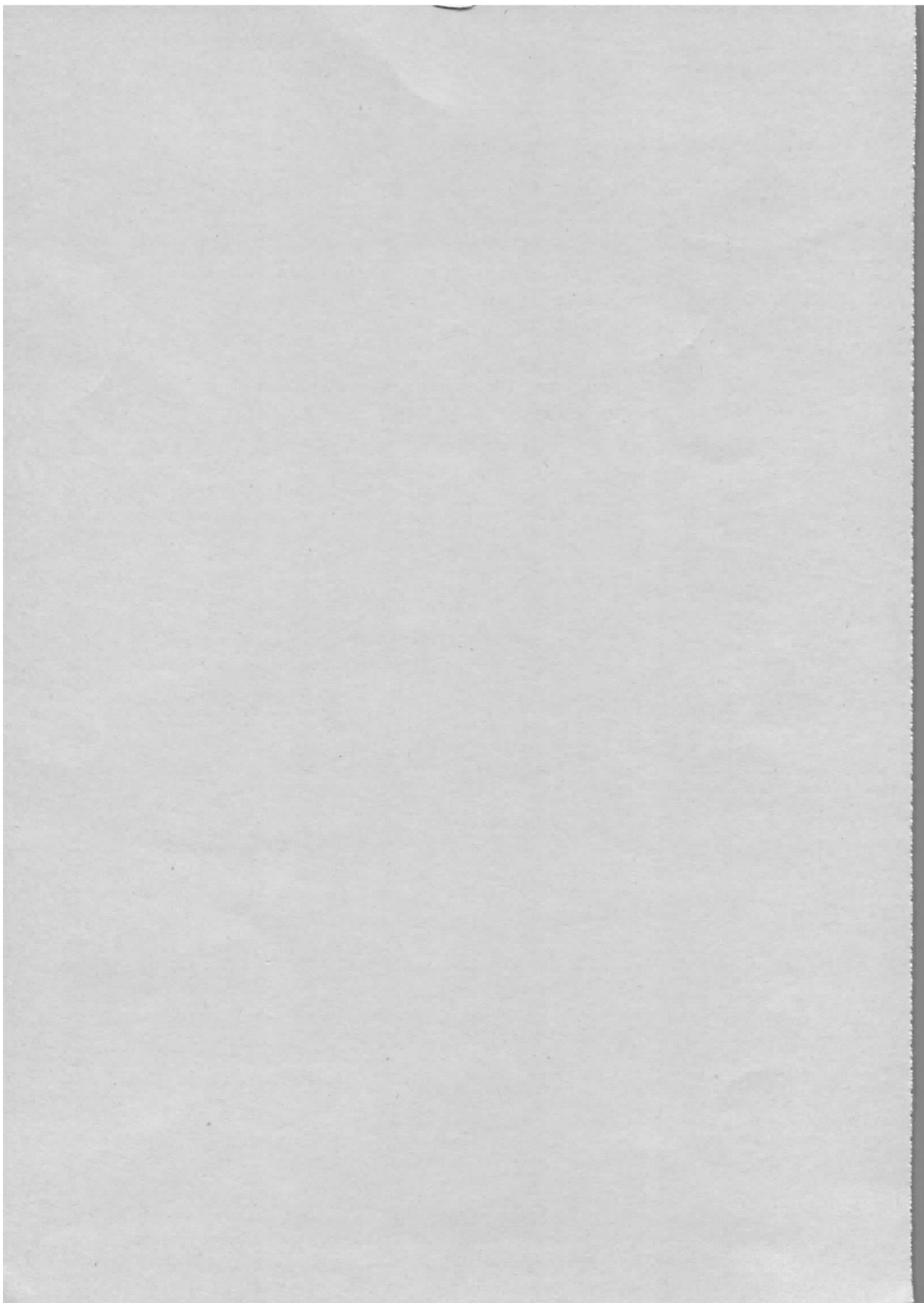


Interner Bericht
DESY H3/72-1
November 1972

Schmalbandiges Feedback am Synchrotron

von

N. Lehnart
D. Renken
U. Weineck
A. Zolfaghari



1. Einleitung

Überlegungen über Instabilitäten an Speicherringen^{1,2)} zeigen, daß der Strahl kohärente Schwingungen infolge der Wechselwirkung mit der Umgebung, z.B. der Vakuumkammer, durchführen kann. Diese Schwingungen können gedämpft oder entdämpft sein und treten in zahlreichen Modes, abhängig von der Bunchzahl, auf. Aus Frascati und SPEAR werden die ersten Erfolge bei der Bekämpfung von radialen Instabilitäten über ein schnelles Gegenkopplungssystem gemeldet. Auch für DORIS ist die Dämpfung dieser Instabilitäten von Interesse.

Studienhalber ist von uns ein Experiment am Synchrotron zur Dämpfung von Betatronschwingungen (barycentrischer Mode³⁾) durchgeführt worden. Beschränkt man sich bei diesen Untersuchungen auf diesen Schwingungstyp, dann kann anstelle eines breitbandigen Rückkopplungssystems, wie es später im Speicherring geplant ist, ein schmalbandiges System benutzt werden.

Als Strahl-Beeinflussungsstrecke bietet sich hier ein Resonanzkreis an, an dem hohe elektrische Feldstärken mit verhältnismäßig geringer HF-Leistung aufgebaut werden.

Das Ziel dieses Experimentes⁴⁾ war herauszufinden, ob das theoretische Modell annähernd Voraussagen über so wichtige Parameter, wie minimale Verstärkung der Rückkoppelschleife, Empfindlichkeit des Pick-up-Systems und Phase der rückgekoppelten Spannung an den Beeinflussungsplatten gestattet.

2. Aufbau der experimentellen Anordnung

Der prinzipielle Aufbau der Rückkoppelschleife besteht aus einem Pick-up-System, Verstärker und Beeinflussungsstrecke.

Als Pick-up-Station wurde eine im Synchrotron eingebaute Lagestation⁵⁾ benutzt, deren Empfindlichkeit experimentell ermittelt wurde zu:

$$E_x = \frac{1 \text{ V}}{I_{\text{voll}} \cdot 2,5 \text{ cm}}$$

wobei

I_{voll} - der Vollausschlag des Meßinstrumentes
ist. (Meßbereich)

Dann ergibt sich am Ausgang des Pick-up-Systems ein Ablagesignal

$$U_x = E_x \cdot i \cdot x$$

mit i - mittlerer Strom in der Maschine

x - Auslenkung der Teilchenbahn von der Sollbahn.

Als Vorverstärker wird ein Breitbandverstärker mit einer Verstärkung von 32 dB und einer Ausgangsleistung von 1 W benutzt. Mit dem Phasenschieber (Abb.1) wird die optimale Phase der rückgekoppelten Spannung eingestellt. Bezogen auf das Pick-up-Signal, ist die Phase um 90° verschoben. Das Filter hat zwei Aufgaben zu erfüllen:

- 1) Synchrotronschwingungen, die im Frequenzbereich von 20 bis 100 KHz liegen, vom Beeinflussungssystem fernzuhalten,
- 2) die 1 MHz-Komponente des Strahles, die durch die Einschubblücke entsteht, zu unterdrücken.

Anderenfalls würde der Endverstärker wegen der hohen Amplitude dieser Komponente in die Sättigung gesteuert.

Der Endverstärker ist ein Breitbandverstärker mit einer Verstärkung von 48 dB und maximaler Ausgangsleistung von 50 W.

Das passive Dämpfungsglied dient lediglich zur Änderung der Schleifenverstärkung.

Mit Hilfe des Gates kann das Feedback-System zu definierten Zeitpunkten des Beschleunigungszyklus eingeschaltet werden.

Das Strahlbeeinflussungssystem besteht aus einem Plattenpaar von 27 cm Länge und einem Plattenabstand von 10 cm. Die Platten sind in einem Schwingkreis hoher Güte $Q \approx 100$ und Shuntimpedanz von $R \approx 700 \text{ K}\Omega$ integriert. Die Zeitkonstante ergibt sich aus

$$\tau = \frac{Q}{2\omega_c} \quad \text{zu} \quad \tau = 32 \text{ } \mu\text{sec}$$

mit $\omega_c = 2 \pi f_c$ $f_c = 274 \text{ KHz}$ - Resonanzfrequenz

Während der Messung war es möglich, mit dem Drehkondensator C_1 (Abb.1) den Koppelfaktor an der Schnittstelle Endverstärker - Schwingkreis und die Resonanzfrequenz zu variieren, und damit änderte sich auch die Amplitude und Phase der auf den Strahl rückgekoppelten Spannung.

3. Messungen am Feedback-System

Während des Tests des Feedbacksystems am Strahl wurden aus dem Linac II jeweils ca. 10 mA mittleren Strahlstroms in das Synchrotron injiziert und auf ca. 2 GeV hochbeschleunigt.

Der Q-Wert der horizontalen Betatronschwingungen betrug ca. 6,28 und änderte sich leicht während des Beschleunigungszyklus; bei Einschub (500 MeV) konnten Betatronschwingungen von 281 KHz und bei 2 GeV von 274 KHz gemessen werden.

Den horizontalen Betatronschwingungen galt während der Untersuchungen unser Interesse, da in dieser Ebene die Schwingungen praktisch keine Dämpfung am Synchrotron aufweisen. Dieses konnte auch experimentell geprüft und gemessen werden. Erst bei höheren mittleren Strömen > 40 mA und starken Anregungen zeigte sich, daß kleine Dämpfungszeitkonstanten größer als 100 μ sec zu messen waren. Dieser Effekt ist wahrscheinlich auf die Landaudämpfung zurückzuführen.

Die Anregung von Betatronschwingungen erfolgte während des Beschleunigungszyklus über die im Synchrotron installierte Q-Meßmaschine zu einem vom Trigger vorherbestimmten Zeitpunkt bzw. über die Injektion von Linac II.

Die im Laufe der Messung am Feedbacksystem aufgenommenen Bilder (Abb.2 bis Abb.5) veranschaulichen den optimalen Zustand der Rückkoppelschleife, bezogen auf die Phase der rückgekoppelten Spannung. An dieser Stelle ist zu erwähnen, daß die optimale Phasenlage allerdings nicht während des gesamten Beschleunigungszyklus optimal sein konnte, da die Bandbreite des Schwingkreises (2,6 KHz bei ± 3 dB) gering gegenüber der Änderung der Betatronschwingung (8 KHz) während des Beschleunigungszyklus war. (s.o.)

Die Abbildungen von 2a bis 5a zeigen die Betatronschwingungen an der Pick-up-Station ohne eingeschaltetes Feedback-System. Die Aufnahmen sind hinter dem Filter (Abb.1) gemacht worden und beinhalten nicht mehr die Synchrotronschwingungen und die 1 MHz-Komponente. So ist in Abb.2a die Betatronschwingung zu sehen, die ca. 2,5 ms nach der Injektion über die Q-Meßmaschine angeregt worden ist. Die Anregungsdauer beträgt ca. 400 μ sec, die Zeitkonstante des Anstiegs der Betatronschwingung ca. 100 μ sec. Die natürliche Dämpfungszeitkonstante der Schwingung ist sehr groß (> 20 msec), daß in den ersten Millisekunden nach erfolgter Störung die Schwingungsamplitude fast konstant bleibt.

Der entsprechende Verlauf des Pick-up-Signals mit eingeschaltetem Feedback ist in Abb.2b, obere Spur, zu sehen. Hieraus erkennt man, daß sich die Amplitude der Schwingung um den Faktor 5 verringert hat und der Schwingungsvorgang bereits nach 1.2 msec abgeklungen ist. Die untere Spur des Bildes zeigt den Verlauf des Signals an den Beeinflussungsplatten.

Die Abb.3a und Abb.3b unterscheiden sich von den Abb.2a und Abb.2b durch eine reduzierte Schleifenverstärkung um 10 dB, die Abb.4a, Abb.4b um 20 dB. Offenbar ist der Regelfaktor jetzt geringer als im Fall der Abb.2, und die Abfallzeitkonstante wird größer. In Abb. 4b ist die Verstärkung schon so gering, daß die Schwingungen nicht mehr vollständig ausgeregelt werden.

Im Gegensatz zu den oberen Abbildungen erfolgt in Abb.5a und Abb.5b die Triggerung des Gates zum Zeitpunkt der Injektion. In Abb.5a erkennt man die starken Betatronschwingungen zum Zeitpunkt der Injektion und die darauffolgende gedämpfte Schwingung. Die Anregung mit der Q-Meßmaschine erfolgt nach 2,5 ms. Der Einfluß des Feedback-Systems ist entsprechend in Abb.5b veranschaulicht worden.

4. Vergleich der theoretischen Vorhersagen mit den Messungen

Ausgangspunkt für den hier angestellten Vergleich soll die Bewegungsgleichung der Betatronschwingung²⁾ für einen Bunch sein:

$$\ddot{x} - \frac{2}{\tau} \dot{x} + \omega_v^2 x = K \cdot x(t-t_0) \quad *$$

x - Ablage des Strahls

τ - Zeitkonstante der Anregung

ω_v - Betatronfrequenz

$x(t-t_0)$ - Ablage zum Zeitpunkt $t-t_0$

Die Konstante K des Anregungsterms ist:

$$K = g \cdot \frac{U_0 e \omega_0 \ell \cdot c}{b^2 \cdot E \cdot 2\pi}$$

g - Schleifenverstärkung

b - Plattenabstand

$\frac{x(t-t_0)}{b}$ U_0 - Pick-up-Signal an einem Plattenpaar

e - Elementarladung

E - Energie des Teilchens

ω_0 - Umlauffrequenz

ℓ - Länge der Platten

c - Lichtgeschwindigkeit

Da die Anregung in unserem Fall sehr schnell ist (ca. 100 μ sec) und die Zeitkonstante des Beeinflussungssystems in der gleichen Größenordnung liegt, soll hier zum Vergleich die Abfallzeitkonstante herangezogen werden, zumal die Amplitude nach erfolgter Anregung annähernd konstant bleibt. Da wir in unserem Experiment kein Plattensystem²⁾ als Pick-up Station benutzen sondern eine induktive Lagestation⁵⁾, muß in der Bewegungsgleichung* der Term

$$\frac{x(t-t_0)}{b} \cdot U_0 \quad \text{durch} \quad E_x \cdot i \cdot x$$

ersetzt werden.

$$\ddot{x} + \omega_v^2 x = g \cdot \frac{E_x \cdot i x(t-\Delta t) e \omega_0 c \ell}{2\pi \cdot b \cdot E}$$

Die Lösung des Systems ergibt eine Dämpfungszeitkonstante :

$$\tau^* = \frac{2\omega_v}{K_1 \cdot \sin \phi}$$

mit

$$K_1 = g \cdot \frac{E_x \cdot i \omega_0 \ell c}{2\pi b \cdot E}$$

und einen Verstärkungsfaktor von

$$g = \frac{2 \omega b \cdot E 2\pi}{E_x \cdot i \omega_0 \ell \cdot c \cdot \tau^* \sin \phi}$$

ϕ ist die Phasenverschiebung zwischen dem Pick-up-Signal und dem Signal der Beeinflussungsstrecke.

Als Beispiel wird der Fall der Abb.5a und Abb. 5b herangezogen. Die Abfallzeitkonstante kann hier aus dem Bild zu ca. 200 μ sec entnommen werden. Die Schleifenverstärkung des offenen Kreises ist gemessen worden und lag bei 55000. Der Strahlstrom betrug 10 mA und wurde im Bereich $I_{\text{voll}} = 30$ mA gemessen.

Setzt man jetzt die experimentell gewonnene Dämpfungszeitkonstante $\tau^* = 200$ μ sec in die obige Gleichung für die Verstärkung ein, dann erhält man einen Wert für g von ca. $62 \cdot 10^3$. Dieser Wert stimmt sehr gut mit dem gemessenen überein. Dieses Verfahren kann auch an den anderen Bildern bestätigt werden. Die Abweichung der gemessenen und theoretischen Werte liegt im Rahmen vertretbarer Meßgenauigkeiten, wie Tabelle 1 zeigt. Da die Messungen stets mit optimaler Phase der Rückkoppelschleife durchgeführt werden, ist auch für die Berechnungen $\sin \phi = 1$ gesetzt worden.

Abb.	U Pick-up	U Platten	g gemessen	g theoretisch
2	20 mV	750	37 500	40 000
3	40 mV	450	12 500	20 000
4	46 mV	400	8 700	13 000
5	15 mV	750	55 000	62 000

Tabelle I .

Abbildungen

- Abb.1: Blockdiagramm des Rückkopplungssystem
- Abb.2a: Die obere Spur zeigt die mit der Q-Meßmaschine angeregten Betatronschwingungen, gemessen hinter dem Filter
- Abb.2b: Die Feedback-Schleife wird mit der Schwingungsanregung eingeschaltet.
Die obere Spur zeigt die durch das Feedback gedämpften Betatronschwingungen
Die untere Spur zeigt das auf den Feedback-Platten um den Faktor 25000 geschwächte Signal.
- Abb.3: Wie Abb.2, nur wurde das Feedback-Signal um 10 dB geschwächt.
- Abb.4: Wie Abb.2 aber Schwächung des Feedbacksignals um um 20 dB
- Abb.5a: Die obere Spur zeigt Betatronschwingungen, die von der Injektion und von der Q-Meßmaschine angeregt werden (gemessen hinter dem Filter)
- Abb.5b: Das Feedback wird gleichzeitig mit dem Einschub eingeschaltet, d.h. es werden sowohl die Injektions- als auch die Q-Anregung gedämpft.
Das Feedback-Signal hat - wie Abb.2 - die volle Schleifenverstärkung ($g = 55\ 000$).

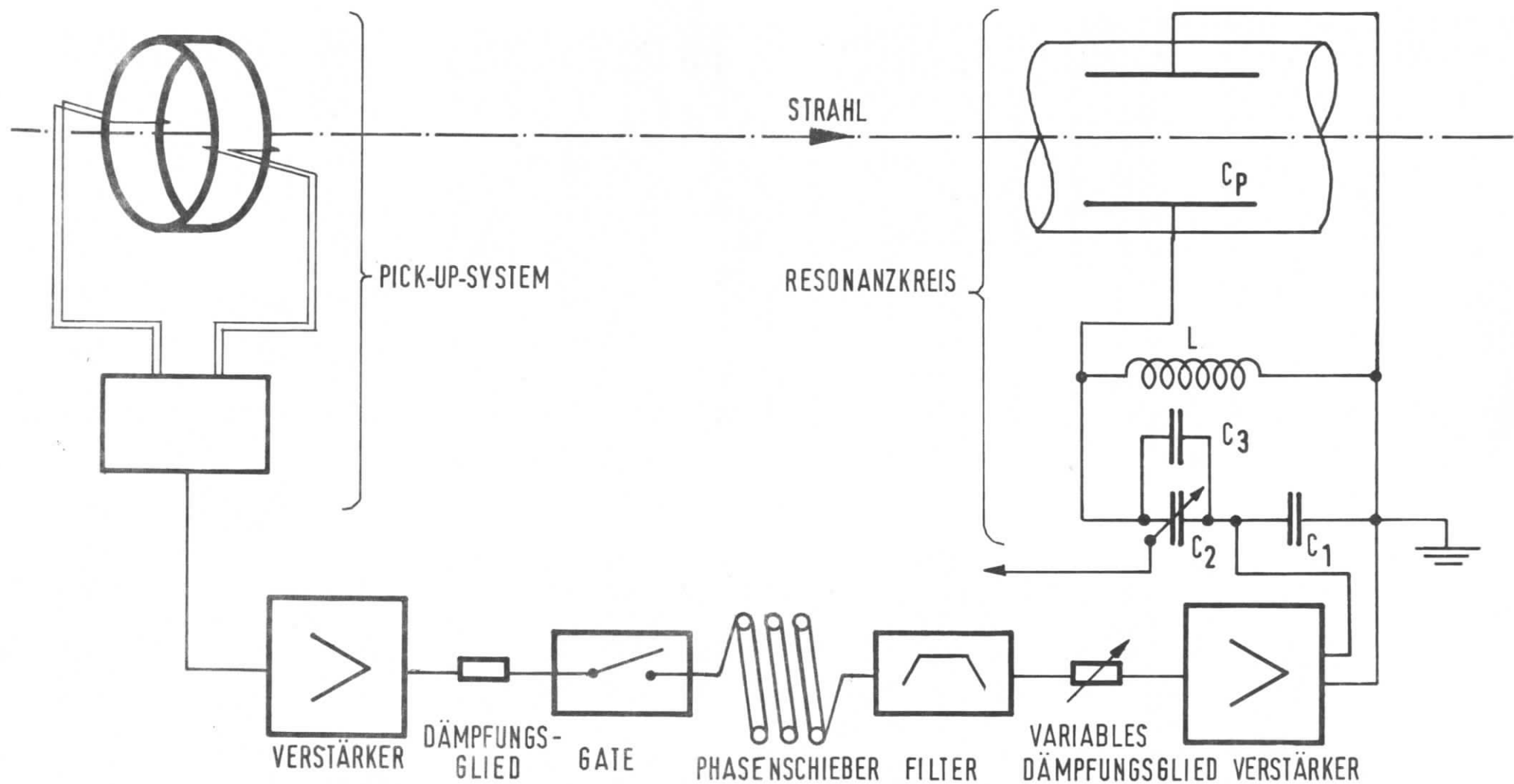
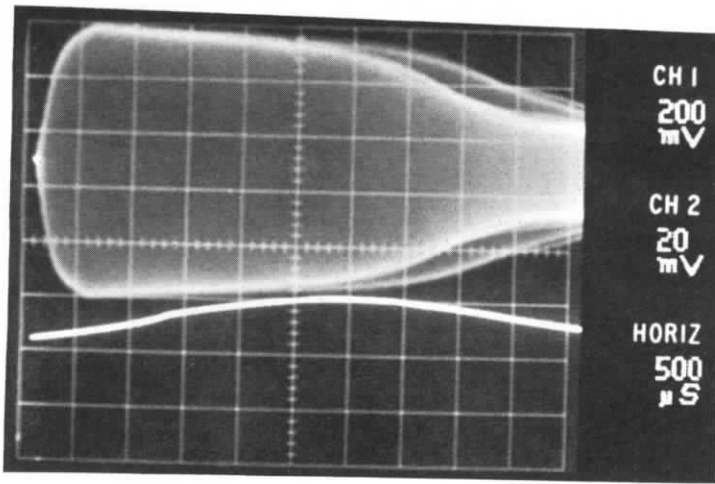
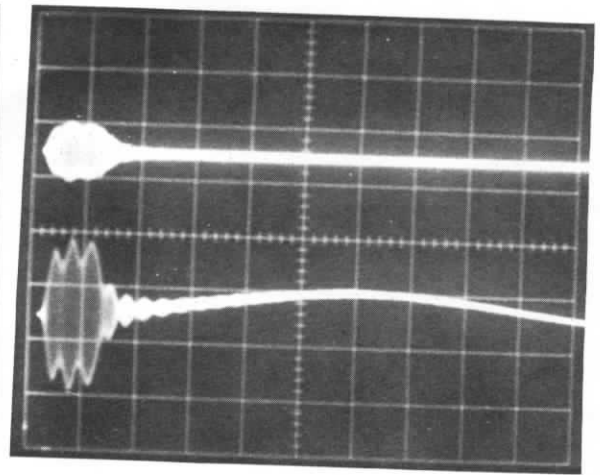


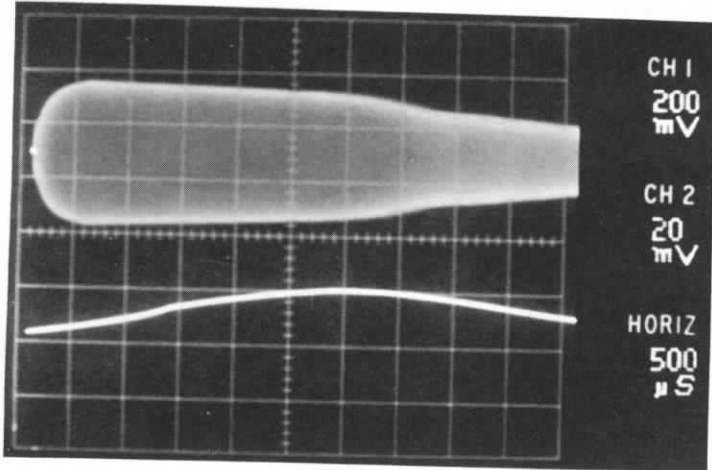
Abb.1 BLOCKDIAGRAMM DES FEEDBACK-SYSTEMS



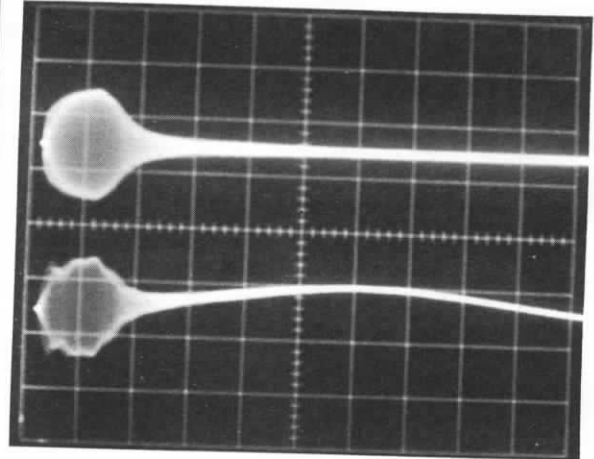
2 a



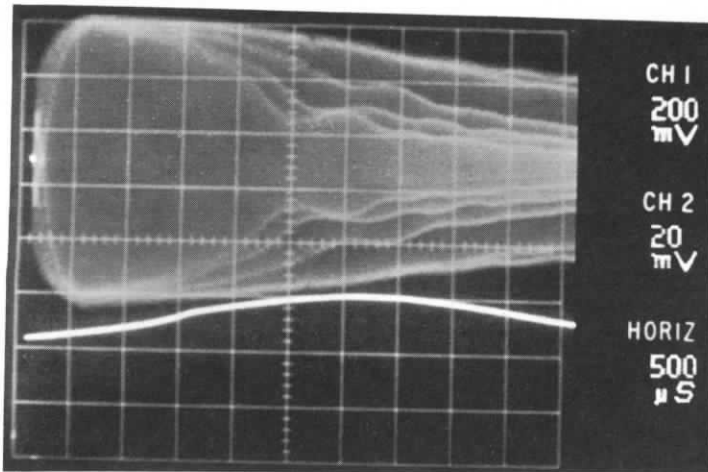
2 b



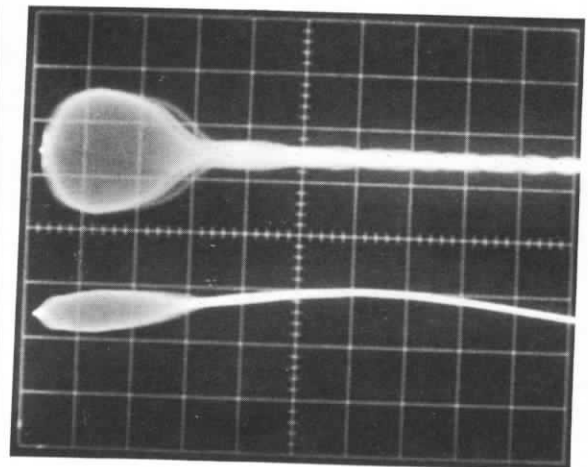
3 a



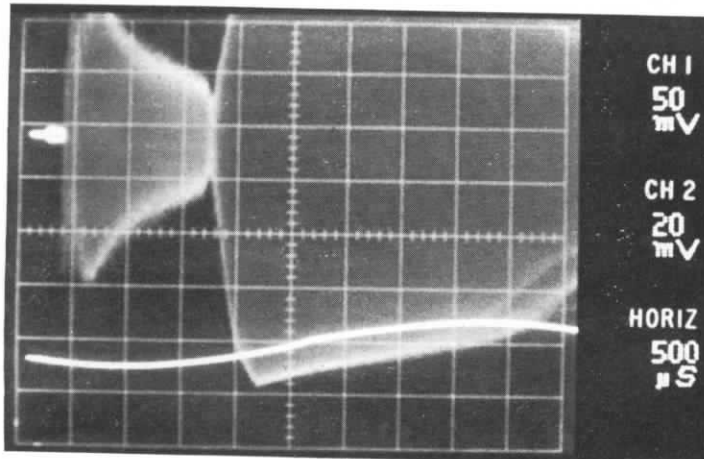
3 b



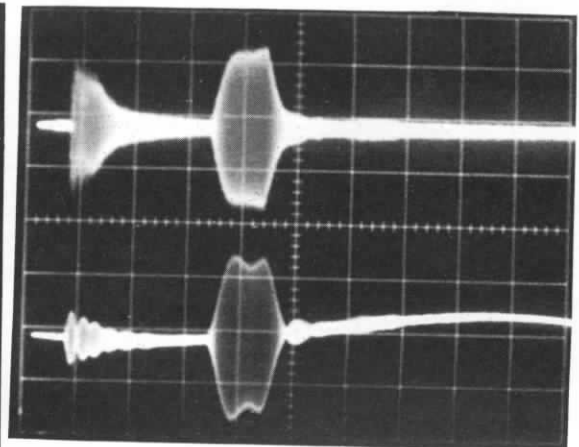
4 a



4 b



5 a



5 b

Literatur

1. B.Richter, SPEAR-25, March 1970
2. R.D.Kohaupt, Technische Notiz H1-1, 14.April 1971
3. Littauer, Sands, Frascati, Memorandum Interno, 17.5.1968
4. Dieses Experiment ist im Rahmen der Diplomarbeit von Herrn U.Weineck durchgeführt worden.
5. W.Kriens und W.Radloff, Interner Bericht DESY - S1 - 68/1

Unser besonderer Dank gilt den Mitarbeitern des Synchrotrons für ihre Hilfe beim Einbau der Apparatur und für die Bereitstellung des Strahles und von Meßgeräten.