

DESY-Notiz A 2.61

Hamburg, den 14. April 1960

Dr. Ti:Ge

### Zur Messung der Strahlanpassung

Die bisherigen Erfahrungen beim CERN PS haben gezeigt, wie wichtig es ist, die Anpassung der Linac Emittanz an die Acceptanz des Synchrotrons auch wirklich, und zwar kurzfristig, kontrollieren zu können. Man verfolgt bei CERN zu diesem Ziel zwei Grundgedanken für die Realisierung einer Phasenflächenmessung, nach Informationen, die auf B. W. Montague (CERN) zurückgehen. Die erste Idee ist, dass man im Einschussweg eine sogenannte  $\lambda/4$  Strecke hat, mit der Eigenschaft, dass sich Linien  $x = \text{const}$  in einer Phasenfläche am Anfang auf Linien  $x' = \text{const}$  am Ende der Strecke transformieren. Der zweite Gedanke ist, mit Hilfe dieser Transformationseigenschaft der  $\lambda/4$  Strecke eine schnelle Aufzeichnung der Phasenfläche auf einen Bildschirm zu machen, so dass die Anpassung unmittelbar und in kürzester Messzeit direkt in den Phasenebenen sichtbar wird. Die Bezeichnung als  $\lambda/4$  Strecke ist dort gewählt in Anlehnung an die stark fokussierende Struktur des Synchrotrons, die die oben beschriebene Eigenschaft hat.

Es ist nützlich, dieses Konzept auch für die Anwendung bei unserer Maschine zu diskutieren. In der Notiz A 2.45 war bereits gezeigt worden, wie man die Linac Emittanz unter Voraussetzung einer Gaußverteilung im Strom messen kann. Die hier zu untersuchende Methode ist jedoch sehr viel allgemeiner, da sie eine punktweise Ausmessung der Phasenfläche ermöglicht und ausserdem eine momentane Information gibt. Konkret muss man sich etwa vorstellen, dass eine solche  $\lambda/4$  Strecke mit der Phasenmeseinrichtung in Strahlrichtung gesehen auf die beiden Quadrupoltripel folgt. Der Ablenkmagnet, den der Geradeausstrahl dann durchsetzt, ist entmagnetisiert. Die zum zweiten Tripel

zurücktransformierte Acceptanz des Synchrotrons in r- und z-Richtung ist bekannt und kann auf dem Bildschirm markiert werden, auf dem auch die durch die Quadrupoltripel verformten Linac-Phasenflächen erscheinen. Durch Justierung der Tripelbrennweiten, kann man dann die Anpassung optimal machen.

Wie oben erwähnt, braucht man ein Abbildungssystem, das einen  $\Delta x$ -Schlitz in der Phasenebene um  $90^\circ$  dreht. Für eine solches System muss das Matrixelement  $a_{22}$  verschwinden:

$$(1) \quad \begin{pmatrix} x \\ x'_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ x'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} x_1 + a_{12} x'_1 \\ a_{21} x_1 \end{pmatrix}$$

Wie man sieht, sind die Geraden  $x_1 = c$  dann auf Geraden  $x'_2 = a_{21} \cdot c$  parallel zur  $x_2$ -Achse abgebildet.

Eine solche Matrix kann z. B. dargestellt werden durch eine Folge von Laufraum und Quadrupollinse, deren Brennweite gleich der Laufräumlänge ist (siehe Abb. 1). Man findet, mit

$$Q = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{l} & 1 \end{pmatrix}; \quad L = \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad \mathcal{L} = \begin{pmatrix} x \\ x' \end{pmatrix}$$

für die Transformationsmatrix:

$$(2) \quad \mathcal{L}_3 = Q \mathcal{L}_2 = QL \mathcal{L}_1 = \begin{pmatrix} 1 & l \\ -\frac{1}{l} & 0 \end{pmatrix} \mathcal{L}_1$$

Bei dieser Anordnung werden die Geraden  $x_1 = c$  nicht ebenfalls um  $90^\circ$  gedreht. Ihre Transformation ergibt sich aus (1) und (2) zu:

$$x_3 = \frac{a_{11}}{a_{21}} x'_3 + a_{12} c = l (-x'_3 + c)$$

Der Witz der Anordnung besteht darin, dass ein Spalt  $\Delta x_1$  am Ort  $s_1$  und einer Stelle  $x_1$  im Phasendiagramm, auf einen Schlitz parallel zur  $x_3$ -Achse im Bildphasenraum abgebildet wird, so dass man die  $x_1$ -Verteilung jetzt am Ort  $s_3$  durch einen bewegten Schlitz  $\Delta x_3$  abtasten kann. In der Abb. 1 ist ein Beispiel im Phasendiagramm gezeigt.

Wegen der im Phasenraum  $s_3$  schräg laufenden Linien  $x_1' = c'$  wird die Messung unnötig verschmiert, insbesondere bei breitem Spalt. Darum ist es vernünftig, auch diese Linien um  $90^\circ$  zu drehen. Dann muss auch  $a_{11}$  verschwinden, was man durch einen weiteren Laufräum der Länge  $\ell$  machen kann (siehe Abb. 2).

$$(3) \quad \mathcal{L}_4 = LQL\mathcal{L}_1 = \begin{pmatrix} 0 & \ell \\ -\frac{1}{\ell} & 0 \end{pmatrix} \mathcal{L}_1$$

In der Tat ist jetzt

$$x_4 = \ell x_1' \quad x_4' = -\frac{1}{\ell} x_1.$$

Wählt man als Koordinaten  $\bar{x} = x/\ell$ , so sieht man, dass diese Transformation eine Drehung der ganzen Phasenebene bei  $s_1$  um  $90^\circ$  im Uhrzeigersinne darstellt:

$$(4) \quad \begin{pmatrix} \bar{x} \\ x' \end{pmatrix}_4 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{x} \\ x' \end{pmatrix}_1. \quad (\text{siehe Abb. 2})$$

Wenn es gelingt, die Phasenfläche auf einem Oszillographenschirm sichtbar zu machen, hat man also ein unmittelbares Bild der Emittanz.

Natürlich ist die Anordnung, wie sie eben beschrieben wurde, für sich schon zur punkweisen Ausmessung einer Phasenfläche brauchbar. Nur ist eine solche Messung wahrscheinlich sehr zeitraubend und entspricht nicht dem Bedürfnis nach einer schnellen Information. Für die elektronische Aufzeichnung schlägt Montague vor, den Strahl über eine feststehende Blende zu bewegen, statt sich auf die meist sehr langsame Bewegung der Blende gegenüber dem Strahl zu verlassen.

In unserem Falle haben wir Pulse von  $1 \mu\text{sec}$  Dauer, die im Abstand von 20 msec aufeinander folgen. Nennen wir, um kenntlich zu machen, was gemessen wird, den ersten Spalt bei  $s_1$  den  $\Delta x$ -Schlitz, und den zweiten bei  $s_4$  den  $\Delta x'$ -Schlitz. Dann ist klar, dass man den Strahl in einer  $\mu\text{sec}$  über den  $\Delta x'$ -Schlitz lenken muss, um die Intensität über  $x'$  abzutasten. Die Auslenkung kann mit dem Linacstrom zusammen getriggert werden. Dies kann man relativ einfach mit einem elektrischen Feld machen. Um ein zahlenmässiges Bei-

spiel zu geben: es sei der Laufräum 5 m lang. Man kann das elektrische Feld über seine ganze Länge erstrecken und braucht dann für eine Gesamtauslenkung um 8 cm am  $\Delta x$ -Schlitz eine Feldstärke, die von 0 bis 2,56 kV/cm linear variiert. Bei einem Plattenabstand von 10 cm kommt man also auf eine maximale Plattenspannung von 25,6 kV. Durch eine Hochspannungstriode parallel zum Plattenpaar kann man die Sägezahnspannung aufprägen. Die Triode liegt über Anodenwiderstand an 25,6 kV und ist im Wartezustand stromlos, so dass die volle Spannung an den Platten liegt. Das 1  $\mu$ sec lange Triggersignal steuert dann die Röhre zeitlich linear bis zu einer geringen Restanodenspannung auf. Die Mittelstellung des Elektronenstrahls, die ja bei oben skizzierter Methode erst am Ende des Pulses erreicht wird, könnte durch ein gekreuztes, statisches Magnetfeld korrigiert werden, das über die gleiche Länge erstreckt nur eine Stärke von 4,3 T zu haben braucht.

Auch für den  $\Delta x$ -Schlitz ist es zunächst denkbar, dass man den Strahl über den feststehenden Spalt führt. Die Ablenkgeschwindigkeit hängt von dessen Öffnungsweite ab. Man wird es so einrichten, dass aufeinanderfolgende Pulse um die Schlitzbreite versetzt werden. Bei einem  $\Delta x = 0,1$  cm würde man also eine Ablenkgeschwindigkeit von 0,1 cm in 20 msec fordern. In einer Sekunde überstreicht man damit 5 cm. Die Acceptanz hat an dieser Stelle etwa eine Ausdehnung von 4 cm. Wählt man eine Gesamtauslenkung von 8 cm so braucht man z. B. ein Magnetfeld in dem Bereich von 0 bis 135 T über eine Länge von 0,25 m, das 2,50 m von dem Schlitz entfernt steht. Ein solches Magnetfeld aus Luftspulen könnte man in unserer z. Zt. geplanten Anordnung hinter dem zweiten Quadrupoltripel einbauen, dessen sägezahnförmige Stromcharakteristik mit einem gesteuerten Gleichstromgenerator zu bewerkstelligen ist. Hier hat die Ablenkmethode jedoch einen Nachteil. Die Randstrahlen durchlaufen den Spalt unter einem anderen Winkel als die Mittelstrahlen, d. h. man überlagert ein zusätzliches  $\Delta x$ , was zu einer Verzerrung des Bildes führt. Dieser Fehler wird vermieden, wenn man statt dessen den Spalt mechanisch bewegt. Die Bewegung braucht auch nicht, wie weiter unten gezeigt werden soll, sägezahnförmig zu verlaufen, sondern es genügt eine harmonische Zeitabhängigkeit. Ein solcher Spalt würde dann direkt hinter dem zweiten Quadrupoltripel stehen können und, entsprechend den oben diskutierten Daten, mit einer

Periode von 2 sec bei einer Gesamtauslenkung von 6 cm durch den Spalt geführt werden.

Die beiden Ablenkkelder müssen noch eine weitere Bedingung erfüllen. Da man die Anpassung in x- und y-Richtung messen will, müssen die Ablenkkelder um  $90^\circ$  drehbar sein. Bei einer Luftspule kann man die Felddrehung durch Umordnung der Windungsanschlüsse erzielen, wenn man die Windungsanordnung entsprechend wählt. Einen Plattenkondensator müsste man mechanisch drehbar aufstellen.

Die Strommessung hinter der  $\Delta x^1$ -Blende geschieht mit einem Strahlfänger, an dem der aufgefangene Strom über einen Widerstand gemessen wird. Damit der Stromverlauf naturgetreu wiedergegeben wird, muss die Zeitkonstante der Messung  $RC = T$  klein sein gegen die Pulsdauer von 1  $\mu$ sec ( $R$  = Messwiderstand,  $C$  = Kapazität des Auffängers), also

$$RC \approx 10^{-8} \text{ sec}$$

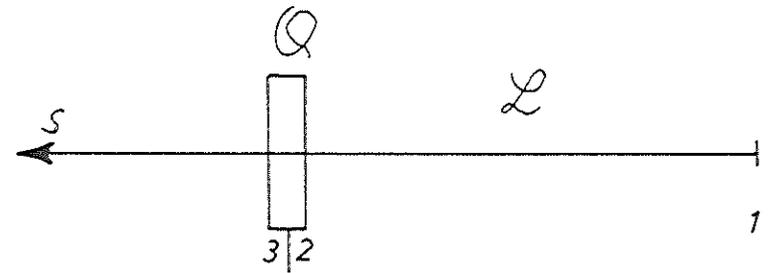
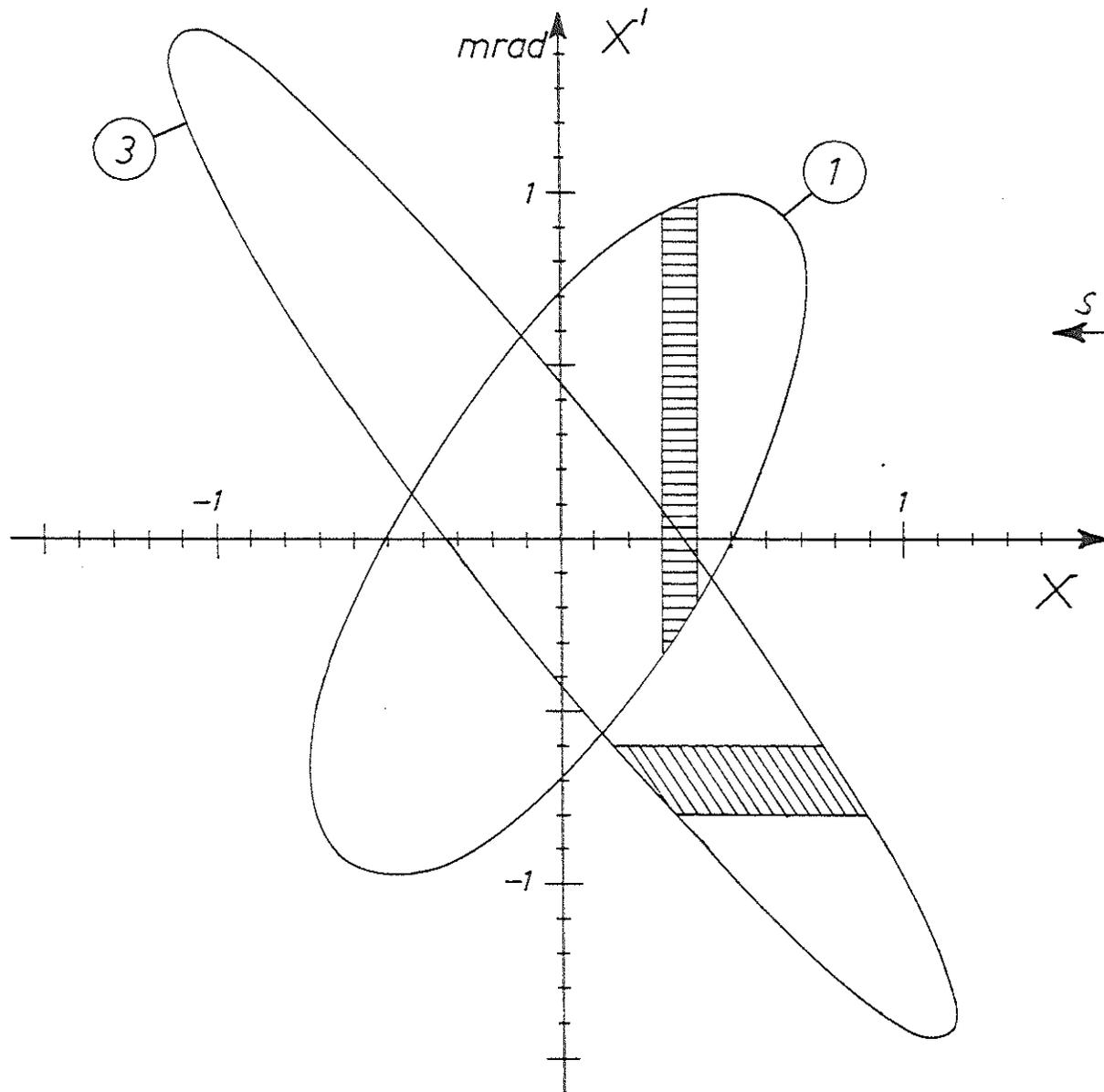
$R$  und  $C$  liegen darum in der Grössenordnung von  $100 \Omega$  und  $100 \text{ pF}$ .

Die elektronische Aufzeichnung ist im Prinzip auf folgende Weise möglich (siehe Abb. 3): Der Messwiderstand  $R$  liegt am Gitter einer steilen Penthode, deren Arbeitspunkt einstellbar ist. Die Röhre zieht Strom. Durch den Strompuls auf  $C$  wird sie zugesteuert. Die Dauer des stromlosen Zustands wird bestimmt durch die Form des  $U_{g_1}$ -Impulses und durch die Wahl des Arbeitspunktes. Durch die über den Kathodenwiderstand gegengekoppelte zweite Stufe werden die Flanken des Impulses steil gemacht und dieser selbst in einer dritten Stufe wieder auf positive Polarität gebracht. Der Ausgangsimpuls wird auf den Wehneltzylinder einer Bildröhre gegeben. Während der Dauer des Pulses ist also deren Kathode aufgesteuert. Legt man noch an die X-Ablenkung eine 1 MHz Sägezahnspannung synchron mit der Strahlauslenkung über  $s_4$ , so erscheint auf dem Bildschirm ein waagerechter Strich. Auf der Länge des Bildstriches ist der Strom am Auffänger grösser als ein bestimmter Strom  $i_0$ , bzw. als eine bestimmte Stromdichte  $j_0$  im Phasendiagramm. Durch Wahl des Arbeitspunktes der ersten Stufe kann man  $j_0$  nach Wahl verändern.

Die Aufzeichnung der Phasenfläche wird vervollständigt durch eine zum  $\Delta x$ -Schlitz asynchrone Spannung an den Y-Platten der Bildröhre. Dass die Striche nicht äquidistant liegen, spielt keine Rolle, solange der maximale Strichabstand nicht zu gross wird. Bei der angedeuteten sinförmigen Bewegung des  $\Delta x$ -Spaltes beträgt dieser 1,2 mm für einen 8 cm Bildschirm. Die Phasenfläche, innerhalb der eine Stromdichte  $\geq j_0$  liegt, erscheint dann als heller Fleck auf dem Schirm.

Ein Umstand ist zum Schluss noch zu erwähnen, nämlich die Notwendigkeit einer Anfangsverstärkung. Der Gesamtstrom beträgt 125 ma. Nimmt man an, dass der Strahl, dessen Phasenfläche gemessen werden soll, einen Durchmesser von 4 cm hat ( $= 1256 \text{ mm}^2$ ), von dem  $1 \text{ mm}^2$  ausgeblendet wird, so erhält man im Auffänger einen Strom von  $100 \mu\text{a}$ , was, da der Messwiderstand niederohmig sein muss, nur eine Spannung von 10 mV ergibt. Das Eingangssignal muss also vor der Verarbeitung noch etwa um den Faktor 1000 verstärkt werden.

Dr. U. Timm

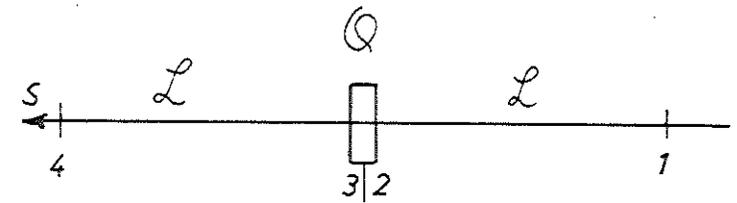
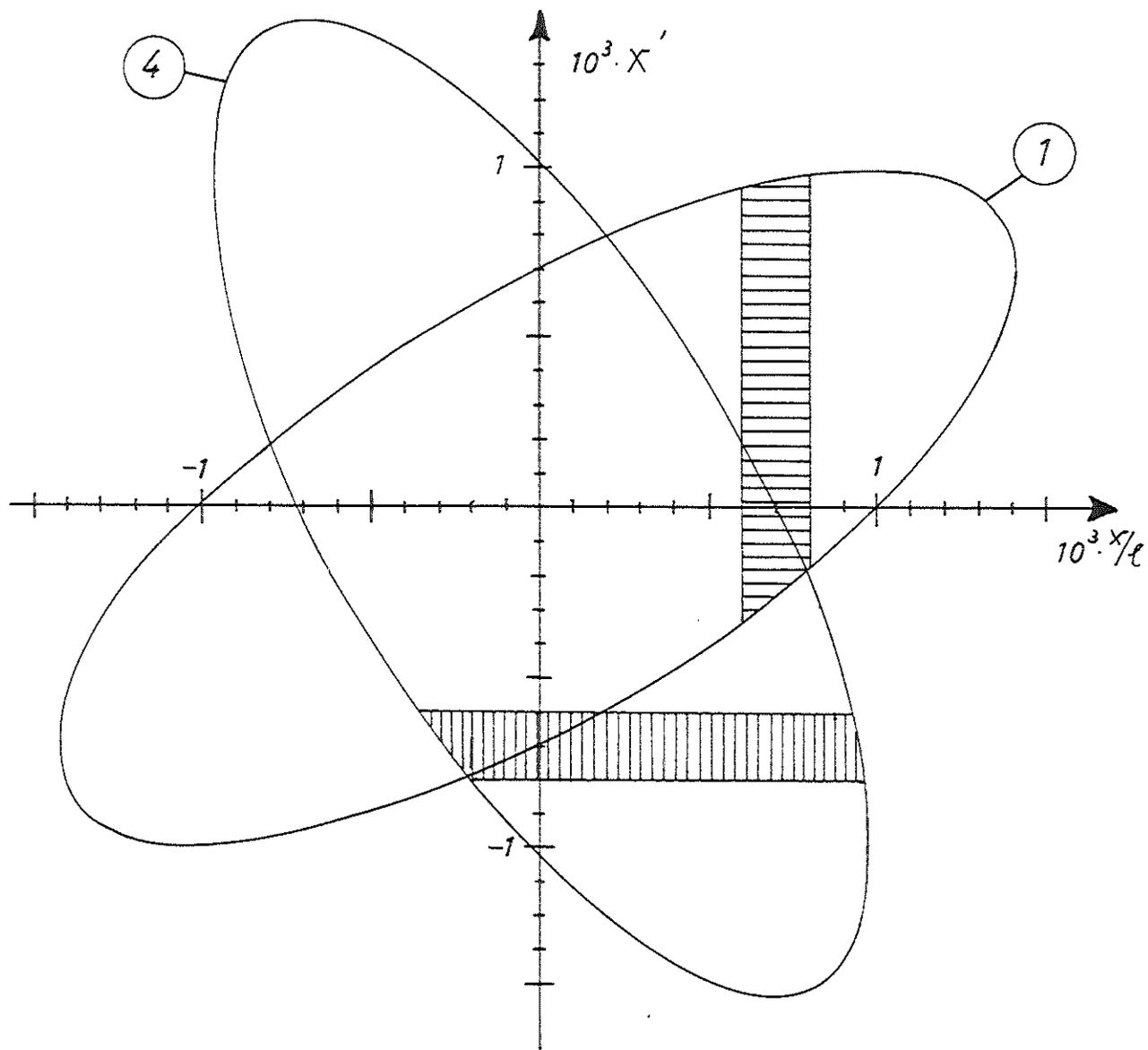


$$\mathcal{L}_3 = \begin{pmatrix} 1 & \ell \\ 1/\ell & 0 \end{pmatrix} \mathcal{L}_1$$

$$\ell = 500 \text{ cm}$$

Abb. 1

Drehung der Schar  $x = \text{const.}$   
um  $90^\circ$  in der Phasenebene



$$\bar{\mathcal{P}}_4 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \bar{\mathcal{P}}_1, \quad \bar{\mathcal{P}} = \begin{pmatrix} x/l \\ x' \end{pmatrix}$$

$$l = 500 \text{ cm}$$

Abb. 2

Drehung der Scharen  $x=c$ ,  $x'=c'$   
um  $90^\circ$  in der Phasenebene

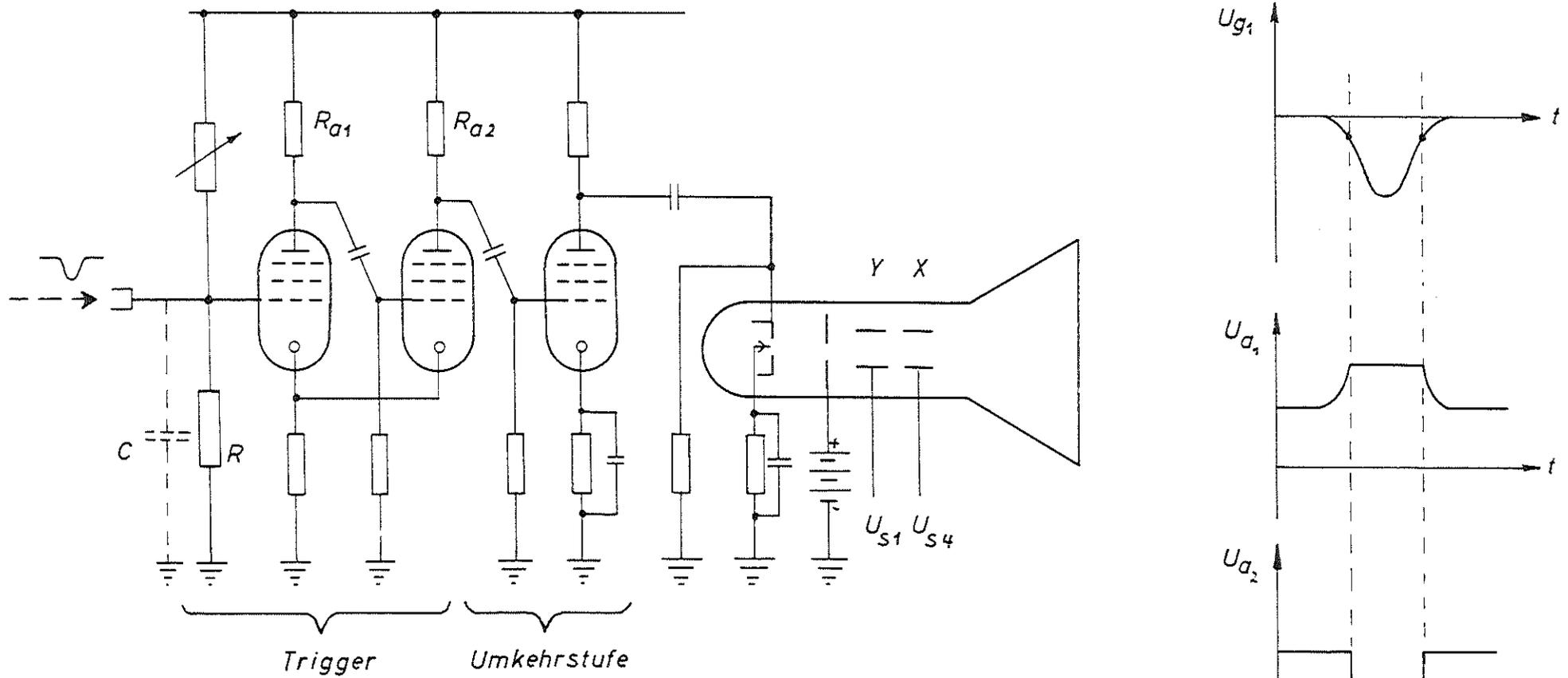


Abb 3

Prinzipschaltung zur elektronischen  
Aufzeichnung eines Phasendiagramms