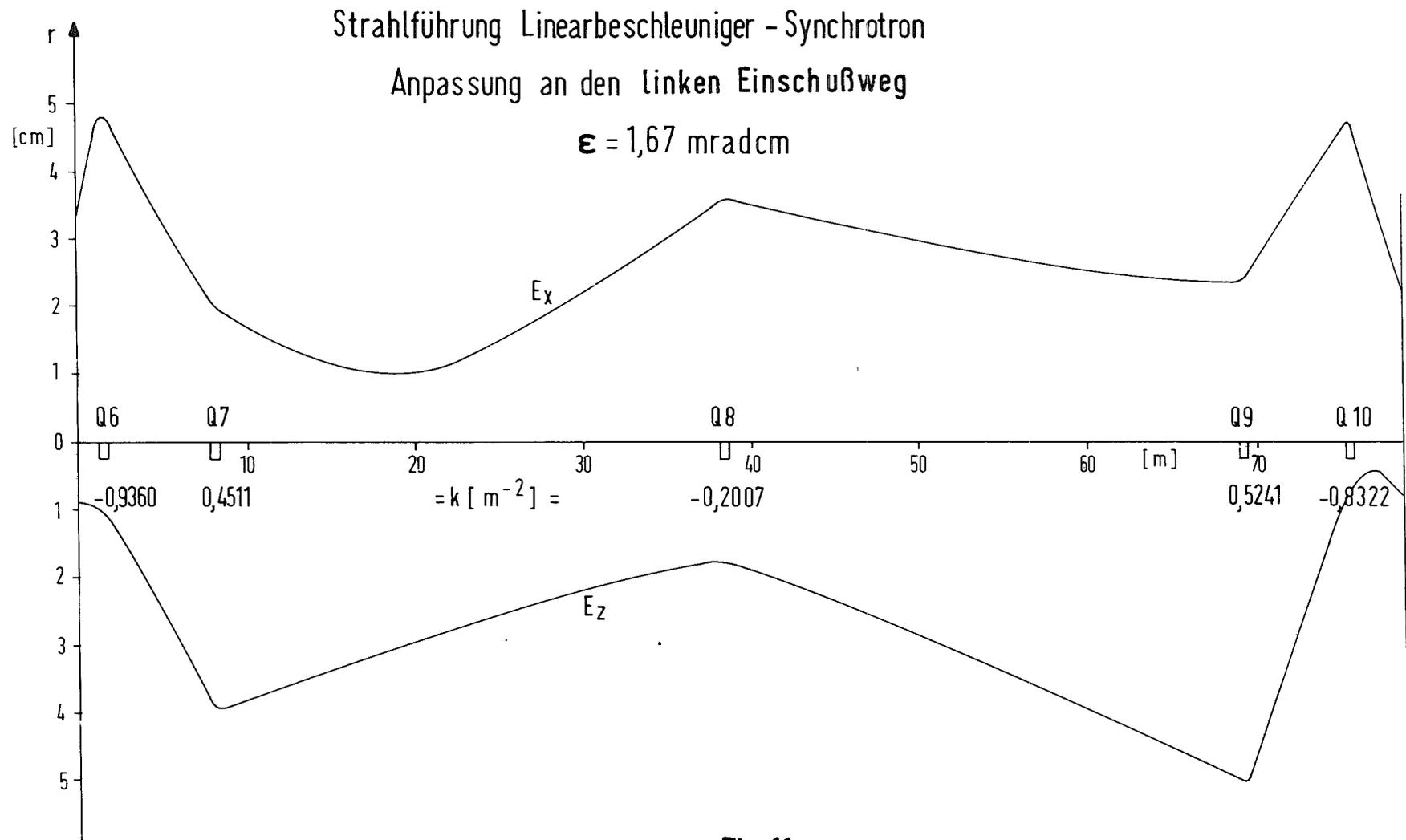


Fig.11

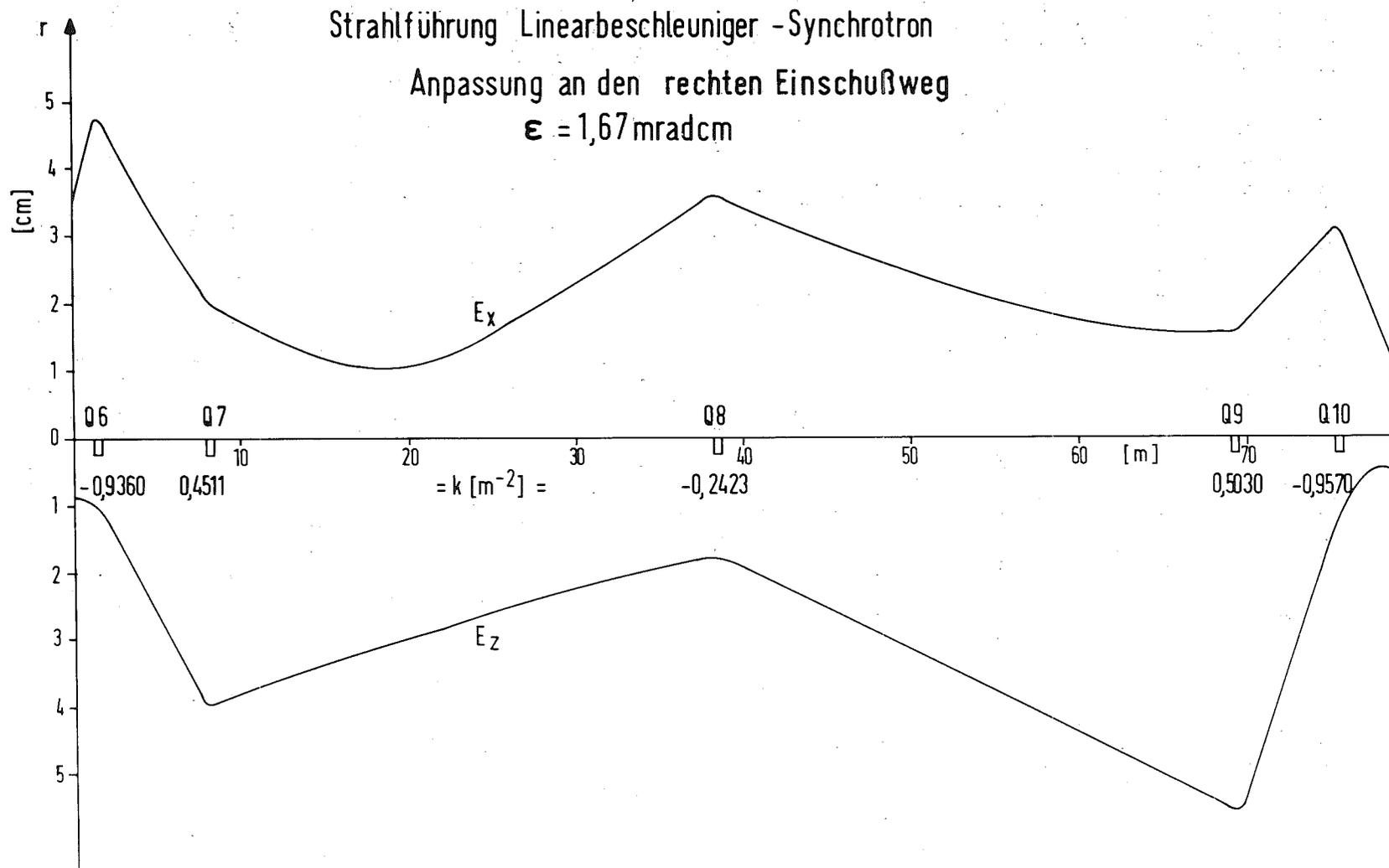


Fig.12

freien Apertur des Strahlrohres allein durch Einstellen von Quadrupolstärken vorgenommen werden, weswegen der Anpassungsteil sich bis in den langen Strahlführungstunnel zieht.

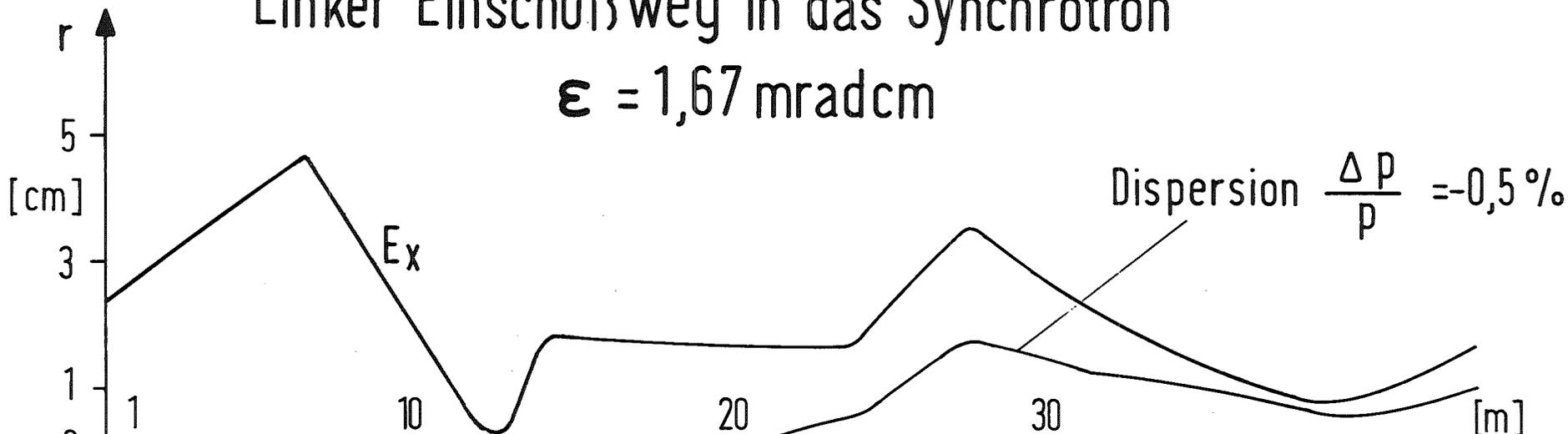
Die Abb. 13 zeigt in der Strahlweiche die Strahloptik des linken Injektionsweges, welche die Anpassung der Strahlparameter an die Akzeptanzellipsen des Synchrotrons am Eingang des Synchrotronmagneten F47 herstellt. Die numerischen Daten der Synchrotronakzeptanz und der Emittanz der Strahlführung an diesem Injektionspunkt sind in Tabelle 7 zusammengestellt. Es zeigt sich, daß die Emittanzellipsen der Strahlführung ohne Berücksichtigung der chromatischen Aberration ganz in den Akzeptanzellipsen des Synchrotrons liegen. Bei Berücksichtigung der chromatischen Aberration tritt jedoch eine Deformation der Phasenellipsen für energieabweichende Teilchen auf. In den Abb. 14 und 15 sind neben den Akzeptanzellipsen des Synchrotrons die Emittanzellipsen des Injektionsstrahles in horizontaler und vertikaler Ebene unter Berücksichtigung der chromatischen Aberration dargestellt. Man sieht, daß in der vertikalen Ebene die Emittanz des Strahls fast ganz in die Synchrotronakzeptanz fällt, während in der horizontalen Ebene einige Prozent der Teilchen mit der größten Energieabweichung verloren gehen. Grundsätzlich wäre es möglich, die chromatische Aberration durch den Einbau von Sextupolen zu korrigieren. Davon soll jedoch abgesehen werden, da einmal keine von der Optik her für die Sextupolkorrektur geeignete Stellen im Strahltransportsystem vorhanden ist, und zum anderen der geringe Gewinn an Strahlintensität die zusätzlichen Kosten und die wesentlich kompliziertere Handhabung des Systems nicht rechtfertigen. Die Abb. 16 zeigt die genaue Geometrie der Einschussollbahn ab M10. Durch die Punkte L1 bis L4 ist die Lage der Einschussollbahn, bezogen auf die Synchrotronsollbahn, am Ende von F45 (L4), am Anfang und Ende des Septums (L3, L2) und am Anfang von D46 (L1) gegeben. Der Punkt SL ist der Schnittpunkt der Tangenten an den Strahl in den Punkten L3 und L2.

In Abb. 17 ist noch einmal die Einschussollbahn in bezug auf die Synchrotronsollbahn mit der Strahlenveloppe und der Dispersion dargestellt.

Die eben gemachten Bemerkungen zum linken Einschussweg treffen in allen wesentlichen Punkten auch für den rechten Einschussweg zu, wie die Abb. 18, 19 und 20 zeigen. Ein Vergleich der Strahlemittanz mit der Synchrotronakzeptanz zeigt auch hier wieder, daß nur wegen der chromatischen Aberration ein geringer Verlust an Strahlintensität in Kauf genommen werden

# Linker Einschubweg in das Synchrotron

$$\epsilon = 1,67 \text{ mradcm}$$



	Q9	Q10	M4	Q11	Q12	M8	M9	Q13	Q14	Q15	M10	Septum	Synchr. Magnet	Kicker
$k =$	0,5241	-0,8322	2,9397	-2,9753				0,9910	-0,8151	0,1657		0,0703		
$\rho =$			-2,8326					-11,187				-19,672	31,702	-29,639
														-10,053

Fig. 13

T A B E L L E 7

Strahlparameter am linken Einschußpunkt

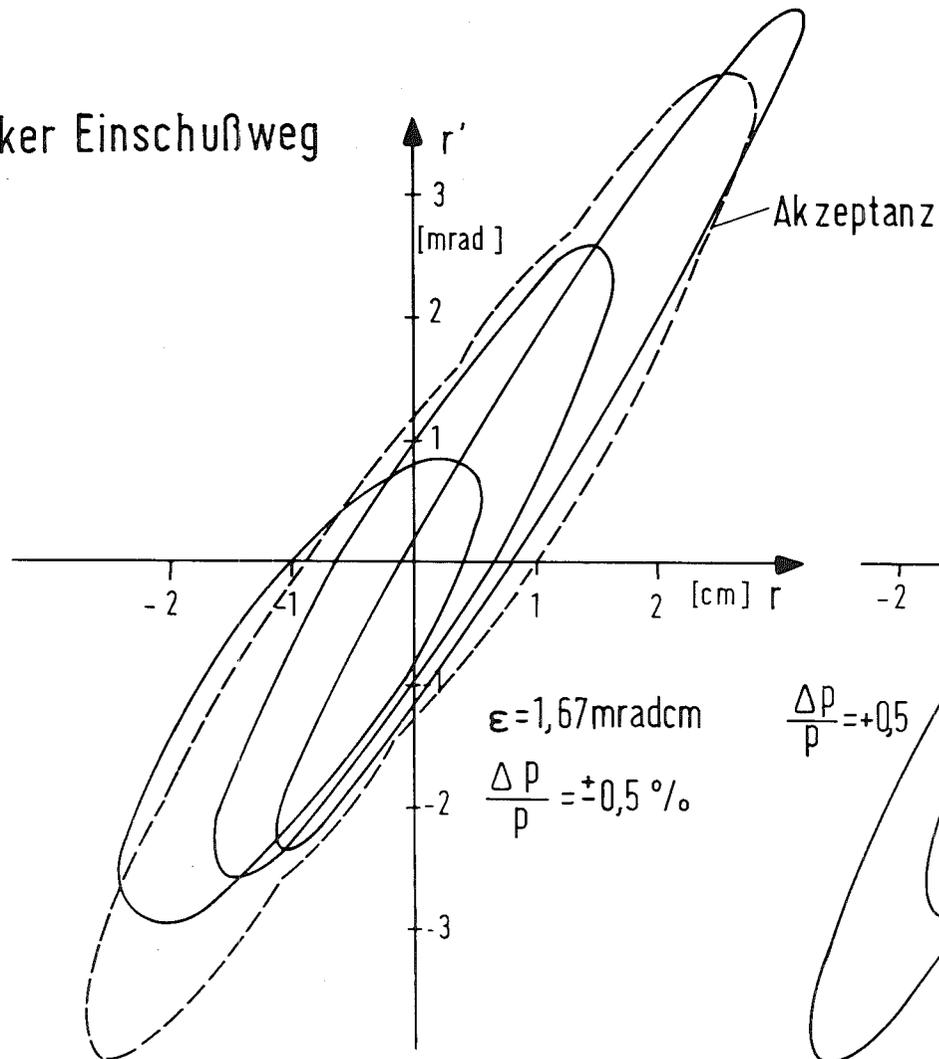
A. Strahlparameter des Synchrotrons am Anfang des Magneten  
F 47 (Wü 59):

	horizontal	vertikal	
$\epsilon$	2.00	2.00	mrادcm
E	1.754	1.126	cm
E'	2.709	-2.341	mrاد
$\epsilon/E$	1.140	1.776	mrاد
A	2.939	2.939	mrاد
D (- 0.5 %)	0.9405		cm
D'	1.1553		mrاد

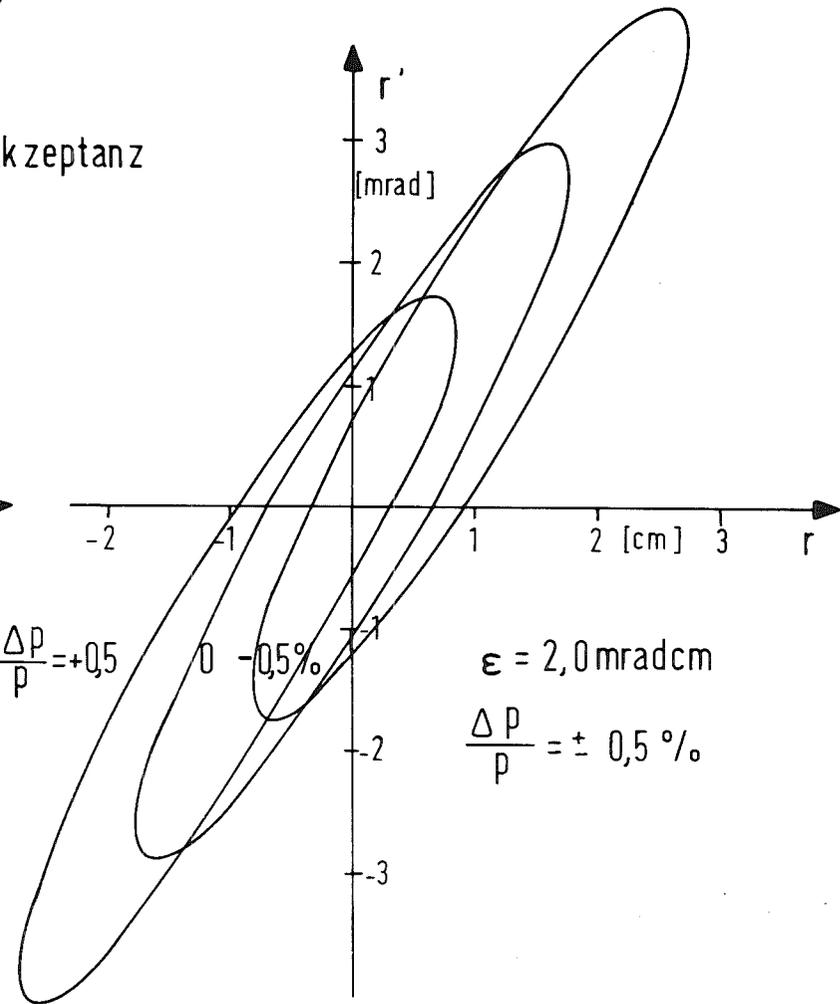
B. Strahlparameter der Injektionsstrahlführung ohne Berücksichtigung der chromatischen Aberration:

$\epsilon$	1.67	1.67	mrادcm
E	1.65	1.05	cm
E'	2.40	-2.18	mrاد
$\epsilon/E$	1.02	1.59	mrاد
A	2.61	2.69	mrاد
D (- 0.5 %)	1.00		cm
D'	1.09		mrاد

Linker Einschubweg



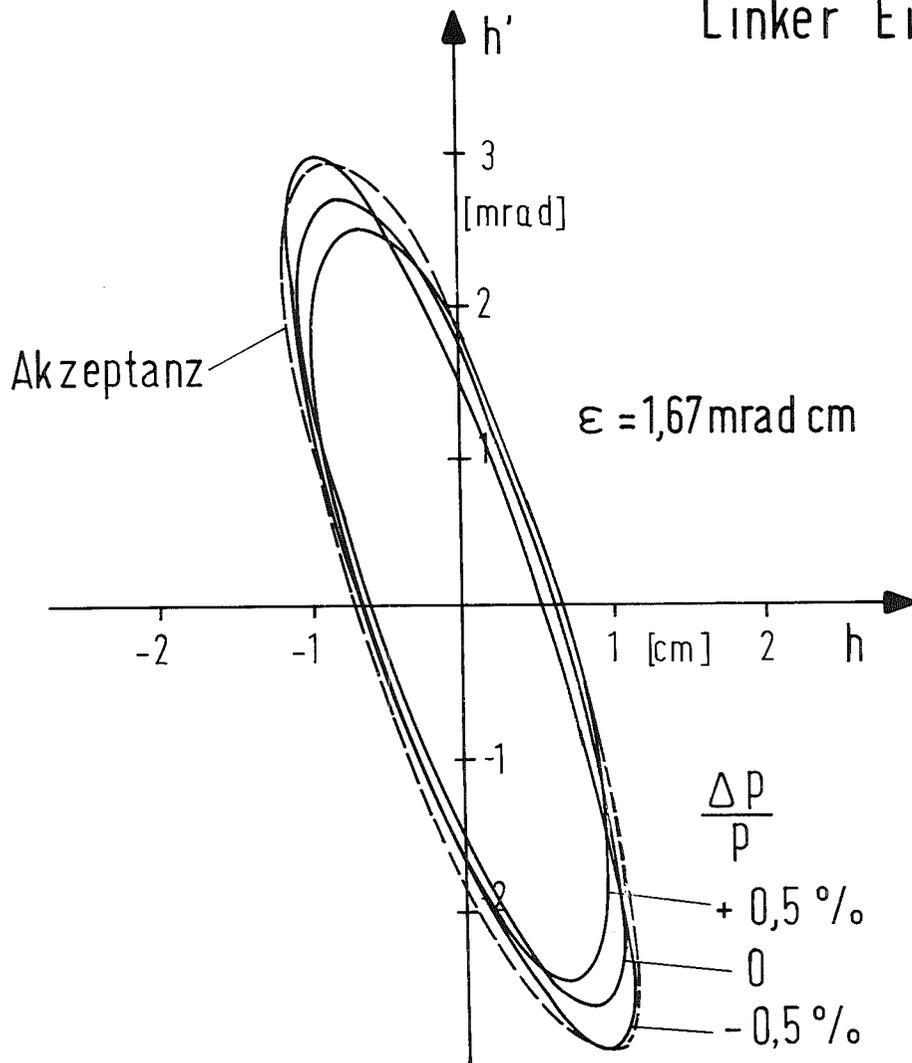
Horizontale Emittanz der Strahlführung vom Linac II zum Synchrotron  
(mit Chrom. Aberration für  $\Delta p/p = \pm 0,5 \%$ )



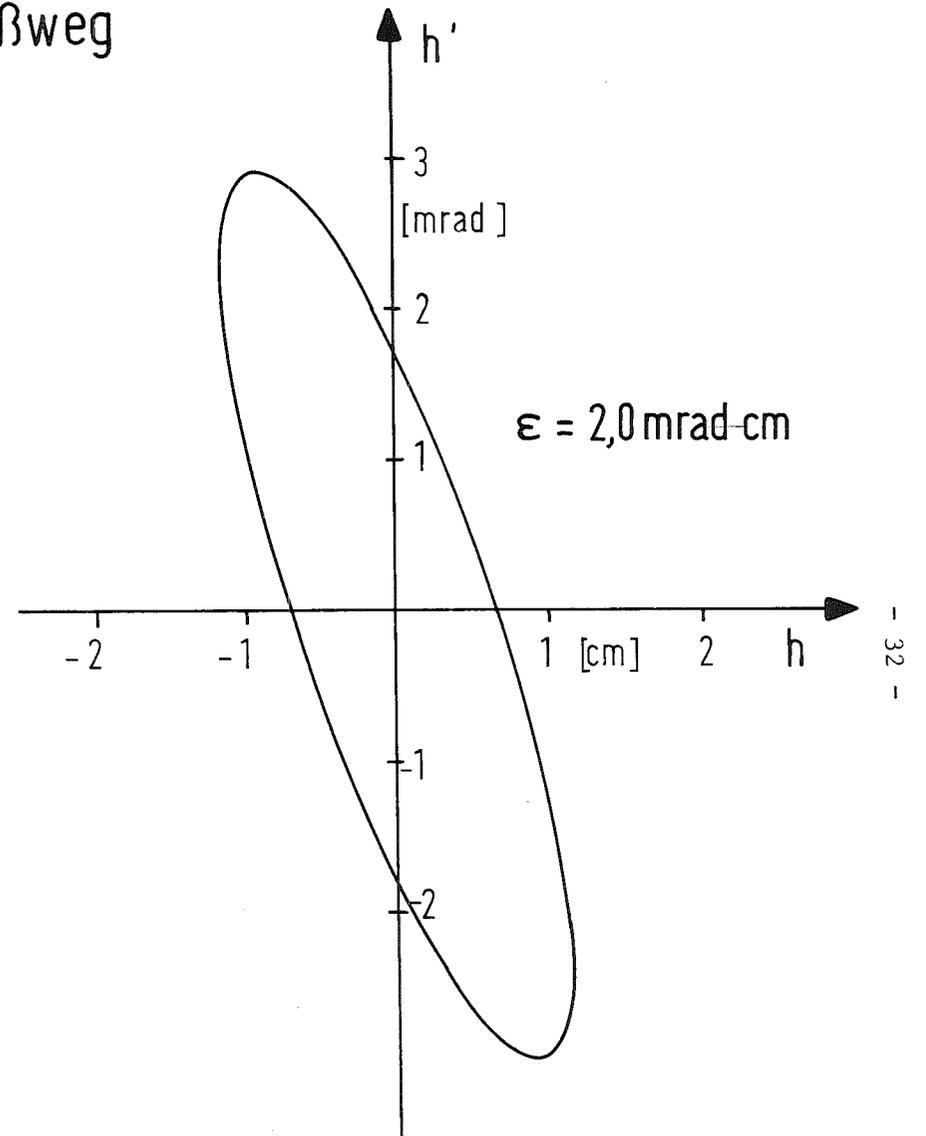
Horizontale Akzeptanz des Synchrotrons am Anfang eines F-Magneten

Fig.14

# Linker Einschubweg



Vertikale Emittanz der Strahlführung  
 vom Linac II zum Synchrotron  
 (mit Chrom. Aberration für  $\Delta p/p = \pm 0,5 \%$ )



Vertikale Akzeptanz des Synchrotrons  
 am Anfang eines F-Magneten

Fig.15

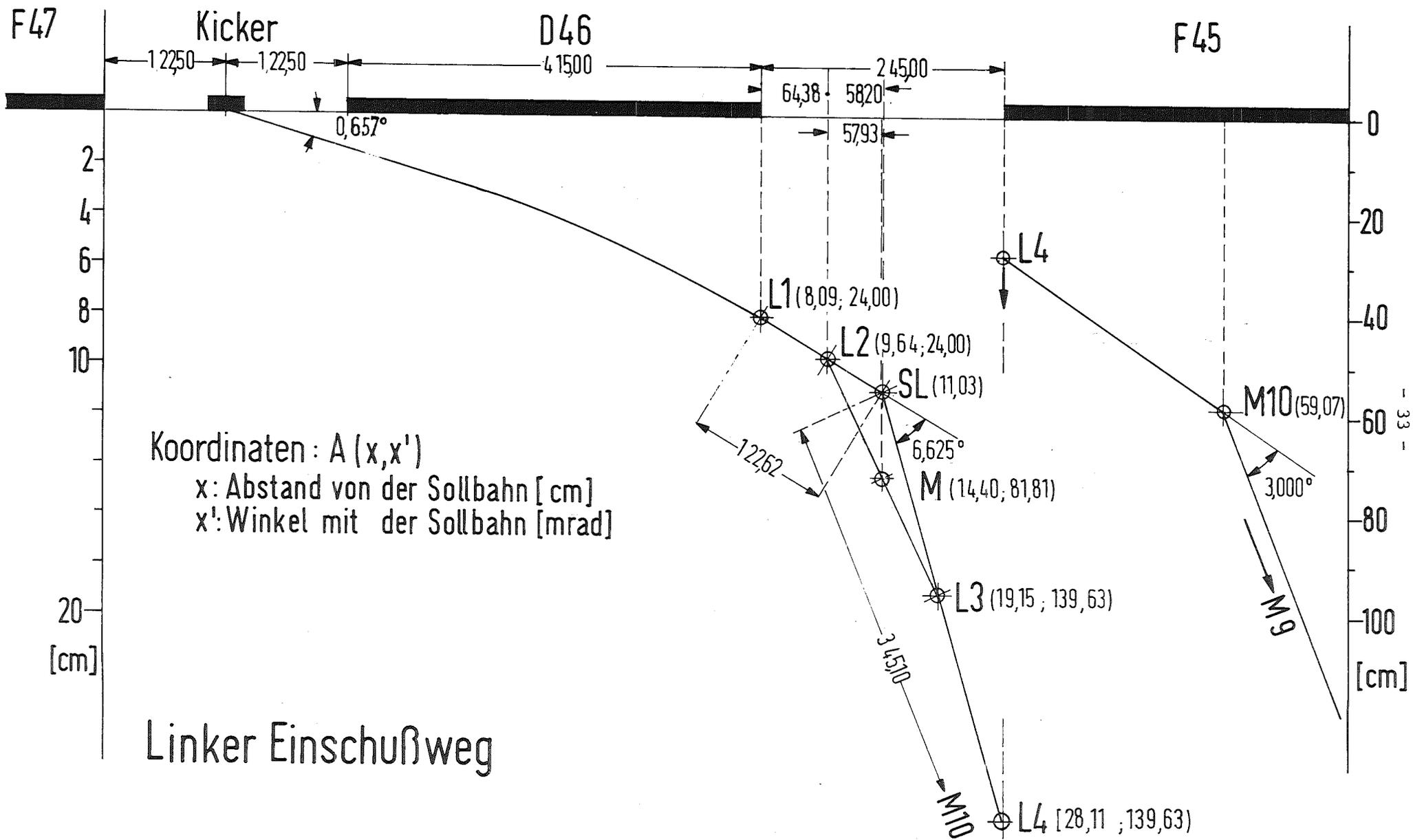


Fig. 16

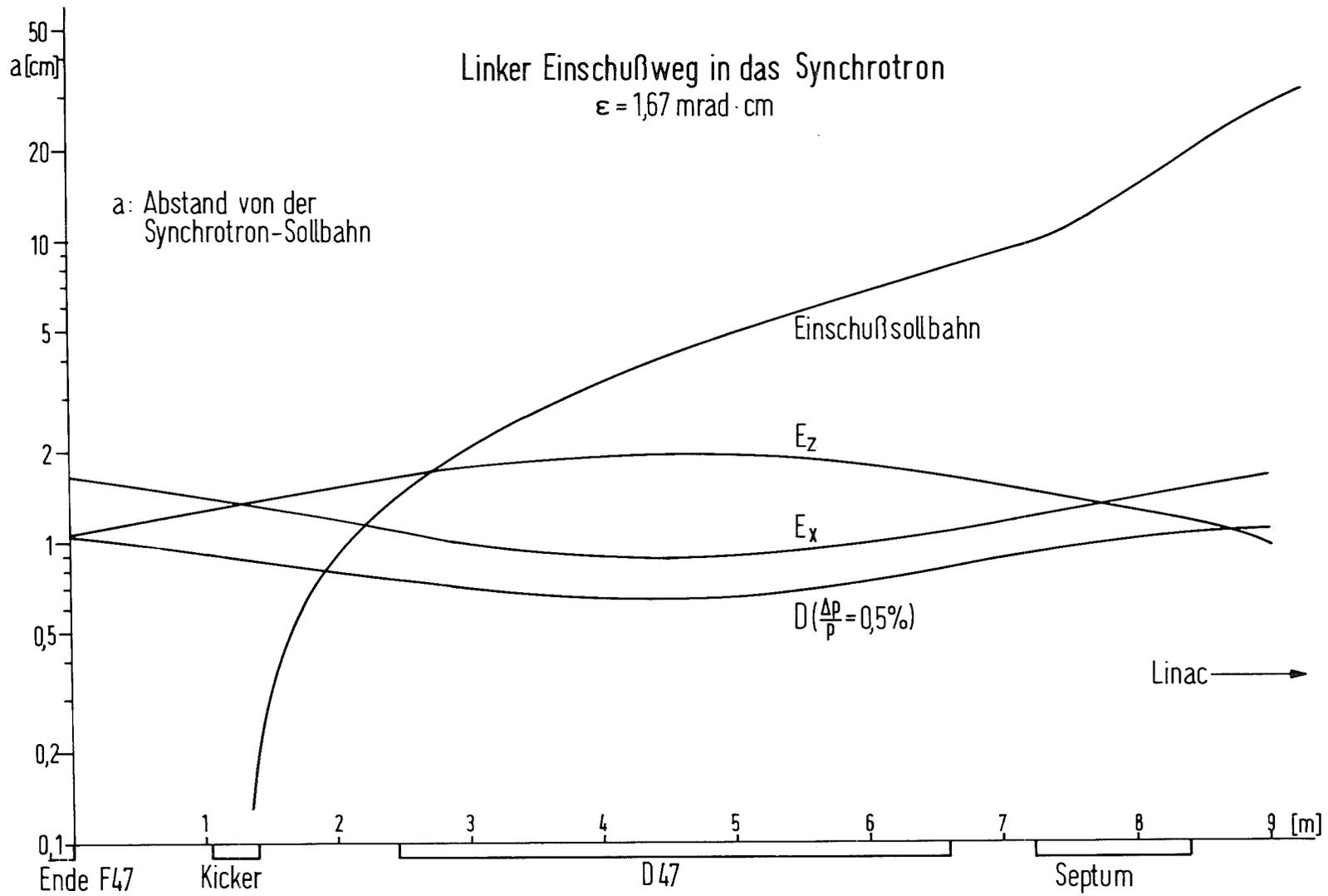


Fig.17

# Rechter Einschubweg in das Synchrotron

$$\epsilon = 1,67 \text{ mradcm}$$

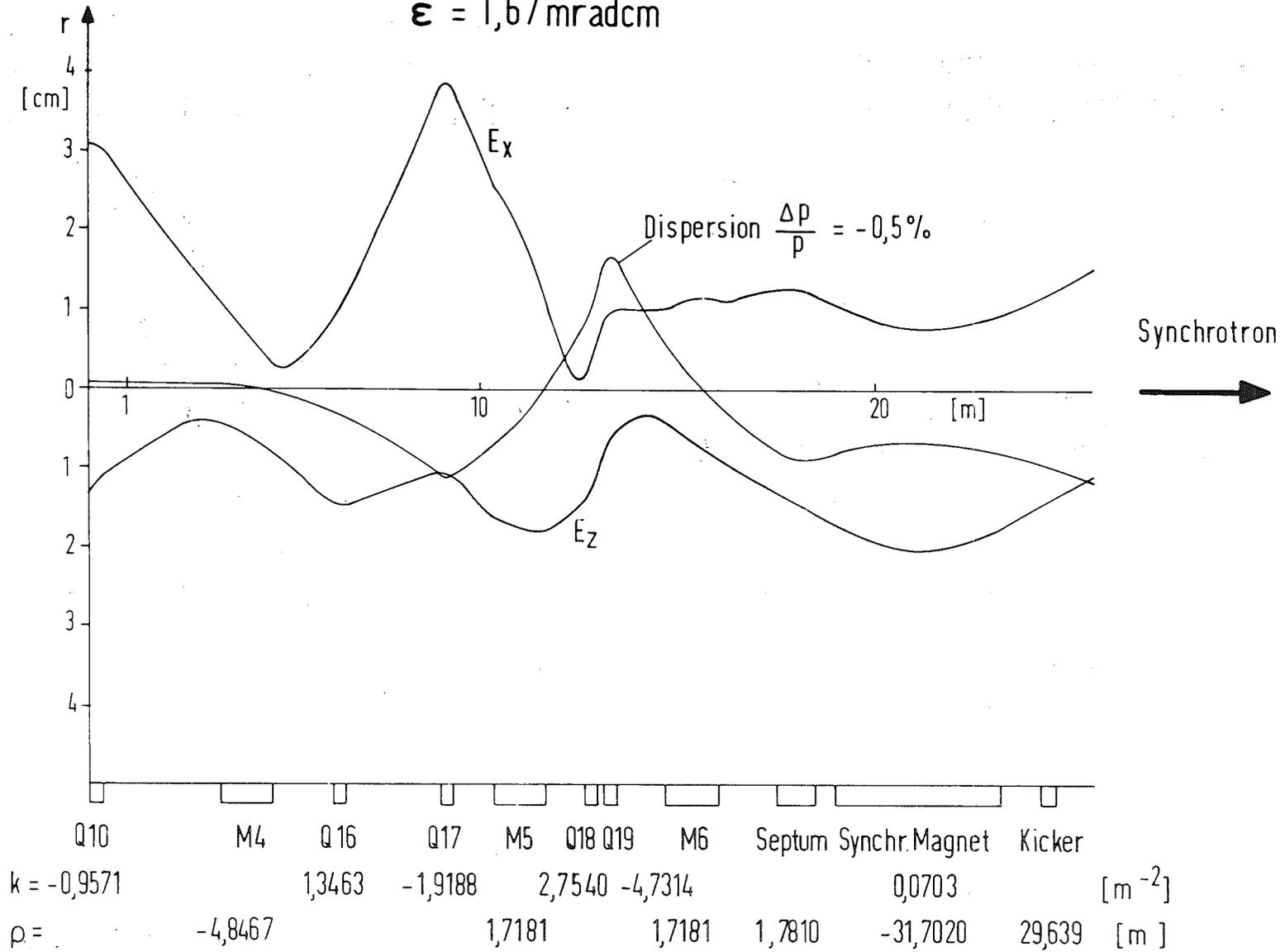
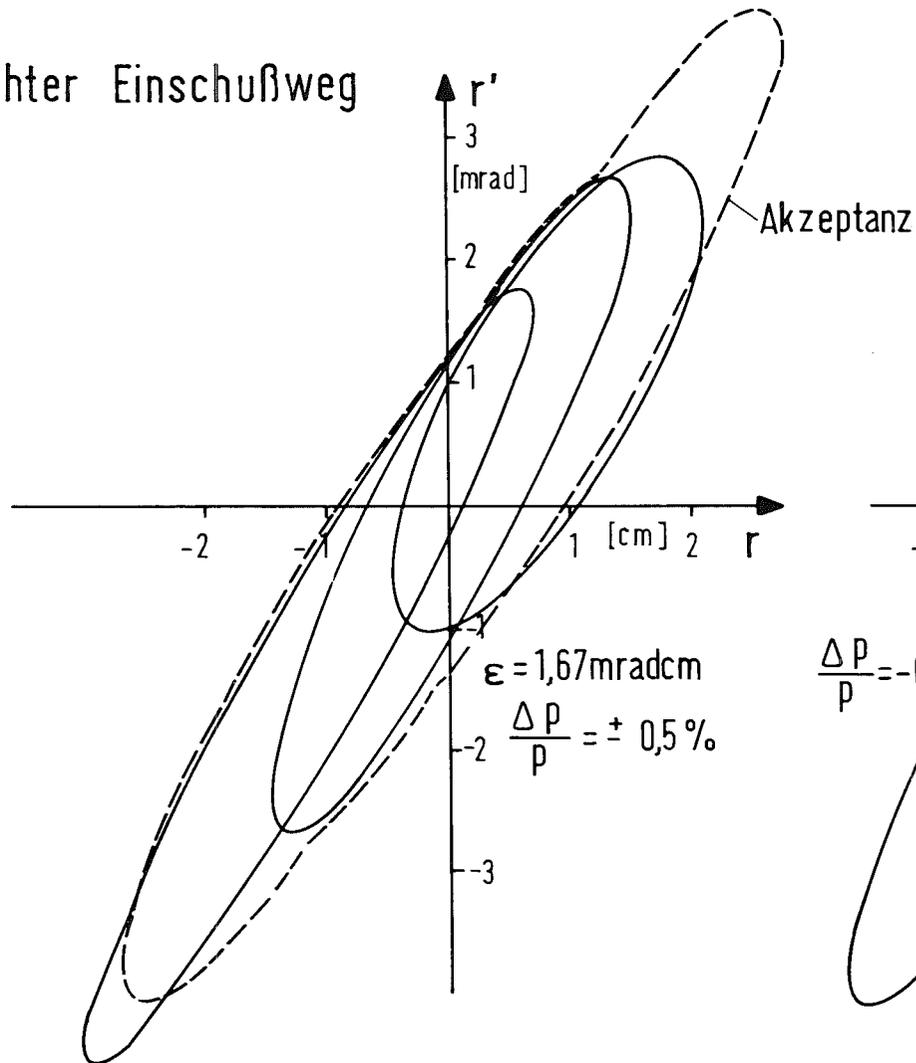
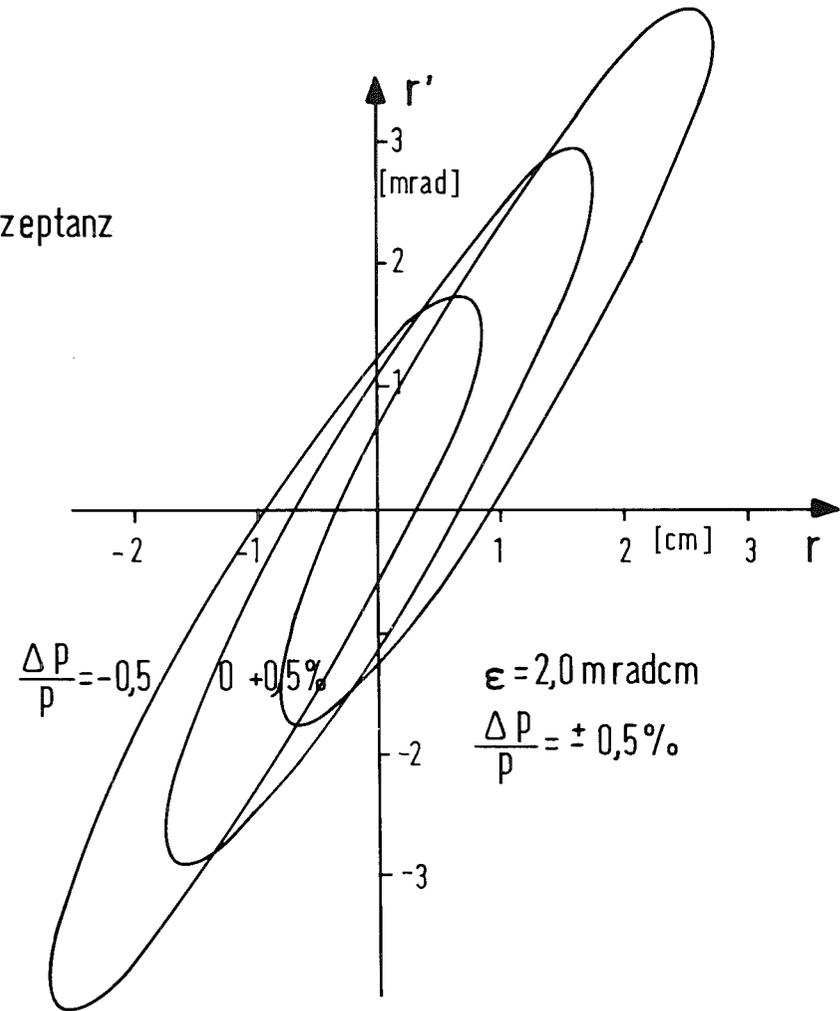


Fig. 18

Rechter Einschubweg

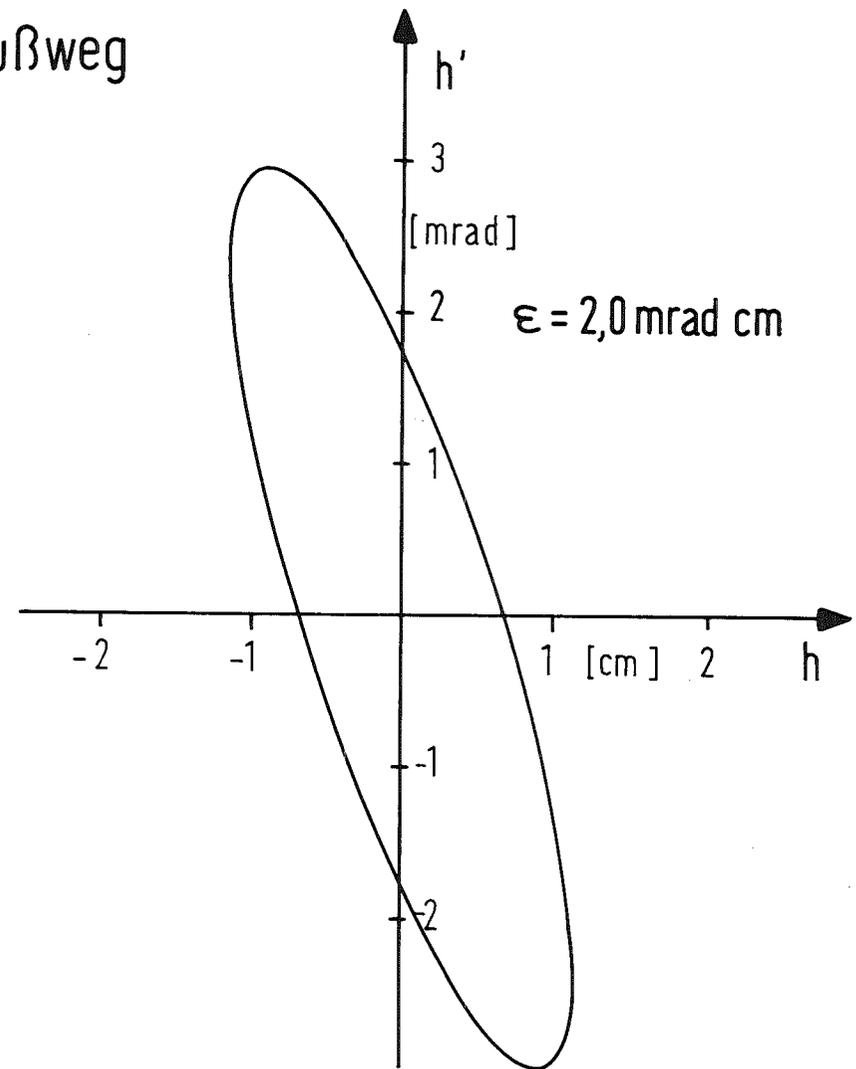
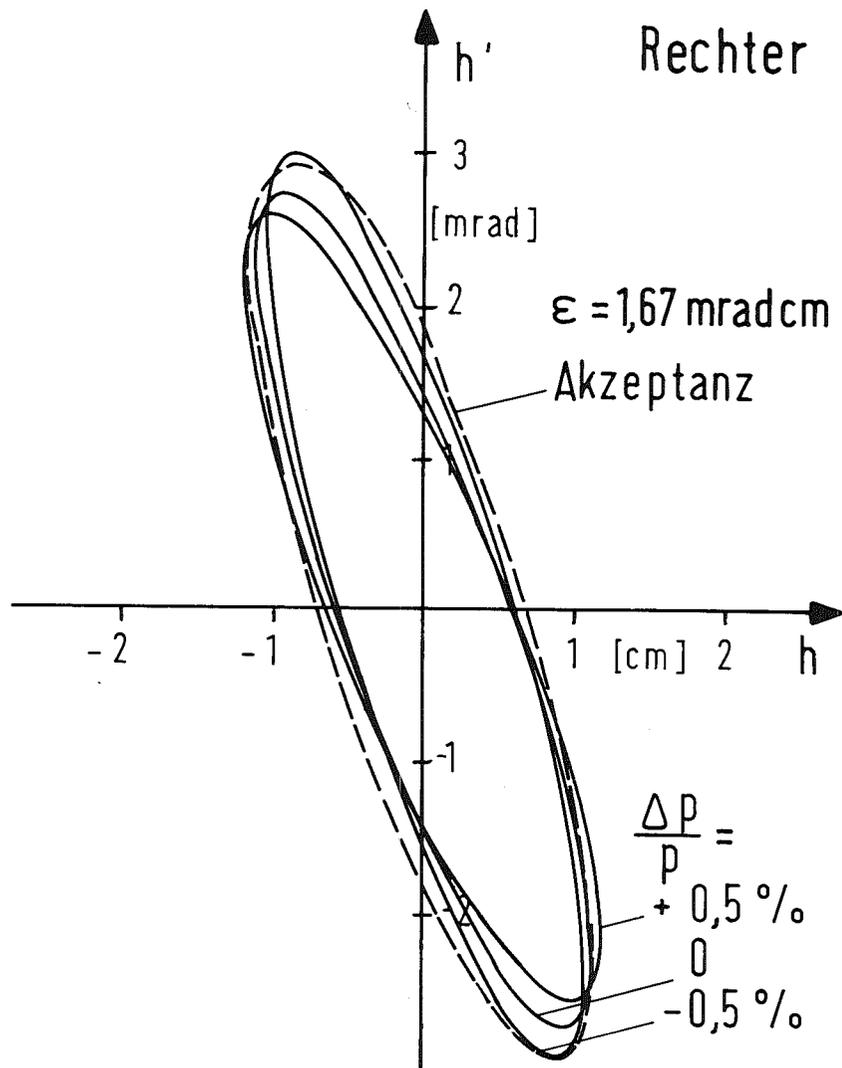


Horizontale Emittanz der Strahlführung vom Linac II zum Synchrotron (mit Chrom. Aberration für  $\Delta p/p = \pm 0,5\%$ )



Horizontale Akzeptanz des Synchrotrons am Anfang eines F - Magneten

Fig.19



Vertikale Emittanz der Strahlführung  
vom Linac II zum Synchrotron  
(mit Chrom. Aberration für  $\Delta p/p = \pm 0,5 \%$ )

Vertikale Akzeptanz des Synchrotrons  
am Anfang eines F - Magnetes

Fig. 20

muß. Die Daten für die Akzeptanz des Synchrotrons am Eingang zum Synchrotronmagneten F41 und die Strahlparameter des rechten Strahlführungs-  
weges an der gleichen Stelle sind in Tabelle 8 zusammengefaßt. Die Abb. 21  
zeigt wieder die Einschußsollbahn in bezug auf die Synchrotronsollbahn am  
Anfang und am Ende des Septums (R3, R2) und am Anfang von D42 (R1),  
während die Abb. 22 die gesamte Einschußsollbahn mit Enveloppen und Disper-  
sion am Synchrotron wiedergibt.

In der Tabelle 9 bis 11 sind die numerischen Daten für beide Injektionswege  
mit Enveloppen Dispersion und Strahlquerschnitten unter Berücksichtigung  
der chromatischen Aberration bei positiver und negativer Energieabweichung  
zusammengestellt.

#### 4.2.2. Strahlbeobachtung und Korrekturen

In die Abb. 6 sind alle vorgesehenen Strahlbeobachtungs- und Strahlkorrek-  
turmöglichkeiten eingetragen. Der Strahlpositionsmonitor am Ende des Linear-  
beschleunigers gibt einen genau definierten Ausgangspunkt für die weitere  
Strahlbeobachtung. Grundsätzlich ist in angemessenem Abstand nach jeder  
der Ablenkungen M1 - M0, M2 - M3, M4, M5 - M6 und M7 - M9 ein Strahlposi-  
tionsmonitor zur genauen Einstellung der Strahlablenkung eingebaut. Zu-  
sätzlich definieren ein Positionsmonitor vor M1 und vor M4 den Strahlein-  
tritt in diese Magnete. Für jeden Injektionsweg stehen also fünf Positions-  
monitore zur Strahlüberwachung zur Verfügung. Eine von Stanford (LA 66)  
übernommene Elektronik erlaubt es, die Strahlablage von der Sollbahn unab-  
hängig vom Strahlstrom in allen fünf Positionsmonitoren in horizontaler  
und vertikaler Ebene simultan auf dem Bildschirm zu beobachten.

Über ein System von horizontalen und vertikalen Steuerspulen längs der  
Strahlführungswege (s. Abb. 6) kann eine Strahlablage von der Sollbahn  
korrigiert werden. Dazu ist jedem Positionsmonitor im allgemeinen nur ein  
Paar von Steuerspulen - in horizontaler Richtung dienen oft die Ablenk-  
magnete als Steuerspulen - zugeordnet, um schnelle und eindeutige Korrek-  
turen, die damit grundsätzlich auch über den Rechner automatisiert werden  
können, möglich zu machen. Nur im langen Strahlführungs kanal sind mehr  
Steuerspulen als Positionsmonitore eingebaut, wodurch die Einstellung nicht  
mehr eindeutig, aber doch noch übersehbar durchgeführt werden kann.

T A B E L L E 8

Strahlparameter am rechten Einschußpunkt

A. Strahlparameter des Synchrotrons am Anfang des Magneten F 42:

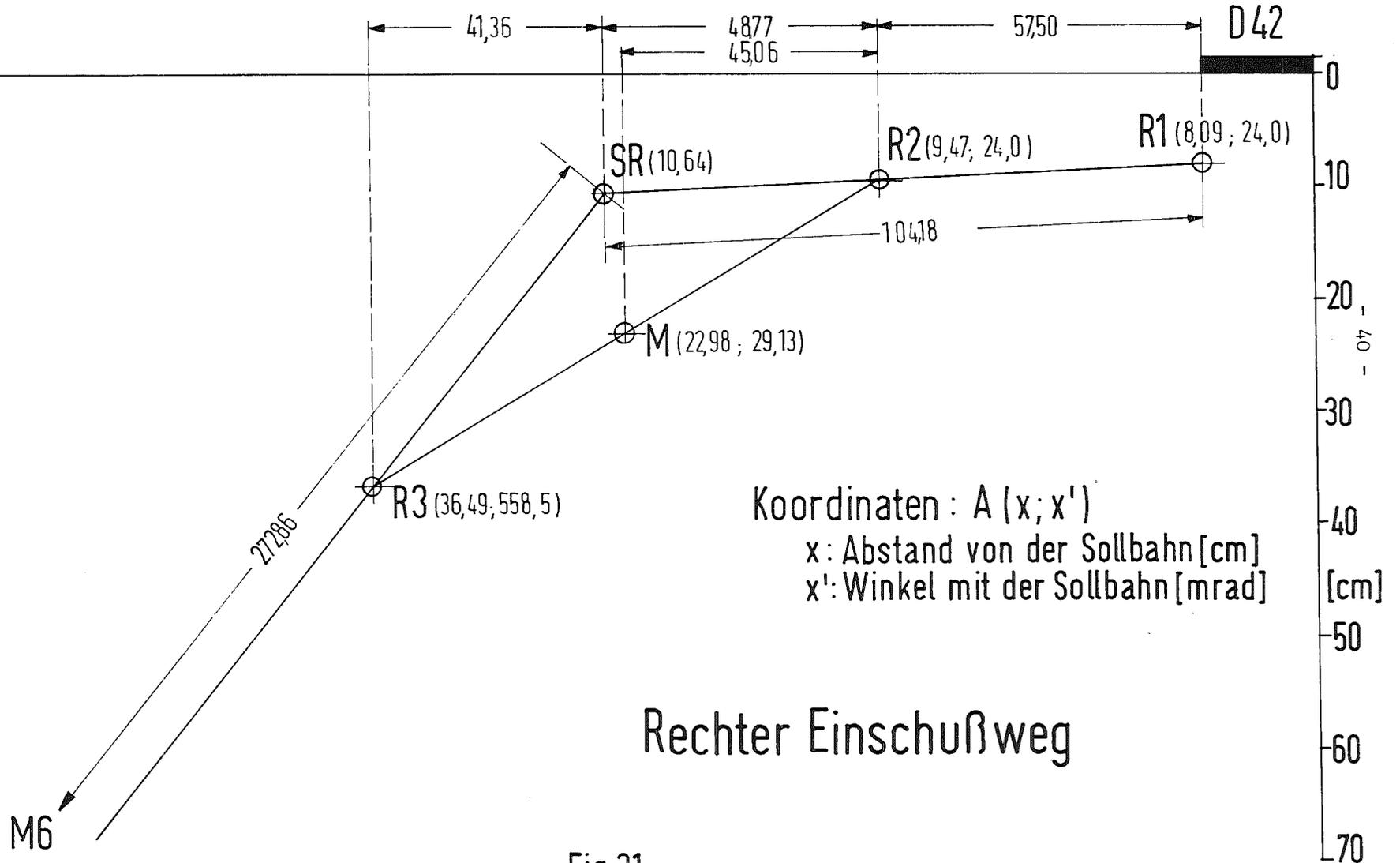
	horizontal	vertikal	
$\epsilon$	2.00	2.00	mrادcm
E	1.754	1.126	cm
E'	2.709	-2.314	mrاد
$\epsilon/E$	1.140	1.776	mrاد
A	2.939	2.939	mrاد
D (-0.5 %)	-0.9405		cm
D'	-1.1553		mrاد

B. Strahlparameter der Injektionsstrahlführung ohne Berücksichtigung der chromatischen Aberration:

	horizontal	vertikal	
$\epsilon$	1.67	1.67	mrادcm
E	1.50	1.11	cm
E'	2.43	-2.36	mrاد
$\epsilon/E$	1.11	1.50	mrاد
A	2.67	2.79	mrاد
D (-0.5 %)	-1.00		cm
D'	-1.15		mrاد

F43

D42



T A B E L L E 9

Linearbeschleuniger - Q8

Element	magn. Länge [m]	$\rho$ [m]	$k$ [m <sup>-2</sup> ]	$E_h$ [cm]	$E_v$ [cm]	D [cm]	$E_h \cdot E_v$ [cm <sup>2</sup> ]
D	0,8185			1,33	0,40	-	1,33 · 0,40
L 26	0,3030			1,28	0,52	-	1,28 · 0,52
D	1,2970			0,34	1,44	-	0,35 · 1,44
L 27	0,3030			0,25	1,49	-	0,25 · 1,50
D	1,8370			1,28	0,81	-	1,31 · 0,82
L 28	0,3030			1,39	0,77	-	1,42 · 0,78
D	9,2420			1,81	2,38	-	1,84 · 2,40
Q 1	0,3030			1,89	2,38	-	1,92 · 2,39
D	5,3370			4,22	1,13	-	4,31 · 1,14
Q 3	0,3030		-1,1965	4,13	1,13	-	4,21 · 1,14
D	0,4827			3,60	1,23	-	3,68 · 1,24
M 2	1,3150	4,1932		2,19	1,46	-0,10	2,35 · 1,46
D	1,0908			1,01	1,60	-0,28	1,33 · 1,61
Q 4	0,3030		2,4543	0,79	1,47	-0,36	1,19 · 1,47
D	0,4370			0,62	1,02	-0,53	1,19 · 1,02
Q 5	0,3030		-3,2500	0,43	0,85	-0,56	1,03 · 0,85
D	2,8669			2,27	0,78	-0,10	2,42 · 0,78
M 3	1,3150	4,1932		3,46	0,87	0,01	3,56 · 0,87
D	1,3408			4,79	1,00	0,01	4,84 · 1,00
Q 6	0,3030		-0,9360	4,77	1,08	0,01	4,92 · 1,08
D	6,3410			2,06	3,87	0,01	2,20 · 3,89
Q 7	0,3030		0,4511	1,97	3,93	0,01	2,13 · 3,94
D	30,0940			3,55	1,78	0,08	4,25 · 1,83
$\frac{\Delta p}{p}$ [%]				0	0	+0,5	± 0,5

TABELLE 10

## Q8 - Linker Injektionsweg

Element	magn. Länge [m]	$\rho$ [m]	$k$ [m <sup>-2</sup> ]	$E_h$ [cm]	$E_v$ [cm]	D [cm]	$E_h \cdot E_v$ [cm <sup>2</sup> ]
Q 8	0,3030		-0,2007	3,56	1,79	+0,08	4,27 · 1,83
D	30,5110			2,42	5,06	+0,01	2,48 · 5,11
Q 9	0,3030		0,5241	2,47	4,98	+0,01	2,54 · 5,02
D	5,9476			4,71	0,94	-0,01	4,98 · 0,96
Q 10	0,3030		-0,8322	4,64	0,77	-0,01	4,92 · 0,79
D	2,9928			2,22	0,83	-0,01	2,41 · 0,86
M 4	1,3150	- 2,8326		1,20	1,34	+0,14	1,49 · 1,37
D	2,3194			0,72	2,04	+0,69	1,49 · 2,06
Q 11	0,3030		2,9397	1,07	1,86	+0,86	2,02 · 1,87
D	0,3570			1,63	1,33	+1,19	2,92 · 1,34
Q 12	0,3030		2,9753	1,87	1,06	+1,30	3,27 · 1,06
D	4,6910			1,74	1,13	+0,21	2,11 · 1,22
M 8	1,3150	-11,1876		1,72	1,68	-0,05	1,97 · 1,80
D	0,5828			1,72	1,92	-0,15	2,10 · 2,05
M 9	1,3150	-11,1876		1,71	2,45	-0,35	2,34 · 2,61
D	1,6499			1,72	3,11	-0,53	2,60 · 3,30
Q 13	0,3030		0,9910	1,80	3,08	-0,59	2,77 · 3,27
D	3,4023			3,64	1,26	-1,54	6,04 · 1,30
Q 14	0,3030		-0,8151	3,67	1,15	-1,57	6,11 · 1,18
D	3,1300			2,53	0,64	-1,23	4,42 · 0,70
Q 15	0,3030		0,1657	2,44	0,62	-1,21	4,29 · 0,69
D	0,6350			2,29	0,61	-1,18	4,09 · 0,67
M 10	1,0300	-19,6718		2,05	0,70	-1,12	3,75 · 0,72
D	2,3536			1,51	1,16	-0,96	2,94 · 1,27
Septum	1,1624	-10,0530		1,25	1,43	-0,83	2,50 · 1,59
D	0,6440			1,11	1,60	-0,74	2,23 · 1,77
D 46	4,1500	31,7020	0,0703	1,08	1,61	-0,68	2,03 · 1,79
D	1,0550			1,30	1,36	-0,79	2,48 · 1,49
Kicker	0,3400	-29,6390		1,37	1,28	-0,83	2,63 · 1,40
D	1,0550			1,61	1,04	-0,95	3,09 · 1,12
F 47				1,61	1,04		3,09 · 1,12
$\frac{\Delta p}{p}$ %				0	0	+0,5	± 0,5

T A B E L L E 11  
Q8 - Rechter Injektionsweg

Element	magn. Länge [m]	$\rho$ [m]	$k$ [m <sup>-2</sup> ]	$E_h$ [cm]	$E_v$ [cm]	D [cm]	$E_h \cdot E_v$ [cm <sup>2</sup> ]
Q 8	0,3030		-0,2423	3,56	1,79	0,08	4,12 · 1,84
D	30,5110			1,55	5,65	-0,03	1,87 · 5,71
Q 9	0,3030		0,5030	1,59	5,55	-0,03	1,93 · 5,62
D	5,9476			3,13	1,22	-0,09	3,88 · 1,25
Q 10	0,3030		-0,9570	3,07	1,05	-0,09	3,81 · 1,09
D	2,9928			1,17	0,48	-0,04	1,46 · 0,51
M 4	1,3212	- 4,8467		0,30	0,94	0,08	0,40 · 0,99
D	1,5535			0,98	1,59	0,32	1,44 · 1,64
Q 16	0,3030		1,3463	1,27	1,62	0,38	1,85 · 1,67
D	2,4660			4,18	1,07	1,11	6,04 · 1,08
Q 17	0,3030		-1,9188	4,17	1,11	1,10	6,02 · 1,11
D	1,0752			2,79	1,57	0,72	4,04 · 1,59
M 5	1,3150	1,7181		1,27	1,67	0,05	1,61 · 1,71
D	1,0384			0,14	1,35	-0,74	0,93 · 1,40
Q 18	0,3030		2,7540	0,50	1,10	-1,07	1,57 · 1,15
D	0,2500			0,87	0,76	-1,45	2,32 · 0,80
Q 19	0,3030		4,7794	1,10	0,51	-1,57	2,72 · 0,55
D	1,3002			1,14	0,43	-0,57	1,93 · 0,47
M 6	1,3150	1,7181		1,21	0,91	0,10	1,60 · 0,99
D	1,5292			1,32	1,27	0,65	2,36 · 1,33
Septum	0,9407	1,7810		1,22	1,50	0,77	2,37 · 1,56
D	0,5752			1,06	1,65	0,70	2,10 · 1,70
D 43	4,1500	-30,7020	0,0703	0,87	1,66	0,68	1,88 · 1,69
D	1,0550			1,10	1,39	0,81	2,34 · 1,44
Inflektor	0,3400	29,6393		1,18	1,31	0,84	2,49 · 1,36
D	1,0550			1,44	1,06	0,96	2,96 · 1,13
F 42				1,44	1,06	0,96	2,96 · 1,13
$\frac{\Delta p}{p}$ %				0	0	+0,5	± 0,5

M4: Eintrittswinkel: - 13,424°

Austrittswinkel: - 2,253° (s. Abb. 28)

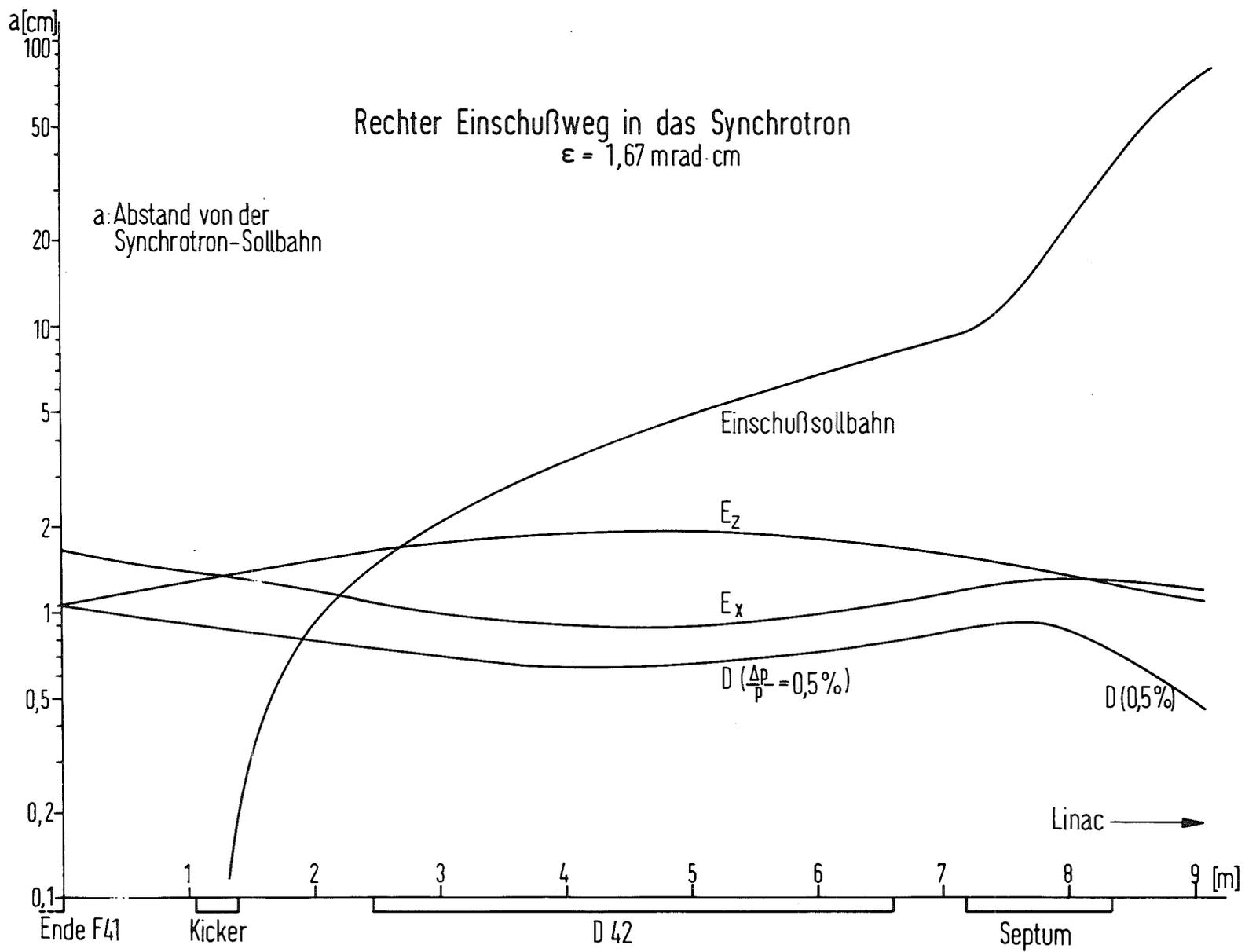


Fig. 22

Während die eben besprochenen Steuerspulen dazu da sind, Sollbahnabweichungen infolge des Erdfeldes oder infolge Aufstellungs- und Einstellfehler zu korrigieren, sind in der Strahlweiche Möglichkeiten vorgesehen, die selektiv die Lage und Richtung des eingeschossenen Strahls am Einschubort in das Synchrotron einzustellen gestatten. In horizontaler Ebene kann die für das Synchrotron optimale Strahlage und Richtung am Einschubort durch Variation der Septum- und Kickerstärke erreicht werden. Für die vertikale Ebene sind dazu besondere Korrekturmagnete KM (s. Abb. 6 und Abb. 23) im Abstand von einer viertel bzw. von eineinhalb Betatronwellenlängen vom Einschubpunkt vorgesehen.

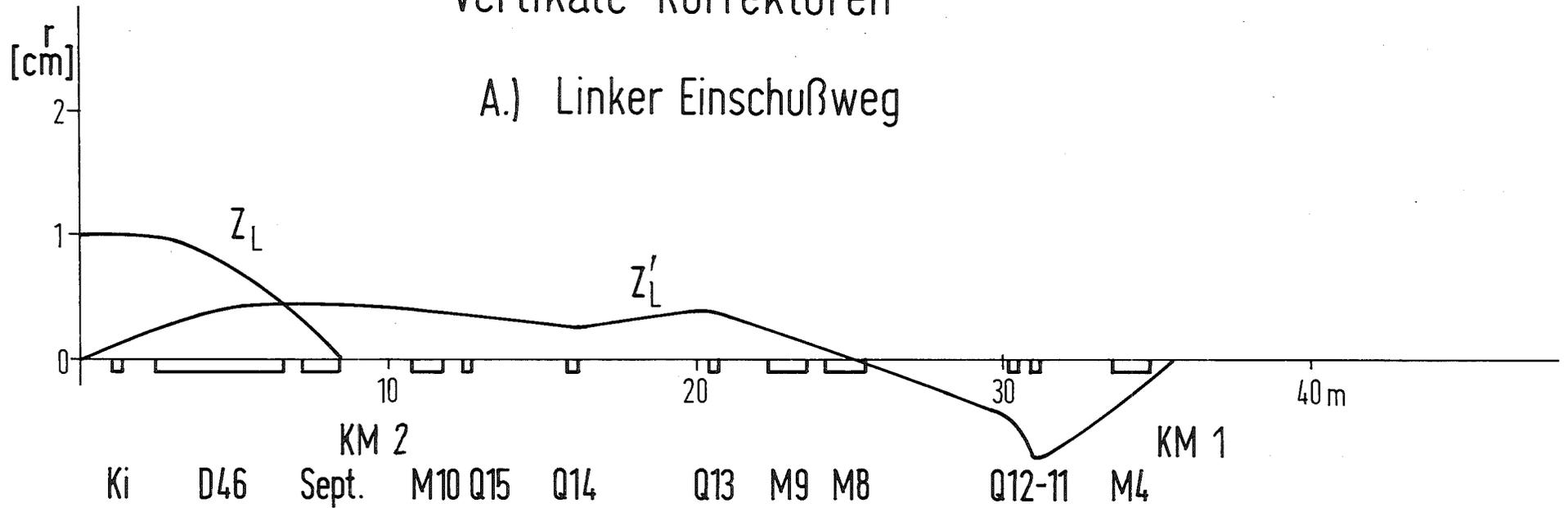
Am Anfang und Ende der beiden Injektionswege sind Strommonitore zur genauen Messung des Strahlstromes eingebaut. Es kann somit der vom Linac emittierte Strahl mit dem in das Synchrotron eingeschossenen Strahl ständig verglichen werden. Ein Strahlverlust kann auftreten durch eine falsche Einstellung eines Ablenkmagneten oder durch einen Aufstellungsfehler eines Quadrupols. Dieser Fehler ist sofort über Strahlpositionsmonitore feststellbar und auch lokalisierbar. Dies trifft nicht mehr zu, wenn ein richtig aufgestellter Quadrupol falsch eingestellt ist, wodurch die Sollbahn nicht geändert wird. Bei Verdacht auf eine falsche Quadrupoleinstellung, die zu einem Intensitätsverlust führt, können durch Umschalter sämtliche Positionsmonitore auf Strahlstrommessung umgestellt werden, wodurch sofort ein Fehler in der Strahlführung lokalisiert werden kann.

#### 4.2.3. Energieüberwachung

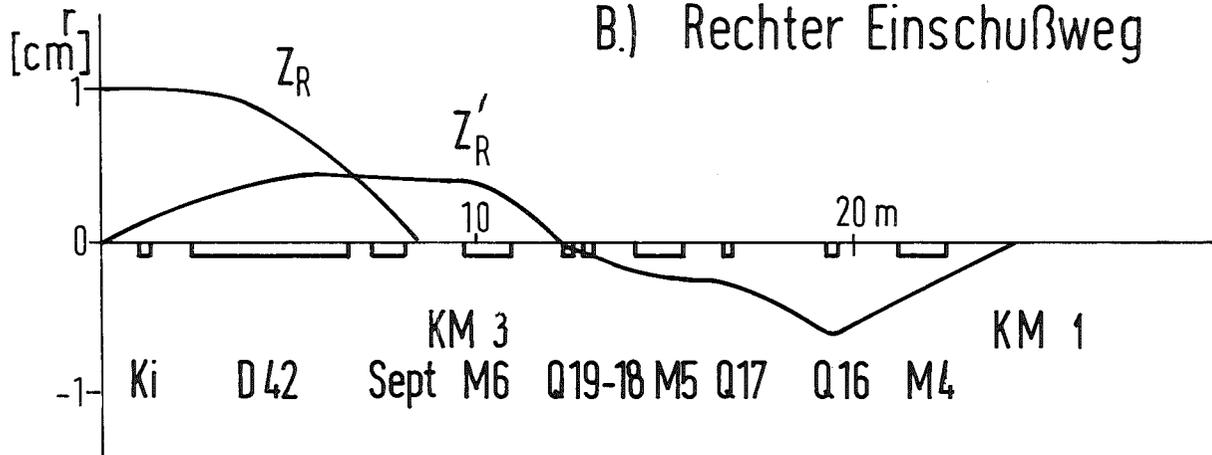
In der Ablenkung M2 - M3 ist wieder eine enge horizontale Strahltaile bei großer Dispersion zum Einbau eines Energiefilters vorgesehen. Den wesentlichen Teil dieser Strahlführung zeigt die Abb. 24. An der bezeichneten Stelle ist wieder, wie im Meßarm, eine Energieblende mit isolierten Backen vorgesehen. Damit ist es hier möglich, die Energie des Intensitätsmaximums mit einer Genauigkeit von  $\pm 0.2\%$  zu messen. Im Betrieb hat diese Energieblende jedoch die Aufgabe, aus dem Linacstrahl eine Energiebreite von  $\pm 0,5\%$ , entsprechend der Synchrotronakzeptanz, herauszufiltern. Durch Vergleich der elektrischen Signale von den isolierten Blendenbacken kann ein Abweichen der Sollenergie vom Intensitätsmaximum sofort festgestellt werden. Ein von Varian vorgesehens Regelsystem korrigiert automatisch die Linacenergie wieder auf den Sollwert.

# Vertikale Korrekturen

## A.) Linker Einschubweg



## B.) Rechter Einschubweg



Empfindlichkeit:

$Z_L$  : 4mm / mrad

$Z'_L$  : 0,45 mrad / mrad

$Z_R$  : 4mm / mrad

$Z'_R$  : 0,7 mrad / mrad

KM: Korrekturmagnet

Fig. 23

# Energieauflösung zwischen M2 und M3

$\epsilon = 1,67 \text{ mradcm}$

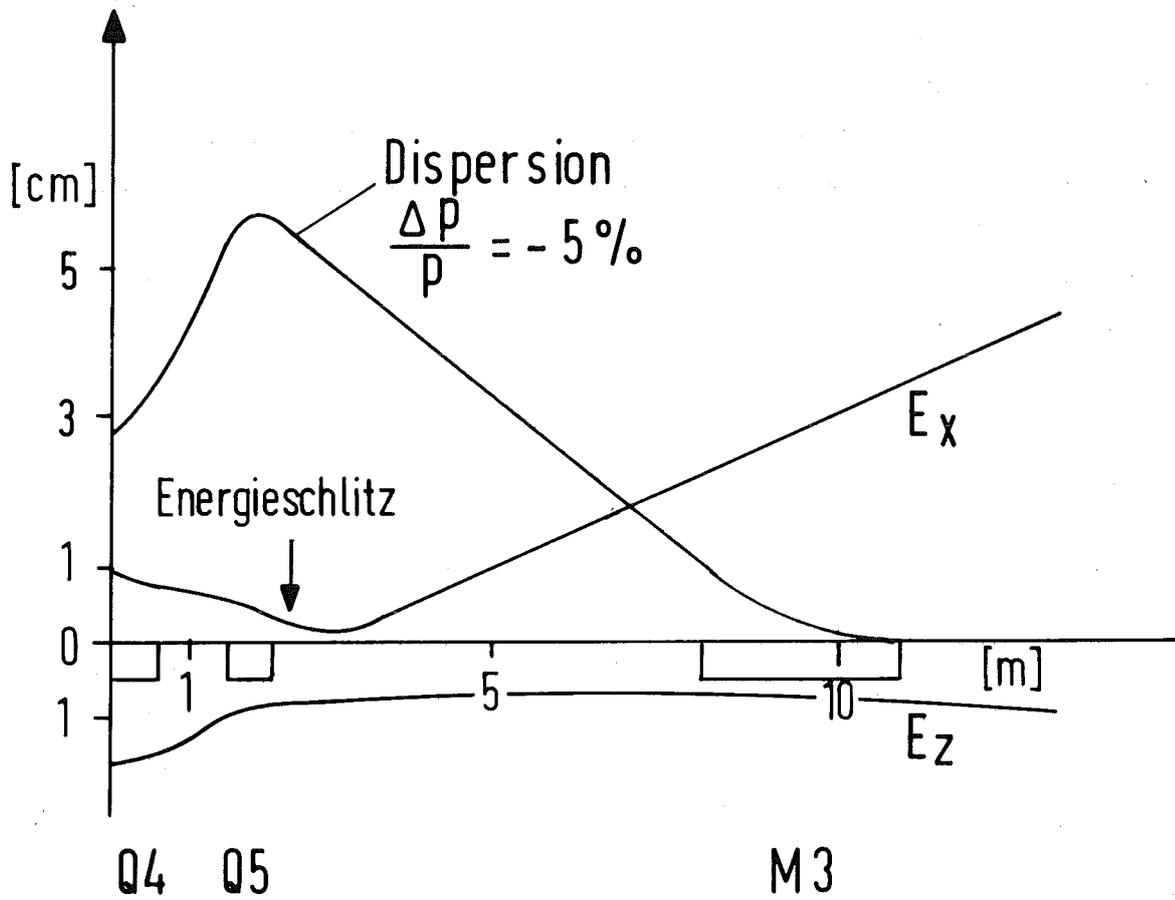


Fig. 24

Unmittelbar vor der Energieblende ist wieder eine Tantalstabmonitor T1 vorgesehen. Dieser soll nur so weit eingefahren werden, daß der normale Strahl nicht berührt wird. Der vertikale Ablenkmagnet VKI ermöglicht es, etwa alle ein oder zwei Sekunden einen Linacimpuls vertikal auf dem Tantalstabmonitor (s. Abb. 25) abzulenken. Damit ist eine Routineüberwachung der Energieverteilung des Linacstrahles möglich.

Das beschriebene Energiefilter zusammen mit den Strahlpositions- und strommonitoren und den Korrekturmöglichkeiten über die Steuerspulen gestattet es, einen genau definierten Strahl an den Einschußort in das Synchrotron zu führen. Die vorgesehenen Korrekturmagneten machen es außerdem noch möglich, den Strahl am Einschußpunkt den von der Synchrotrontheorie abweichenden optimalen Betriebsbedingungen anzupassen. Die erforderlichen Emittanzellipsen zur optimalen Anpassung lassen sich zwar nicht unmittelbar beobachten, aber ihre Variationsmöglichkeit ist durch das lange Strahlführungssystem mit weitgehend ausgenutzter freier Apertur sehr stark eingeengt.

#### 4.3. Ejektion aus dem Synchrotron (Strahl E)

Teilchen, die über den rechten Injektionsweg in das Synchrotron eingeschossen wurden, können bei höherer Energie über den Ejektionsweg E (s. Abb. 1) wieder aus dem Synchrotron gelenkt werden. Dieser Weg ist zunächst mit einem Faraday-Käfig abgeschlossen und dient so zur Erprobung und Messung einer schnellen Ejektion aus dem Synchrotron im GeV-Bereich. Die Strahlführung und Optik ist in den Abb. 5 und 26 dargestellt. Später soll diese Ejektionsmöglichkeit für den Einschuß in den geplanten Speicherring verwendet werden.

#### 5.1. Lineare Quadrupolkorrekturen

Für die verwendeten Quadrupole vom Typ QL wurden die linearen Korrekturen (s. K.G. Steffen 65) ausgerechnet\*. In Abb. 27 sind diese Korrekturen dargestellt. Sie bewegen sich für die effektive Linsenstärke und Linsenlänge im Bereich von 8%. Es zeigt sich jedoch, daß die relativen Korrekturen der

---

\* An dieser Stelle möchte ich Herrn Dr. Wüster für die Überlassung seines Rechenprogramms herzlich danken.

# Vertikale Ablenkung auf den Tantalmonitor T1

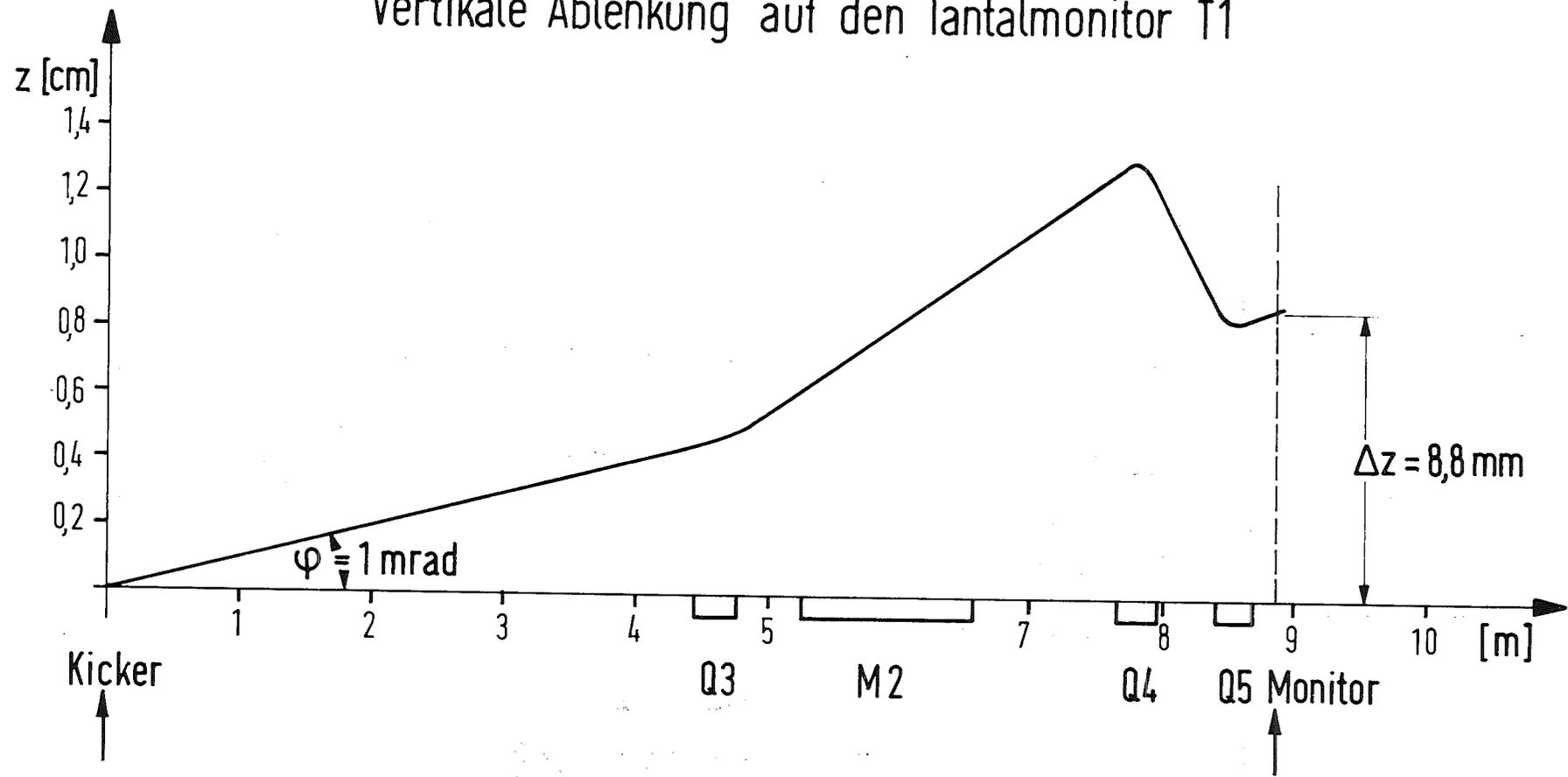


Fig.25

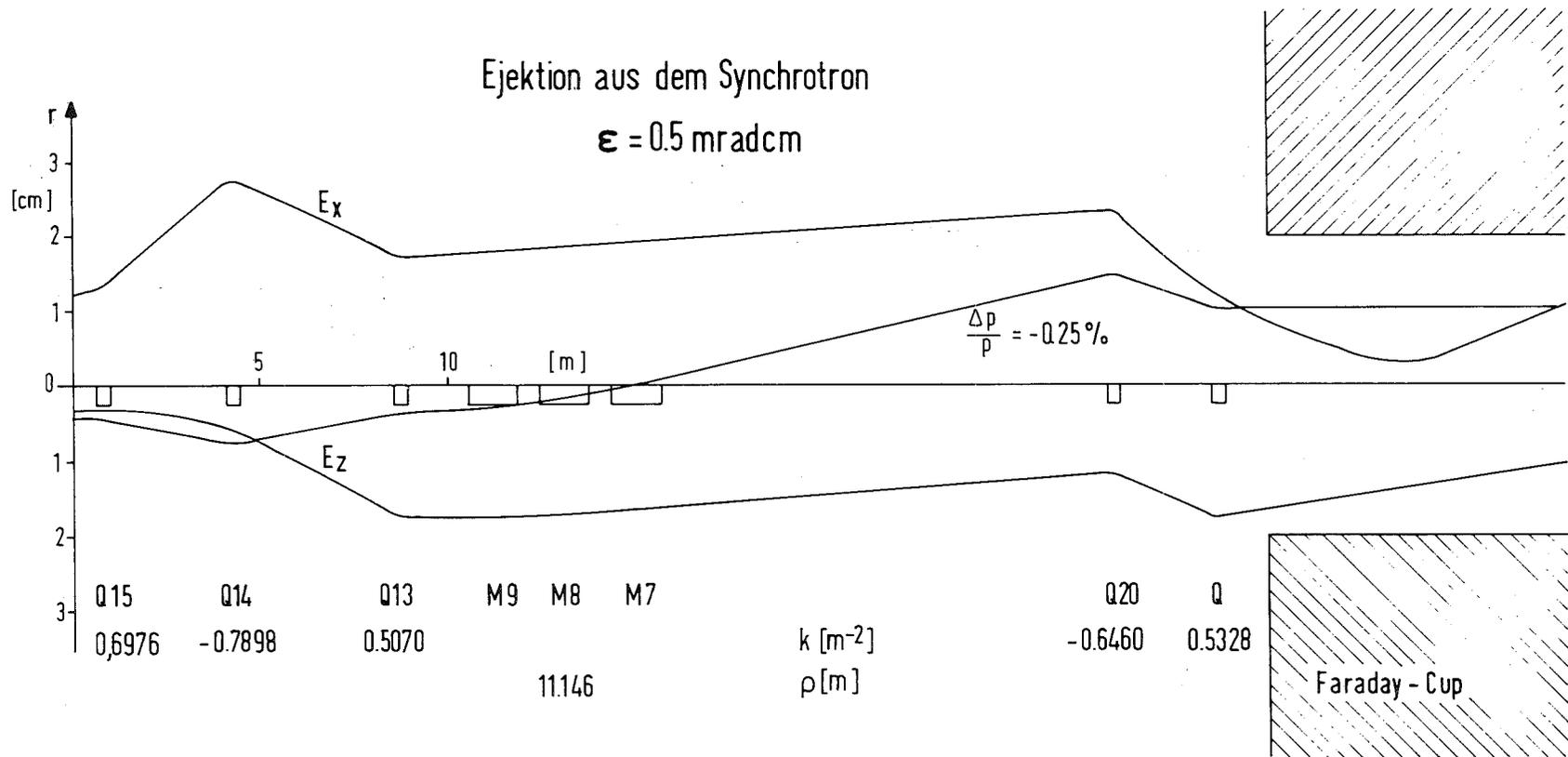


Fig. 26

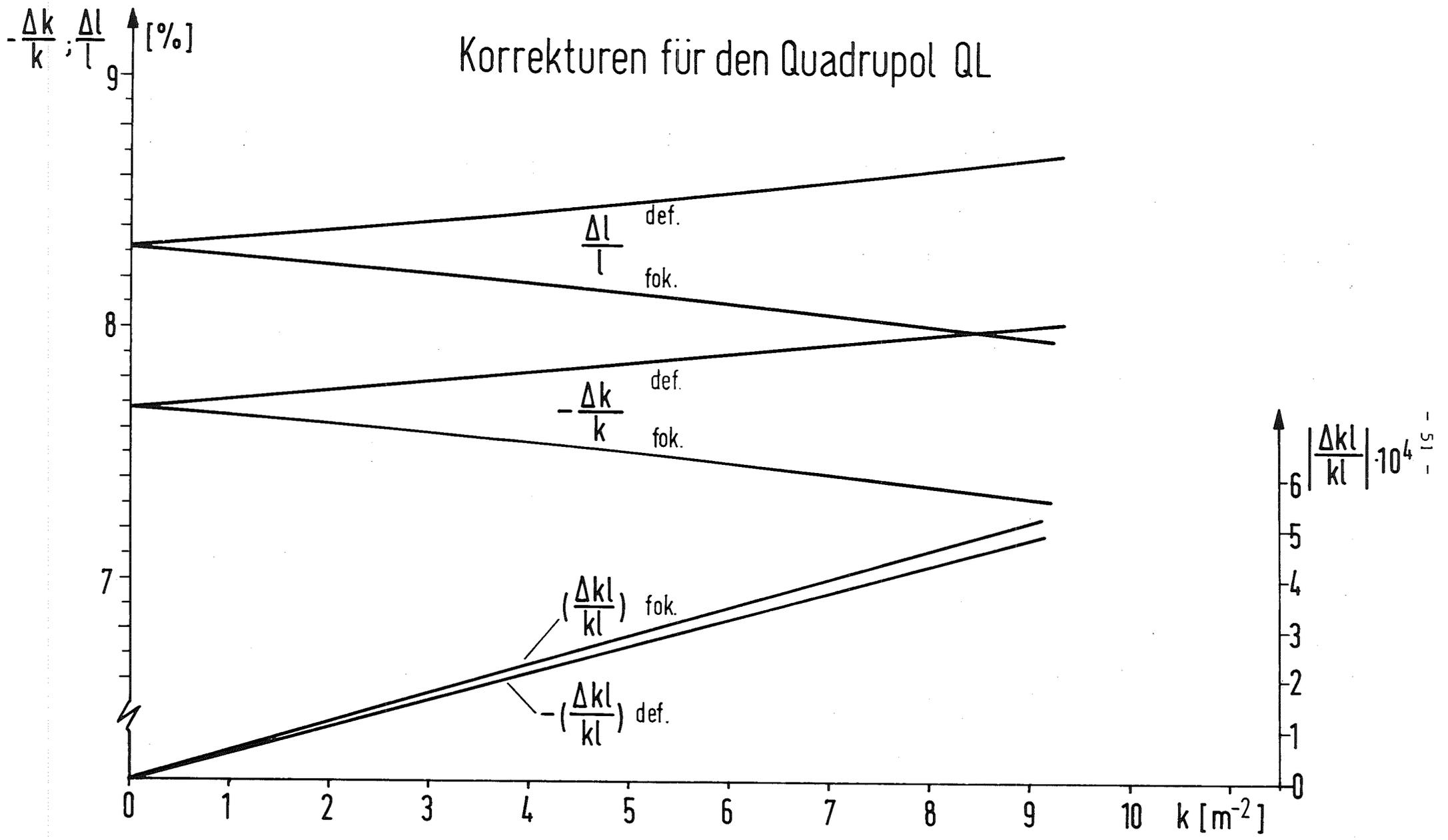


Fig. 27

Brennweiten bis zu großen Quadrupolstärken kleiner als  $5 \cdot 10^{-4}$  sind. Da dies in der Größenordnung der Einstellungsfehler liegt, wurde darauf verzichtet, diese Korrekturen in der Rechnung zu verwenden.

## 5.2. Magnete

Zum Abschluß sollen noch einige für die Strahloptik wichtige Daten der verwendeten Magnettypen zusammengestellt werden.

### a. Ablenkmagnete:

Alle Ablenkmagnete M0 bis M10 sind Rechteckmagnete und werden symmetrisch zur Sollbahn aufgestellt. Beim Ablenkmagneten M4 war dies jedoch nur für einen Strahlweg - hier der linke - möglich. Der rechte Strahlweg bildet mit der Magnetachse einen Winkel von  $-13,42$  Grad am Eingang und von  $-2,25$  Grad am synchrotronseitigen Ausgang. In Abb. 28 sind die Strahlwege im M4 und die notwendigen Vermessungspunkte genau angegeben.

M0 bis M 9: magn. Länge 1,315 m

M10: magn. Länge 1,030 m

### b. Kicker:

Die Kicker sind ebenfalls Rechteckmagnete und haben eine magnetische Länge von 34 cm.

### c. Septum:

Die Septa sind die einzigen Sektormagnete in diesem Strahlführungssystem.

Das Septum im linken Einschubweg hat einen Ablenkwinkel von  $6,6250^\circ$  und eine magnetische Bogenlänge von  $\ell = 1,1624$  m.

Das Septum im rechten Einschubweg macht eine Ablenkung von  $30,625^\circ$  und hat eine magnetische Bogenlänge von  $\ell = 0,9519$  m.

### d. Quadrupole:

Mit Ausnahme der beiden Linac-Dubletts sind alle Quadrupole vom Typ QL mit einer magnetischen Länge von 30,3 cm und einem maximalen Feldgradienten von 1,7 kG/cm bei einer Apertur von 14 cm Durchmesser.

Die magnetische Länge der Dublett D1 und D2 beträgt 10,0 cm, ihre Apertur hat 5 cm Durchmesser, der Abstand der Quadrupolmitten beträgt 17 cm und ihr maximaler Feldgradient 3,6 kG/cm.

# Vermessung der Injektionswege im Magnet M4

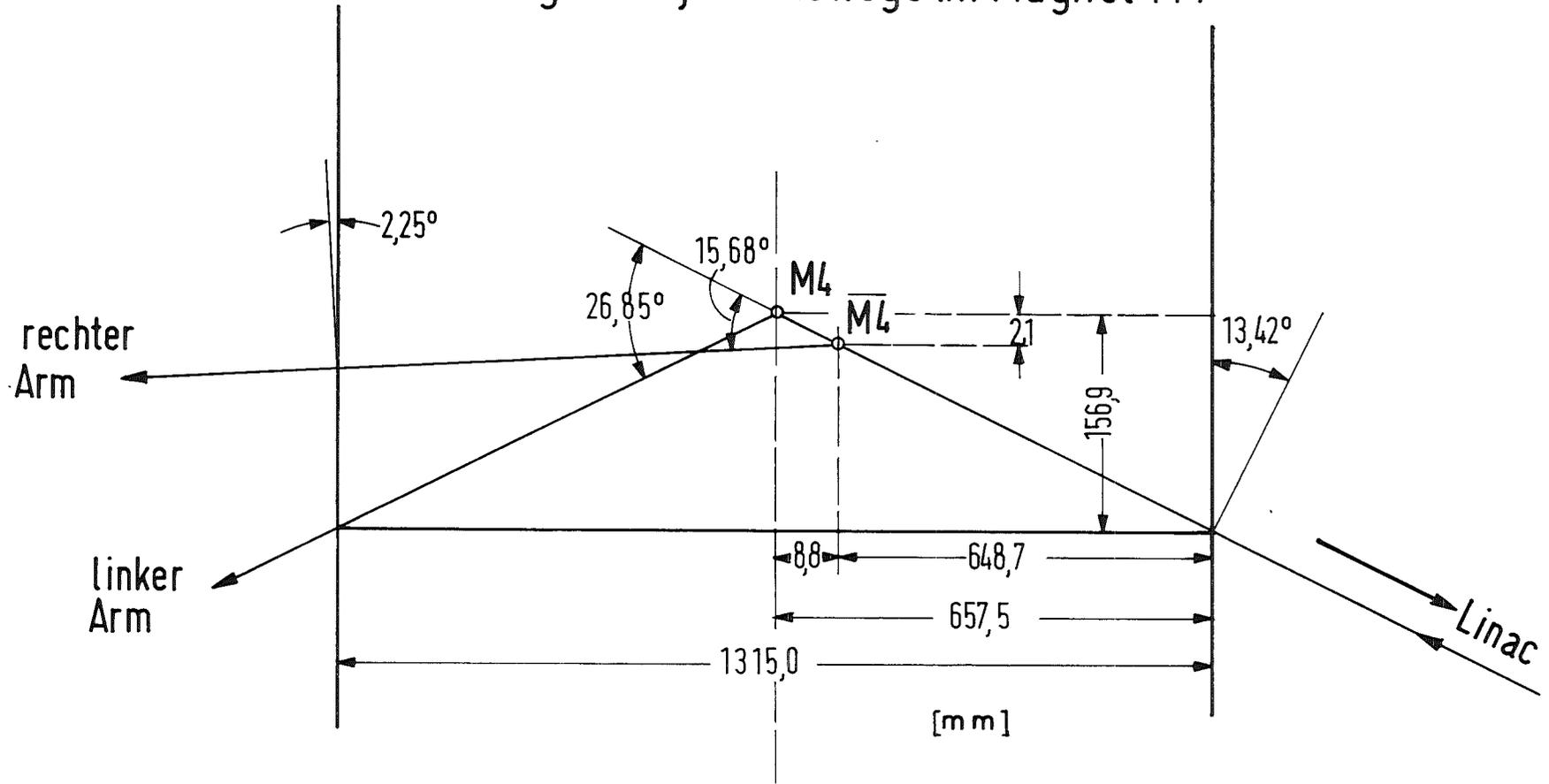


Fig. 28

TABELLE 12

Linker Injektionsweg - Strahlparameter am Injektionspunkt  
(ohne chromatische Aberration)

$\frac{\Delta k}{k}$	- 1 %						+ 1 %					
	$E_x$	$E'_x$	$E_z$	$E'_z$	$D_x$	$D'_x$	$E_x$	$E'_x$	$E_z$	$E'_z$	$D_x$	$D'_x$
Quadrupol												
L26	1.54	2.16	1.04	-2.12	0.95	1.13	1.63	2.43	1.04	-2.15	0.95	1.13
27	1.61	2.30	1.07	-2.33	0.95	1.13	1.61	2.30	1.01	-1.94	0.95	1.13
28	1.58	2.30	1.03	-2.11	0.95	1.13	1.64	2.30	1.05	-2.16	0.95	1.13
Q 1	1.64	2.36	1.03	-2.02	0.95	1.13	1.58	2.24	1.05	-2.25	0.95	1.13
3	1.49	1.76	1.05	-2.18	0.95	1.13	1.90	2.91	1.03	-2.09	0.95	1.13
4	1.62	2.35	0.98	-2.03	0.97	1.15	1.60	2.25	1.10	-2.27	0.93	1.11
5	1.61	2.28	1.07	-2.18	0.92	1.09	1.61	2.32	1.01	-2.10	0.98	1.17
6	1.52	1.79	1.03	-2.11	0.95	1.13	1.89	2.92	1.05	-2.16	0.95	1.13
7	1.62	2.35	1.10	-2.16	0.95	1.13	1.60	2.25	0.98	-2.10	0.95	1.13
8	1.58	2.27	1.04	-2.16	0.95	1.13	1.64	2.32	1.04	-2.11	0.95	1.13
9	1.64	2.39	0.93	-2.03	0.95	1.13	1.58	2.21	1.17	-2.39	0.95	1.13
10	1.55	1.87	1.04	-2.13	0.95	1.13	1.82	2.83	1.04	-2.14	0.95	1.13
11	1.64	2.36	0.94	-1.84	1.00	1.18	1.58	2.24	1.14	-2.49	0.90	1.08
12	1.51	2.03	1.08	-2.25	0.78	0.94	1.74	2.56	1.00	-2.03	1.12	1.31
13	1.61	2.36	1.00	-1.81	0.92	1.09	1.61	2.25	1.07	-2.47	0.98	1.17
14	1.68	2.21	1.05	-2.18	1.09	1.33	1.60	2.50	1.03	-2.09	0.82	0.93
15	1.60	2.31	1.04	-2.14	0.94	1.11	1.62	2.29	1.04	-2.13	0.97	1.15
Sollwerte												
$\frac{\Delta k}{k} = 0$	1.61	2.30	1.04	-2.14	0.95	1.13	1.61	2.30	1.04	-2.14	0.95	1.13

Angaben in cm bzw mrad - D bzw.  $D'_z$  für  $\Delta p/p = - 0.5 \%$

TABELLE 13

Rechter Injektionsweg - Strahlparameter am Injektionspunkt  
(ohne chromatische Aberration)

$\frac{\Delta k}{k}$	- 1 %						+ 1 %						
	Quadrupol	$E_x$	$E'_x$	$E_z$	$E'_z$	$D_x$	$D'_x$	$E_x$	$E'_x$	$E_z$	$E'_z$	$D_x$	$D'_x$
L26		1.39	2.52	1.06	-2.29	0.96	1.11	1.48	2.51	1.05	-2.25	0.96	1.11
27		1.44	2.52	1.01	-2.23	0.96	1.11	1.44	2.51	1.11	-2.35	0.96	1.11
28		1.45	2.60	1.06	-2.26	0.96	1.11	1.42	2.43	1.05	-2.28	0.96	1.11
Q 1		1.46	2.53	1.09	-2.36	0.96	1.11	1.42	2.50	1.02	-2.19	0.96	1.11
3		1.20	2.21	1.04	-2.27	0.96	1.11	1.70	2.75	1.07	-2.27	0.96	1.11
4		1.46	2.55	1.08	-2.16	0.97	1.12	1.41	2.48	1.04	-2.39	0.95	1.10
5		1.43	2.49	1.05	-2.34	0.94	1.08	1.45	2.54	1.06	-2.20	0.98	1.13
6		1.19	2.15	1.06	-2.26	0.96	1.11	1.71	2.80	1.05	-2.29	0.96	1.11
7		1.46	2.55	1.08	-2.50	0.96	1.11	1.41	2.48	1.06	-2.07	0.96	1.11
8		1.44	2.59	1.05	-2.26	0.96	1.10	1.43	2.44	1.07	-2.28	0.96	1.11
9		1.45	2.55	1.11	-1.93	0.96	1.11	1.43	2.48	1.01	-2.61	0.96	1.10
10		1.41	2.27	1.06	-2.31	0.95	1.10	1.51	2.80	1.06	-2.24	0.97	1.12
16		1.46	2.57	1.09	-2.31	0.97	1.12	1.42	2.46	1.03	-2.23	0.95	1.09
17		1.38	1.69	1.04	-2.29	0.74	0.79	1.91	3.63	1.07	-2.26	1.18	1.43
18		1.44	2.52	1.06	-2.16	0.97	1.12	1.43	2.51	1.05	-2.38	0.95	1.10
19		1.38	2.37	1.06	-2.33	0.79	0.90	1.50	2.66	1.06	-2.22	1.13	1.31
Sollwerte													
$\frac{\Delta k}{k} = 0$		1.44	2.52	1.06	-2.27	0.96	1.11	1.44	2.52	1.06	-2.27	0.96	1.11

Angaben in cm bzw. mrad - D bzw.  $D'_z$  für  $\Delta p/p = + 0,5 \%$

### 5.3. Kontrollen und Empfindlichkeit des Strahlführungssystems

Der Prozessrechner, der als Kontrollorgan für den gesamten Linearbeschleuniger vorgesehen ist, übernimmt die Aufgabe, alle Quadrupole und Ablenkmagnete gemäß der Strahlenergie richtig einzustellen und diese Einstellung ständig zu kontrollieren. Es ist vorgesehen, die Ströme für alle Quadrupole und Ablenkmagnete auf einige  $10^{-5}$  genau einzustellen. Für die Quadrupole des FODO-Kanals wurde nur eine Einstellgenauigkeit von  $10^{-3}$  gefordert, da dieses System, wie Tabelle 3a zeigt, relativ unempfindlich ist. Da alle Quadrupole des FODO-Kanals in Serie geschaltet sind, wird die in Tabelle 3 angegebene individuelle Einstellung über einen digital gesteuerten Leistungstransistor vorgenommen, der parallel zur Quadrupolspule geschaltet ist. Sollte der Prozessrechner ausfallen, können alle Einstellungen von Hand vorgenommen werden. Ein Gefühl für die Einstellempfindlichkeit der beiden Einschüßwege vermitteln die Tabellen 12 und 13. Hier sind die Enveloppen mit deren Ableitung und die Dispersion mit Ableitung am Einschüßort für positive und negative Fehleinstellung jeweils eines Quadrupols um  $\pm 1\%$  angegeben. Man sieht, daß nur sehr wenige Quadrupole empfindlich in die Emittanzellipse eingehen.

An dieser Stelle möchte ich Herrn Dr. K. G. Steffen für viele weiterhelfende Diskussionen und Anmerkungen herzlich danken. Frä. I. Borchardt darf ich besonders danken für die aktive Mithilfe beim Erstellen der ersten Entwürfe und für Ihre stete Hilfsbereitschaft während der Rechnungen am Analogrechner. Herrn Knaut danke ich herzlich für die Anfertigung der Illustrationen.

Referenzen:

- AM 63: F. Amman - R. Andreani LNF - 63/46
- DST 64: H. De Staebler SLAC - TN - 64 - 10
- EC 67: V. Eckardt DESY 67/12, Apr. 1967
- HE 62: R. H. Helm SLAC - 2, 1962
- LA 66: R. S. Larsen SLAC - 63, 1966
- STE 65: K. G. Steffen "High Energy Beam Optics" New York 1965
- STE 66: K. G. Steffen DESY - H 12, 1966
- WI 65: H. Wiedemann DESY - H 9, 1965
- WI 66: H. Wiedemann DESY - H 14, 1966
- WI 68: H. Wiedemann DESY 68/5, Jan. 1968
- WÜ 59: H. O. Wüster DESY - TH9, 1959