

Die Gulstadsche Vibrationsschaltung als Anwendung der Mitnahmeerscheinung.

(Mitteilung aus dem Heinrich-Hertz-Institut.)

Von H. Salinger, Berlin, und A. F. Schönau, Kopenhagen.

I. Einleitung.

Bei langen Telegraphenkabeln erleiden die Telegraphierzeichen bekanntlich eine Verzerrung, durch die die kürzesten Zeichen (Morsepunkte) am meisten geschädigt werden, während die längeren (Striche und gleichlange Pausen) mit relativ größerer Stärke am Empfangsende ankommen. Wir setzen dabei Doppelstrombetrieb voraus, bei dem die Pausen durch Trennstrom dargestellt werden. In solchen Fällen hat sich die von Gulstad (seinerzeit Oberingenieur der Großen Nordischen Telegraphengesellschaft) angegebene Vibrationsschaltung sehr bewährt¹⁾. Bei dieser wird ein Empfangsrelais mit zwei Wicklungen benutzt, von denen die eine, die sogenannte „Hilfswicklung“, in einer Selbstunterbrechungsschaltung liegt, so daß auch dann, wenn die an das Kabel angeschlossene „Hauptwicklung“ stromlos ist, der Anker im Takt der Morsepunkte hin und her bewegt wird. Die ankommenden Zeichen werden nur so weit entzerrt, daß die Amplitude der Punkte noch wesentlich unter der der Striche bleibt; erstere beeinflussen dann die von selbst erfolgende Ankerbewegung nicht

wesentlich, während beim Empfang eines Striches die Relaiszunge auf dem einen oder anderen Kontakt liegen bleibt. Danach könnte es scheinen, als sei es notwendig, die Frequenz der Selbstunterbrechung sehr genau gleich der „Telegraphierfrequenz“, mit der gearbeitet werden soll, zu machen. In Wirklichkeit brauchen diese beiden Frequenzen nur ungefähr miteinander übereinzustimmen, und gerade dies ist einer der Gründe für den großen praktischen Erfolg der Gulstadschen Schaltung²⁾.

Es liegt nahe, diesen Umstand als eine Wirkung der Mitnahmeerscheinung anzusehen. Man kann sich vorstellen, daß die vom Relais selbst unterhaltenen Schwingungen durch die ankommenden Punktzeichen mitgenommen werden, so daß ihre Frequenz sich der jeweils vorhandenen Telegraphierfrequenz angleicht. Diese Vermutung trifft, wie die nachfolgend beschriebenen Versuche zeigen, in der Tat zu. Bei dieser Gelegenheit sollen noch einige Beobachtungen mitgeteilt

¹⁾ Vgl. z. B. Zimmermann, TFT 18, 337, 1929; Wisspeintner, TFT 20, 67, 1931.

²⁾ Deren Eigentümlichkeiten sind allerdings hiermit noch nicht erschöpfend dargestellt; vielmehr ist die Kraft auf den Anker durch die Summe des Hauptstromes und des Hilfsstromes gegeben, und durch die Schaltelemente wird der Verlauf dieses gesamten magnetisierenden Stromes so günstig wie möglich gemacht.

werden, die nicht nur für diesen Fall, sondern überhaupt für die Theorie der Mitnahme bei Kipperschwingungen von Interesse sind.

Die bei den Versuchen verwendete Vibrationschaltung ist in Abb. 1 gezeichnet. a ist die Hauptwicklung, die im Betrieb an das Empfangskabel angeschlossen zu denken ist, b die Hilfswicklung. Verläßt der Anker den einen Kontakt, so entlädt sich der Kondensator C und schickt

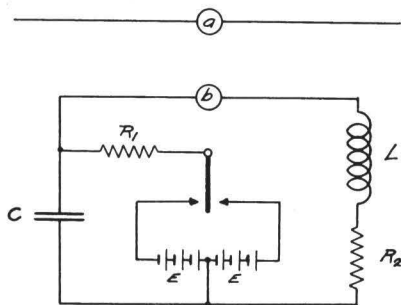


Abb. 1. Vibrationschaltung.

damit einen Strom durch die Hilfswicklung, der die Ankerbewegung noch beschleunigt. Die Induktivität L sucht ebenfalls den Strom in der Hilfswicklung noch aufrechtzuerhalten.

II. Die zeitliche Ausbildung der Mitnahme.

Um das Grundsätzliche der Erscheinung zu erfassen, ist es nicht erforderlich, die Schaltung der Abb. 1 genau durchzurechnen. Wir stellen uns vielmehr vereinfachend vor, daß der Strom in der Hilfswicklung nach Umlegung des Ankers nach einer Exponentialfunktion mit der Zeitkonstanten τ anwächst, und daß der Anker auf neue umgelegt wird, wenn der Hilfsstrom den „Ansprechwert“ $\pm J_s$ erreicht hat. Beide Halbperioden des Vorganges sollen einander gleich sein und die Schwebezeiten vernachlässigt werden. Der Magnetfluß wird als dem Strom proportional angenommen. Der Hilfsstrom folgt also in seinem Verlauf der strichpunktierten Linie in Abb. 2. Für die Dauer einer Periode der selbsterregten Schwingung findet man unter diesen Annahmen leicht

$$T = 2 \tau \ln \frac{J_0 + J_s}{J_0 - J_s};$$

dabei ist J_0 der Endwert, zu dem der Hilfsstrom bei festgehaltenem Anker anwachsen würde. Fließt nun in der Hauptwicklung ein Wechselstrom $i = i_m \sin \omega t$, so kann man dessen Wir-

kung in der Weise berücksichtigen, daß man annimmt, die Ansprechstromstärke i_s bleibe nicht konstant, sondern ändere sich nach einem Gesetz $i_s = \pm J_s - i'_m \sin \omega t$, so wie in Abb. 2 gezeichnet. Der Hilfsstrom verläuft dann nach der ausgezogenen Kurve des Bildes, und die beiden Halbperioden brauchen nicht mehr einander gleich zu sein.

Man sieht, daß die Umkehrpunkte des Hilfsstromes jedesmal bei einer anderen Phase des störenden Wechselstroms liegen. Die aufeinanderfolgenden Phasenlagen entsprechender Umkehrpunkte sind in Abb. 2 mit $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ bezeichnet. Hudec³⁾ hat gezeigt, daß der theoretischen Behandlung des Vorganges die Kurve zugrunde gelegt werden muß, die φ_n mit φ_{n+1} verbindet. Diese Kurve gibt an, welchen Wert φ_{n+1} hat,

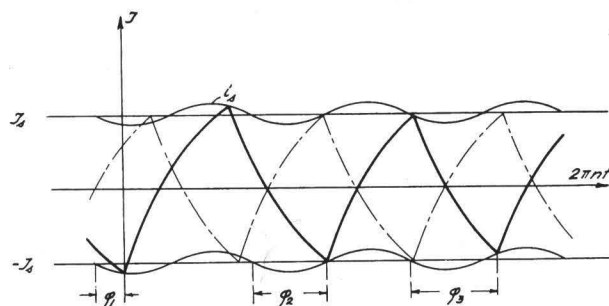


Abb. 2. Verlauf des Hilfsstromes, schematisch.

wenn man φ_n beliebig annimmt. Sie soll als „Phasenfolgekurve“ bezeichnet werden. Sie kann nach dem Muster der Abb. 2 graphisch ermittelt werden, wenn die freie Schwingung (d. h. τ, J_0 und J_s) sowie die Frequenz und Stärke des störenden Wechselstromes gegeben sind.

Diese Kurven sind für die Bedingungen, die bei unseren Versuchen vorlagen, berechnet worden; ein Beispiel zeigt die Kurve der Abb. 3. (Die von Hudec angegebenen Kurven zeigen einen un stetigen Verlauf; dies tritt hier nicht auf, weil der Wechselstrom sehr schwach war.) Man entnimmt der Abbildung, daß z. B. auf die Phase 240° nach einer vollen Schwingung die Phase 164° folgt, auf diese würde dann 140° folgen usw. Man übersieht den Vorgang am leichtesten, wenn man noch die unter 45° verlaufende Gerade $\varphi_n = \varphi_{n+1}$ zeichnet. Man erhält dann die Reihe der aufeinanderfolgenden Phasen durch Ein-

³⁾ Arch. f. El. 22, S. 459, 1929. In der Bezeichnung und Darstellungsart weichen wir aber weiterhin von Hudec ab.

zeichnen eines Treppenzuges. In der Abbildung ist das für die Anfangsphasen 60° und 360° ausgeführt. Man sieht sofort, daß bei $128^\circ \varphi_n = \varphi_{n+1}$ wird und daß diese Phase sich nach Verlauf einiger Perioden als Endwert einstellt. Von da ab ist der Vorgang periodisch, der Wechselstrom hat die Kippschwingung „mitgenommen“. Die Abbildung läßt auch ohne weiteres erkennen, daß die Phase von 52° , bei der gleichfalls $\varphi_n = \varphi_{n+1}$ wäre, instabil ist. Die Stabilitätsbedingung lautet offenbar so, daß am Schnittpunkt die Steigung

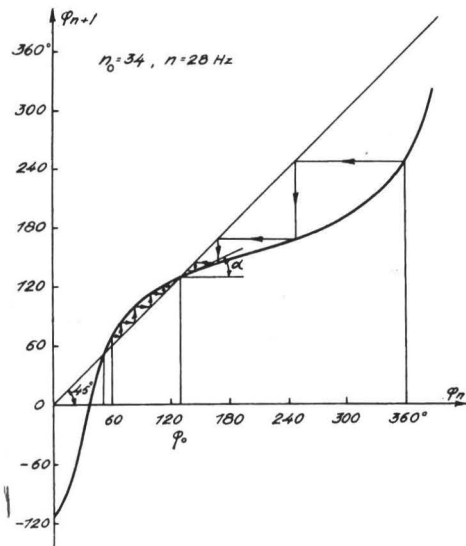


Abb. 3. Die Phasenfolgekurve.

der Phasenfolgekurve kleiner als 45° , aber größer als -45° sein muß, in Formeln:

$$-1 < \frac{d \varphi_{n+1}}{d \varphi_n} < +1.$$

Diese Bedingung ist der von Hudec gegebenen äquivalent, aber vielleicht etwas anschaulicher.

Die hier angegebene Treppenkonstruktion beantwortet bereits die Frage, wie sich nach Einschalten des störenden Wechselstromes die Mitnahme ausbildet. Dieser Vorgang läßt sich aber auch formelmäßig verfolgen, wenn wir bedenken, daß die Phase nach einigen Schwingungen dem stabilen Endwert φ_0 bereits so nahe sein wird, daß die Phasenfolgekurve durch eine Gerade von der Neigung α (Abb. 3) ersetzt werden darf. Machen wir ausdrücklich diese Annahme, so folgt leicht

$$\frac{\varphi_n - \varphi_0}{\varphi_1 - \varphi_0} = (\text{tg } \alpha)^{n-1},$$

wenn φ_1 eine Anfangsphase, φ_n die nach $n - 1$

Perioden darauf folgende und φ_0 die stabile Endphase ist. Es ist $|\text{tg } \alpha| < 1$, und man sieht, daß die Schwingung nicht plötzlich in die stabile Phasenlage hineinspringt, sondern daß sie sich dieser exponentiell nähert, es sei denn, daß gerade $\alpha = 0$ wäre. Man kann auch die Zeit explizite einführen vermittels $\varphi_n = \omega t_n - 2\pi(n - 1)$. Für große n wird dann in guter Näherung

$$\frac{\varphi_n - \varphi_0}{\varphi_1 - \varphi_0} = e^{-\frac{p \omega t_n}{2\pi}} \cdot e^{\frac{p \varphi_0}{2\pi}};$$

dabei ist (bei positivem α) $\text{tg } \alpha = e^{-p}$ gesetzt worden. Für negatives α wäre $\text{tg } \alpha = -e^{-p}$ zu setzen und in der letzten Formel der Faktor $(-1)^{n-1}$ hinzuzufügen.

Wie man sieht, ist der ganze Schwingungsvorgang bestimmt, sobald nur die Phasenfolgekurve bekannt ist. Da die Berechnung dieser Kurve stets nur unter vereinfachenden Annahmen möglich sein wird, ist es von Wichtigkeit, sie experimentell aufzunehmen. Man macht dies in der Weise, daß man den Wechselstrom (oder die

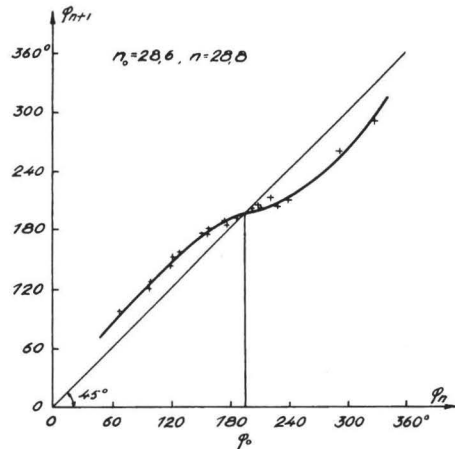


Abb. 4. Experimentell ermittelte Phasenfolgekurve.

Kippschwingung) plötzlich einschaltet, wobei die Anfangsphase φ_1 dem Zufall überlassen bleibt, und dann die nächsten Phasen $\varphi_2, \varphi_3 \dots$ beobachtet. Diese Phasen ergeben sich aus einem Oszillogramm, in dem gleichzeitig der Wechselstrom und der Relaisstrom aufgezeichnet wird. Eine in dieser Weise aufgenommene Phasenfolgekurve zeigt Abb. 4.

III. Mitnahmebereich.

Bei der von uns angenommenen Schaltung sind die Bedingungen für beide Halbperioden einander gleich; daraus läßt sich ableiten, daß im

stationären Zustand, d. h. nach erreichter Mitnahme, die Kippschwingungen symmetrisch verlaufen, d. h. daß beide Halbperioden identisch sind. Für diesen Fall hat Hollmann⁴⁾ bereits festgestellt, daß die größte und die kleinste mögliche Frequenz Schwingungen der beiden in Abb. 5a angedeuteten Arten entspricht, während für den Fall, daß die Frequenz des Wechsel-

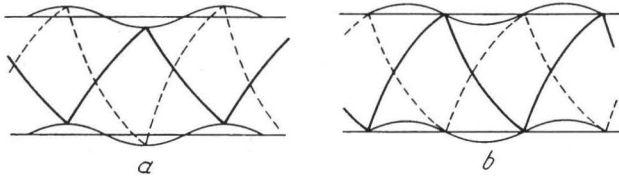


Abb. 5. Symmetrische Kippschwingungen.

stromes gerade gleich der Frequenz der freien Kippschwingungen ist, die ausgezogene Kurve der Abb. 5b gültig wäre. Die gestrichelte Kurve würde an sich die gleiche Frequenz geben, sie genügt aber, wie man leicht erkennt, nicht der oben angegebenen Bedingung

$$\left| \frac{d \varphi_{n+1}}{d \varphi_n} \right| < 1$$

und ist daher instabil. Zählt man die Phasen so, wie oben in Abb. 2 angedeutet, so ergibt sich also, daß die mitgenommene Schwingung gegen-

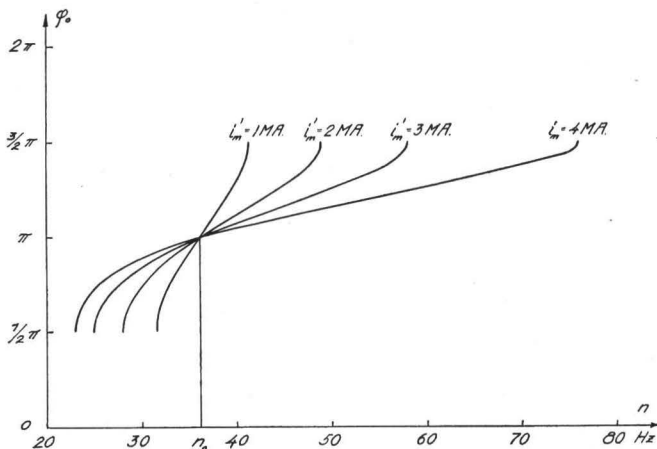


Abb. 6. Die stationäre Phase als Funktion der Frequenz.

über dem erregenden Wechselstrom die Phase π hat, wenn dessen Frequenz mit der der freien Kippschwingungen übereinstimmt, während bei den Grenzfrequenzen, die noch gerade imstande sind, die Kippschwingungen mitzunehmen, diese Phasenverschiebung die Werte $\frac{\pi}{2}$ bzw. $\frac{3\pi}{2}$ hat.

4) ENT 6, S. 253, 1929.

Welches diese Grenzfrequenzen sind, hängt natürlich von der Stärke des mitnehmenden Stromes ab und ist aus den für verschiedene Frequenzen

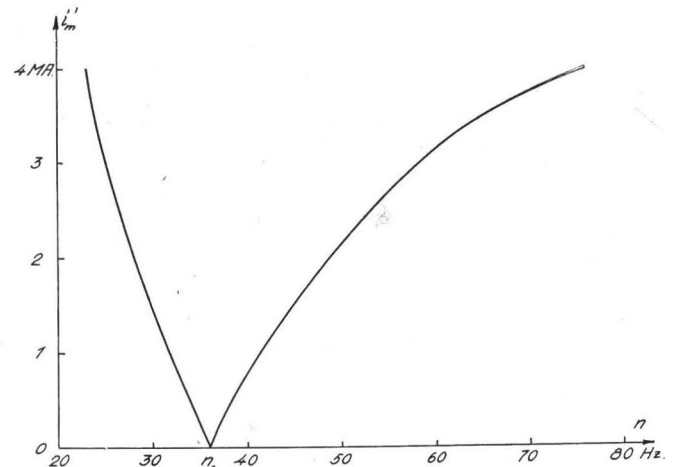


Abb. 7. Die Breite des Mitnahmebereiches.

und Stromstärken zu bestimmenden Phasenfolgekurven zu entnehmen. In dieser Weise wurde der Zusammenhang zwischen der stationären Phase und der Frequenz für die vorliegenden Versuchsbedingungen berechnet; er ist in Abb. 6 dar-

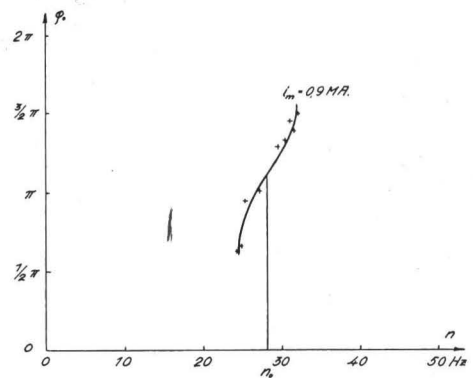


Abb. 8. Meßwerte (zu vergleichen mit Abb. 6).

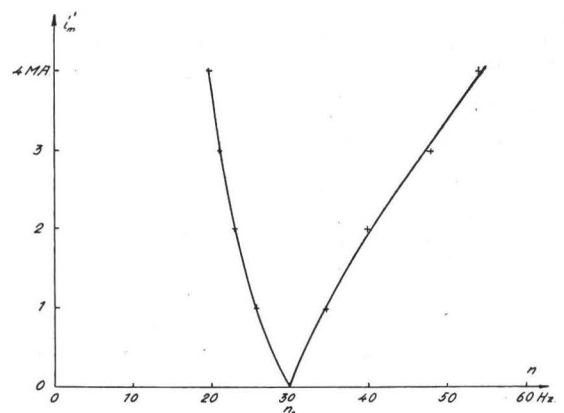


Abb. 9. (Entspricht Abb. 7.)

gestellt. Die Breite des Mitnahmebereiches, die sich daraus ergibt, zeigt Abb. 7, in der die beiden Grenzfrequenzen für verschiedene Werte des Wechselstroms dargestellt sind. (i'_m ist der Strom in der Hauptwicklung, reduziert auf die Hilfswicklung. Zum Vergleich sei angeführt, daß der Endwert J_0 des Hilfsstromes 10 mA betrug.) Die berechneten Abb. 6 und 7 können mit den entsprechenden beobachteten Abb. 8 und 9, bei denen nur die freie Hilfsfrequenz n_0 einen anderen Wert hatte, verglichen werden; man sieht, daß der Vorgang völlig wie erwartet verläuft.

IV. Die Vorgänge außerhalb des Mitnahmebereiches.

Wenn die Frequenz des störenden Wechselstromes von der der freien Kippschwingungen so weit abweicht, daß der Wechselstrom die Schwingungen nicht mehr mitzunehmen vermag, so können doch noch die von Hudec beobachteten „zyklischen Schwingungen“ eintreten. Dies sind periodische Vorgänge, deren Grund-

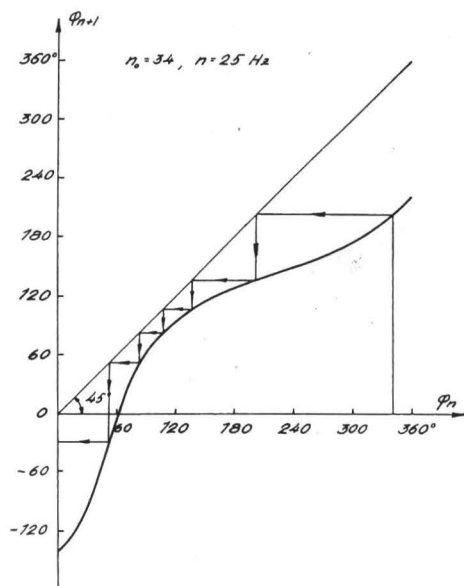


Abb. 10. Phasenfolgekurve außerhalb des Mitnahmebereiches.

frequenz aber ein ganzzahliger Bruchteil von derjenigen des Wechselstromes ist. Nicht diese Vorgänge sollen aber im folgenden betrachtet werden, sondern vielmehr die Erscheinungen, die sich einstellen, wenn die Relaisschwingung gerade nicht mehr mitgenommen werden kann, d. h. wenn man sich knapp außerhalb der in Abb. 7 und 9 gezeichneten Grenze befindet.

Die Phasenfolgekurve sieht in einem solchen Fall so aus, wie Abb. 10 zeigt. Daß eine stationäre Schwingung nicht möglich ist, erkennt man sofort daran, daß die Kurve die unter 45° gezogene Linie, die ja gerade der Bedingung $\varphi_n = \varphi_{n+1}$ entspricht, gar nicht mehr schneidet. Der zeitliche Verlauf der Erscheinung wird wieder durch die Treppenkonstruktion erhalten. Man sieht, daß die Phase sich dauernd ändert, aber mit abwechselnder Geschwindigkeit. Diese Er-

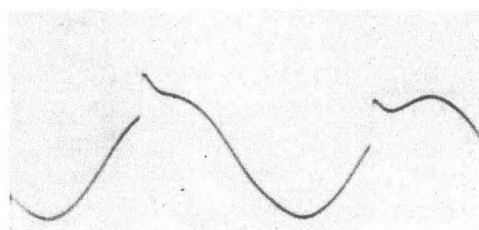


Abb. 11. Zur Erläuterung von Abb. 12.

scheinung ist sehr charakteristisch: als Beispiel und zugleich als Beleg, daß die hier beschriebenen Vorgänge bei Kippschwingungen jeder Art auftreten können, soll ein Oszillogramm mitgeteilt werden, das an einer Glimmlampe in der Blinkerschaltung, also an dem von Hudec untersuchten Vorgang, aufgenommen wurde. Die Oszillographenschleife war so geschaltet, daß sie sowohl den störenden Wechselstrom wie auch den kurz-

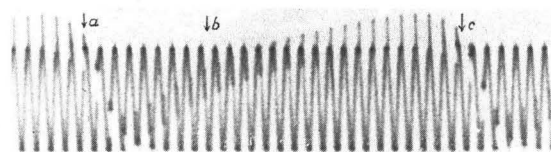


Abb. 12. Blinkvorgang (keine Mitnahme).

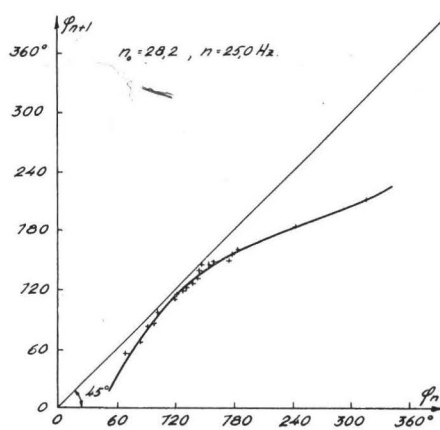


Abb. 13. (Entspricht Abb. 10.)

zeitig einsetzenden Glimmstrom wiedergab (vgl. Abb. 11). In dem soeben geschilderten Betriebszustand, wo die Wechselspannung die Kippschwingung gerade noch nicht mitnahm, wurde dann das Bild der Abb. 12 erhalten. Es ist deutlich zu erkennen, daß die Phase des Glimmvorganges gegenüber der störenden Wechselspannung sich zwischen a und b schnell, zwischen b und c dagegen nur noch langsam ändert.

Eine an der Gulstad-Anordnung dicht außerhalb des Mitnahmebereiches experimentell aufgenommene Phasenfolgekurve zeigt Abb. 13.

V. Die Wiedergabe von Telegraphierzeichen.

Aus den hier beschriebenen Versuchen folgt, daß das Gulstad-Relais, wie jede Kippschaltung, durch schwache Wechselströme mitgenommen werden kann. Beim wirklichen Telegraphierbetrieb liegen die Dinge nun etwas anders. Zunächst wird in der Regel nicht mit Sinus-, sondern

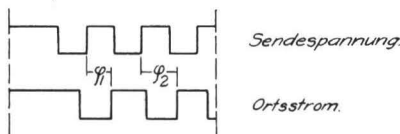


Abb. 14. Ermittlung der Phasenverschiebung zwischen Sender und Empfänger.

mit Rechteckzeichen gesendet. Am Empfangsende sind aber die Zeichen, und vor allem die kürzesten, so weit abgerundet, daß hierin kein wesentlicher Unterschied zu sehen ist. Wichtiger ist, daß die Zahl der aufeinanderfolgenden Zeichen kürzester Dauer nur sehr beschränkt ist; beim Morsealphabet z. B. können höchstens 5 Punkte aufeinander folgen. Der stationäre Zustand der Mitnahme wird also vielleicht gar nicht erreicht werden, sondern es werden nur einige auf ihn zu führende Stufen unseres Treppenzuges zurückgelegt werden. Außerdem ist die Anfangsphase nicht, wie das φ_1 bei unseren Versuchen, willkürlich, sondern der Anker des Relais hat vorher auf dem einen oder anderen Kontakt angelegen und wird sich bei einem ganz bestimmten Stromwert in Bewegung setzen.

Um die Vorgänge experimentell zu klären, wurden Telegraphierzeichen mit einem Wheatstone-sender über ein Kunstkabel ($CR = 0,13$) gesendet und der im Ortskreis des Gulstad-Relais fließende Strom zusammen mit den Sendezeichen oszillographisch beobachtet. Man erhält ein Bild nach

Art der Abb. 14. Die Zeitdifferenzen zwischen entsprechenden Punkten wurden mit der Punkt-frequenz in Phasen umgerechnet und außerdem die vorher bei der gleichen Frequenz beobachteten Phasenverschiebungen auf dem Kunstkabel abgezogen. Die übrigbleibenden Werte φ_k sind in Abb. 15 als Funktion des Stellenzeigers k ($k = 1, 2, 3, 4$) aufgetragen worden. Aus dem Bild ist zu sehen, daß diese Phasendifferenzen innerhalb des Mitnahmebereiches sich in der Tat einem Grenzwert nähern, ihn aber nicht erreichen, so daß also der stationäre Endpunkt der Phasen-

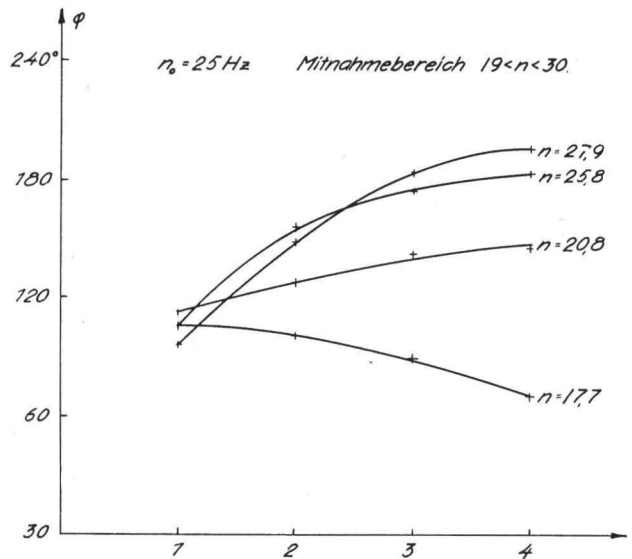


Abb. 15. $\varphi_k = f(k)$ beim Telegraphievorgang.

folgekurve, der auf der 45° -Linie liegt, nicht erreicht wird. Dem Bild ist außerdem zu entnehmen, daß die Punktlängen am gleichmäßigsten werden, wenn man sich ungefähr an der unteren Grenze des Mitnahmebereiches hält, denn dann würde man in Abb. 15 eine fast horizontale Linie erhalten. Es ist also günstig, wenn das Gulstad-Relais von selbst etwas schnellere Schwingungen ausführt, als der Telegraphierfrequenz entspricht. Es ist aber möglich, daß diese Regel nur für die bei den Versuchen gerade vorliegenden Phasenverhältnisse gilt und in andern Fällen zu ändern ist. Innerhalb des Mitnahmebereiches wird aber die günstigste Einstellung stets liegen.

VI. Zusammenfassung.

Bei der Gulstadschen Telegraphierschaltung arbeitet man mit einem selbstschwingenden Empfangsrelais. Aus der Beobachtung, daß dessen

Schwingungszahl mit der Telegraphierfrequenz, die den ankommenden Zeichen entspricht, nicht genau übereinzustimmen braucht, wird geschlossen, daß die Relaischwingungen von den Telegraphierzeichen mitgenommen werden. Diese Vermutung läßt sich durch genauere Untersuchung des Vorganges beweisen. Es gelingt, die zeitliche Ausbildung des stationären Zustandes der Mitnahme

theoretisch und experimentell zu verfolgen, und es zeigt sich, daß der Vorgang in vollkommener Analogie zu anderen Fällen der Mitnahme bei Kippschwingungen verläuft. Besonders untersucht wurden die Erscheinungen bei eben noch nicht erreichter Mitnahme der Schwingungen durch die Außenstörung.

(Eingegangen am 30. Mai 1931.)