

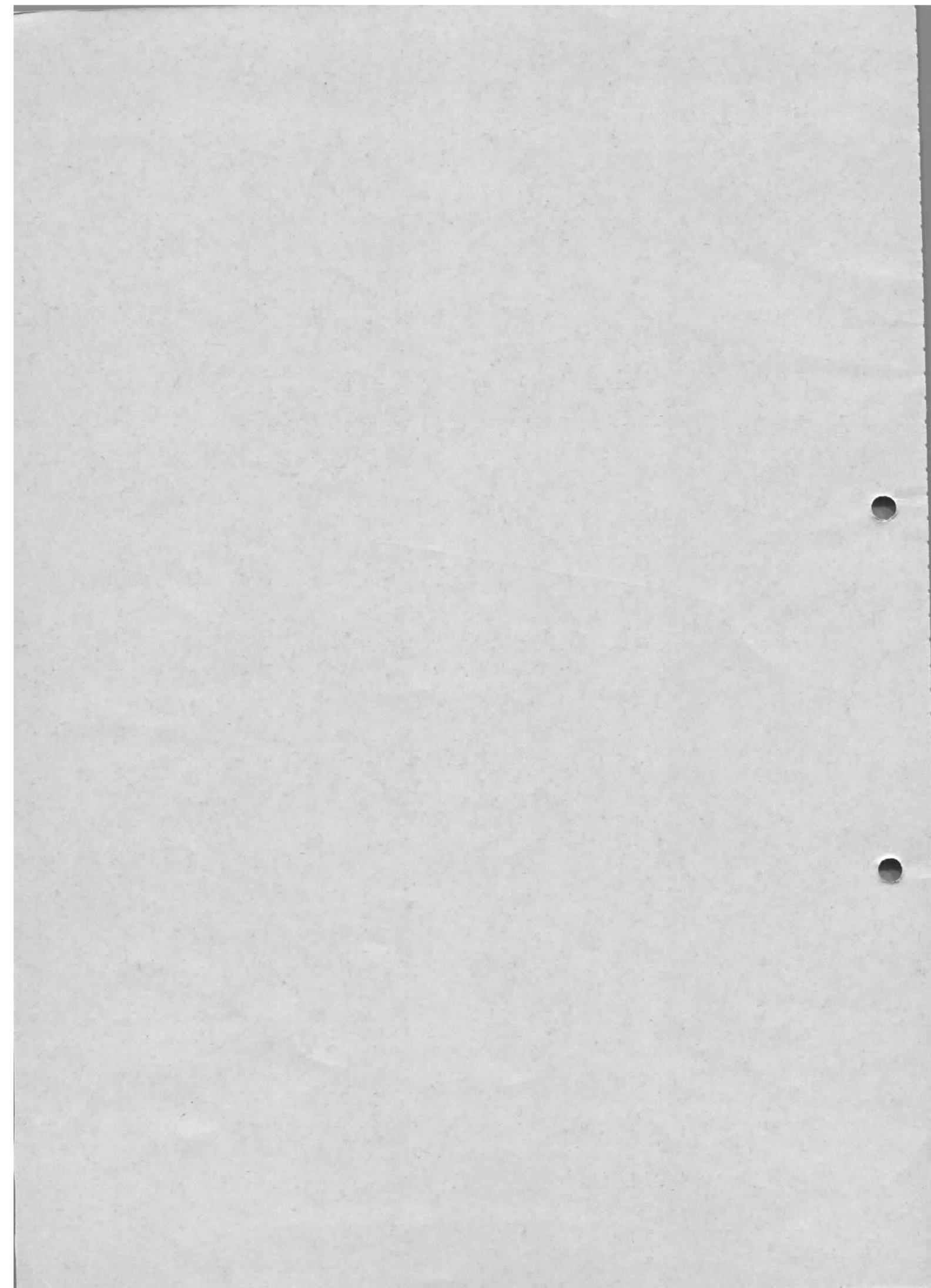
Interner Bericht
DESY H2-75/1
Februar 1975

Er. ex.
DESY-Bibliothek
8. JULI 1975

Zusammenfassung der bisherigen Ergebnisse
der longitudinalen Bunchstrukturmessung in DORIS

von

R. Fischer und R. Rossmanith



1. Einleitung

DORIS ist der einzige große e^-e^+ Speicherring, bei dem die beiden Strahlen unter einem vertikalen Kreuzungswinkel aufeinandertreffen. Für die Größe der Luminosität sind daher nicht nur die transversalen Dimensionen des Strahls entscheidend, sondern auch die longitudinale Ausdehnung. Die meßtechnische Erfassung dieser Größe ist äußerst schwierig, da die erwartete Bunchlänge (Standardabweichung) zwischen einigen 10 und 100 psec je nach Energie und Umfangsspannung liegt (100 Pikosekunden entsprechen ungefähr 3 cm). Auf elektrischem Wege ist eine Messung der Bunchstruktur nicht möglich, da die elektromagnetischen Pick-up-Systeme und die anschließenden Kabel nicht breitbandig genug sind, um Strukturen von 10 psec noch deutlich aufzulösen. Man kann jedoch das vom Strahl emittierte Synchrotronlicht in den Bögen der Maschine dazu verwenden, die Bunchstruktur zu analysieren. Bei hochrelativistischen Teilchen besitzt das Synchrotronlicht innerhalb eines sehr kleinen Fehlers (im vorliegenden Fall wesentlich geringer als eine Pikosekunde) die gleiche Zeitstruktur wie der Strahl selbst. Das Synchrotronlicht wird über einen Vakuumspiegel und über mehrere Luftspiegel in einen Meßraum oberhalb des Ringtunnels geleitet (e^+ und e^- getrennte Strahlwege).

Zeitauflösungen von 10 psec können auch optisch nicht mit konventionellen Meßmethoden erreicht werden. Vor einigen Jahren wurde daher bei DESY begonnen, neuartige Methoden zu entwickeln, um die Zeitstruktur von Lichtpulsen mit einer Auflösung von 10 Pikosekunden zu messen.

Als Meßinstrument dient ein modenverkoppelter Laser ¹⁾, der einen linear polarisierten Licht-Pulszug von mehreren hundert Nanosekunden Länge und einem genau definierten Pulsabstand (=optische Länge des Laserresonators) und einer Pulsbreite von etwa 5 Pikosekunden emittiert. Der verwendete Nd-Glas-Laser emittiert im nahen Infrarot (1.06 μ m). Dieser Pulszug gelangt in eine mit Schwefelkohlenstoff gefüllte Kerrzelle, in der das elektrische Feld des linear polarisierten Laserpulses eine doppelbrechende Zone erzeugt, die nach Durchgang des Laserpulses innerhalb von 2 bis 3 psec zerfällt ²⁾. (Abb.1). Das Synchrotronlicht fällt über einen Polarisator auf die Kerrzelle und dann auf einen weiteren um 90° verdrehten Polarisator. Da der Bunch und damit das von ihm emittierte Licht länger ist als die Öffnungszeit der Kerrzelle (ca. 10 psec), wird nur ein Teil des Bunchlichtes durchgelassen. Durch entsprechende Wahl der Pulswiederholfrequenz des Lasers kann man erreichen, daß, falls ein Laserpuls mit einem Bunch

zusammenfällt, erst nach 8 Bunchen wieder ein Zusammentreffen von Laserpuls und Bunch möglich ist. Auf diese Weise mißt man die Bunchstruktur ähnlich wie bei den bekannten Sampling-Oszillographen. Der Detektor kann relativ langsam sein, ohne daß die Auflösung beeinflußt wird.

Der Laserabstand kann durch Variieren der optischen Resonatorlänge verändert und somit den gegebenen Umständen angepaßt werden.

Bei dem Samplingverfahren dieser Art ist es notwendig, die Pulswiederhol-
frequenz genau zu kennen. Die Messung der Pulswiederholfrequenz ist in Abb.2
schematisch dargestellt. Ein Teil des infraroten Laserlichtes wird in einem
Kaliumdihydrogen-Kristall (KDP) in grünes Licht umgewandelt und fällt über eine
Umwegstrecke in die Kerrzelle. Auf einem Präzisionsschlitten wird der Umweg
solange vergrößert, bis der nächste Puls in der Kerrzelle wieder auf derselben
Stelle erscheint. Aus der Verschiebung des Schlittens kann der Pulsabstand
ermittelt werden. Die Meßunsicherheit beträgt ca. 0.6 psec. Für die Absolut-
messung der Bunchlänge ergibt sich ein größerer Fehler, da nur jeder 5. Laser-
puls einen Bunch trifft. Gehören zu einer Bunchmessung 5 Treffer, so beträgt
der Meßfehler 15 psec. Genauere Messungen in naher Zukunft sollen diesen Fehler
weiter reduzieren. Der statistische Fehler (Schwankungen in der Pulswiederhol-
zeit ist (vermutlich wesentlich) kleiner als 2 psec und spielt daher keine
Rolle.

2. Longitudinales Strahlverhalten ohne Entkoppelsender

a) Phasenschwingungen

Die Ergebnisse der ersten Messungen sind in Abb.3 dargestellt. Das mit Hilfe
des Lasers erhaltene Photo wurde auf Zeichenpapier übertragen, um es besser
auswerten zu können. Samplingaufnahmen geben nur dann ein klares Bild, wenn alle
Bunche gleiche Füllung und Struktur aufweisen. Deshalb ist es notwendig, bei
der Auswertung die Homogenität der Füllung zu berücksichtigen. Die dazugehörige
Ringfüllung (e^- Ring, 1991 MeV) war ziemlich inhomogen (Abb.4). Die Aufnahme
wurde bei 80 mA mittlerem gespeicherten Strom gemacht. Die Folgefrequenz der
Laserpulse betrug 3.1947 nsec. Die Treffer liegen 16 nsec auseinander (jeder
achte Bunch wird zur Messung herangezogen). Die theoretisch ermittelte Bunch-
länge beträgt $\sigma_{\ell} = 50 \text{ psec}^3$. Aus Abb.3 folgt eine Bunchlänge von 57 psec.
Somit ist die Übereinstimmung zwischen Rechnung und Messung relativ gut. Bei
weiteren Messungen lag die Bunchlänge bei 60 psec, vereinzelt auch bei 70 psec.

Im allgemeinen ist die gemessene Bunchlänge größer als die gerechnete. Interessant ist der Vergleich zwischen den Messungen am Synchrotron⁴⁾ und den Messungen an DORIS. Die Messungen am Synchrotron zeigen wesentlich klarere Strukturen (Abb.15) (klarer auch als Abb.3, bedingt durch die bessere Homogenität der Füllung im Synchrotron), obwohl die Stromstärken geringer sind (Aufnahme Abb.15: 8 mA) und daher Quantenstatistik eine entscheidendere Rolle spielt als bei DORIS. Die Ursache für diesen Unterschied kann vor allem in longitudinalen Schwingungen höherer Ordnung liegen. Der Grundmode der Synchrotronschwingung, deren Frequenz zwischen 30 und 40 kHz liegt, kann die Messung nicht beeinflussen, da die Schwingungsdauer groß gegenüber der Meßzeit von ca. $8 \times 16 \text{ nsec} = 128 \text{ nsec}$ ist.

Tatsächlich wurde mit einem Spektrumanalysator von einer bestimmten Stromstärke an der Einsatz von starken longitudinalen Schwingungen gemessen, die weite Teile des Spektrums überdeckten. Die Spektrumanalysator ist an eine breitbandige Antenne angeschlossen, die sich im Vakuum in unmittelbarer Nähe des Strahls befindet. Die Schwingungen traten sowohl im e^- als auch im e^+ -Strahl auf. Die Schwelle für die Instabilitäten lag zwischen 20 und 80 mA. In den nächsten Schichten versuchten wir die longitudinalen Schwingungen besser zu verstehen und führten Messungen zwischen 100 und 250 mA Strahlstrom durch.

Tatsächlich zeigte sich eine umso größere Verformung der gaußförmigen Einhüllenden, je weiter die Stromstärke von der Schwelle entfernt ist. In Abb.5 ist eine solche Aufnahme (e^+ Ring, 230 mA, 1,5 GeV) dargestellt. Die Bunchlänge wurde aus Aufnahmen mit niedrigem Strom ermittelt und in die Zeichnung eingetragen. Nun kann Abb.5 folgendermaßen interpretiert werden: Die Bunche schwingen um ihre longitudinale Soll-Position. Der Laserpuls hat jedoch eine feste Wiederholfrequenz. Es wird somit ein anderer Teil des Lichtbunches gemessen als bei einem longitudinal nicht schwingendem Strahl. Mit Hilfe dieser Überlegung kann man aus Abb.5 die momentane Ablage des Bunches von seiner Soll-lage herauslesen. Die so ermittelten Ablagen sind in Abb.6 aufgetragen und es wurde untersucht, ob es möglich ist, die Ablagen durch eine Sinuskurve miteinander zu verbinden. Man erkennt, daß es tatsächlich möglich ist, die Ablagen

durch eine Sinusschwingung zu verbinden, wenn auch der Absolutwert der Amplituden nicht immer dem erwarteten Wert entspricht. Erstaunlicherweise findet man, daß die Sinusschwingung eine Frequenz von 85 MHz besitzt. Aus früheren Messungen ist bekannt, daß 1585 MHz eine parasitäre Resonanzfrequenz der Cavities ist. Wenn die Anregung der Instabilität über eine 1585 MHz Komponente erfolgt, so ist es leicht einsichtig, daß der Strahl nur eine 85 MHz Anregung erfährt: Der zeitabhängige Term der Anregung kann folgendermaßen umgeformt werden:

$$\begin{aligned}\sin(\omega_{1585}t) &= \sin(\omega_{1500}t + \omega_{85}t) = \\ &= \sin\omega_{1500}t \cos\omega_{85}t + \cos\omega_{1500}t \sin\omega_{85}t\end{aligned}$$

1500 MHz ist die Drittharmonische der Bunchfolgefrequenz. $\sin(\omega_{1500}t)$ und $\cos(\omega_{1500}t)$ besitzen bei Auftreten eines Bunches immer denselben Wert, sind also konstant. Es gilt daher für die auf einen Bunch wirksame Anregung

$$\begin{aligned}(\sin(\omega_{1585}t))_{\text{wirk}} &= A \sin\omega_{85}t + B \cos\omega_{85}t = \\ &= C \sin(\omega_{85}t + \phi)\end{aligned}$$

A, B, C ... konstante Größen

Die Amplitude der Schwingungen beträgt ca. 2 Standardabweichungen. Aber nicht alle Bilder lassen sich auf eine simple 85 MHz Struktur zurückführen. Manchmal treten Phasensprünge auf: Abb.7 (Aufnahme e⁻ Ring 82 mA).

Zusammenfassend kann somit gesagt werden: Longitudinale Schwingungen mit einer Amplitude von ca. 2 Standardabweichungen wurden gesehen. Es liegt der Verdacht nahe, daß die bekannte Resonanz bei 1585 MHz zumindest teilweise die Schwingungen verursacht. Eine letzte Sicherheit kann man jedoch nicht aus den Samplingaufnahmen gewinnen. Deshalb ist eine Apparatur in Vorbereitung, die speziell longitudinale Schwingungen analysieren kann. Sie soll im wesentlichen folgendermaßen arbeiten: (Abb.8) Der Polarisationsvektor des Synchrotronlichts wird mit einer Pockelszelle moduliert. Die Pockelszelle steht zwischen zwei gekreuzten Polarisatoren. Die Modulation der Pockelszelle erfolgt über die 500 MHz des Speicherrings. Die Transmission des Systems als Funktion der Zeit

ist in Abb.8 dargestellt. Kommen die Bunche zum Soll-Zeitpunkt, so ist die Transparenz der Pokelszelle bei entsprechender Phasenschieberstellung gering. Bei Abweichungen von der Sollage besitzt die Zelle eine Transparenz ± 0 . Am Photomultiplier erhält man ein Signal, das proportional dem Produkt aus Ablage und Stromstärke ist.

b. Bunchverlängerung

Trotz der angegebenen Schwierigkeiten, Bunchstrukturen wegen der Synchrotron-schwingungen zu identifizieren, kann man Aussagen über Bunchverlängerungen machen. Abb. 9 und Abb.10 zeigen Aufnahmen von zwei Bunchen bei verschiedenen Strömen (e^- Ring, 2 GeV). Trotz erheblicher Strukturzerstörung ist eine Bunchverlängerung bei hohem Strom gegenüber der Aufnahme bei niedrigem Strom zu erkennen. Die tatsächliche Größe der Verlängerung ist grob schätzbar. Durch Vergleich mehrerer Messungen folgt eine Abhängigkeit der Bunchlänge von der Stromstärke nach Abb.11 (Füllgrad 50%). Die Kurve zeigt einen deutlichen Knickpunkt bei etwa 1 mA/Bunch. Diese Messungen wurden alle an einem einzigen Tag durchgeführt und es ist fraglich, ob bei Wiederholung der Knickpunkt an derselben Stelle liegt. Zum Abschluß sei noch erwähnt, daß bei Aufnahmen, die während der Injektion gemacht wurden, die Störungen durch Synchrotron-schwingungen wesentlich geringer sind. Erst nach Abschalten der Injektion fließt die Struktur des Bunches auseinander.

3. Longitudinales Strahlverhalten mit Entkopplungssender

Um die longitudinalen Schwingungsamplituden zu verringern, wurde für die Experimenteschichten zusätzlich ein Sender in Betrieb genommen, dessen Frequenz um rund 1 MHz von dem ersten verschieden ist. Während der Hauptsender genau bei $480 f_0$ arbeitet, ist der Entkopplungssender auf $481 f_0$ eingestellt¹⁾ Die beiden Sender erzeugen eine Schwebung

$$U = U_1 \sin \omega_1 t + U_2 \sin \omega_2 t = A \sin (\omega_1 t + \phi)$$

$$A = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + 2U_1 U_2 \cos ((\omega_1 - \omega_2) t)}$$

$$\operatorname{tg} \phi = - \frac{U_2 \sin ((\omega_1 - \omega_2) t)}{U_1 + U_2 \cos ((\omega_1 - \omega_2) t)}$$

¹⁾ f_0 ist die Umlauffrequenz (1,04097 MHz)

Die dem Strahl angebotene Spannung ist amplitudenmoduliert. Auf diese Weise erreicht man, daß die Frequenzen der Synchrotronschwingungen von Bunch zu Bunch verschieden sind und daher eine Kopplung zwischen den Bunchen erschwert wird. Aber neben der Amplitudenmodulation gibt es entsprechend der obigen Formel auch eine Phasenmodulation. Das bedeutet, daß der Bunchabstand nicht konstant ist. Das erschwert die Auswertung der Bilder. Mit der Auswertung der Aufnahmen wurde erst begonnen, so daß noch keine endgültigen Zahlen vorliegen. Typische Aufnahmen sind in Abb. 12 und 13 dargestellt. Man erkennt sofort, daß der Entkopplungssender die Amplitude der longitudinalen Schwingungen drastisch reduziert (e^+ Ring, 170 mA, Verhältnis der Senderamplituden 1:1.7). Es ist aber auch deutlich sichtbar, daß die Bunchlänge keine konstante Größe über den gesamten Ring ist. Dabei muß berücksichtigt werden, daß die Aufnahmen Abb.12 und 13 noch die Verzerrung, bedingt durch die Phasenmodulation, aufweisen. In den Gebieten, in denen sich die beiden Spannungen subtrahieren, ist die Bunchlänge deutlich größer (Abb.13). Die dazugehörige Füllung ist in Abb.14 dargestellt.

L i t e r a t u r

- 1) Fischer, R., Rossmanith, R. - A proposed method of measuring synchrotron radiation pulses in the picosecond range. DESY Interner Bericht, H5-69/4
- 2) Fischer, R., Rossmanith, R. - A Kerr Camera with Ten Picoseconds Time Resolution - DESY-Bericht 72/14
- Opt.Comm.5(1972) 53
- 3) Neemann, H.,: Priv. Comm.
- 4) Fischer, R., Rossmanith, R. - Measurement of the Bunch Structure in the DESY-Synchrotron . - DESY-Bericht 72/49 .

Verzeichnis der Abbildungen:

- Abb.1: Prinzipielle Darstellung des Meßaufbaues
- Abb.2: Aufbau zur Vermessung der Laserpuls-Wiederholfrequenz
- Abb.3: Bunchstrukturmessung bei 2 GeV, 80 mA
- Abb.4: Ringfüllung bei Bild Abb.3
- Abb.5: Aufnahme e^+ -Ring, 230 mA, 1.5 GeV
- Abb.6: Interpretation von Abb.5
- Abb.7: Aufnahme und mögliche Interpretation
- Abb.8: Meßanordnung zur Beobachtung von höheren Synchrotronmodes
- Abb.9: Aufnahme e^- Ring, 2 GeV, 28 mA, "schlechte Füllung"
- Abb.10: Aufnahme e^- Ring, 2 GeV, 400 mA, 50% Füllung
- Abb.11: Bunchverlängerung vs. Strom bei 50% Füllung, 2 GeV
- Abb.12: Aufnahme mit Entkopplungssender, e^+ , 170 mA
- Abb.13: Aufnahme mit Entkopplungssender, e^+ , 170 mA
- Abb.14: Füllung zu Aufnahme Abb.12 und 13
- Abb.15: Bunchstrukturaufnahme vom Synchrotron

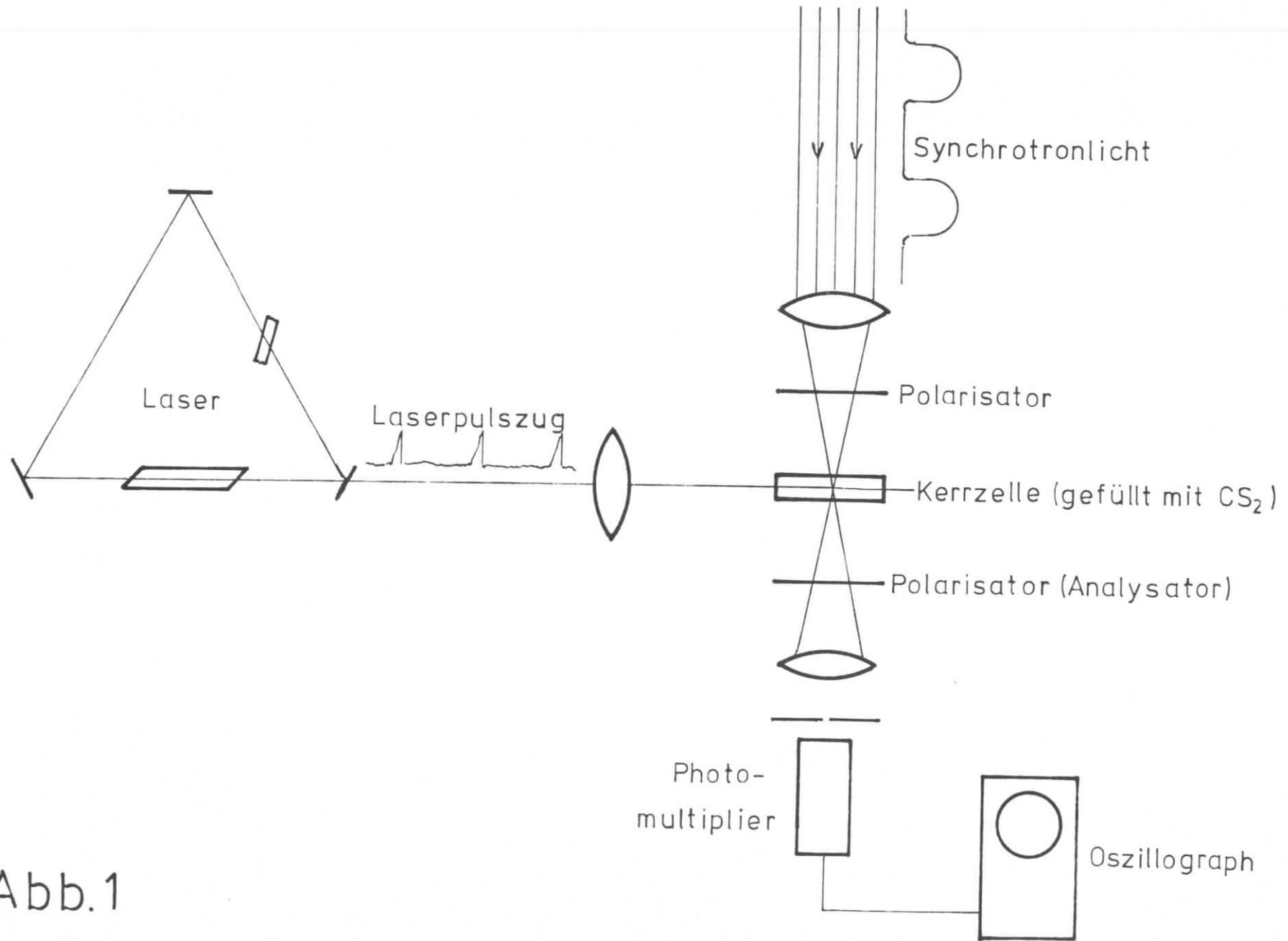


Abb.1

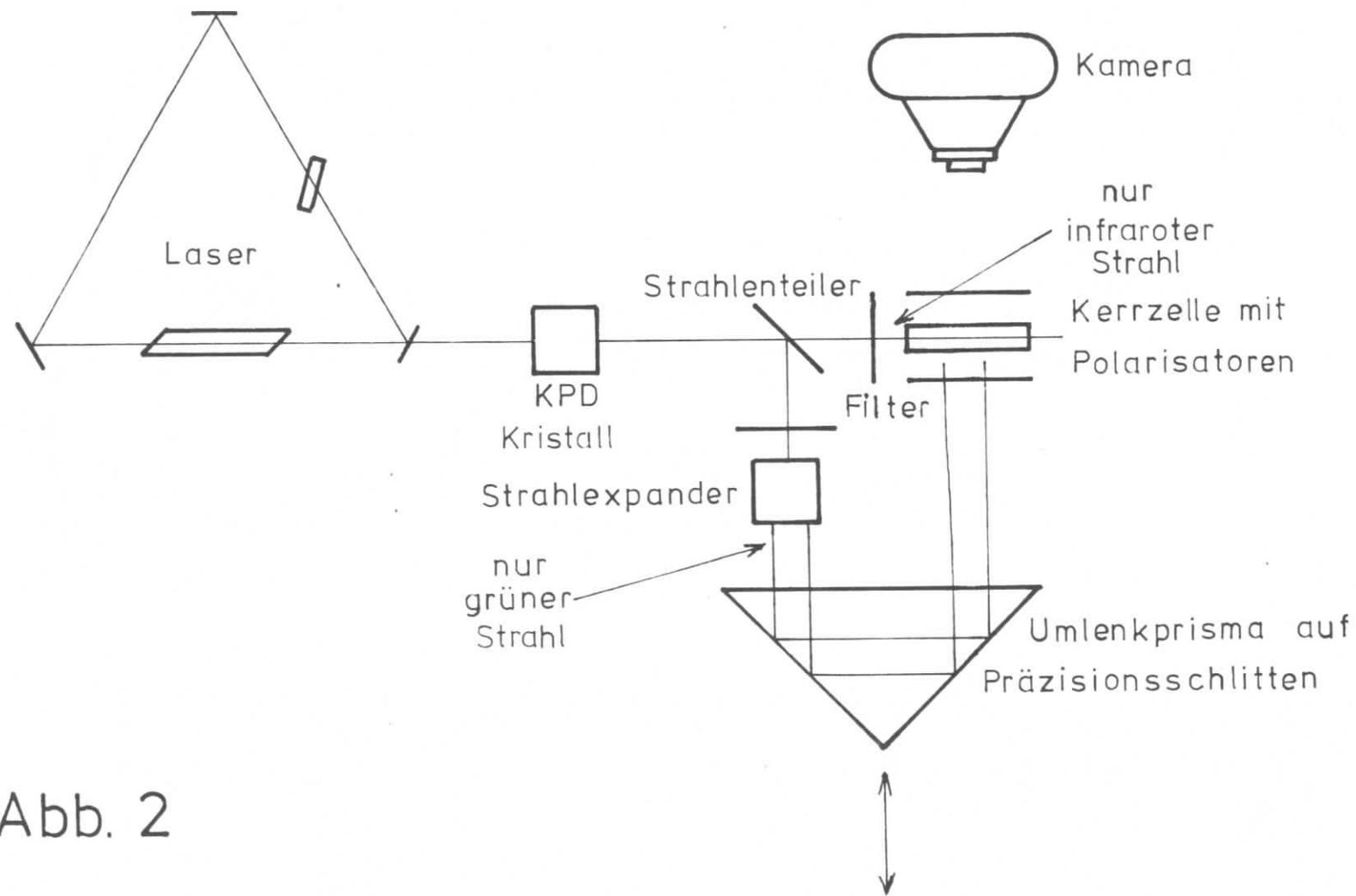


Abb. 2

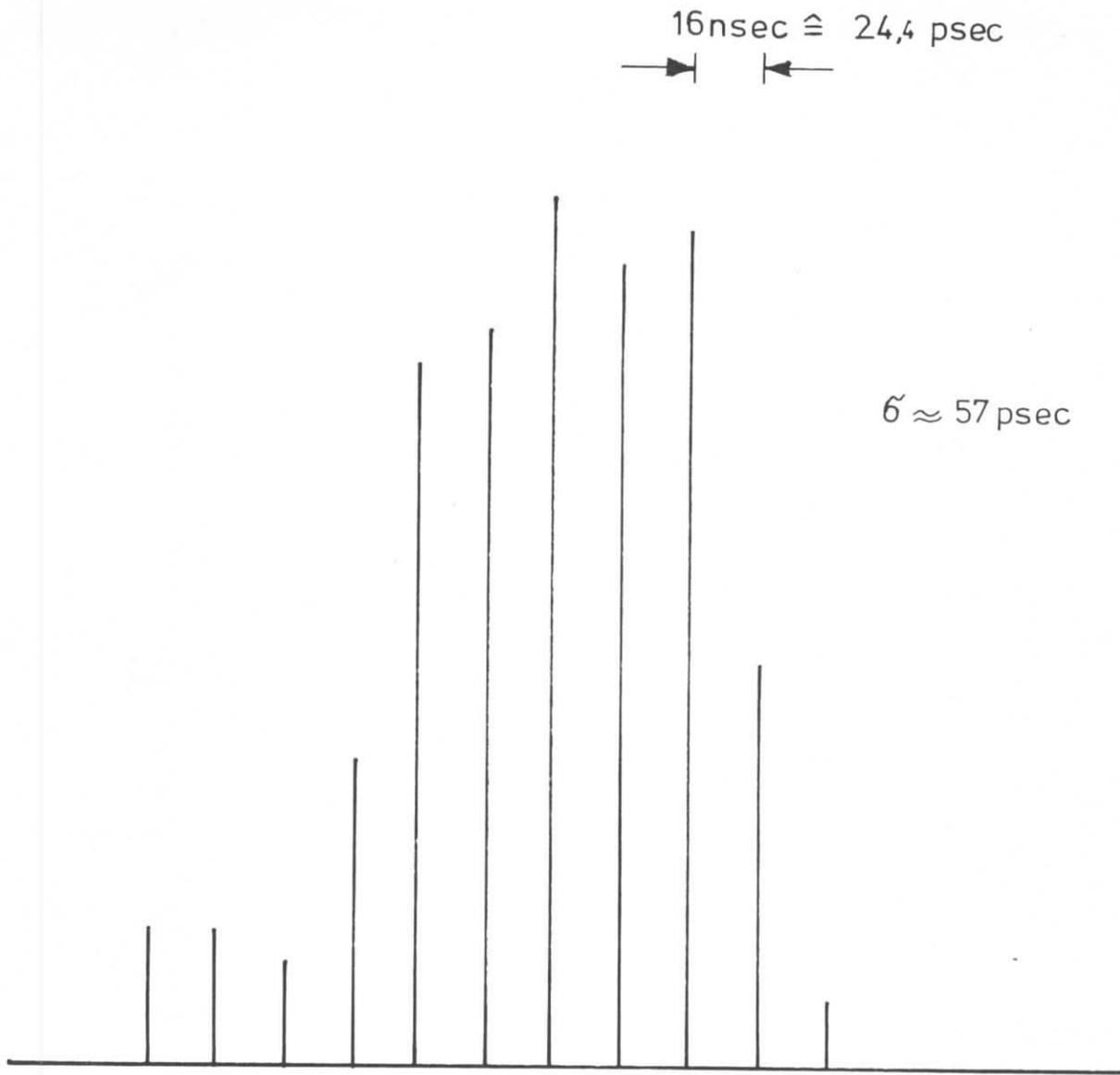


Abb. 3

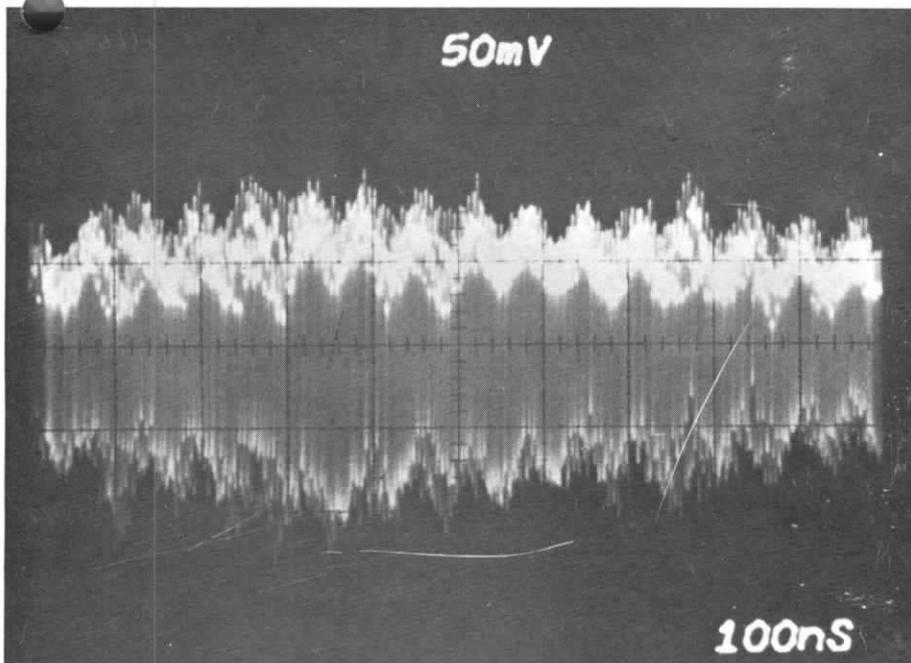


Abb. 4

1. "Bunch"

2. "Bunch"

3. "Bunch"

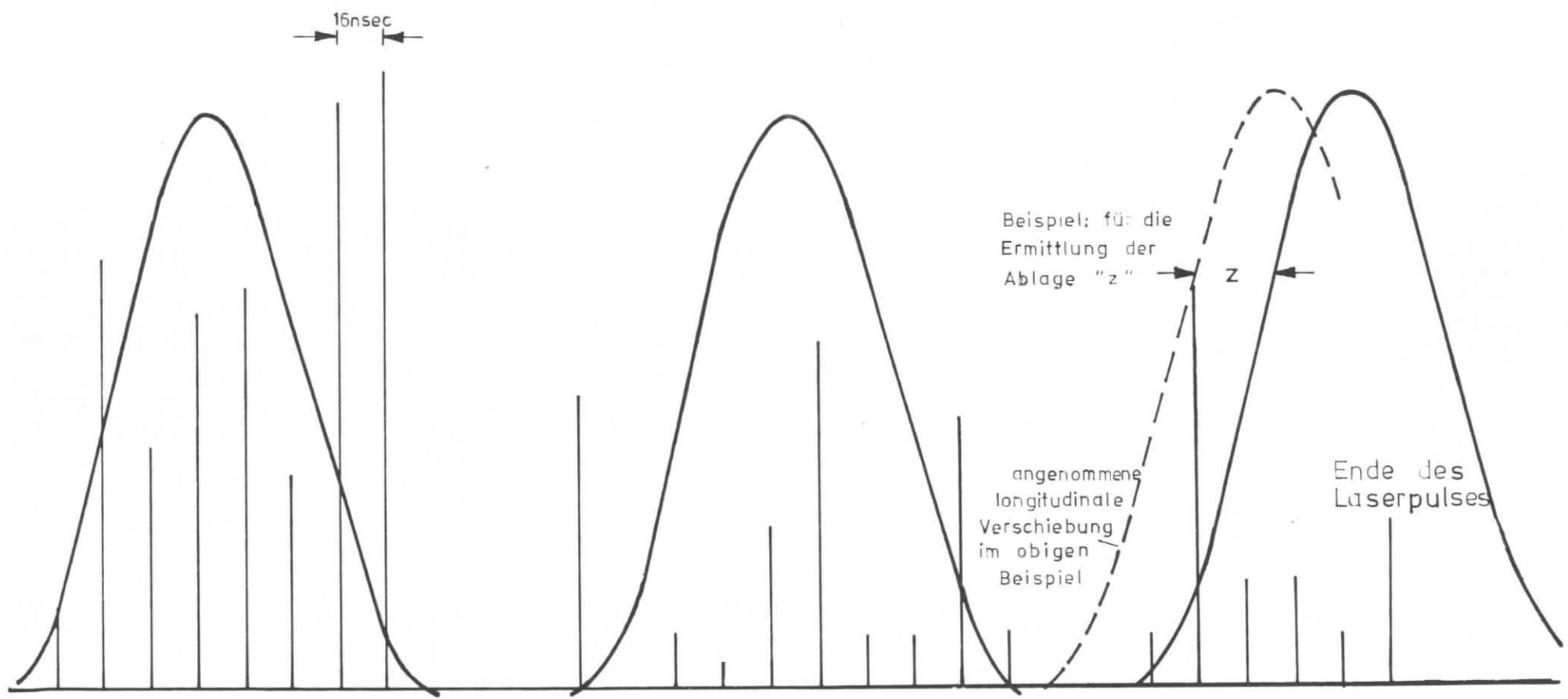


Abb. 5

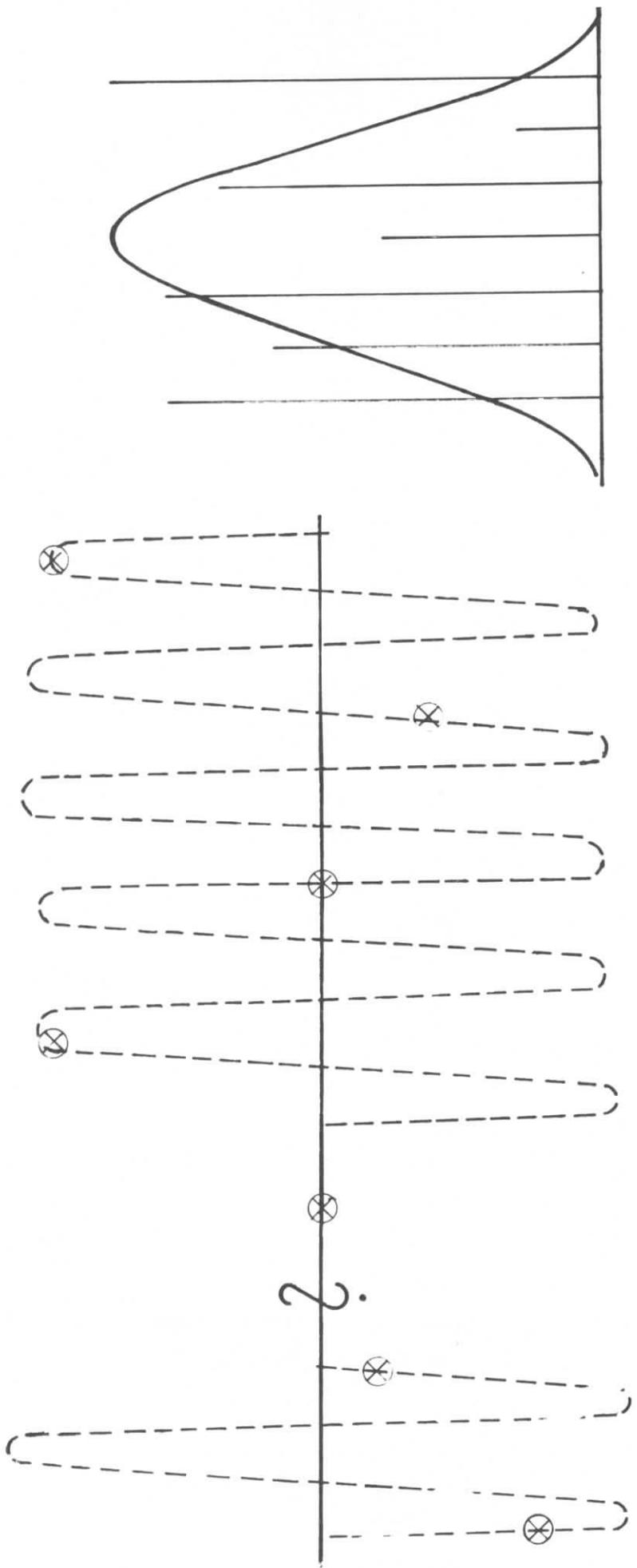


Abb. 7

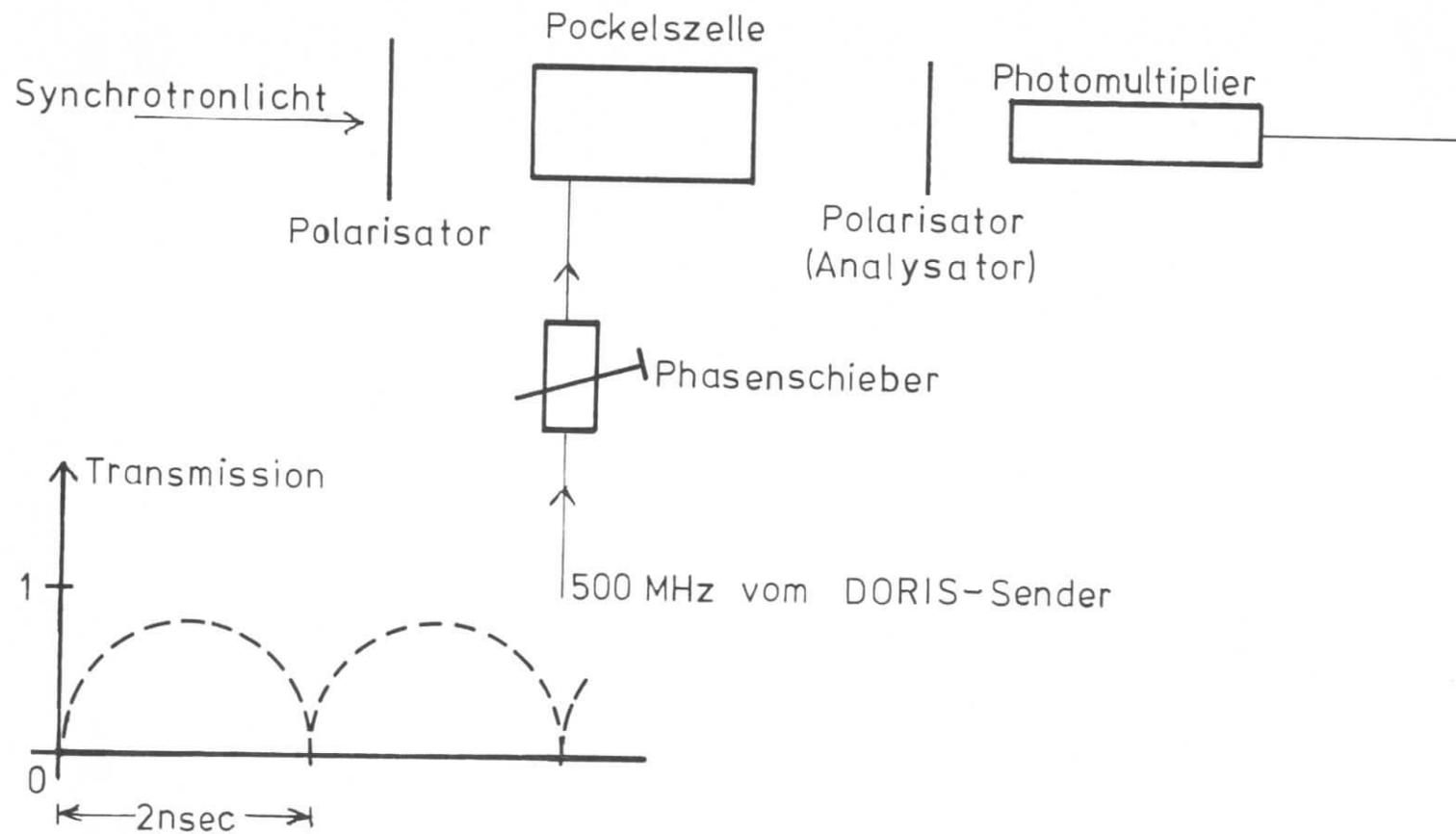


Abb. 8

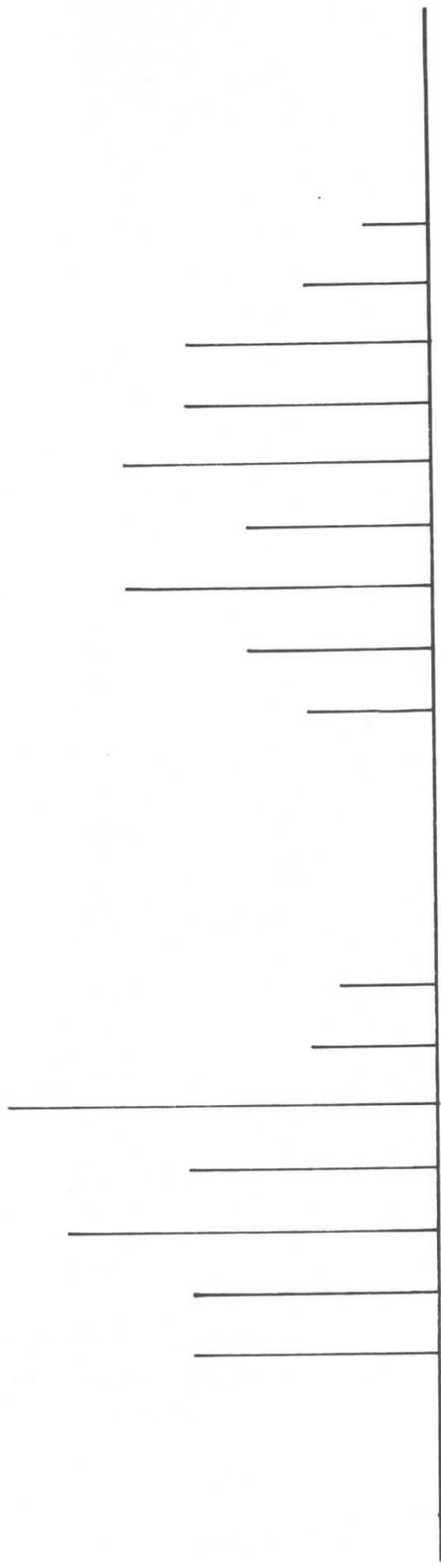


Abb. 9

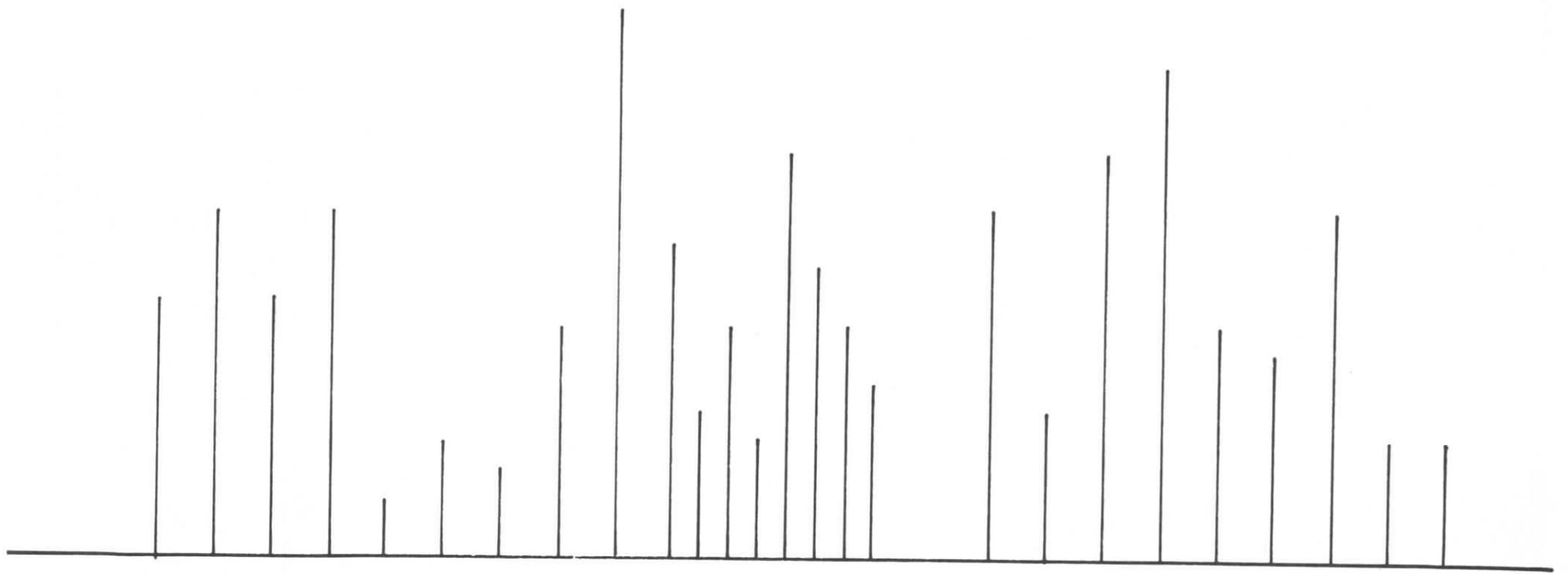


Abb. 10

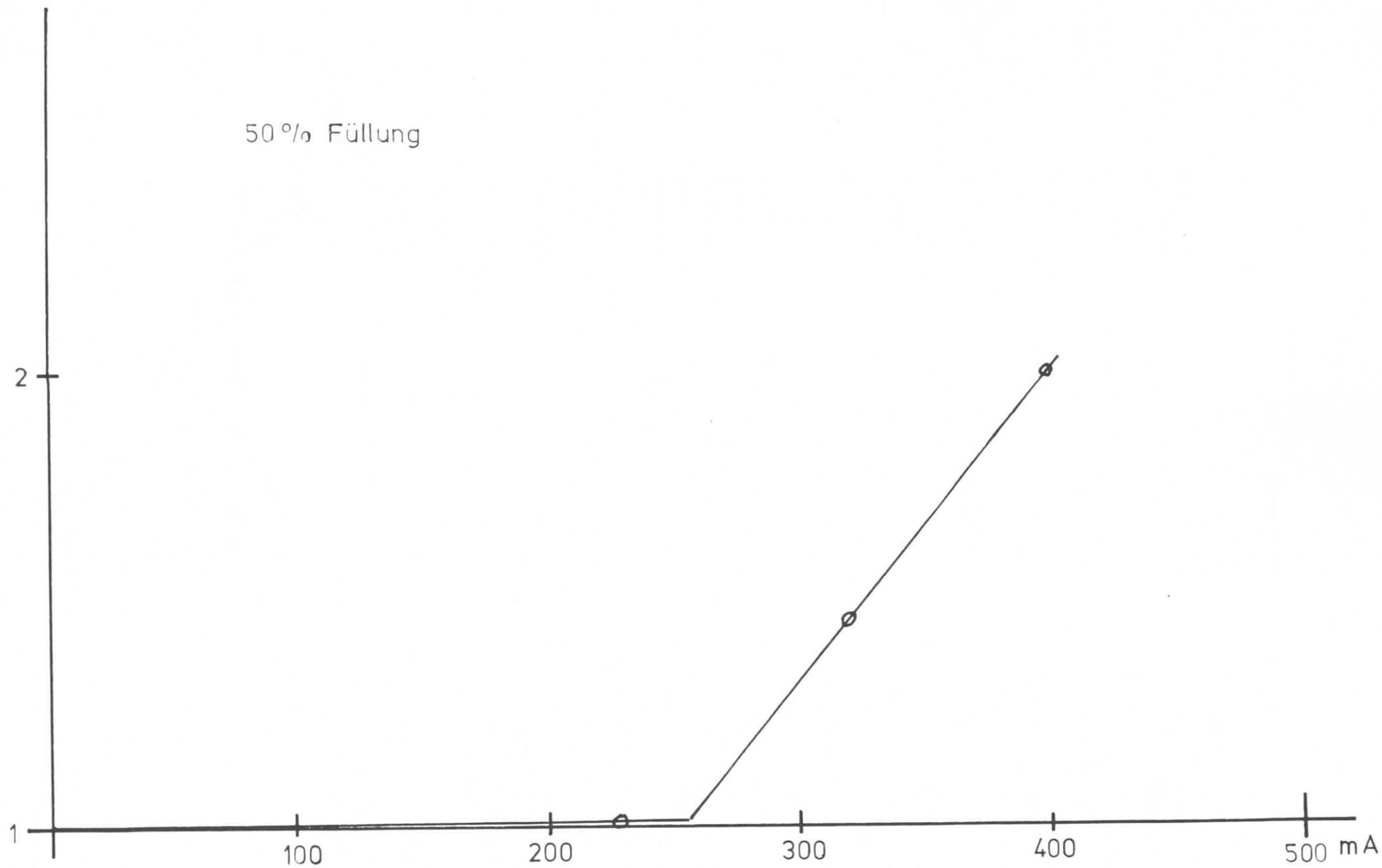


Abb.11

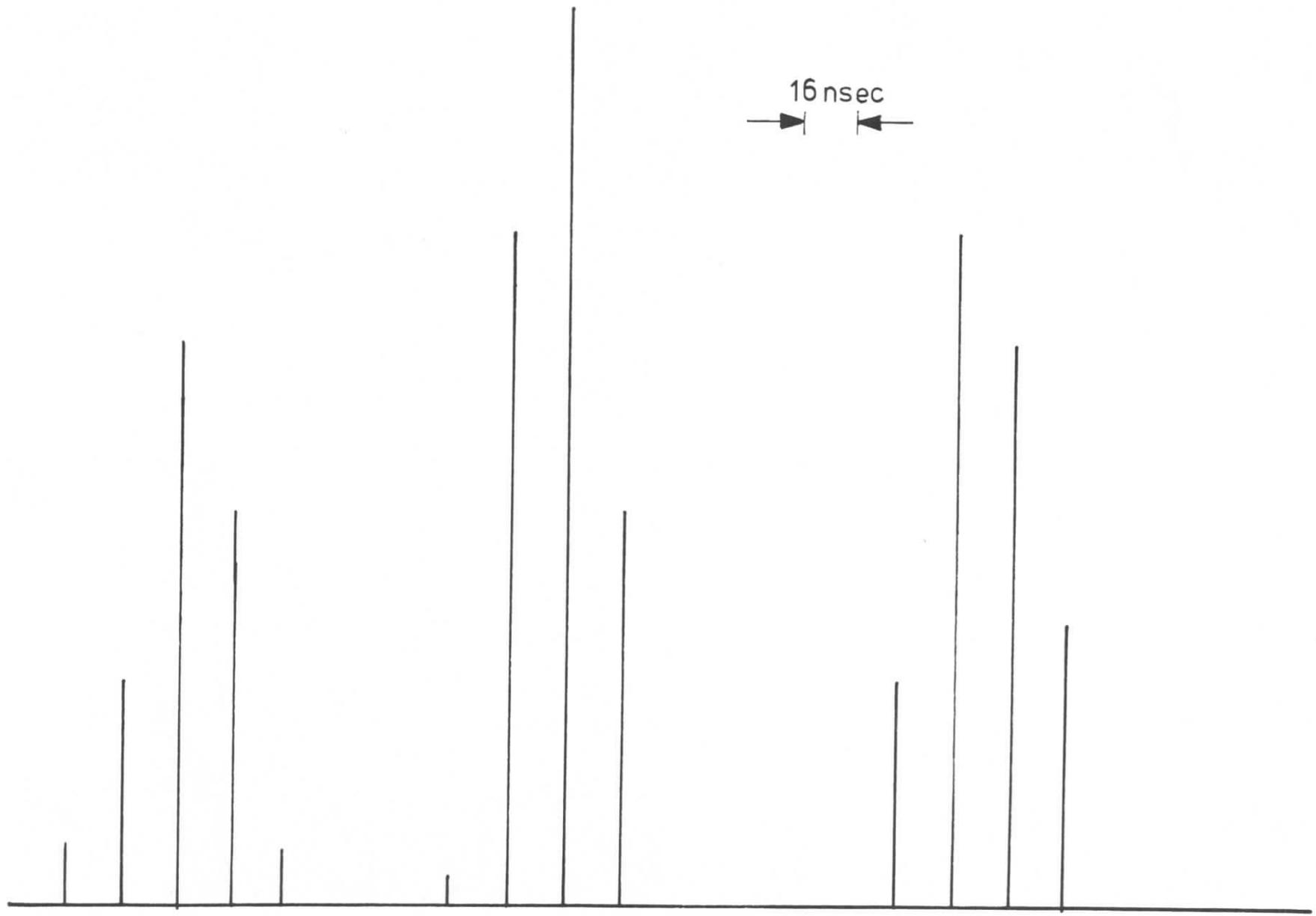


Abb. 12

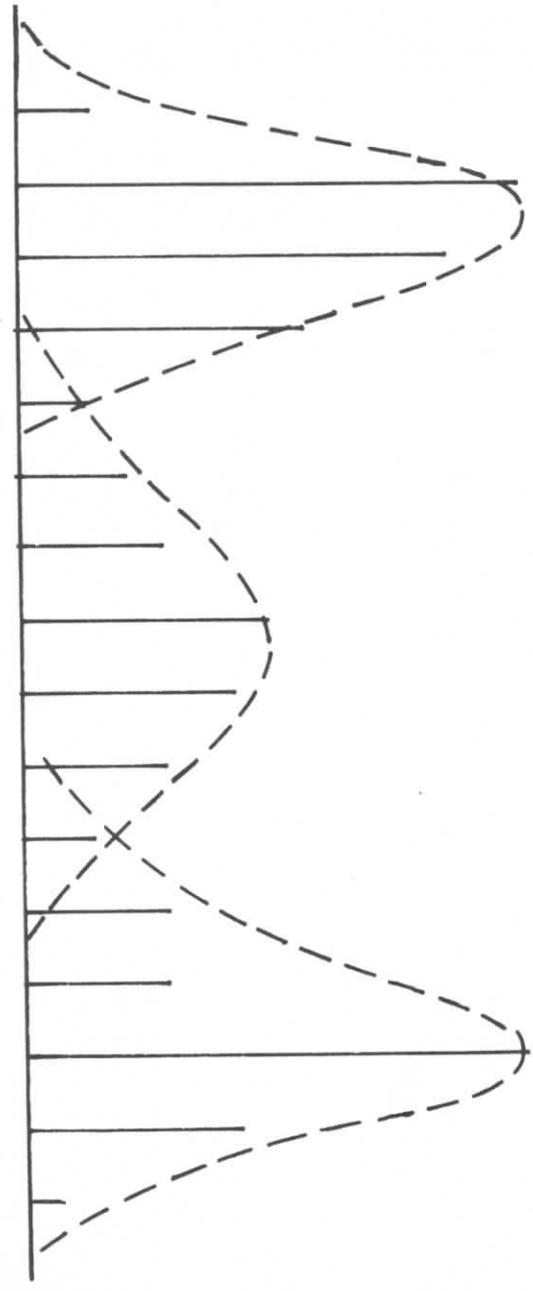


Abb. 13

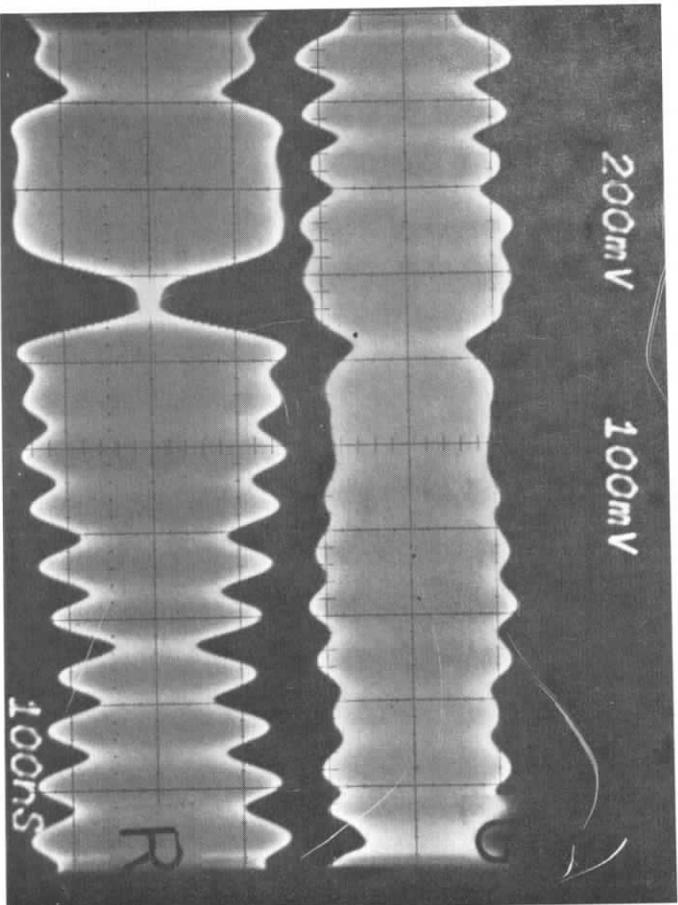


Abb. 14

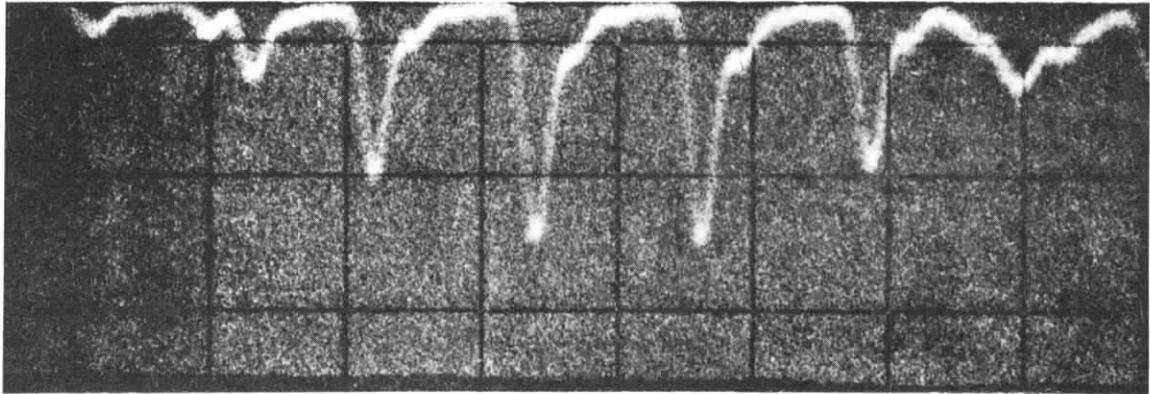


Abb. 15

