

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

**Band:** 42 (1951)

**Heft:** 20

**Artikel:** Der Rototrol : eine neue elektrische Gleichstrommaschine

**Autor:** Tschappu, F.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1061025>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 23.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

Mangel an einigen tausend einfachen Leuchtdichtemessern bestehe, beleuchtet diese Sachlage kräftig. Für den Laboratoriumsbedarf und den fachmännischen Gebrauch ist jedenfalls dieser Mangel bereits behoben.

#### Literatur

- [1] Schweizerisches Beleuchtungs-Komitee: Lichttechniker-Tagung über «Licht und Sehen» vom 24. November 1949 in Bern. Vorträge: Goldmann, H.: Einiges über die Physiologie der Blendung und das Sehen bei herabgesetzter Beleuchtung. Bull. SEV Bd. 41(1950), Nr. 20, S. 751...760.  
Spieser, R.: Über Leuchtdichte und Blendung durch Leuch-

ten, Gruber W.: Praktische Erfahrung mit Blendungen durch Lichtreklamen.

- [2] Dresler, A.: Methoden zur Bewertung der Beleuchtungsgüte. Eine kritische Übersicht. Bull. SEV Bd. 42(1951), Nr. 15, S. 531...539.  
[3] Taylor, A. H.: Brightness and Brightness Meters. Illum. Engng. Bd. —(1942), Januar.  
[4] A Brightness Meter, developed by Luckiesh and Taylor, Lightg. News. Trans. Illum. Eng. Soc. Bd. —(1937), März.  
[5] Luckiesh M. und A. H. Taylor: A Brightness-Meter. J. opt. Soc. Amer. Bd. 27(1937), Nr. 132.

#### Adresse des Autors:

Prof. R. Spieser, Seestrasse 111, Herrliberg (ZH).

## Der Rototrol \*) Eine neue elektrische Gleichstrommaschine

Von F. Tschappu, Zürich

621.313.226.3

An Hand der Ersatzschemata wird zuerst die prinzipielle Funktionsweise dieses als Regler arbeitenden Gleichstrom-Leistungsverstärkers erläutert. Es folgt darauf eine eingehende Behandlung der in der Maschine induzierten Spannungen, der Kommutationsverhältnisse, sowie der magnetischen Trägheit. Am Schluss des Artikels orientieren einige Beispiele über das ausgedehnte Anwendungsgebiet dieser Maschine in der Praxis.

Exposé, à l'aide du schéma équivalent, du principe de fonctionnement de cet amplificateur de puissance à courant continu, agissant comme régulateur. Etude détaillée des tensions induites dans la machine, des conditions de commutation et de l'inertie magnétique. Quelques exemples illustrent le vaste domaine d'applications pratiques des rototrols.

#### 1. Allgemeines

Unter dem Namen «Rototrol» existiert in Amerika eine Gleichstrommaschine spezieller Art. Rototrol heisst sinngemäss übersetzt *rotierender Kontroller*. Die Maschine arbeitet als rotierender Gleichstromleistungsverstärker und wird für Regulierzwecke mannigfaltiger Art verwendet.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Theorie, dem Aufbau und der Funktionsweise dieser sehr interessanten, in ihrem Aufbau aber komplizierten Maschine. Ihre guten Eigenschaften, nämlich kleine magnetische Trägheit und grosser Leistungs-Verstärkungsgrad, machen den Rototrol-Verstärkerregler für die verschiedensten Regulierzwecke besonders geeignet. Einige Anwendungsbeispiele, welche später eingehender behandelt werden, seien hier erwähnt:

Steuerung bzw. Regulierung der Klemmenspannung von Generatoren, der Drehzahl und Beschleunigung von Gleichstromantrieben, der Hubgeschwindigkeit von Hebwerken usw.

#### 2. Arbeitsweise des Rototrols

Der in Fig. 1 dargestellte elektrische Kreis besteht aus einem Ohmschen Widerstand  $R_B$ , einem Gleichstromgenerator  $G$  mit Serieerregung und einem Schalter  $S$  mit den Klemmen  $A$  und  $B$ . Der Generator  $G$  wird mit konstanter Drehzahl  $n$  angetrieben und erzeugt die Rotationsspannung  $u_s$ .

Für das ungesättigte Gebiet des aktiven Eisens gilt folgende Beziehung:

$$u_s = -K_s i$$

Das negative Vorzeichen von  $K_s$  ergibt sich aus der Tatsache, dass der Strom  $i$  die entgegengesetzte Richtung wie  $u_s$  hat.

Damit im Kreise bei geschlossenem Schalter  $S$  ein Strom  $i$  entstehen kann, muss folgende Bedingung erfüllt sein:

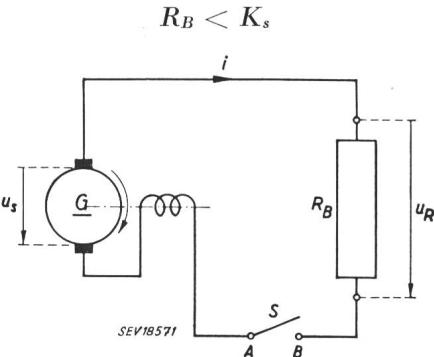


Fig. 1

#### Arbeitsweise des Rototrols

$G$  Gleichstrom-Generator mit Serieerregung  
 $R_B$  Ohmscher Widerstand  
 $S$  Schalter mit den Klemmen  $A$  und  $B$

Für  $R_B = K_s$  tritt der Zustand der Selbsterregung im Kreise ein. Dies soll für die folgenden Betrachtungen stets der Fall sein.

$$u_R = +R_B i \quad u_s = -K_s i$$

Die Größen  $u_s = f(i)$  und  $u_R = f(i)$  sind in Fig. 2 dargestellt. Ein im Kreise fliessender Strom  $i$  befindet sich im indifferenten Gleichgewicht. Er kann jeden Wert zwischen  $-i_s$  und  $+i_s$  annehmen. Vom Punkte  $S$  der Kurve  $u_s = f(i)$  an macht sich die Sättigung des aktiven Eisens bemerkbar, und die Linearität zwischen  $u_s$  und  $i$  wird gestört.

Anstelle des Schalters  $S$  werde nun zur Zeit  $t_1$  eine positive Spannungsquelle  $u_1$  mit vernachlässigbarem innerem Widerstand in den Kreis eingeschaltet und zur Zeit  $t_2$  wieder abgeschaltet. Während der Zeit  $t_1$  bis  $t_2$  ist im Kreise nur diese

\*) Vortrag, gehalten am 4. Dezember 1950 im Kolloquium des Elektrotechnischen Institutes der ETH.

Spannung  $u_1$  wirksam. Der Strom  $i_{t_1}$  schwillt an und hat zur Zeit  $t_2$  den Wert  $i_{t_2}$  erreicht. Nun wird die Spannung  $u_1$  wieder abgeschaltet, und der Strom  $i_{t_2}$  bleibt konstant und im indifferenten Gleichgewicht. Wird nun eine negative Spannung  $-u_1$  an die Klemmen A und B gelegt, so wird der Strom  $i_{t_2}$  kleiner und nimmt den konstanten Wert  $i_{t_3}$  an, der zur Zeit  $t_3$  des Abschaltens der Spannung  $-u_1$  im Kreise fliesst.

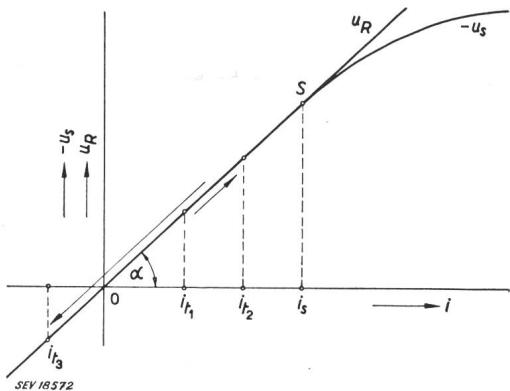


Fig. 2  
Spannungskurven in Funktion des Stromes  
 $u_R$  Spannung am Ohmschen Widerstand  $R_B$   
 $u_s$  Spannung am serieerregten Generator  
 $i_t$  Strom im Zeitmoment  $t$

Mit entsprechenden Spannungsimpulsen ist es also möglich, den im Kreise fliessenden selbst-erregten Strom  $i$ , der sich im indifferenten Gleichgewicht befindet, im ungesättigten Gebiet des aktiven Eisens der Gleichstrommaschine beliebig zu steuern. Die Steuerspannung  $u_1$  reguliert den Strom  $i$  in den Grenzen von  $-i_s$  bis  $+i_s$ . Diese Reguliermöglichkeit des Stromes  $i$  wird im Rototrol-Verstärkerregler angewandt. Die Maschine vereinigt in sich die Funktionen des Verstärkens der Steuerspannung  $u_1$  und des Regulierens des Stromes  $i$  nach bestimmten Gesetzen.

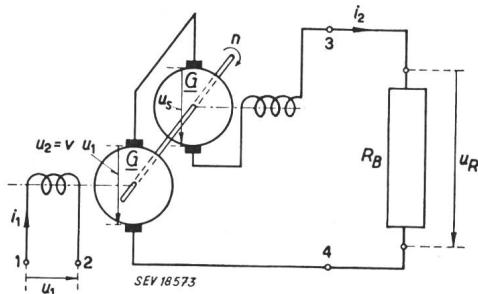


Fig. 3  
Prinzipschema des Rototrols

Klemmen 1 und 2: Eingangsklemmen des Rototrols  
Klemmen 3 und 4: Ausgangsklemmen des Rototrols (Belastungskreis)

Klemmen 3 und 4:

Ausgangsklemmen des Rototrols (Belastungskreis)  
 $u_1$  Steuerspannung;  $u_2$  verstärkte Steuerspannung;  $v$  Spannungsverstärkungsverhältnis;  $u_s$  Seriespannung im Belastungskreis;  $u_R$  Spannung am Ohmschen Widerstand  $R_B$ ;  $R_B$  Belastungswiderstand;  $i_1$  Erregerstrom;  $i_2$  Belastungsstrom;  $n$  konstante Drehzahl des Rototrols

Das prinzipielle Schema der Maschine ist in Fig. 3 dargestellt. Die Klemmen 1 und 2 sind die Eingangsklemmen, die Klemmen 3 und 4 die Ausgangsklemmen des Rototrols. Als Belastung dient der konstante Widerstand  $R_B$ . Der Belastungskreis

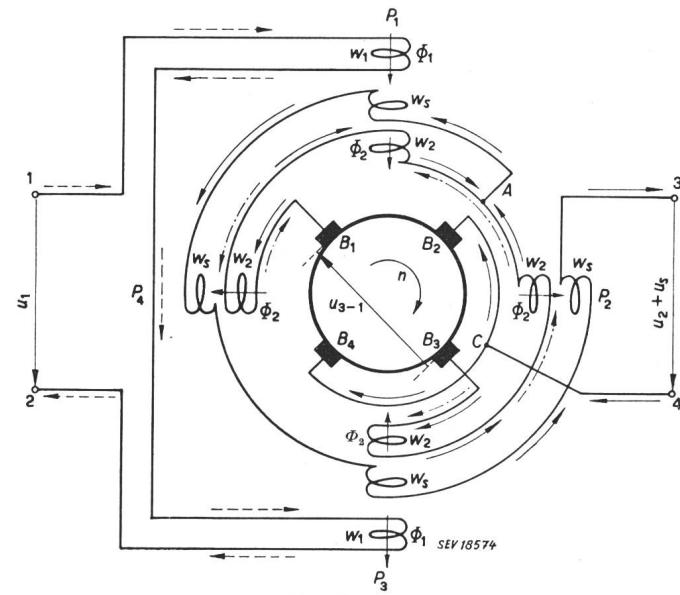
befindet sich im Zustand der beginnenden Selbst-erregung. Die Steuerspannung  $u_1$  wird im Rototrol auf die Ausgangsspannung  $u_2 = v u_1$  verstärkt, welche die Grösse des Belastungsstromes  $i_2$  reguliert ( $v$  Spannungsverstärkungsgrad).

### 3. Aufbau des Rototrol-Verstärkers

Beim Rototrol-Verstärker sind zwei Verstärkerstufen und die Serieerregung zur Erzeugung der Spannung  $u_s$  in einer Maschine vereinigt. Theoretisch wären wohl mehrere Verstärkerstufen in einer Maschine möglich, doch begrenzen die praktischen Schwierigkeiten ihre Zahl im allgemeinen auf zwei. Im besonderen der technologische Aufbau sowie die Beherrschung der Kommutationsverhältnisse setzen die maximal mögliche Zahl der Verstärkerstufen fest. Wir befassen uns in der Folge nur mit dem 2stufigen Rototrol.

Der 2stufige Rototrol-Verstärker wird aus einer gewöhnlichen 4poligen Gleichstrommaschine mit normalem Doppelbürstensatz entwickelt.

Die Ankerwicklung besteht aus einer normalen 4poligen Schleifenwicklung. Aus im Abschnitt 4 erläuterten Gründen ist eine Wellenwicklung für diese Zwecke unbrauchbar. Die vier Bürsten befinden sich in den neutralen Zonen. Der Anker der Gleichstrommaschine muss mit der konstanten Drehzahl  $n$  angetrieben werden.



Wicklungen  $w_1$ . Dabei wird das magnetische Feld  $\Phi_1$  der 1. Stufe erzeugt. Dieses Feld induziert zwischen den Bürsten  $B_3$  und  $B_1$  die Rotationsspannung  $u_{3-1}$ , welche der Spannung  $u_1$  direkt proportional ist, wenn man die Sättigungserscheinungen im aktiven Eisen vernachlässigt. Die Spannung  $u_{3-1}$  ist die Ausgangsspannung der 1. Verstärkerstufe; sie wird zur Eingangsspannung der 2. Verstärkerstufe. Die Bürsten  $B_1$  und  $B_3$  sind über die Erregerwicklungen  $w_2$  der vier Pole kurzgeschlossen. Die Spannung  $u_{3-1}$  bildet den Strom  $i_k$  aus, den Erregerstrom der 2. Verstärkerstufe, welcher seinerseits das magnetische Feld  $\Phi_2$  der 2. Verstärkerstufe aufbaut. Die Ausgangsspannung  $u_2$  der 2. Verstärkerstufe wird zwischen den Punkten A und C abgegriffen. Zwischen dem Punkt A und der Ausgangsklemme 3 des Rototrols liegen noch die Serieerregewindungen  $w_s$ . An den Ausgangsklemmen 3 und 4 herrscht die Spannung  $u_2 + u_s$ . Der Punkt C besitzt das Potential der beiden galvanisch kurzgeschlossenen Bürsten  $B_2$  und  $B_4$ . Das Potential des Punktes A liegt in der Mitte der Potentiale der Bürsten  $B_3$  und  $B_1$ .

Auf den ersten Blick wirkt das Schaltschema der Maschine nach Fig. 4 etwas verwirrend. Es ist daher vorteilhaft, sich an Hand des Ersatzschemas in Fig. 5 Einblick in die inneren Verhältnisse zu verschaffen. Dort wurden zur Vereinfachung des Bildes die Erregerwicklungen aus der Maschine herausgezeichnet. Die Erregerwindungen der 1. Stufe  $w_1$  sind auf den Polen  $P_1$  und  $P_3$ , diejenigen der 2. Stufe  $w_2$  und die Serieerregung  $w_s$  auf den Polen  $P_1 \dots P_4$  aufgebracht.

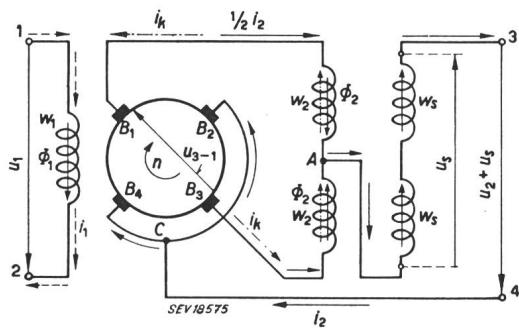


Fig. 5  
Ersatzschema des Rototrols  
Legenden siehe bei Fig. 4

Beide Verstärkerstufen sind einander in derselben Maschine überlagert. Durch die Superposition zweier magnetischer Felder, eines 2poligen,  $\Phi_1$ , und eines 4poligen,  $\Phi_2$ , entsteht eine magnetische Unsymmetrie, und es erhebt sich die Frage, ob sich die beiden Verstärkerstufen nicht gegenseitig beeinflussen. Dies darf natürlich nicht der Fall sein. Die Spannung  $u_{3-1}$ , die Ausgangsspannung der 1. Stufe, darf nur vom magnetischen Felde  $\Phi_1$  der 1. Stufe, die Spannung  $u_2$ , die Ausgangsspannung der 2. Stufe, nur vom magnetischen Felde  $\Phi_2$  der 2. Stufe abhängen.

#### 4. Die im Anker induzierten Spannungen

Die Rotorwicklung ist als 4polige Schleifenwicklung ausgebildet. Die in Fig. 6 eingezeichnete

Richtung der magnetischen Flüsse wird als positive Richtung definiert. An Hand der Fig. 4 lassen sich folgende Beziehungen aufstellen:

$$\Phi_{P1} = +\Phi_1 + \Phi_2 \quad \text{magnetischer Fluss, Pol 1} \quad (1)$$

$$\Phi_{P2} = -\Phi_2 \quad \text{magnetischer Fluss, Pol 2} \quad (2)$$

$$\Phi_{P3} = -\Phi_1 + \Phi_2 \quad \text{magnetischer Fluss, Pol 3} \quad (3)$$

$$\Phi_{P4} = -\Phi_2 \quad \text{magnetischer Fluss, Pol 4} \quad (4)$$

Ferner sei angenommen, dass ein positives magnetisches Feld in den Ankerleitern eine positive Rotationsspannung induziere, deren Vektor senkrecht in die Tafeloberfläche hineingerichtet sei (Fig. 6).

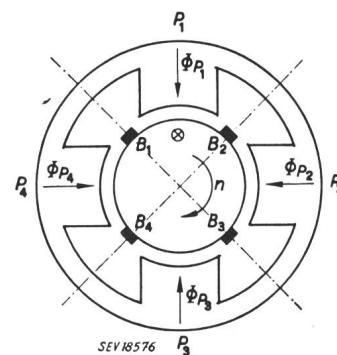


Fig. 6

Im Anker induzierte Spannungen  
 $\Phi_{P1} \dots \Phi_{P4}$  magnetische Flüsse der Pole 1...4  
 $P_1 \dots P_4$  Pole 1...4;  $B_1 \dots B_4$  Bürsten;  $n$  Drehzahl

a) Erzeugung der Spannung  $u_{3-1}$   
( $u_{3-1}$  Spannung zwischen den Bürsten  $B_3$  und  $B_1$ )

An dieser Spannungsproduktion sind beteiligt die positiven oberen Spulenseiten von  $B_3$  über  $B_4$  bis nach  $B_1$  und die unteren negativen Spulenseiten, die gegenüber den oberen um eine Polteilung verschoben sind, also von  $B_4$  über  $B_1$  bis nach  $B_2$ .

Wir können daher folgende Beziehung aufstellen:

$$u_{3-1} = k (\Phi_{P3} + \Phi_{P4} - \Phi_{P4} - \Phi_{P1})$$

Setzen wir die Formeln (1)...(4) oben ein, so erhalten wir

$$u_{3-1} = -2 k \Phi_1 \quad (5)$$

Im andern Ankerzweig von  $B_3$  über  $B_2$  nach  $B_1$  muss natürlich die gleiche Spannung  $u_{3-1}$  induziert werden, was sich durch eine Kontrolle leicht bestätigen lässt. Die Spannung  $u_{3-1}$ , die Ausgangsspannung der 1. Verstärkerstufe, hängt also erwartungsgemäß nur vom magnetischen Felde der 1. Stufe ab.  $\Phi_2$  hat keinen Einfluss auf  $u_{3-1}$ .

Wäre im Rotor eine gewöhnliche Wellenwicklung vorhanden, so wären an der Erzeugung der Bürstenspannung  $u_{3-1}$  sämtliche Ankerleiter beteiligt. Die Summe der Spannungen aller Ankerleiter ist aber immer gleich null, da sich das Spannungspolygon schließen muss. Infolgedessen wäre die Spannung  $u_{3-1}$  (also die Spannung zwischen zwei elektrisch um  $360^\circ$  verschobenen Bürsten) ungeachtet der Unsymmetrie der magnetischen Felder immer gleich null. Das ist der Grund, warum beim Rototrol nur Schleifenwicklung im Anker in Frage kommt.

b) Erzeugung der Spannung  $u_2$

( $u_2$  Ausgangsspannung der 2. Verstärkerstufe zwischen den Punkten A und C, siehe Fig. 5)

Der Punkt C hat das Potential der Bürsten  $B_2$  und  $B_4$ , welche galvanisch miteinander verbunden sind.

Das Potential des Punktes A liegt zwischen dem Wert der Potentiale der Bürsten  $B_3$  und  $B_1$ .

Zur Bestimmung der Spannung  $u_2$  ist vorerst die Kenntnis der Spannungen  $u_{3-4}$  und  $u_{1-4}$  notwendig.

$u_2$  berechnet sich nach folgender Formel:

$$u_2 = \frac{1}{2} (u_{3-4} + u_{1-4}) \quad (6)$$

An der Erzeugung der Spannung  $u_{3-4}$  sind beteiligt die positiven oberen Spulenseiten von  $B_3$  bis  $B_4$  und die negativen unteren Spulenseiten von  $B_4$  bis  $B_1$ .

$$u_{3-4} = k (\Phi_{P_3} - \Phi_{P_4}) = k (-\Phi_1 + 2 \Phi_2) \quad (7)$$

An der Erzeugung der Spannung  $u_{1-4}$  sind beteiligt die negativen oberen Spulenseiten von  $B_4$  bis  $B_1$  und die positiven unteren Spulenseiten von  $B_2$  bis  $B_1$ .

$$u_{1-4} = k (-\Phi_{P_4} + \Phi_{P_1}) = k (+\Phi_1 + 2 \Phi_2) \quad (8)$$

Setzen wir die Gleichungen (7) und (8) ein in die Gleichung (6), so erhalten wir:

$$u_2 = \frac{1}{2} k (4 \Phi_2) = 2 k \Phi_2 \quad (9)$$

Die Spannung  $u_2$ , die Ausgangsspannung der 2. Verstärkerstufe, hängt also erwartungsgemäss nur vom magnetischen Feld  $\Phi_2$  der 2. Verstärkerstufe ab.  $\Phi_1$  hat keinen Einfluss auf  $u_2$ .

An der Schaltung der 2. Verstärkerstufe müssen wir noch eine kleine Korrektur anbringen, weil der Belastungsstrom  $i_2$  das magnetische Feld  $\Phi_2$  beeinflusst (siehe Fig. 5). Der Verstärkungsgrad darf natürlich nicht von der Belastung abhängen. Im Kurzschlusskreis, dem Erregerkreis der 2. Stufe, fliesst neben dem Kurzschlussstrom  $i_k$  noch je die Hälfte des Belastungsstromes  $i_2$ . An Hand des Ersatzschemas der Fig. 5 lässt sich der Weg des Belastungsstromes  $i_2$  verfolgen. Er fliesst von der Klemme 4 nach dem Punkte C, von wo er je zur Hälfte über die Bürsten  $B_2$  und  $B_4$  in den Anker eintritt. Bei den Bürsten  $B_3$  und  $B_1$  tritt er je zur Hälfte wieder aus dem Anker aus, durchfliesst die Erregerwindungen  $w_2$  der 2. Verstärkerstufe und sammelt sich beim Punkte A wieder.

Der Belastungsstrom  $i_2$  verstärkt die Durchflutungen der Pole  $P_3$  und  $P_4$  und schwächt diejenige von  $P_1$  und  $P_2$ . Eine Ungleichheit der Durchflutungen auf den Polen  $P_1$  und  $P_3$  beeinflusst die Spannung  $u_{3-1}$ . Eine Ungleichheit der Durchflutungen auf den Polen  $P_2$  und  $P_4$  hätte eine Spannung  $u_{2-4}$  zwischen den Bürsten  $B_2$  und  $B_4$  zur Folge, die einen Ausgleichstrom zwischen diesen beiden Bürsten verursachen würde, da sie galvanisch miteinander verbunden sind. Darunter hätte natürlich in erster Linie die Kommutation zu leiden.

Durch folgenden Kniff kann man den schädlichen Einfluss des Belastungsstromes  $i_2$  auf den magne-

tischen Fluss der 2. Verstärkerstufe eliminieren (Fig. 7):

Die Pole  $P_1$  bis  $P_4$  werden in der Weise bewickelt, dass sich die Durchflutung des Stromes  $\frac{1}{2} i_2$  in beiden Teilwicklungen pro Pol aufhebt, diejenige von  $i_k$  addiert. Auf diese Weise gelingt es, das magnetische Feld  $\Phi_2$  der 2. Verstärkerstufe nur vom Kurzschlussstrom  $i_k$  abhängig zu machen.

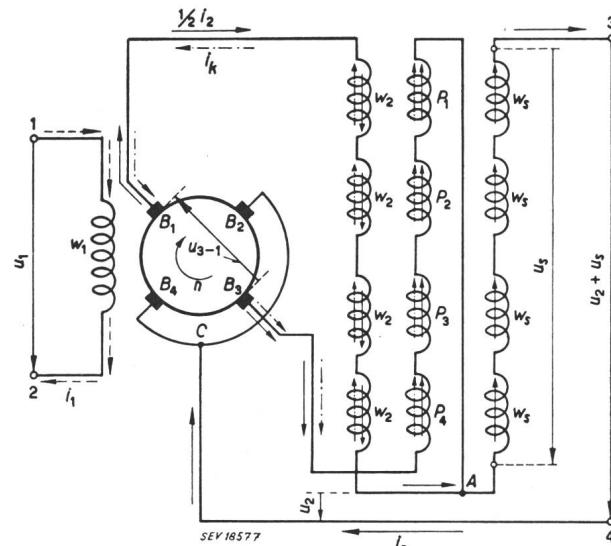


Fig. 7  
Vollständiges Ersatzschema des Rototrols  
Legenden siehe bei Fig. 4

### 5. Kommutation

Das Vorhandensein einer Unsymmetrie der magnetischen Felder nötigt zu einer sorgfältigen Betrachtung der Kommutationsverhältnisse.

Da die Polzahl in Stator und Rotor gleich ist, können zur Verbesserung der Kommutationsverhältnisse Wendepole verwendet werden. Gemäss Ersatzschema Fig. 5 kann man für die Bürstenströme schreiben:

$$i_{B1} = +i_k - \frac{1}{2} i_2 \quad \text{Strom der Bürste } B_1 \quad (10)$$

$$i_{B2} = +\frac{1}{2} i_2 \quad \text{Strom der Bürste } B_2 \quad (11)$$

$$i_{B3} = -i_k - \frac{1}{2} i_2 \quad \text{Strom der Bürste } B_3 \quad (12)$$

$$i_{B4} = +\frac{1}{2} i_2 \quad \text{Strom der Bürste } B_4 \quad (13)$$

In Fig. 8 sind die von den Bürsten  $B_1$ — $B_4$  kurzgeschlossenen Ankerwindungen und die zur Kompen-sation der Kommutationsspannungen notwen-digen Wendepole  $WP_{1-2}$ ... $WP_{4-1}$  dargestellt.

Wir nehmen ganz allgemein an, dass zur Erzeugung der einzelnen Wendefelder alle vier Bürstenströme  $i_{B1}$ ... $i_{B4}$  notwendig seien, und machen daher folgenden Ansatz:

$$AW_{WP_{1-2}} = (a i_{B1} + b i_{B2} + c i_{B3} + d i_{B4}) k \quad (14)$$

Dabei sind die Koeffizienten  $a$ ... $d$  nur Vergleichsgrössen.

Da die Bürstenströme am Ankerumfang sowie die Wendepole zyklisch vertauscht sind, kann man annehmen, dass es auch die Koeffizienten  $a$ ... $d$  seien.

$$AW_{WP_{1-2}} = (a i_{B_1} + b i_{B_2} + c i_{B_3} + d i_{B_4}) k \quad (14)$$

$$AW_{WP_{2-3}} = (d i_{B_1} + a i_{B_2} + b i_{B_3} + c i_{B_4}) k \quad (15)$$

$$AW_{WP_{3-4}} = (c i_{B_1} + d i_{B_2} + a i_{B_3} + b i_{B_4}) k \quad (16)$$

$$AW_{WP_{4-1}} = (b i_{B_1} + c i_{B_2} + d i_{B_3} + a i_{B_4}) k \quad (17)$$

Die Spannung der Selbstinduktion  $u_L$  in den kurzgeschlossenen Windungen ist proportional der Stromänderung unter der betreffenden Bürste während der Kommutation, also gleich dem Bürstenstrom  $i_B$ . Die Wendefeldspannung  $u_w$  muss daher

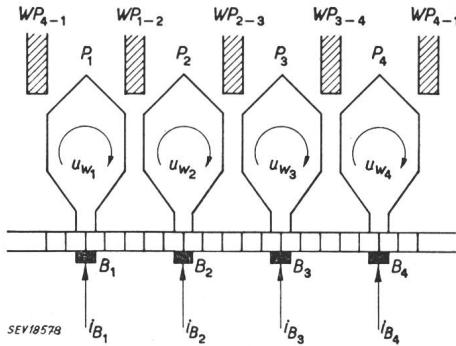


Fig. 8

Schema der kurzgeschlossenen Ankerwindungen und der Wendepole

$WP_{x-y}$  Wendepol zwischen den Polen  $P_x$  und  $P_y$   
 $u_{wx}$  Wendefeldspannung induziert in den von der Bürste  $B_x$  kurzgeschlossenen Windungen  
 $i_B$  Bürstenströme

auch proportional dem Bürstenstrom  $i_B$  sein. In einer Kurzschlusswindung werden Spannungen von 2 Wendefeldern induziert (siehe Fig. 8).

Wir können daher setzen:

$$u_{w1} = k (AW_{WP_{4-1}} - AW_{WP_{1-2}}) \quad (18)$$

$$u_{w2} = k (AW_{WP_{1-2}} - AW_{WP_{2-3}}) \quad (19)$$

$$u_{w3} = k (AW_{WP_{2-3}} - AW_{WP_{3-4}}) \quad (20)$$

$$u_{w4} = k (AW_{WP_{3-4}} - AW_{WP_{4-1}}) \quad (21)$$

$u_{wx}$  Wendefeldspannung in der von der Bürste  $B_x$  kurzgeschlossenen Windungen.

$AW_{WP_{x-y}}$  Ampèrewindungen des Wendepols  $WP_{x-y}$  zwischen den Bürsten  $B_x$  und  $B_y$ .

Wir setzen die Beziehung (14) und (17) ein in die Gleichung (18)

$$u_{w1} = k [i_{B_1} (b - a) + i_{B_2} (c - b) + i_{B_3} (d - c) + i_{B_4} (a - d)] \quad (22)$$

Berücksichtigen wir noch folgende Zusammenhänge:

$$i_{B_2} = -i_{B_1} + i_k$$

$$i_{B_3} = i_{B_1} - 2 i_k$$

$$i_{B_4} = -i_{B_1} + i_k$$

so erhalten wir:

$$u_{w1} = k [i_{B_1} (-2a + 2b - 2c + 2d) + i_k (+a - b + 3c - 3d)] \quad (23)$$

Wir setzen die Beziehung (14) und (15) ein in die Gleichung (19)

$$u_{w2} = k [i_{B_1} (a - d) + i_{B_2} (b - a) + i_{B_3} (c - b) + i_{B_4} (d - c)] \quad (24)$$

Berücksichtigen wir noch folgende Zusammenhänge:

$$i_{B_1} = -i_{B_2} + i_k$$

$$i_{B_3} = -i_{B_2} - i_k$$

$$i_{B_4} = +i_{B_2}$$

so erhalten wir:

$$u_{w2} = k [i_{B_2} (-2a + 2b - 2c + 2d) + i_k (+a + b - c - d)] \quad (25)$$

Wir setzen die Beziehung (15) und (16) ein in die Gleichung (20)

$$u_{w3} = k [i_{B_1} (d - c) + i_{B_2} (a - d) + i_{B_3} (b - a) + i_{B_4} (c - b)] \quad (26)$$

Berücksichtigen wir noch folgende Zusammenhänge:

$$i_{B_1} = i_{B_3} + 2 i_k$$

$$i_{B_2} = -i_{B_3} - i_k$$

$$i_{B_4} = -i_{B_3} - i_k$$

so erhalten wir:

$$u_{w3} = k [i_{B_3} (-2a + 2b - 2c + 2d) + i_k (-a + b - 3c + 3d)] \quad (27)$$

Wir setzen die Beziehung (16) und (17) ein in die Gleichung (21)

$$u_{w4} = k [i_{B_1} (c - b) + i_{B_2} (d - c) + i_{B_3} (a - d) + i_{B_4} (b - a)] \quad (28)$$

Berücksichtigen wir noch folgende Zusammenhänge:

$$i_{B_1} = -i_{B_4} + i_k$$

$$i_{B_2} = +i_{B_4}$$

$$i_{B_3} = -i_{B_4} - i_k$$

so erhalten wir:

$$u_{w4} = k [i_{B_4} (-2a + 2b - 2c + 2d) + i_k (-a - b + c + d)] \quad (29)$$

Die Gleichungen (23), (25), (27) und (29) stellen die Wendefeldspannungen der vier kurzgeschlossenen Windungen in Funktion des betreffenden Bürstenstromes und des Kurzschlußstromes dar.

Die Wendefeldspannungen dürfen aber nur vom jeweiligen Bürstenstrom abhängig sein. Folglich müssen in den Gleichungen (23), (25), (27) und (29) die Klammerausdrücke bei  $i_k$  den Wert null ergeben. Dies liefert uns die notwendigen Beziehungen zum Berechnen der Koeffizienten  $a$ ,  $b$ ,  $c$  und  $d$ . Aus Gleichung (23) folgt:

$$+ a - b + 3c - 3d = 0 \quad (30)$$

Aus Gleichung (25) folgt:

$$+ a + b - c - d = 0 \quad (31)$$

Aus Gleichung (27) folgt:

$$- a + b - 3c + 3d = 0 \quad (32)$$

Aus Gleichung (29) folgt:

$$- a - b + c + d = 0 \quad (33)$$

Da die Koeffizienten  $a, b, c$  und  $d$  nur Vergleichsgrößen sind, genügen schon die Gleichungen (30) und (31), oder (32) und (33), um sie zu bestimmen.

Die Werte	$a = +1$	$c = -\frac{1}{3}$
	$b = -1$	$d = +\frac{1}{3}$

erfüllen die Gleichungen (30) bis (33).

Wir setzen die Werte der Koeffizienten  $a, b, c$  und  $d$  ein in die Gleichungen (14) bis (17) und erhalten:

$$AW_{WP1-2} = k (+ i_{B1} - i_{B2} - \frac{1}{3} i_{B3} + \frac{1}{3} i_{B4}) \quad (34)$$

$$AW_{WP2-3} = k (+ \frac{1}{3} i_{B1} + i_{B2} - i_{B3} - \frac{1}{3} i_{B4}) \quad (35)$$

$$AW_{WP3-4} = k (- \frac{1}{3} i_{B1} + \frac{1}{3} i_{B2} + i_{B3} - i_{B4}) \quad (36)$$

$$AW_{WP4-1} = k (- i_{B1} - \frac{1}{3} i_{B2} + \frac{1}{3} i_{B3} + i_{B4}) \quad (37)$$

Zur einwandfreien Kompensation der Spannung der Selbsinduktion in den kurzgeschlossenen Windungen sind also alle vier Bürstenströme notwendig. Dies bedingt vier getrennte Wicklungen pro Wendepol. Außerdem kommt dazu noch eine Wicklung pro Wendepol zur Kompensation des Ankerfeldes, wie man im folgenden Kapitel sehen wird.

## 6. Ankerrückwirkung

Im Anker fliessen zwei Ströme, der Kurzschlussstrom  $i_k$ , der dem 2poligen System, und der Belastungsstrom  $\frac{1}{2} i_2$ , der dem 4poligen System zugeordnet ist. Beide Ströme erzeugen ein Ankerquerfeld.

Der Kurzschlußstrom  $i_k$  erzeugt ein 2poliges Ankerquerfeld  $\Phi_{A1}$  (Fig. 9a). Es wirkt in der Achse der Pole  $P_2$  und  $P_4$ . Dieses Feld  $\Phi_{A1}$  muss durch eine auf den beiden Polen  $P_2$  und  $P_4$  aufgebrachte Kompensationswicklung  $w_{k1}$  mit dem Kompen-sationsfeld  $\phi_{k1}$  kompensiert werden. Das Ankerfeld  $\Phi_{A1}$  würde sonst zwischen den Bürsten  $B_2$  und  $B_4$  einen Ausgleichstrom verursachen. Dieser Ausgleichstrom würde seinerseits ein Ankerquerfeld erzeugen, das dem magnetischen Fluss  $\Phi_1$  der 1. Stufe entgegenwirkt und so den Verstärkungsgrad beeinflussen würde.

Die Kompensationswindungen  $w_{k1}$  auf den Polen  $P_2$  und  $P_4$  müssen vom Kurzschlußstrom  $i_k$  durchflossen sein. Da diesem Strom jedoch stets der halbe Belastungsstrom überlagert ist, müssen die Wicklungen  $w_{k1}$  auf beiden Polen  $P_2$  und  $P_4$  aus zwei Teilwicklungen bestehen, die so geschaltet sind, dass sich die magnetisierende Wirkung des Stromes  $\frac{1}{2} i_2$  in der Kompensationswicklung aufhebt. Die

gleiche Schaltung wurde für die Erregung der 2. Verstärkerstufe angewendet (Fig. 7).

Der Belastungsstrom  $\frac{1}{2} i_2$  erzeugt im Anker ein 4poliges Ankerquerfeld  $\Phi_{A2}$  (Fig. 9b). Dieses Feld wirkt in den Bürstenachsen. Seine schädliche Wirkung besteht in der Verzerrung der Erregerflüsse der Pole, in der Vergrößerung der Lamellenspannung und in der Entstehung eines Feldes in den neutralen Zonen.

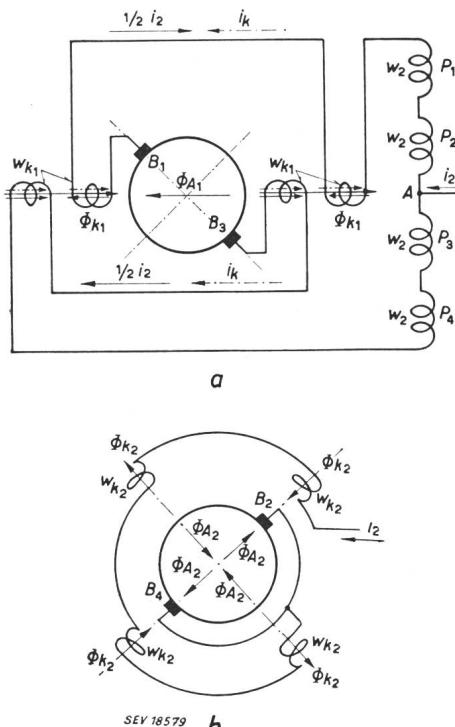


Fig. 9

### Kompensationswicklungen

zu a  $\phi_{k1}$  Ankerquerfeld des Stromes  $i_k$ ;  $\phi_{k1}$  Kompensationsfeld für das Ankerfeld  $\Phi_{A1}$ ;  $w_{k1}$  Kompensationswicklungen zur Erzeugung von  $\phi_{k1}$ ;  $w_2$  Erregerwicklungen der 2. Verstärkerstufe, nur schematisch gezeichnet;  $P_{1\dots 4}$  Pole 1...4

zu b  $\phi_{k2}$  Ankerquerfeld des Stromes  $i_2$ ;  $\phi_{k2}$  Kompensationsfeld für das Ankerfeld  $\Phi_{A2}$ ;  $w_{k2}$  Kompensationswicklungen zur Erzeugung von  $\phi_{k2}$

Das Ankerquerfeld  $\Phi_{A2}$  muss durch eine Kompensationswicklung  $w_{k2}$  auf den Wendepolen kompensiert werden. Die Wicklungen  $w_{k2}$  werden vom Belastungsstrom  $i_2$  durchflossen.

Bei kleineren Maschinen, bei welchen auf Wendepole verzichtet werden kann, sind die Kompensationswicklungen nicht unbedingt notwendig, wohl aber die Kompensationswicklungen  $w_{k1}$  auf den Polen  $P_2$  und  $P_4$ .

## 7. Zeitkonstanten

Die magnetische Trägheit bildet ein wichtiges Kriterium für die Güte eines Verstärkers und Reglers. Die Maschine kann ihre Regleraufgaben um so besser erfüllen, je kleiner ihre magnetische Trägheit ist.

Legen wir an die Eingangsklemmen des Rototrols die konstante Gleichspannung  $U_1$ , so wächst die Ausgangsspannung  $u_2$  nach bestimmten Gesetzen und erreicht asymptotisch ihren Grenzwert

$$U_2 = v U_1 \quad (v \text{ Spannungsverstärkungsgrad}).$$

Fig. 10 stellt das Ersatzschema des Verstärkers dar. Die beiden Verstärkerstufen I und II sind der Übersichtlichkeit halber getrennt gezeichnet.

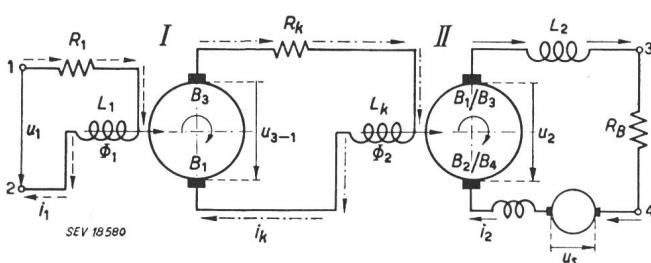


Fig. 10

**Ersatzschema des Rototrols**

I erste Verstärkerstufe; II zweite Verstärkerstufe  
Beide Verstärkerstufen sind separat gezeichnet  
Bezeichnungen siehe im Text

Die in Fig. 10 bezeichneten Größen bedeuten:

*Im Erregerkreis der 1. Verstärkerstufe:*

- $u_1$  Eingangsspannung
- $i_1$  Erregerstrom
- $R_1$  Ohmscher Widerstand des Erregerkreises
- $L_1$  Induktivität des Erregerkreises
- $\Phi_1$  magnetisches Feld

*Im Erregerkreis der 2. Verstärkerstufe (Kurzschlusskreis):*

- $u_{3-1}$  Erregerspannung
- $i_k$  Erregerstrom
- $R_k$  Ohmscher Widerstand des Erregerkreises
- $L_k$  Induktivität des Erregerkreises
- $\Phi_2$  magnetisches Feld

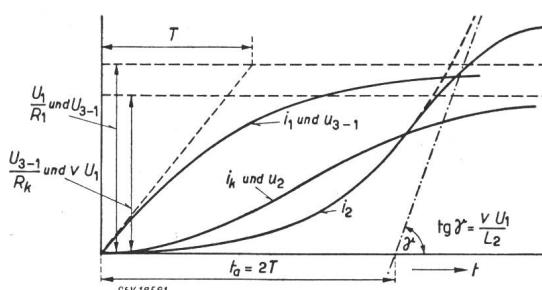
*Im Belastungskreis des Rototrols:*

- $u_2$  Ausgangsspannung = verstärkte Eingangsspannung
- $u_s$  induzierte Spannung der Seriewindungen  $u_s$
- $i_2$  Belastungsstrom
- $R_B$  totaler Ohmscher Widerstand im Belastungskreis
- $L_2$  totale Induktivität im Belastungskreis

Wir definieren noch folgende 2 Begriffe:

- $b_1 = \frac{R_1}{L_1}$  Dämpfungskonstante im Erregerkreis der 1. Stufe
- $T_1 = \frac{1}{b_1}$  Zeitkonstante im Erregerkreis der 1. Stufe
- $b_2 = \frac{R_k}{L_k}$  Dämpfungskonstante im Erregerkreis der 2. Stufe
- $T_2 = \frac{1}{b_2}$  Zeitkonstante im Erregerkreis der 2. Stufe

Mit kleinen Buchstaben werden Momentanwerte, mit grossen Buchstaben konstante Werte der Ströme und Spannungen bezeichnet<sup>1)</sup>.

Fig. 11  
Spannungs- und Stromcharakteristiken

Wir untersuchen den zeitlichen Verlauf der verschiedenen Ströme und Spannungen in der Ma-

<sup>1)</sup> siehe: Regeln und Leitsätze für Buchstabensymbole und Zeichen, Publ. Nr. 192 df des SEV.

schine, wenn an ihren Eingangsklemmen die konstante Gleichspannung  $U_1$  liegt.

Der Erregerstrom der 1. Verstärkerstufe  $i_1$  entsteht nach folgender Formel:

$$i_1 = \frac{U_1}{R_1} \left( 1 - e^{-b_1 t} \right) \quad (\text{siehe Fig. 11}) \quad (38)$$

wobei  $b_1 = \frac{R_1}{L_1}$

Unter Vernachlässigung der Sättigungserscheinungen im aktiven Eisen ist die Spannung  $u_{3-1}$  dem Strom  $i_1$  direkt proportional. Wir können also für den Momentanwert der Bürstenspannung  $u_{3-1}$  schreiben:

$$u_{3-1} = U_{3-1} \left( 1 - e^{-b_1 t} \right) \quad (39)$$

Diese Spannung ist im Erregerkreis der 2. Verstärkerstufe wirksam.

Wir stellen die Differentialgleichung für den Strom  $i_k$  auf:

$$u_R = + i_k R_k \quad u_L = + L_k \frac{di_k}{dt} \quad \Sigma u = 0$$

Sie lautet:

$$U_{3-1} \left( 1 - e^{-b_1 t} \right) = + L_k \frac{di_k}{dt} + R_k i_k \quad (40)$$

Die Lösung dieser inhomogenen linearen Differentialgleichung mit konstanten Koeffizienten setzt sich zusammen aus der allgemeinen Lösung der homogenen Gleichung und einem partikulären Integral der inhomogenen Gleichung.

Ansatz für homogene Gleichung:

$$i_{k1} = A e^{-b_2 t}$$

Ansatz für inhomogene Gleichung:

$$i_{k2} = B + C e^{-b_1 t}$$

Führt man diese Ansätze in die Differentialgleichung ein, so erhält man folgende Lösung, wenn man die Bedingung berücksichtigt, dass der Strom  $i_k$  zur Zeit 0 den Wert null haben muss:

$$i_k = \frac{U_{3-1}}{R_k} \left( 1 - \frac{b_2}{b_2 - b_1} e^{-b_1 t} - \frac{b_1}{b_1 - b_2} e^{-b_2 t} \right) \quad (41)$$

Da sich die Formel für den Strom  $i_k$  zum Weiterrechnen infolge ihrer komplizierten Struktur nicht sehr gut eignet, gestatten wir uns eine Vereinfachung, die in der Praxis mehr oder weniger den Tatsachen entspricht und die Ergebnisse wesentlich vereinfacht.

Wir nehmen an, dass  $b_1 = b_2 = b$  und  $T_1 = T_2 = T$  sei. Die Zeitkonstanten und die Dämpfungskonstanten der beiden Verstärkerstufen werden also einander gleichgesetzt. Die Formel für  $i_k$  lautet dann:

$$\begin{aligned} i_k &= \frac{U_{3-1}}{R_k} \left[ 1 - (1 + b t) e^{-bt} \right] \\ b &= \frac{R_1}{L_1} = \frac{R_k}{L_k} \quad (\text{s. Fig. 11}) \quad (42) \end{aligned}$$

Die Kurve  $i_k = f(t)$  hat keinen reinen exponentiellen Charakter mehr. Ihre Ursprungstangente ist parallel der Abszisse.  $i_k$  nähert sich asymptotisch dem Grenzwert  $U_{3-1}/R_k$ .

Die Spannung  $u_2$  ist dem Strom  $i_k$  direkt proportional, wenn man die Sättigung im aktiven Eisen nicht berücksichtigt.

$$u_2 = U_2 \left[ 1 - (1 + b t) e^{-bt} \right]$$

$$U_2 = v U_1 \quad (v \text{ Spannungsverstärkungsgrad}). \quad (43)$$

Diese Spannung ist im Belastungskreis der Maschine wirksam. Wir stellen die Differentialgleichung für den Belastungsstrom  $i_2$  auf:

$$\begin{aligned} u_R &= + R_B i_2 & u_L &= + L_2 \frac{di_2}{dt} & u_s &= - u_R \\ \Sigma u &= 0 \end{aligned}$$

Die Differentialgleichung lautet:

$$v U_1 \left[ 1 - (1 + b t) e^{-bt} \right] = + L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (44)$$

Als Spannungsabfall im Belastungskreis tritt lediglich der induktive auf, da der Ohmsche durch die Seriespannung  $u_s$  kompensiert wird. Dieser Zustand gilt natürlich nur für das ungesättigte Gebiet des aktiven Eisens.

Dieser Gleichungstyp stellt ebenfalls eine inhomogene lineare Differentialgleichung mit konstanten Koeffizienten dar.

Ansatz für die homogene Gleichung:  $i_2 = A$

Ansatz für die inhomogene Gleichung:

$$i_2 = B - C b e^{-bt} + D e^{-bt} - t D b e^{-bt}$$

$A, B, C$  und  $D$  sind Konstanten.

Diese Ansätze führen zu der folgenden Lösung, wenn man den Strom  $i_2$  im Zeitmoment 0 setzt. (Das braucht aber nicht ausdrücklich der Fall zu sein. Im ungesättigten Gebiet des aktiven Eisens ist jeder Strom  $i_2$  im indifferenten Gleichgewicht.)

$$i_2 = \frac{v U_1}{L_2} \left[ t + \left( \frac{2}{b} + t \right) e^{-bt} - \frac{2}{b} \right] \quad (45)$$

(siehe Fig. 11).

Die Funktion  $i_2 = f(t)$  besitzt eine zur Abszissenachse parallele Ursprungstangente. Sie hat in der Nähe des Ursprungs parabolähnlichen Charakter und nähert sich asymptotisch einer Geraden, die die Abszisse im Punkte  $t_a = 2 T$  schneidet und das Steigungsmass  $\operatorname{tg} \gamma = v U_1/L_2$  besitzt.

Lässt man die Sättigungserscheinungen im aktiven Eisen unberücksichtigt, so wird der Strom  $i_2$

immer grösser; seine Zunahme ist umgekehrt proportional zur Induktivität im Belastungskreis  $L_2$  und proportional dem Spannungsverstärkungsgrad  $v$ . Die Eisensättigung setzt jedoch dem stetigen Wachsen von  $i_2$  eine Grenze. Der Strom  $i_2$  nähert sich asymptotisch einem Grenzwert, der von den Sättigungsverhältnissen der Maschine abhängt. In Fig. 11 ist der wirkliche Verlauf des Stromes  $i_2$  ausgezogen dargestellt.

Eine Zeitkonstante im Belastungskreis ist nicht mehr definierbar, da der Strom  $i_2$  keinen rein exponentiellen Charakter mehr besitzt. Ein Mass für Trägheitslosigkeit des Verstärkers bildet das Steigungsmass der Asymptote der Funktion  $i_2 = f(t)$ . Dieses ist proportional dem Spannungsverstärkungsgrad  $v$  und umgekehrt proportional der Induktivität  $L_2$ .

## 8. Praktische Anwendungen

### a) Regulierung der Drehzahl eines Antriebes in Ward-Leonard-Schaltung

Das Schaltschema ist aus Fig. 12 ersichtlich.

Die darin verwendeten Symbole bedeuten:

$M$  Antriebmotor, dessen Drehzahl auf den konstanten Wert  $n$  reguliert werden soll.

$G$  Generator der Ward-Leonard-Gruppe

$A$  Antrieb des Generators und des Rototrols

$R$  Rototrol-Regler

$TD$  Tachometerdynamo

$U$  fremde Gleichspannung (konstant)

$R_{1,2,3}$  Regulierwiderstände zur Änderung der Drehzahl

Wicklungen: 1 Erregung des Motors

2 und 3 Erregung des Generators

4 und 5 Erregung des Rototrols

6 Erregung des Tachometerdynamos

7 Serieerregung des Rototrols

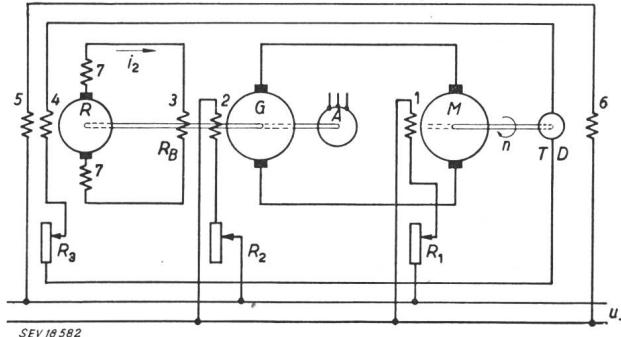


Fig. 12  
Schaltschema der Drehzahlregulierung eines  
Ward-Leonard-Antriebes  
Bezeichnungen siehe im Text

Die Erregung des Generators  $G$  soll durch den Rototrol in der Weise gesteuert werden, dass die Drehzahl des Motors  $M$  unabhängig von der Belastung den konstanten Wert  $n$  annimmt. Einen konstanten Anteil der Erregung des Generators liefert die Wicklung 2, welche an der konstanten Gleichspannung  $U$  liegt. Den regulierbaren Anteil der Erregung liefert der Rototrol der Wicklung 3 des Belastungswiderstandes  $R_B$ . Der Antrieb des Generators und Rototrols soll mit konstanter Drehzahl erfolgen, da sich nur für diesen Zustand der Belastungskreis des Rototrols an der Grenze der Selbsterregung befindet.

Der Tachometerdynamo liefert eine der Drehzahl  $n$  des Motors  $M$  proportionale Spannung. Damit wird die Erregerwicklung 4 des Rototrols gespiesen. Die Ampèrewindungen dieser Wicklung sind daher proportional der Drehzahl des Motors  $M$ .

Die zweite Erregerwicklung 5 des Rototrols liegt an der konstanten Gleichspannung  $U_{\text{--}}$ . Seine Ampèrewindungen sind konstant. Die beiden Erregerwicklungen 4 und 5 des Rototrols werden einander magnetisch entgegengeschaltet. Läuft der Motor mit der verlangten Drehzahl  $n$ , so sollen sich die beiden Ampèrewindungen  $AW_4$  und  $AW_5$  gerade aufheben; den für die Erregung des Generators nötige Strom  $i_2$  liefern die Seriewindungen 7 des Rototrols.

Ändert aus irgend einem Grunde die Drehzahl  $n$  des Motors  $M$ , so ändert in gleicher Weise die Tachometerdynamospannung  $U_{TD}$  und das Gleichgewicht zwischen  $AW_4$  und  $AW_5$  wird gestört. Die Differenz ( $AW_4 - AW_5$ ) induziert im Belastungskreis des Rototrols einen verstärkten Spannungsimpuls. Der Erregerstrom  $i_2$  des Generators ändert seinen Wert und beeinflusst die Generatorenspannung so, dass die Drehzahl des Motors  $M$  den vorgeschriebenen Wert wieder erreicht. Ist das der Fall, so hört die regelnde Wirkung des Rototrols wieder auf bis zur nächsten Störung. Da sich der Strom  $i_2$  im Belastungskreis des Reglers im indifferenten Gleichgewicht befindet, muss er durch das ständige Eingreifen des Reglers auf dem für die Drehzahl  $n$  notwendigen Wert gehalten werden.

Durch Variation der Widerstände  $R_{1,2}$  und  $3$  kann die verlangte Drehzahl des Motors  $M$  in gewissen Grenzen verändert werden. Der Rototrol arbeitet stufenlos. Eine gewisse Schwierigkeit beim Einstellen der Selbsterregung im Belastungskreis des Reglers bildet die Tatsache, dass die magnetische Charakteristik der Maschine im aufsteigenden und absteigenden Ast nicht zusammenfallen. Die Remanenzerscheinung verhindert ein sauberes Einstellen des Zustandes der Selbsterregung. Diese praktische Schwierigkeit hat natürlich einen Einfluss auf die Präzision der Reglerwirkung.

### b) Regulierung der Klemmenspannung eines Drehstrom-Generators

Das Schaltschema ist aus Fig. 13 ersichtlich.  
Die darin verwendeten Symbole bedeuten:

- $G$  Drehstromgenerator
- $R$  Rototrol-Regler
- $A$  Antrieb des Rototrols
- $R_1, R_2$  Ohmsche Widerstände
- $GL_1, GL_2$  Gleichrichter in Graetzschaltung
- $TR_1, TR_2$  Transformatoren
- $TR_D$  Dämpfungstransformator
- Wicklungen: 1 Erregerwicklung des Generators  
2 Erregerwicklung des Rototrols  
3 Serieerregerwicklung des Rototrols

Der Rototrol liefert die Erregung für den Generator  $G$ . Im Belastungskreis des Reglers herrscht wiederum der Zustand der beginnenden Selbsterregung. Darin fliesse der für die Erregung der Klemmenspannung  $U_k$  notwendige Strom  $i_2$ .

Im Erregerkreis des Rototrols wirken zwei Spannungen  $U_1$  und  $U_2$ , die elektrisch einander

entgegengeschaltet sind. Ihre Differenz liegt an den Klemmen der Erregerwicklung 2 des Rototrols. Die Spannung  $U_1$  ist die herabtransformierte und gleichgerichtete Klemmenspannung  $U_k$ . Die Spannung  $U_2$  ist konstant. Am Potentiometer  $R_2$  wird  $U_1$  bei gegebener Klemmenspannung  $U_k$  so eingestellt, dass sie  $= - U_2$  wird. Bei gegebener

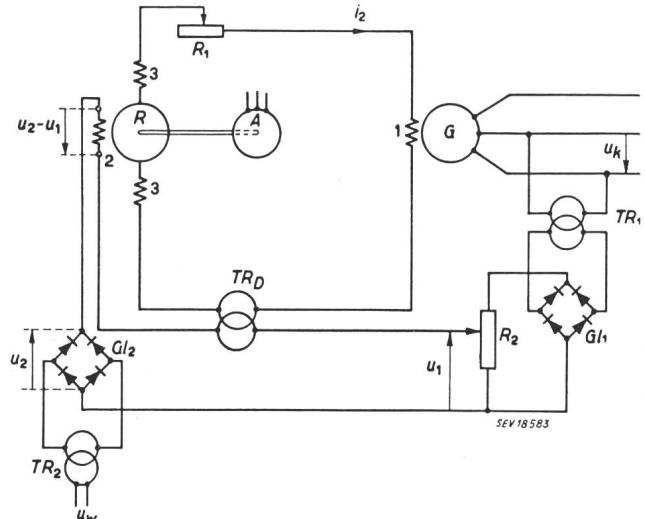


Fig. 13  
Schaltschema der Regulierung der Klemmenspannung eines Drehstrom-Generators  
Bezeichnungen siehe im Text

Klemmenspannung  $U_k$  liegt im Erregerkreis des Rototrols keine Spannung und der Zustand bleibt erhalten. Weicht nun die Klemmenspannung von ihrem Sollwert  $U_k$  ab, so ändert dazu proportional die Spannung  $U_1$ . Die Differenzspannung  $U_2 - U_1$  induziert im Belastungskreis des Rototrols einen verstärkten Spannungs impuls, welcher eine Änderung des Erregerstromes  $i_2$  und damit der Klemmenspannung  $U_k$  zur Folge hat. Hat die Klemmenspannung ihren Sollwert  $U_k$  wieder erreicht, so hört die regelnde Wirkung des Rototrols auf, bis eine neue Störung eintritt.

Der Dämpfungstransformator  $TR_D$  verhindert bei grossen Spannungsschwankungen ein unstabiles Verhalten des Rototrols.

### c) Regulierung der Beschleunigung grosser rotierender Massen

Das Schaltschema ist aus Fig. 14 ersichtlich.  
Die darin verwendeten Symbole bedeuten:

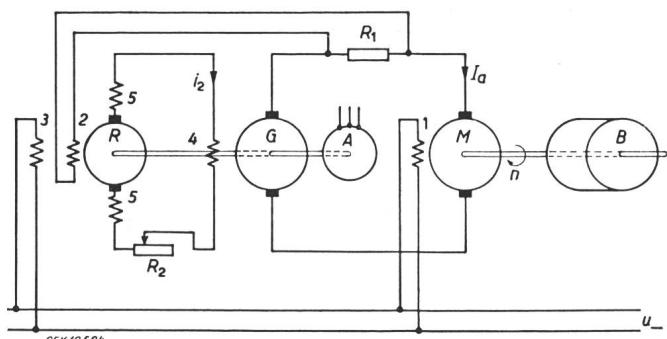


Fig. 14  
Schaltschema der Regulierung der Beschleunigung grosser rotierender Massen  
Bezeichnungen siehe im Text

- B zu beschleunigende Masse mit grossem Schwungmoment  
 M Antriebsmotor von B  
 G Generator  
 R Rototrol-Regler  
 A Antrieb von Generator und Rototrol  
 $R_1$   $R_2$  Omsche Widerstände  
 Wicklungen: 1 Erregerwicklung des Motors  
 2; 3 Erregerwicklungen des Rototrols  
 4 Erregerwicklung des Generators  
 5 Serieerregerwicklungen des Rototrols  
 $U_-$  konstante Gleichspannung

Die Masse  $B$  mit grossem Schwungmoment  $GD^2$  soll von einem Gleichstrommotor  $M$  in Ward-Leonard-Schaltung möglichst rasch angetrieben werden.

Nach dem Drallsatz beträgt das Antriebsdrehmoment  $M_a$  des Motors:

$$M_a = k GD^2 b$$

- wobei       $k$  Konstante  
                $b$  Rotationsbeschleunigung  
 $GD^2$  Schwungmoment der anzutreibenden Masse

Seine Grösse richtet sich einerseits nach der maximal möglichen Beanspruchung der Übertragungsorgane, anderseits nach dem zulässigen Ankerstrom  $I_a$  des Motors. Eine konstante Beschleunigung  $b$  erfordert ein konstantes Antriebsdrehmoment  $M_a$  und, da der Motor fremd erregt ist, auch einen konstanten Ankerstrom  $I_a$ .

Die Aufgabe des Rototrols ist es, den Ankerstrom  $I_a$  des Antriebsmotors möglichst konstant zu halten, damit dieser immer maximal ausgenützt ist.

Die Erregung des Generators  $G$  wird vom Rototrol gespiesen. Im Belastungskreis des Reglers fliesse der zur Erzeugung des Ankerstromes  $I_a$  notwendige Erregerstrom  $i_2$ .

Am Widerstand  $R_1$  wird eine dem Strome  $I_a$  proportionale Spannung erzeugt. Mit dieser Spannung wird die Erregerwicklung 2 des Rototrols gespiesen. Dieser Wicklung 2 ist eine zweite Wicklung 3 entgegengeschaltet, welche von einem konstanten Strom durchflossen wird. Fliest im Anker-

kreis der notwendige Strom  $I_a$ , so kompensieren sich die Ampèrewindungen der Wicklungen 2 und 3 und im Belastungskreis des Reglers wird keine Spannung induziert. Der Ankerstrom  $I_a$  bleibt konstant. Ändert sich infolge der Drehzahländerung der Wert des Stromes  $I_a$ , so ändern sich die Ampèrewindungen der Wicklung 2 und im Belastungskreis des Reglers wird eine Spannung induziert, die eine Änderung der Ankerspannung des Generators  $G$  zur Folge hat, bis der Motorstrom  $I_a$  seinen Sollwert wieder erreicht hat. Dann hört die regelnde Wirkung des Rototrols wieder auf.

Diese Art Regulierung kommt häufig vor bei Walzwerk-Antrieben. Die Walzen sollen möglichst rasch auf eine bestimmte Drehzahl gebracht oder bis zum Stillstand abgebremst werden. Der grosse Vorteil des Rototrol-Reglers bei diesem Vorgang ist das stufenlose Arbeiten. Es tritt keine sprunghafte Änderung des Motorstromes  $I_a$  auf, die den Übertragungsorganen des Drehmomentes schaden könnte. Mit grosser Präzision hält der Rototrol den Maschinenstrom  $I_a$  unabhängig der Drehzahl konstant.

Diese Beispiele mögen zeigen, auf welch mannigfaltige Art und Weise der Rototrol-Verstärker-Regler in der Praxis für Regulierzwecke gebraucht werden kann.

#### Literatur

- [1] Carleton, James T.: The Transient Behavior of the 2-Stage Rototrol Main Exciter Voltage Regulating System as Determined by Electrical Analogy. Electr. Engng. Bd. 68 (1949), S. 59...63.
- [2] Erbe, J. R.: Electric Control. Iron Age Bd. 163(1949), Jan.
- [3] Fisher, M. H.: Industrial Applications of Rotating Regulators. Power Generation Bd. - (1949), April/Juni.
- [4] Hélot, Jacques: Rototrol. Bull. Soc. franç. Electr". 6. Serie Bd. 9(1949), Nr. 94, S. 328...342.
- [5] Baker, R. R.: Pulp and Paper Industry Electrical Developments. Electr. Engng. Bd. 67(1948).
- [6] Lynn, C. und C. E. Valentine: Rototrol Provides Generator Excitation. Westinghouse Engr. Bd. 8(1948), Nr. 2, S. 34..36.
- [7] Kimball, A. W.: Two-Stage Rototrol for Low-Energy Regulating Systems. Electr. Engng. Bd. 66(1947), S. 1507...1511.
- [8] Liwschitz, M. M.: The Multistage Rototrol. Electr. Engng. Bd. 66(1947), S. 564...568.
- [9] Harris, W. R.: Industrial Application of Rototrol Regulators. Electr. Engng. Trans. Bd. 65(1946), März, S. 118...123.

#### Adresse des Autors:

F. Tschappu, Dipl. El.-Ing., Schönbühl 8, Zug.

## Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

### Anwendung von Widerständen mit negativem Temperaturkoeffizienten

621.316.86

[Nach R. Kretzmann: Anwendungsmöglichkeiten von NTC-Widerständen. Funk-Techn. Bd. 6(1951), Nr. 15, S. 419...421.]

Widerstände mit negativen Temperaturkoeffizienten (im folgenden NTC-Widerstände) unterscheiden sich von den üblichen Widerständen durch einen grossen negativen Temperaturkoeffizienten des Widerstandswertes ( $-3...-4,5\%$  pro  $^{\circ}\text{C}$  bei  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Steigt die Temperatur eines solchen Widerstandes infolge Anstieg der Umgebungstemperatur oder auch durch Wärmeentwicklung im Widerstand selbst, so sinkt dessen Widerstand erheblich. Solche Widerstände können zu verschiedenen Zwecken verwendet werden.

#### Temperaturmessung

Wird der Ohmsche Widerstandswert eines NTC-Widerstandes mit einer derart geringen Stromstärke gemessen, dass im Widerstand selbst keine nennenswerte Erwärmung erfolgt

und somit der Widerstandswert ausschliesslich von der Umgebungstemperatur abhängt, so kann der NTC-Widerstand als Widerstandsthermometer benutzt werden. Die Empfind-

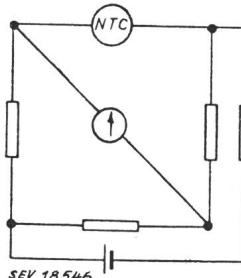


Fig. 1  
Brückenschaltung mit  
NTC-Widerstand für  
Temperaturmessung

lichkeit solcher Widerstandsthermometer ist bei Zimmertemperatur 8...12mal so hoch als diejenige der üblichen Widerstandsthermometer; bei niedrigeren Temperaturen