

Interner Bericht  
DESY H5-71/3

20. April 1971

Einschuß in den Speicherring  
(ersetzt DESY-H5/5)

H. Wiedemann

4

5



6

7



8

9

## Inhalt

- I. Einleitung
- II. Einschußverfahren
- III. Einschußgeometrie und Optik
- IV. Einschußparameter
- V. Intensitäten vom Linac II und Synchrotron
- VI. Einschußzeiten

## I. Einleitung

Für den Einschub von Elektronen und Positronen in den Speicherring bei DESY gibt es zwei Möglichkeiten: Den Einschub direkt vom 400 MeV Elektron-Positron Linearbeschleuniger und den Einschub aus dem Synchrotron bei hoher Energie (s. Abb. 1). Im Folgenden sollen die Einschubbedingungen für beide Möglichkeiten aufgezeigt werden.

## II. Einschubverfahren

Durch die Notwendigkeit des sukzessiven Einschusses von vielen Teilchenpulsen in den Speicherring ergibt sich eine besondere Einschuboptik, die vermutlich nicht die optimale Betriebsoptik sein wird. Im Gegensatz zum Einschub in ein Synchrotron über einen Umlauf ist es hier nicht möglich, durch einen magnetischen Kicker den Injektionspuls auf die Sollbahn des Beschleunigers zu lenken. Das würde gleichzeitig eine Ablenkung des schon gespeicherten Strahles und damit seinen Verlust bedeuten. Bei einem Speicherring kann also der Injektionspuls nur außerhalb der normalen Akzeptanz parallel zur Sollbahn eingelenkt werden (Abb. 2). In der Abb. 3 ist ein Querschnitt der Injektionsstelle dargestellt. Injektionspuls und Akzeptanz des Speicherrings sind noch durch den Septummagneten getrennt. Da die Teilchen des injizierten Pulses noch nicht innerhalb der Akzeptanz des Speicherrings liegen, müssen sie irgendwo an der Vakuumkammerwand verloren gehen. Es muß also durch eine Kickerbeule um die Injektionsstelle die Akzeptanz des Speicherrings über den Injektionspuls geschoben werden (Abb. 4). Damit wird der Injektionspuls von der Akzeptanz des Speicherrings aufgefangen und die Teilchen können gespeichert werden. Wie man jedoch aus der Abb. 4 ersieht, trifft beim Einschalten des Kicks ein beträchtlicher Teil der Akzeptanz auf die Vakuumkammer und auf das Septum. Das beschriebene Injektionsverfahren ist also nur dann praktikabel, falls im äußeren Teil der Akzeptanz, der der Größe des Kicks entspricht, keine oder nur sehr wenig Teilchen enthalten sind. Dies ist im Speicherring der Fall. Die horizontale Akzeptanz ist 80 mradmm, während die Emittanz des Injektionspulses nur 5 mradmm beträgt, d.h. der gespeicherte Strahl konzentriert sich sehr stark um die Sollbahn. Durch Quantenfluktuationen stellt sich jedoch in der Intensität eine Gaußverteilung über den Querschnitt ein, so daß Teilchen, wenn auch wenige, beim Einschalten der Injektionsbeule verloren gehen. Deshalb wird die Kickerbeule nur während weniger Mikrosekunden

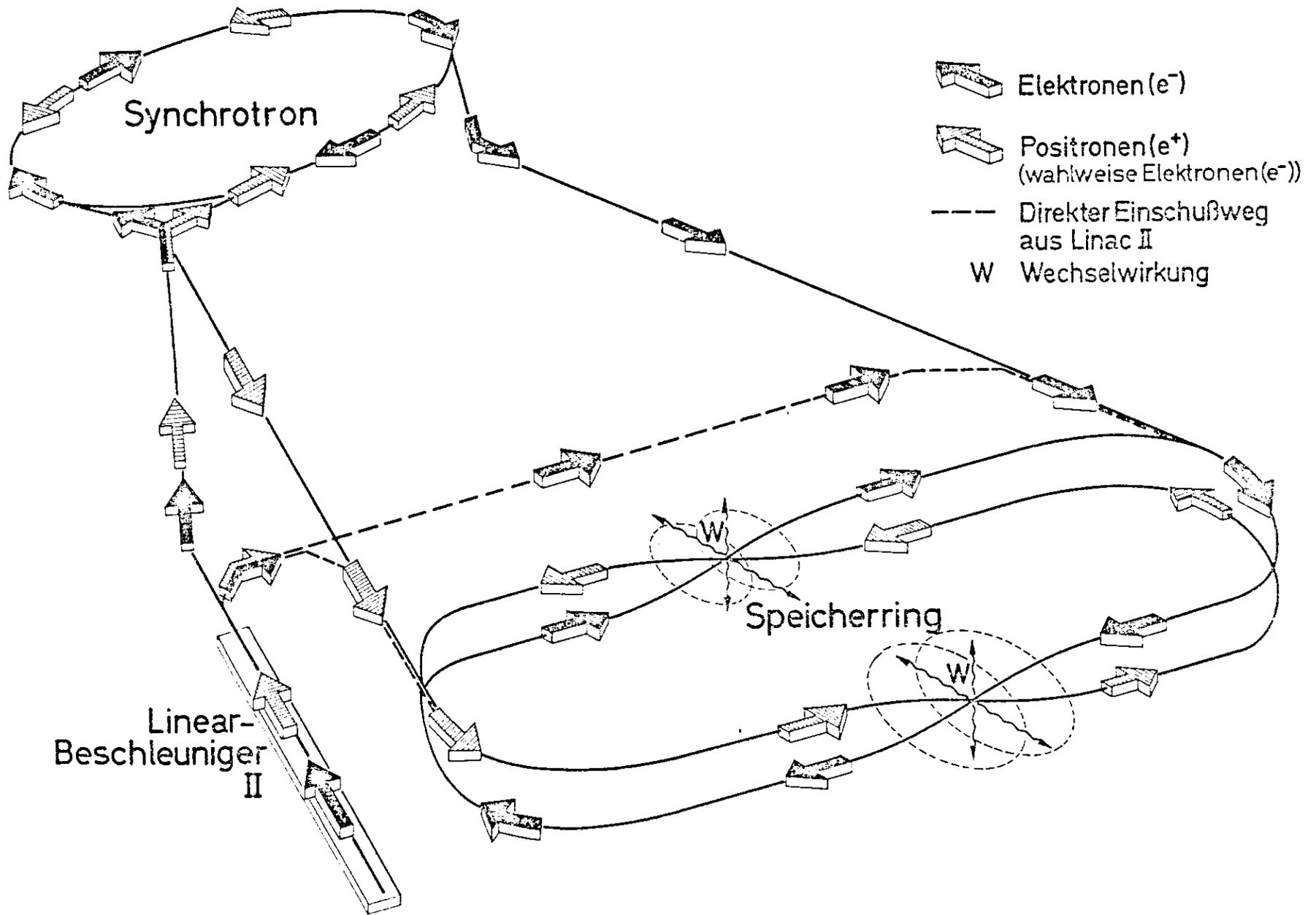


Abb. 1

# Einschußstelle

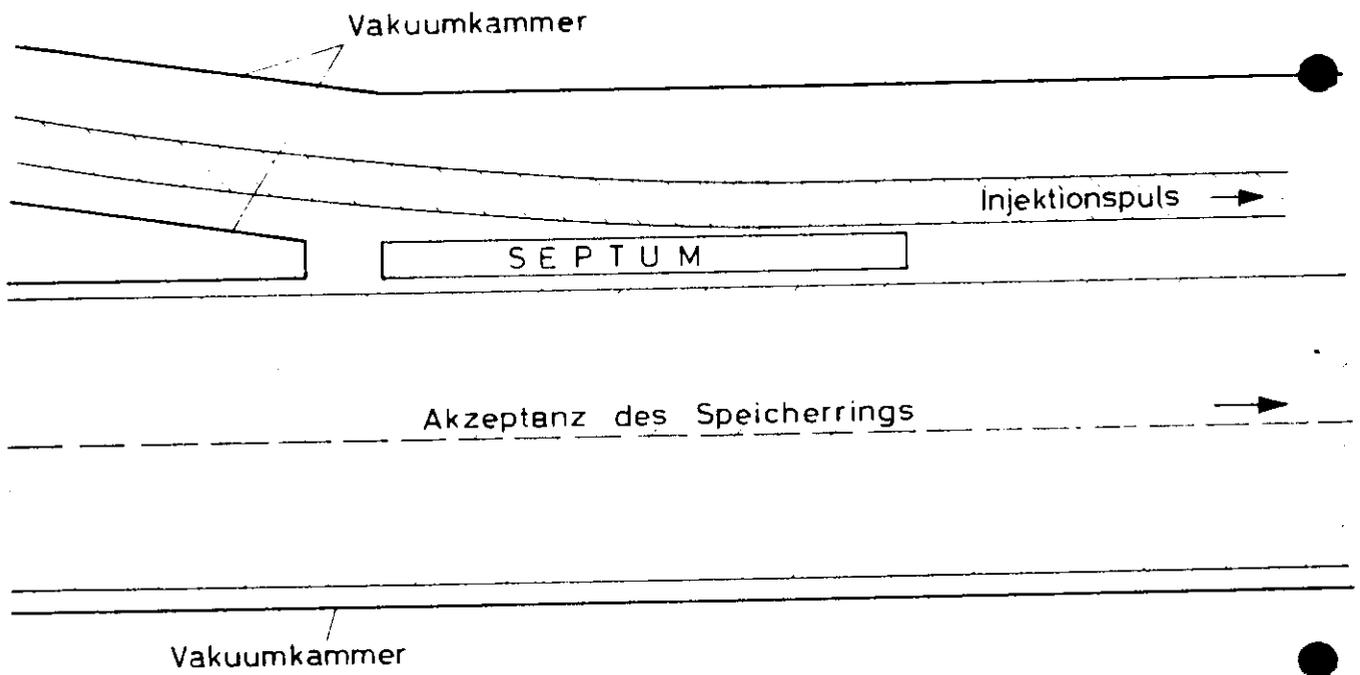
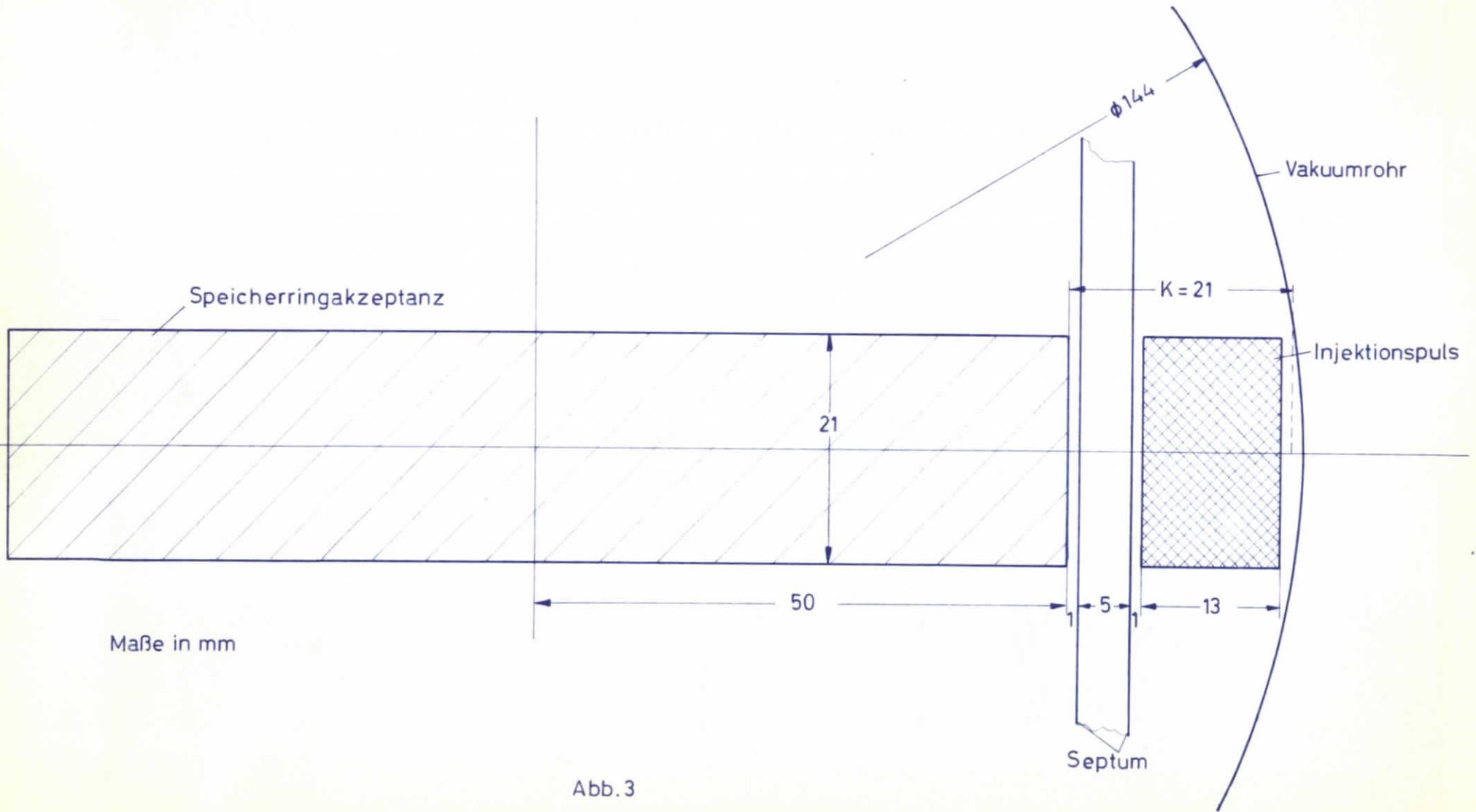


Abb. 2

# Strahlquerschnitte am Injektionspunkt



# Injektionsbeule

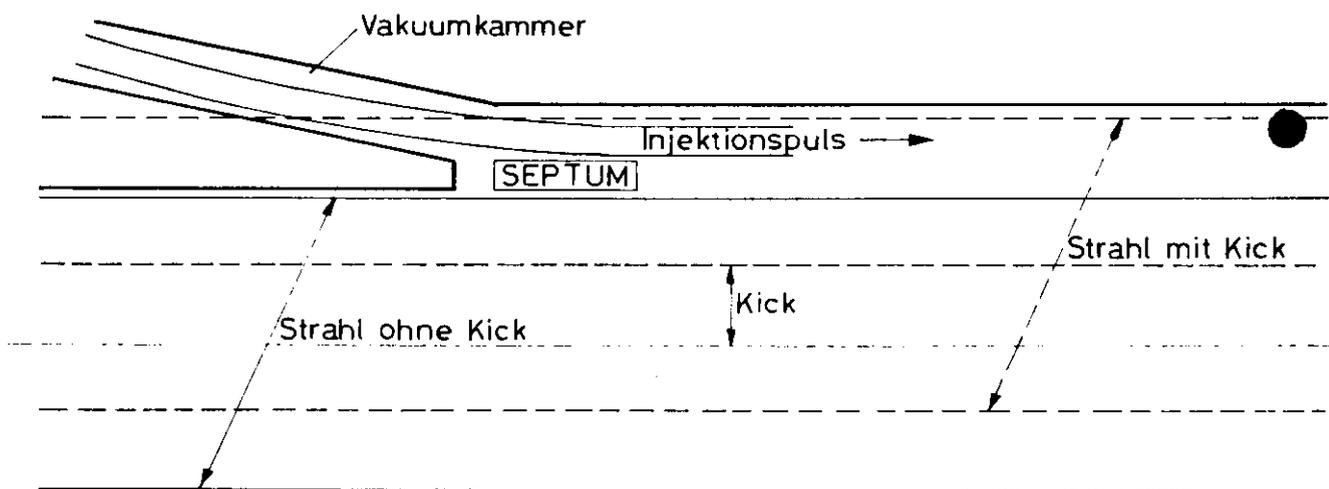


Abb. 4

eingeschaltet, um die Teilchenverluste gering zu halten. Bei höheren Stromstärken können diese Verluste jedoch so groß wie der Injektionspuls selbst sein, womit von der Injektion her eine obere Grenze für den gespeicherten Strom erreicht wird.

In der Abb. 5 ist noch einmal die gesamte Strahlenvelope mit Injektionsbeule dargestellt.

Damit der injizierte Puls nach einem oder wenigen Umläufen im Speicherring nicht wieder auf das Septum trifft, muß der Arbeitspunkt im Bereich  $9,15 < Q_x < 9,25$  liegen. In diesem Falle erreicht der Injektionspuls infolge der Betatronschwingungen erst nach 4 bis 6 Umläufen wieder das Septum, d. h. die Kickerbeule muß nach spätestens vier Umläufen wieder ausgeschaltet sein. Dieser Arbeitspunktbereich erlaubt andererseits einen Einschub über 2 - 3 Umläufe, was durch einen entsprechend langen Puls direkt aus dem Linearbeschleuniger zu einer schnelleren Einschubdauer um den Faktor 2 - 3 führt.

### III. Einschubgeometrie und Optik

Im letzten Kapitel wurde dargelegt, daß der Injektionspuls am Rande der verschobenen Speicherringakzeptanz in den Speicherring eintritt. Dieser Moment ist in der Abb. 6 in der Phasenebene  $(x, x')$  noch einmal dargestellt. Der Injektionspuls führt im Verlaufe seiner weiteren Bahn im Speicherring Betatronschwingungen um die Sollbahn aus, die jedoch durch die Abstrahlung von Synchrotronlicht gedämpft sind. Ist  $a_0$  die ursprüngliche Betatronamplitude und  $\tau$  die Dämpfungszeitkonstante, so gilt für die Amplitude  $a$  zur Zeit  $t$  :

$$a = a_0 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Der nächste Puls kann erst eingeschossen werden, wenn die Betatronschwingungsamplitude von  $a_0$  auf  $a$  bzw. um den Betrag  $K$  der Kickerbeule abgenommen hat (s. Abb. 7). Es gilt also:

$$\left. \begin{aligned} a &= a_0 - K \\ K &= a_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) = 2E_0 + S \end{aligned} \right\}$$

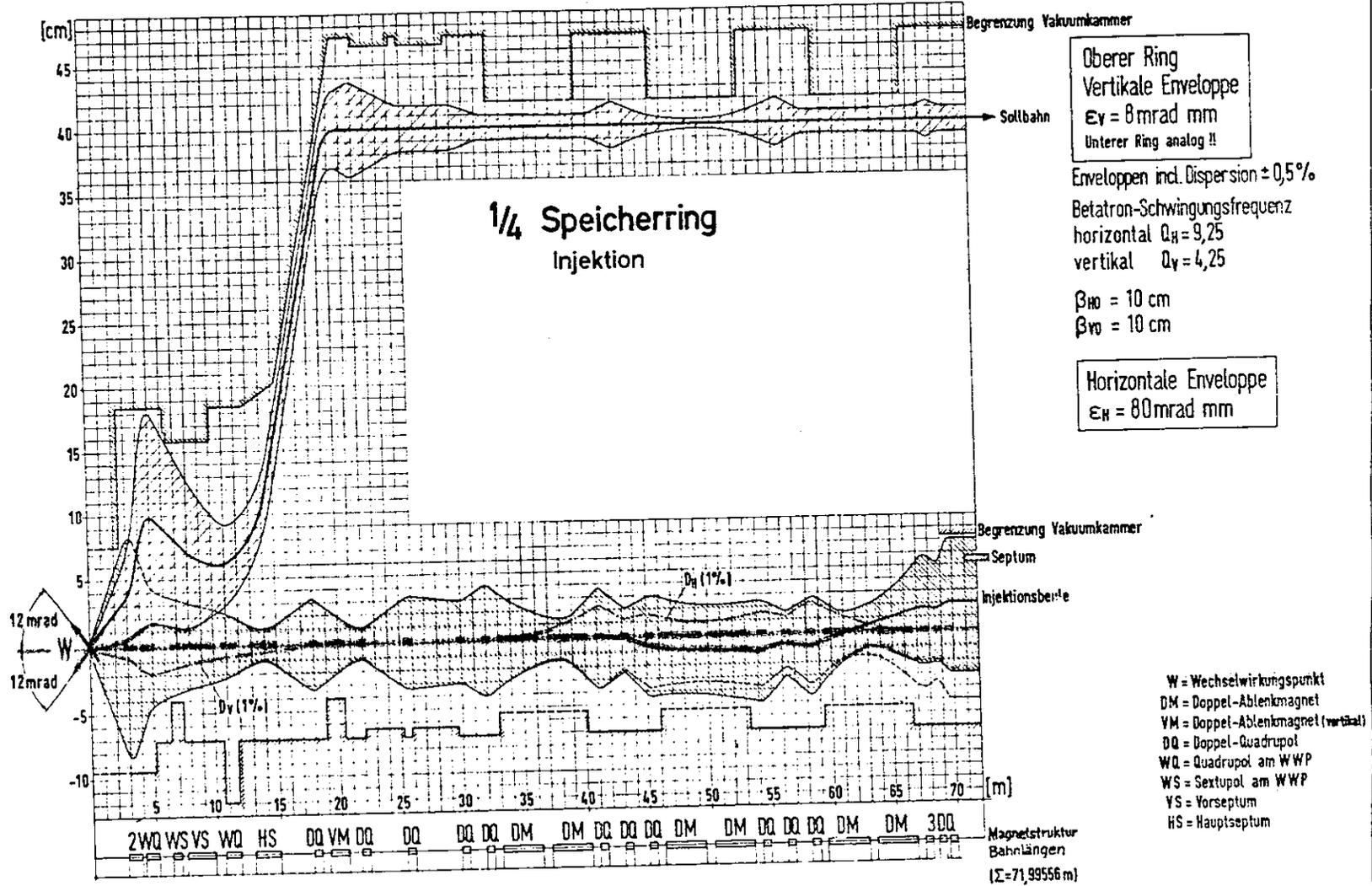


Abb. 5.

DISY			
1/4 Speicherring Injektion			

Für die Zeit zwischen zwei Injektionspulsen ergibt sich damit:

$$+ \frac{t}{\tau} = - \log \left( 1 - \frac{K}{a_o} \right)$$

Hieraus folgt, daß um so schneller wieder eingeschossen werden kann, je kleiner  $K$  und je größer  $a_o$  ist. Da  $K = 2E_o + S+1$  und  $a_o = E-E_o$  ist, folgt, daß  $E_o$  und  $S$  möglichst klein und  $E$  möglichst groß gemacht werden soll. Aus diesem Grunde wurde durch den Einbau von zwei zusätzlichen Quadrupolen DQ - 382 (s. Abb. 8) um den Injektionspunkt die Enveloppe  $E$  der Speicherringakzeptanz so groß wie möglich und  $E_o$  durch eine "Fehlanpassung" so klein wie möglich gemacht. In den Abb. 6 und 7 ist der Injektionspuls bereits mit Fehlanpassung eingezeichnet. Es muß jedoch erwähnt werden, daß nach einer Dämpfungszeit die fehlangepaßte Emittanzellipse des Injektionspulses in die angepaßte Ellipse übergegangen ist. Dies führt zu einem Teilchenverlust von etwa 10-15% beim Wiedereinschalten der Kickerbeule am Septum. Dieser Verlust wird jedoch überkompensiert durch den Gewinn in der Einschußfolge. Für den Speicherring sind in der folgenden Tabelle die wesentlichen Daten gemäß Abb. 7 für eine horizontale Injektion zusammengestellt.

$$E = 50,0 \text{ mm}$$

$$E_o = 6,5 \text{ mm}$$

$$S = 7,0 \text{ mm}$$

(5 mm Septumschiene mit 1 mm Sicherheitsabstand  
auf beiden Seiten)

$$a_o = E - E_o = 43,5 \text{ mm}$$

$$K = 2E_o + S + 1 = 21 \text{ mm}$$

(Der Injektionspuls liegt mit seinem äußeren Rand  
1 mm innerhalb der Akzeptanzellipse!)

$$a = a_o - K = 22,5 \text{ mm}$$

Damit ergibt sich:

$$\frac{t}{\tau} = - \log \frac{a_o - K}{a_o} = \log \frac{a_o}{a}$$

# Injektion in den Speicherring

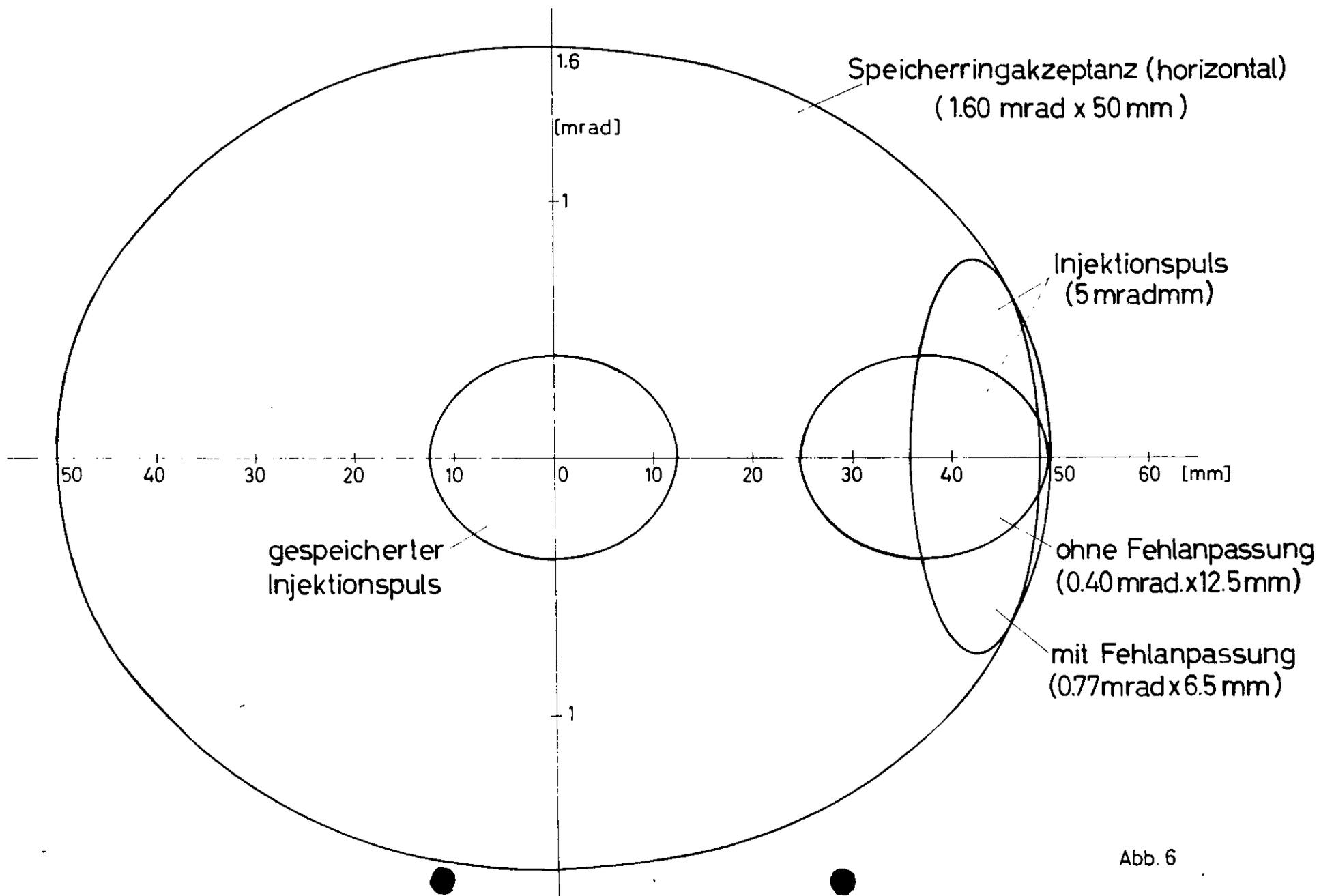


Abb. 6

# Injektion

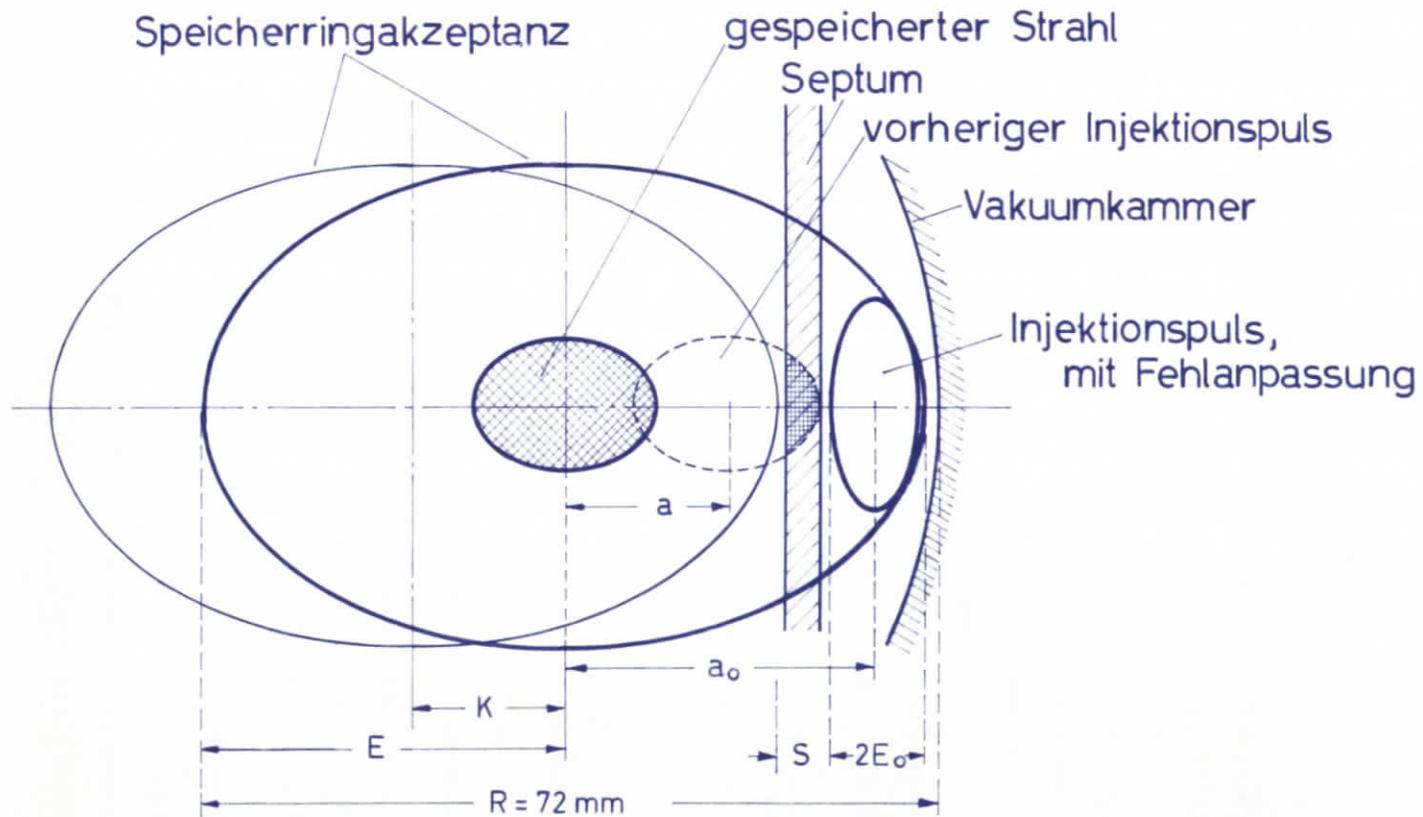


Abb.7

$$\frac{t}{\tau} \approx \log \frac{43,5}{22,5} = \log 1,935 = 0,66$$

$$t = 0,66 \cdot \tau$$

d.h. nach einer Zeit von  $2/3$  einer Dämpfungszeit kann der nächste Teilchenpuls eingeschossen werden.

Die erforderliche Kickerbeule ist in ihrem Verlauf aus der Abb.5 zu ersehen. Man sieht, daß sich die gesamte Beule über  $1,5$  Betatronwellenlängen erstreckt, während vom optischen Standpunkt nur eine halbe Betatronwellenlänge notwendig wäre. Technisch ist es jedoch nicht sinnvoll, innerhalb eines Ablenkmagneten DM den Kicker anzuordnen, wie es für die Erzeugung einer halben Betatronwelle notwendig wäre.

Zur Erzeugung einer Kickerbeule K an der Injektionsstelle ist eine Ablenkung des Sollstrahls im Kicker von

$$\phi \text{ (mrad)} = 0,7646 \cdot K \text{ (mm)}$$

erforderlich.

Der Ort der optischen Mitte des Kickers ist dabei genau in der Mitte zwischen DQ-229 und DQ-240 (s. Abb. 8) angenommen.

Die Injektionsstelle an die der Injektionsstrahl angepaßt werden soll, liegt in der Mitte des Injektionsseptums (s. Abb. 9), d. h. längs der Sollbahn an der Stelle  $l_s = 71155,56 \text{ mm.}^{*)}$

#### IV. Einschußparameter

Durch die Optik des Speicherrings bei  $Q_x = 9,25$  und  $Q_z = 4,25$  sind am Einschußort (s. Abb. 9) folgende optische Parameter für den Injektionsstrahl gegeben:

---

\*) In Notiz: DESY H5/2-1971 R.Appel - H. Wiedemann

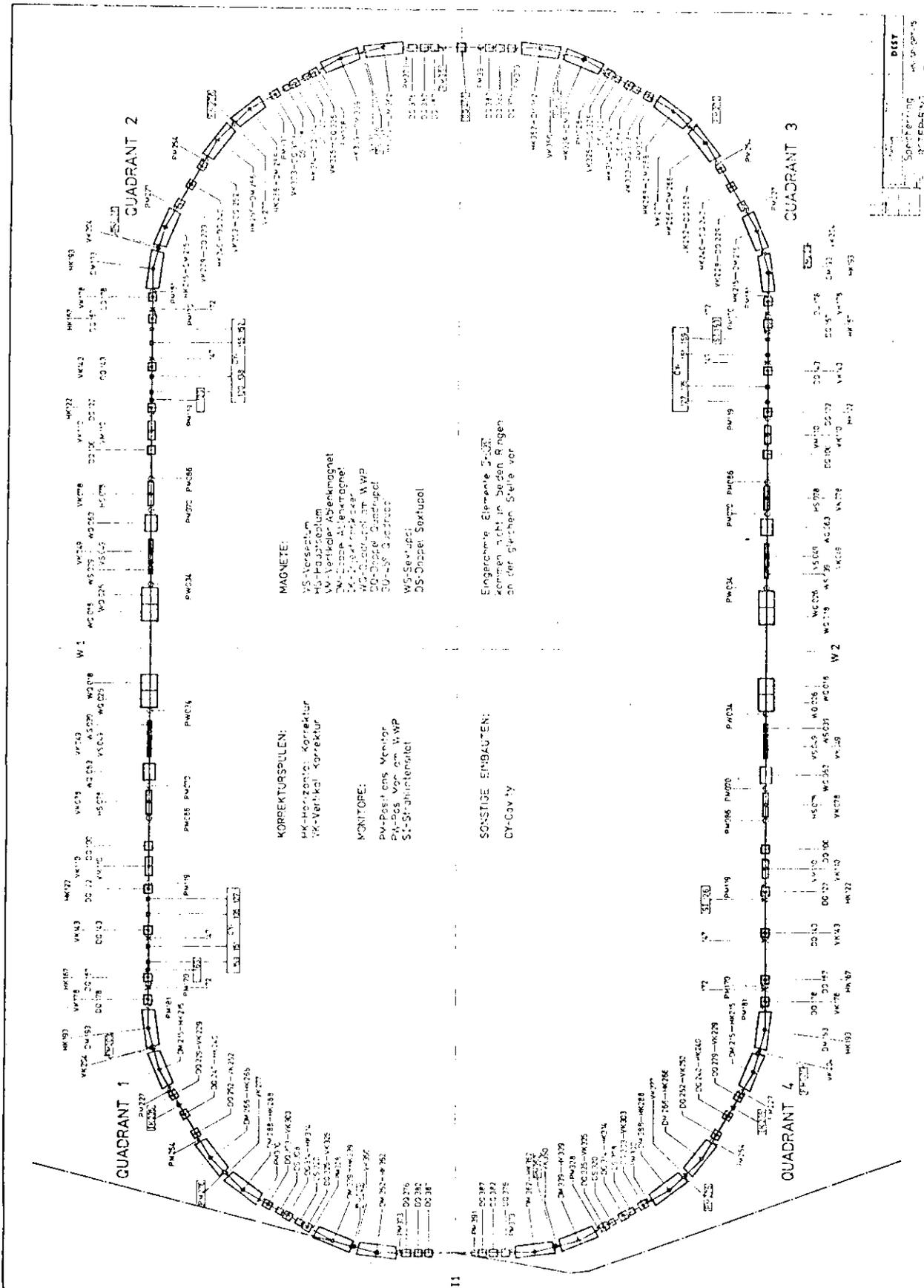


Abb. 8

# Injektion

(nicht maßstäblich)

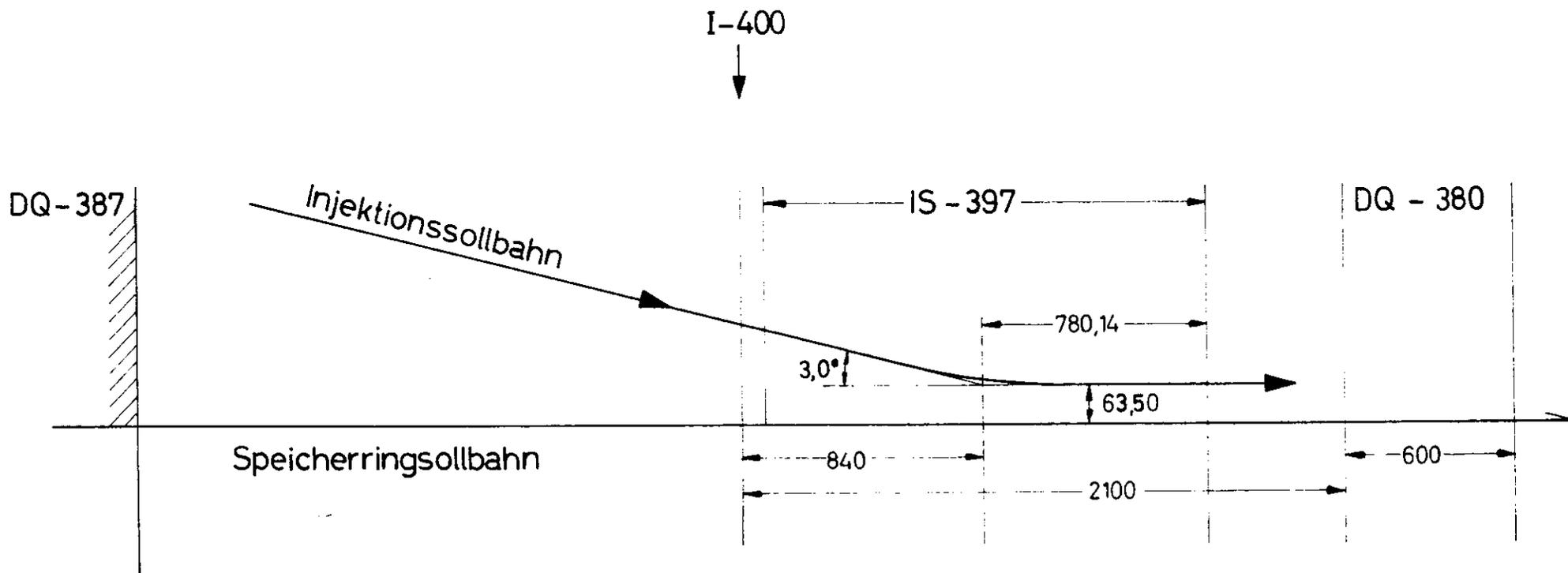


Abbildung 9

$$\begin{array}{ll} \epsilon_x = 5 \text{ mrad mm} & \epsilon_z = 5 \text{ mrad mm} \\ E_{ox} = 6,50 \text{ mm} & E_{oz} = 8,20 \text{ mm} \\ E'_{ox} = 0 \text{ mrad} & E'_{oz} = 0 \text{ mrad} \\ S_x = 63,5 \text{ mm} & S_z = 0 \text{ mm} \\ S'_x = 0 \text{ mrad} & S'_z = 0 \text{ mrad} \end{array}$$

Hierbei bedeuten  $S_x$  bzw.  $S_z$  die Abstände der Injektionssollbahn von den vertikalen bzw. horizontalen Mittelebenen durch die ungestörte Sollbahn des Speicherrings.  $S'_x$  bzw.  $S'_z$  bedeuten die entsprechenden Winkel dazu.

Die maximal notwendige Einschußenergie ergibt sich aus der Dämpfungszeitkonstante und dem Wunsch, mit 50 Pulsen pro Sekunde zu injizieren.

Auf Grund des Einschußprozesses ergab sich eine Wartezeit zwischen zwei Injektionspulsen von  $2/3$  einer Dämpfungszeitkonstanten. Da die Wartezeit bei 50 pps 20 msec beträgt, darf die Dämpfungszeitkonstante nicht größer als 30 msec betragen. Wie aus Abb. 10 ersichtlich, erfordert dieser Wert Einschußenergien von

$$E_J \geq 2,08 \text{ GeV}$$

d.h. die bisher festgelegte Einschußenergie von 2,2 GeV ergibt einige Sicherheit für die erreichbare Einschußfolge von 50 Pulsen pro Sekunde.

Die Kickerbeule hat am Einschußort einen Wert von  $K = 21 \text{ mm}$ , d.h. es ist ein Ablenkwinkel des Kickers von

$$\phi = 1,60 \text{ mrad}$$

erforderlich.

Bei einer Energie von 2,2 GeV ergibt sich daraus eine Kickerstärke von

$$B \cdot L = 120 \text{ Gauß} \times \text{Meter}$$

B: Feldstärke im Kicker; L: magnetische Länge des Kickers.

Zunahme in % 0' 5 100 200 300 usw. →

← 5 50 50 20 10 0

Abnahme in %

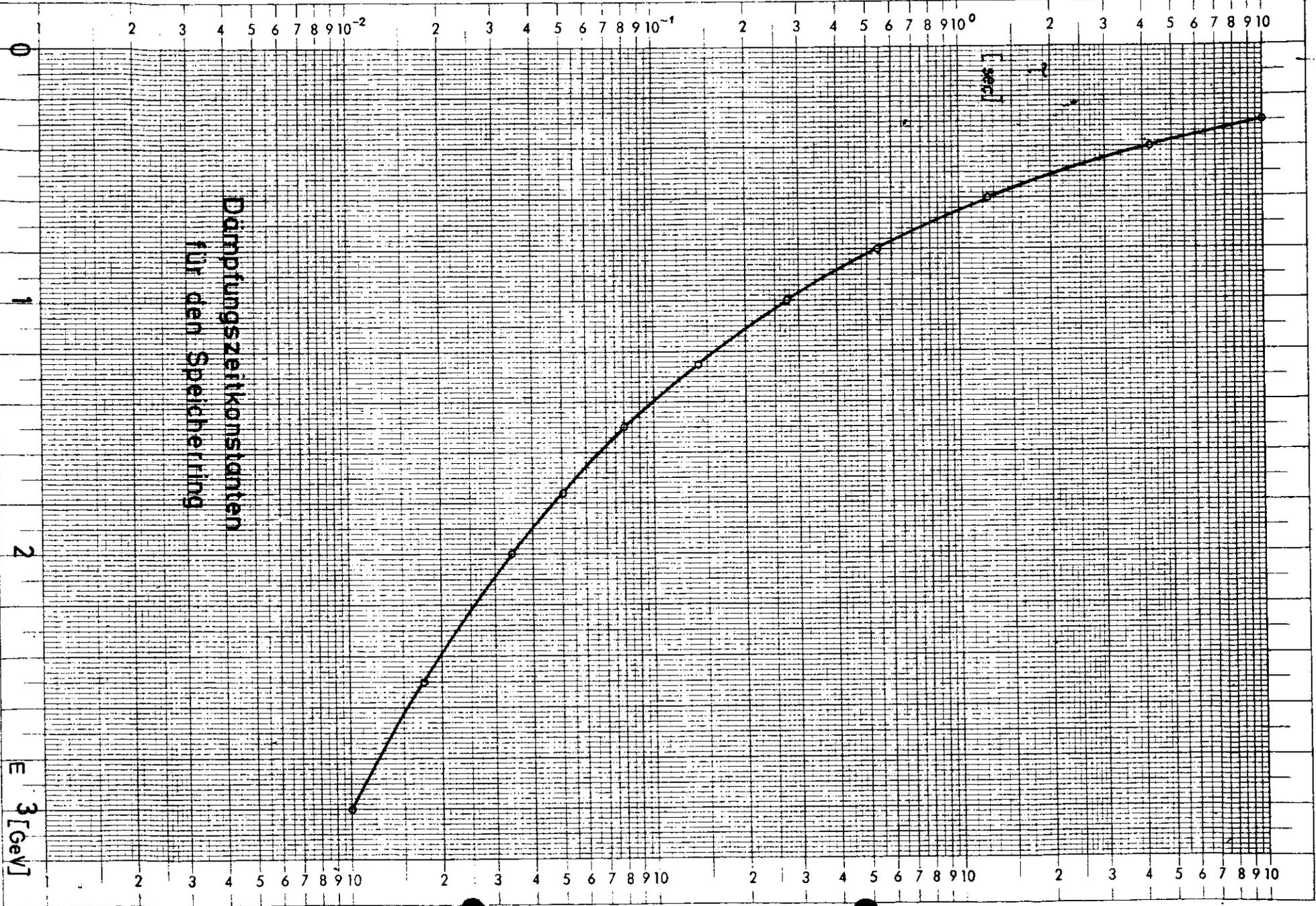


Abb. 10

-15-

V. Intensitäten vom Linac II und Synchrotron

Nach dem derzeitigen Stand der Entwicklungen am Linac II kann mit folgenden Teilchenströmen und Energien am Ende des Linearbeschleunigers gerechnet werden: Dabei wird der bestehende Linac mit 12 Abschnitten und einer 500 MHz Modulation zugrunde gelegt.

Ein weiterer Ausbau auf 14 Abschnitte würde einen Gewinn in der Energie von etwa 100 MeV erbringen.

Elektronen: (gemessen)  
 $J^- = 120 \text{ mA}$  in  $\frac{\Delta p}{p} = \pm 0,5\%$   
 und  $\epsilon < 5 \text{ mrad mm}$   
 $E^- = 600 \text{ MeV}$

Positronen: (Varian Konverter) (gemessen)  
 $J^+ = 1 \text{ mA}$  in  $\frac{\Delta p}{p} = \pm 0,5\%$   
 und  $\epsilon = 10 \text{ mrad mm}$   
 $E^+ = 360 \text{ MeV}$

Positronen (Positronenhorn) (Design)  
 $J^+ = 3 \text{ mA}$  in  $\frac{\Delta p}{p} = \pm 0,5\%$   
 und  $\epsilon = 16 \text{ mrad mm}$   
 $E^+ = 360 \text{ MeV}$

Rechnet man die Intensitäten auf die Akzeptanz des Strahlführungssystems und des Speicherrings um, so erhält man folgende Injektionsströme gemittelt über die Dauer eines Injektionspulses.

a) Einschub über das Synchrotron

Teilchen	Energie (GeV)	Emittanz mradmm	Pulsstrom mA
Elektronen	2,2 GeV	$\ll 5$	60
Positronen			
Varian Konverter	2,2 GeV	$\ll 1,7$	0,5
Positronenhorn	2,2 GeV	$\ll 2,7$	1,5

Hierbei wurde ein Gesamtwirkungsgrad für die verschiedenen Injektionen und Ejektionen von 50% angenommen.

Außerdem wurde angenommen, daß die Impulsakzeptanzbreite des Synchrotrons  $\Delta p/p = \pm 0,5\%$  beträgt.

b) Einschub direkt vom Linac II (12 Abschnitte)

Teilchen	Energie MeV	Emittanz mradmm	Pulsstrom mA
Elektronen	600	$\ll 5$	100
Positronen			
Varian Konverter	360	5	0,4
Positronenhorn	360	5	0,75

Hierbei wurde ein Einschubwirkungsgrad von 80% angenommen.

c) Einschub direkt vom Linac II (14 Abschnitte)

Teilchen	Energie MeV	Emittanz mradmm	Pulsstrom mA
Elektronen	700	$\ll 5$	- 100
Positronen			
Varian Konverter	460	5	0,51
Positronenhorn	460	5	0,96

VI. Einschubzeiten in den Speicherring

a) Einschub vom Synchrotron.

Bei Energien über 2,08 GeV kann mit einer Wiederholfrequenz von 50 Hertz in den Speicherring eingeschossen werden.

Mit den Strömen aus dem vorhergehenden Kapitel ergeben sich damit folgende Einschubzeiten.

Elektronen	5 A/sec	0,2 sec/A
Positronen		
Varian Konverter	25 mA/sec	40 sec/A
Positronenhorn	75 mA/sec	14 sec/A

b: Einschub direkt vom Linac II

Energie MeV	Dämpfungszeitkonstante sec	Einschubpulse / sec pps
600	1,25	0,80
360	6,0	0,17
700	0,80	1,25
460	2,7	0,37

Damit ergeben sich folgende Einschubzeiten:

Teilchen	Energie (MeV)	Einschubrate (mA/sec)	Einschubzeit (sec/A)
Elektronen	600	80	12,5
	700	125	8
Positronen			(min/A)
	Varian Konverter	360	0,07
	460	0,19	88
Positronenhorn	360	0,13	133
	460	0,35	47

Die Einschubzeiten für eine Injektion in den Speicherring direkt vom Linac II sind sehr groß für Positronen und schwanken zwischen 47 Minuten und 4 Stunden pro Ampère gespeicherten Strom. Diese Einschubzeiten können jedoch noch verkürzt werden, falls

- 1.) über 2-3 Umläufe eingeschossen wird und falls
- 2.) das Impulsband der Positronen auf  $\pm 1\%$  erweitert wird.

Damit ist zu hoffen, daß die angegebenen Einschubzeiten etwa um einen Faktor 3-4 verkürzt werden können.

c: Maximal speicherbare Ströme

Durch Quantenfluktuation stellt sich nach etwa einer Dämpfungszeitkonstante eine Gaußverteilung der Intensität über den Strahlquerschnitt ein, deren Standardbreite energieabhängig ist. (s. Abb. 5) Die Akzeptanz des Speicherrings ist so ausgelegt, daß die Lebensdauer des Strahls gegen Wandverluste durch Abstreifen der Gaußschwänze größer als 10 Stunden ist. Während der Füllung des Rings entstehen am Septum infolge der Kickerbeule größere Verluste, wodurch der maximal gespeicherte Strom begrenzt wird, sobald die Verluste genau so groß sind wie der Injektionspuls.

Bei den gegebenen Verhältnissen werden am Septum durch den Injektionspuls 2,5 Standardbreiten einseitig abgeschabt, falls der gesamte Strahl innerhalb der Akzeptanz eine Ausdehnung von 6,5 Standardabweichungen hat.

In diesen 2,5 Standardabweichungen ist bei vollkommener Gaußverteilung eine Intensität von  $2,1 \cdot 10^{-3}$  Prozent der gesamten Strahlintensität enthalten. Falls dieser Prozentsatz bei steigendem gespeichertem Strom die Intensität des Injektionspulses erreicht, ist die maximal speicherbare Stromstärke erreicht.

Ist bei einem Einschub über nur einen Umlauf die Einschubstromstärke  $J_0$ , so ist der maximal speicherbare Strom

$$J_{\max} = \frac{J_0}{2,1 \cdot 10^{-5}}$$

d.h. für einen maximalen Strom im Speicherring von 1 A ist ein Injektionsstrom von mindestens 21  $\mu$ A nötig und bei einem maximalen Strom von 6 A ein Injektionsstrom von mindestens 126  $\mu$ A.

Nach dem derzeitigen Stand der Entwicklung der Positronenkonverter am Linac II ist die maximale Positronenstromstärke im Speicherring durch den Einschubprozeß erst bei 19 Ampère begrenzt. Bei einem geringeren Transfer- und Injektionswirkungsgrad als 80% wird dieser maximale Wert entsprechend kleiner.