

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 115/116 (1940)
Heft: 9

Artikel: Regenerationstheorie und Stabilität von Regulierungen
Autor: Feiss, René
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-51146>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.03.2025

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

INHALT: Regenerationstheorie und Stabilität von Regulierungen. — Zum Verwerfungsproblem des Eisenbahngleises. — Holzkohlengas-Triebwagen der SNCF. — Nachtrag zum Geiser-Wettbewerb 1939 des S. I. A. über aktuelle Probleme des architekton. Wettbewerbs. — Tonisolierplatten als Unterlage für Dacheindeckungen. — Villaggio Sanatoriale di Sondalo. — Mitteilungen: Turbulenz und Röntgenstreubild. Der Akademische Ingenieurverein an der E. T. H. Die Wärme in unserer Energiewirtschaft. Das

Elektrofahrzeug im Krieg. Das Verhalten des Langschienengeleises unter dem Betrieb. Die hölzerne Bogenbrücke von 85 m Spannweite bei Kranj in Jugoslawien. Aluminiumfragen. VII. Internat. Ausstellung für dekorative und industrielle Kunst und moderne Architektur in Mailand. — Eidg. Techn. Hochschule. — Wettbewerbe: Schulhaus in Bex. — Nekrologe: Willy Dürler. Ernst Kohler. — Literatur. — Mitteilungen der Vereine. — Sitzungs- und Vortrags-Kalender.

Regenerationstheorie und Stabilität von Regulierungen

Von Ing. Dr. sc. techn. RENÉ FEISS, Winterthur

Die Bestimmung der dynamischen Stabilität von mittelbaren Regulierungen erfolgte bisher anhand einer analytischen Methode. Das Kriterium von Hurwitz führt aber bei Differentialgleichungen höherer Ordnung auf unübersichtliche Determinanten-Ungleichungen. Verschiedentlich wurde versucht, diese mathematische Methode zu umgehen und auf eine anschaulichere Art, z. B. mit mechanischen Modellen¹⁾, das Ziel zu erreichen. Im nachfolgenden Aufsatz soll unter Anwendung der Regenerationstheorie ein solcher Versuch erläutert werden. Dabei sollen die folgenden Bezeichnungen gelten:

- y = Abstand der augenblicklichen Muffenstellung von der neuen Gleichgewichtslage.
- y_{max} = Ganzer Muffenhub entsprechend dem Ungleichförmigkeitsgrad des Reglers.
- η = $\frac{y}{y_{max}}$ relative Reglerabweichung.
- m = Augenblicklicher Abstand des Servomotorkolbens K von der neuen Gleichgewichtslage.
- m_{max} = Ganzer Weg des Servomotorkolbens von Leerlauf bis Vollast.
- μ = $\frac{m}{m_{max}}$ relative Servomotorabweichung.
- p = Augenblicklicher Ueberdruck im Dampfraum über den Druck in der neuen Gleichgewichtslage.
- p_{max} = Druck im Dampfraum, der der Vollast entspricht.
- ψ = $\frac{p}{p_{max}}$ relative Druckabweichung im Dampfraum.
- ω_m = Mittlere Winkelgeschwindigkeit des Reglers und der Maschinengruppe.
- δ = $\frac{\omega_o - \omega_u}{\omega_m}$ Ungleichförmigkeitsgrad.
- φ = $\frac{\Delta \omega}{\omega_m}$ relative Geschwindigkeitsabweichung entsprechend der Spannungsänderung am Widerstand R_1 .
- s = Abstand des Steuerschiebers von der Mittellage.
- s_{max} = Grösster Ausschlag des Steuerschiebers aus der Mittellage.
- σ = $\frac{s}{s_{max}}$ relative Steuerungsverstellung.
- T_s = Schlusszeit des Hilfsmotors, entsprechend $\tau_s = L/R$, im elektr. System.
- T_e = Füllzeit des Dampfraumes, entsprechend $\tau_e = L_f/R$. Im elektr. System die Zeit, die nötig ist, um den Dampfraum bei maximaler Dampfdruckflussmenge ganz aufzufüllen.
- T_a = Anlaufzeit der Maschinengruppe, entsprechend $\tau_a = RC$, im elektr. System.
- P = Störkraft am Regler.
- S_x = Dynamische Steilheit der Röhren.
- e = Wechselanteil der elektr. Spannung.
- i = Wechselanteil des elektr. Stromes.

Wirkt in einem Reguliersystem der zu regulierende Energiefluss auf die Regulierung zurück, d. h. ist das Reguliersystem geschlossen, so kann dieses System entweder stabil oder instabil sein. Als stabil wird das System dann bezeichnet, wenn eine kleine einmalige Initialstörung, die in das System hineingebracht wird, eine abklingende Reaktionsschwingung des Systemes hervorruft. Entsprechend wird als instabil ein System bezeichnet, dessen Reaktionsschwingung sich aufschaukelt oder auch harmonisch weiterschwingt. Im letzten Fall heisst dies, dass die zugeführte Energie gerade ausreicht, um die Schwingung zu erhalten. Um das Problem durchsichtiger zu gestalten, kann man eine Analogie herstellen mit dem in der Hochfrequenz- und Schwachstromtechnik in letzter Zeit so viel besprochenen gegengekoppelten Verstärkersystem, dessen Stabilitätsproblem in allgemeiner Form von Nyquist theoretisch untersucht wurde²⁾.

¹⁾ J. v. Freudenreich: Untersuchung der Stabilität von Reglerapparaturen. Stodola-Festschrift 1929.

Die mechanisch-elektrischen Analogien sind längst bekannt³⁾. Früher wurden sie vom Elektriker herangezogen, um elektrische Probleme leichter übersehen zu können⁴⁾. Hier wird der umgekehrte Weg beschritten, um zu einer Messmethode zu gelangen, die erlaubt, an einem elektrischen Modell die Stabilitätsverhältnisse einer Regulierung zu untersuchen.

Um das elektrische Modell einer Regulierung zu finden, muss diese in ihre schwingungstechnischen Elemente zerlegt werden, für die alsdann die entsprechenden elektrischen Grössen einzusetzen sind. Wir wollen diese Umformung am praktischen Beispiel, der klassischen Regulierung von Brown und Farcot, erläutern, die zur Regelung einer Dampfturbine mit angekuppeltem Generator verwendet werden kann (Abb. 1). Sie

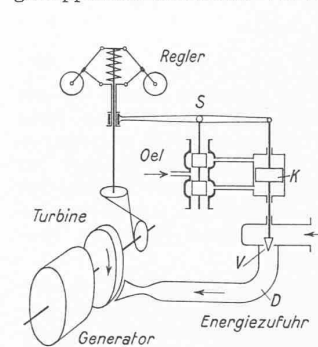


Abb. 1. Regulierung mit starrer Rückführung nach Brown-Farcot

arbeitet folgendermassen: Wird der Generator z. B. plötzlich entlastet, so beschleunigt sich das Turboaggregat, die Reglergewichte fliegen nach aussen und heben die Muffe an, worauf der Steuerkolben S den Oelzutritt zum Servomotor K freigibt. Dieser schliesst das Ventil V und führt gleichzeitig den Steuerkolben wieder in seine Mittellage zurück; damit steht aber der Servomotorkolben still. Entspricht nun die Energiezufuhr der Belastung, so herrscht stationärer Zustand, andernfalls wiederholt sich der Reguliervorgang in umgekehrtem Sinn.

Jede Regulierung besteht aus Schwingungsgliedern und Kopplungsgliedern. Im vorliegenden Fall unterscheiden wir folgende Schwingungsglieder: 1. Fliehkraftregler, 2. Kraftgetriebe bestehend aus Steuerschieber S , Servomotor K und Energiedosierungsorgan V , 3. Energiezufuhrleitung D zwischen Ventil und Maschine, 4. Maschinengruppe. Als Kopplungsglieder bezeichnet man die Verbindungsglieder zwischen den Schwingungsgliedern; schwingungstechnisch sind sie ohne Bedeutung, dagegen haben sie die Eigenart, Störungen, die das System durchlaufen, nur in einer Richtung zu übertragen, so ist z. B. eine Rückwirkung des Energiezustroms durch das Ventil V auf den Servomotor K ausgeschlossen, wogegen die Bewegungen des Ventiles den Energiezuström steuern. Eine derartige Kopplung können wir als einseitig bezeichnen.

Der Fliehkraftregler besteht aus einer federbelasteten Masse, angetrieben durch eine, der Abweichung von der stationären Winkelgeschwindigkeit proportionalen Kraft P , behindert durch laminare Reibung. Die Bewegungsgleichung eines solchen Gebildes lautet⁵⁾: $m y'' + k y' + f y = P$. In praktischen Ausführungen kann der Regler aber als masse- und reibungslos angenommen werden. Dann fallen die ersten beiden Glieder weg und es bleibt: $f y = P$ oder unter Einführung der dimensionslosen Grössen

$$\eta = \frac{1}{\delta} \varphi \dots \dots \dots (1)$$

Damit beschränkt sich aber die Funktion des Reglers auf diejenige eines Kopplungsgliedes. Eine elektrische Analogie hierfür wird geliefert durch eine Elektronenröhre (Abb. 2), die bei konstanten Anoden- und Gitterspannungen einen konstanten An-

²⁾ H. Bartels und F. Schierl: Die Arbeitsweise gegengekoppelter Verstärker. «Telefunken» Nr. 77. 18. Jahrgang, November 1937.

³⁾ Darrieux: Les modèles mécaniques en électrotechnique, leur application aux problèmes de stabilité. «Bulletin S. F. E.» t. 9, 1929.

⁴⁾ S. B. Griscan: A Mechanical Analogy to the Problem of Transmission Stability. «The Electric Journals» Vol. XXIII.

⁵⁾ Die folgenden mechanischen Differentialgleichungen sind ausführlich abgeleitet in dem Buch von M. Tolle: Regelung der Kraftmaschinen, S. 756 ff (3. Aufl., Springer 1921), mit Ausnahme von Gl. (3), die im Wesentlichen von F. Weiss stammt: Der Einfluss von Dampfdrücken auf die Regulierung von Dampfturbinen, «SZ», Bd. 108 (1936), Nr. 13, S. 137*.

denstrom I_a liefert. Wird der konstanten Gitterspannung eine Wechselfspannung u_g überlagert, so folgt der daraus resultierende Anodenwechselstrom i_a der Beziehung $i_a = S u_g$. Mit den Bezeichnungen von Abb. 2 ist $u_{g2} = R_1 i_{1R}$ und

$$i_2 = S_2 R_1 i_{1R} \dots (1^*)$$

Nicht bei allen Mechanismen ist die Analyse so einfach, was wir gleich erkennen, wenn wir zur Steuerung, einem konstruktiv komplizierten Mechanismus, übergehen, dessen mathematische Fassung überaus einfach ist. Steigt beispielsweise die Drehzahl, so wird die Muffe des Reglers gehoben, der Steuerschieber S desgleichen, Drucköl tritt über den Servomotorkolben K , sodass dieser nach unten geht und den Energiezufluss zur Turbine vermittelst des Ventils V verringert. Dabei wird die Geschwindigkeit des Hilfsmotorkolbens proportional der Schieberöffnung angenommen, was sich in der Beziehung ausdrückt: $T_s \mu' = \sigma$ oder, wegen $\sigma = \eta - \mu$, in der Gleichung:

$$T_s \mu' + \mu = \eta \dots (2)$$

Das mechanische Schema, das diese Bewegungsgleichung aufweist, ist die Parallelschaltung einer Feder und eines mechanischen Widerstandes, oder im elektrischen Modell die Parallelschaltung einer Induktivität L und eines Ohm'schen Widerstandes R . In Abb. 2 ist $R = R_3$, $L = L_1$; $(R_L + R_1) i_{2L}$ ist gegenüber $L_1 i'_{2L}$ zu vernachlässigen. Der zugeführte Wechselstrom i_{a2} gabelt sich in die Teilströme $i_{2R} = e/R_3$ und i_{2L} , wobei $e = L_1 i'_{2L}$, sodass $\frac{L_1}{R_3} i'_{2L} + i_{2L} = i_{a2}$, oder:

$$\tau_s i'_{2L} + i_{2L} = i_{a2} \dots (2^*)$$

Aus der Analogie der Gleichungen (2) und (2*) können wir alle Vorgänge von einem System auf das andere übertragen. Wird z. B. plötzlich entlastet, sodass der Regler plötzlich ansteigt, so heisst dies, dass der Strom i_{a2} plötzlich anwächst. Zuzufolge der Selbstinduktivität der Spule wird der Strom i_{2L} nur exponentiell dem neuen Wert zustreben. $\tau_s = L_1/R_3$ können wir gleich der Schliesszeit T_s des Kraftgetriebes, oder einem beliebigen Vielfachen davon, wählen.

Im Dampfraum zwischen Ventil und Turbine strömt sekundlich eine zu m proportionale Dampfmenge zu, eine zu p proportionale Dampfmenge ab; der Ueberschuss bestimmt den sekundlichen Druckanstieg. Die diesen Sachverhalt formulierende Gleichung

$$T_a \psi' + \psi = k \mu \dots (3)$$

weist die selbe Form auf, wie die der zuvor behandelten Steuerung. Aus diesem Grund ist auch das elektrische Modell (Abb. 2) das selbe, abgesehen von den Dimensionen der Bestandteile:

$$\tau_a i'_{3L} + i_{3L} = i_{a3} \dots (3^*)$$

Nach den Gl. 2 und 2* entsprechen sich μ und i_{2L} , nach den Gl. 3 und 3* entsprechen sich $k\mu$ und i_{a3} . Dem mechanischen Ventil, das eine Proportionalität zwischen Steuerhub und Dampfstrom herstellt, hat demnach im elektrischen Modell (Abb. 2) ein elektrisches «Ventil», d. h. eine Elektronenröhre zu entsprechen, deren Anodenstrom i_{a3} der an R_4 gelegten Gitterspannung u_{g3} , also auch dem R_4 durchfliessenden Strom i_{2L} proportional ist:

$$i_{a3} = S_3 u_{g3} = S_3 R_4 i_{2L} \dots (3^{**})$$

Die Maschine besteht aus den rotierenden Massen von Turbine und Generator. Das überschüssige, zu p proportionale Drehmoment dient zur Beschleunigung der Masse und zur Ueberwindung eines mit der Drehzahl zunehmenden am Läufer des Generators entwickelten elektromagnetischen Bremsmoments, was seinen Ausdruck findet im Drallsatz $\theta \omega' + H \omega = N p$, oder unter Verwendung der dimensionslosen Grössen in der Beziehung:

$$T_a \varphi' + \varphi = h \psi \dots (4)$$

Als Modell der Maschine kann man die Parallelschaltung einer Kapazität und eines Widerstandes wählen: Der zugeführte Strom i verzweigt sich in i_R , Anteil des Widerstandes, und i_C , Anteil des Kondensators, sodass die Stromgleichung lautet: $i = C e' + i_R = C R i' + i_R$, oder, mit Bezug auf Abb. 2:

$$\tau_a i'_{1R} + i_{1R} = i_{a1} \dots (4^*)$$

Da laut Gl. 3 und 3* ψ und i_{3L} , laut Gl. 4 und 4* $h\psi$ und i_{a1} sich entsprechen, ist im elektrischen Modell eine weitere Elektronenröhre vorzusehen, die, analog zur Proportionalität zwischen Dampfdruck und Drehmoment in der Turbine, eine solche zwischen i_{3L} und i_{a1} bewirkt: An das Gitter dieser Röhre (in Abb. 2 der ersten von links) wird der von i_{3L} durchflossene Widerstand R_6 gelegt, d. h. der Ausgang des Vierpols wird mit seinem Eingang verbunden:

$$i_{a1} = S_1 R_6 i_{3L} \dots (4^{**})$$

Damit ist das System geschlossen.

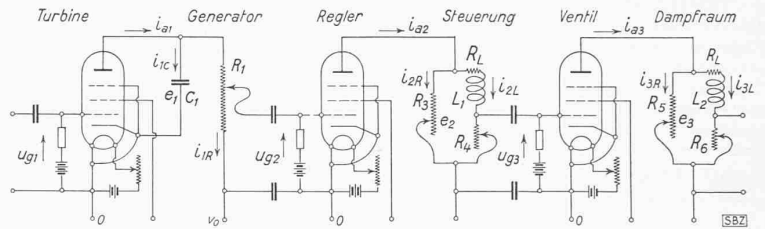


Abb. 2. Elektrisches Modell der Regulierung mit starrer Rückführung

Wir haben also ein elektrisches Modell gefunden, das in allen seinen schwingungstechnischen Einzelheiten dem Original entspricht, und mit dem wir nun Versuche durchführen können, deren Ergebnisse Schlüsse auf das Verhalten des Originals zulassen.

Die Regel, die Nyquist angibt, lautet auf unsern Fall angewandt⁶⁾: Schneide das gegengekoppelte System an einer geeigneten Stelle auf und miss bei dem so erhaltenen Vierpol das vektorielle Spannungsübertragungsverhältnis über alle Frequenzen von 0 bis ∞ . Schliesst der so gewonnene Kurvenzug den Punkt (1,0) der Gauss'schen Zahlenebene ein, so ist das System instabil; wird er dagegen nicht umschlossen, so ist das System stabil. Wir müssen also am Eingang unseres Vierpols eine Störspannung (= Einheit E) anlegen, deren vektorielle Eigenschaften genau bekannt sind, und alsdann am Ausgang die vektorielle Spannung messen. Diese ist für die verschiedenen Frequenzen in einem Polardiagramm aufzuzeichnen, wobei E auf der positiven reellen Axe liegt.

Bei der experimentellen Untersuchung wird nun der Vierpol (Abb. 2) als Messobjekt in das Kompensationsgerät (Abb. 3) eingebaut.

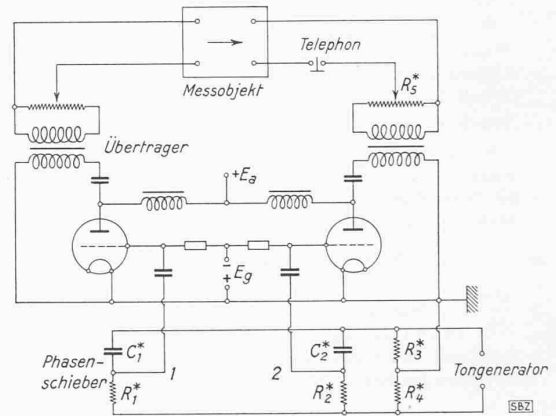


Abb. 3. Kompensationsgerät zur Messung des vektoriellen Spannungsübertragungsfaktors

Der prinzipielle Aufbau des Kompensationsgerätes lässt zwei Verstärker unterscheiden, die parallel zueinander arbeiten und wechselstromtechnisch voneinander möglichst getrennt sind. Die beiden Verstärker werden über je einen Phasenschieber vom gleichen Tongenerator aus gespeist. Um von den Symmetrie-Verhältnissen am Messobjekt unabhängig zu sein, sind beide Zweige des Kompensationsgerätes mit je einem Stromquellen-übertrager abgeschlossen, an die sich die Potentiometer zur Amplitudenabgleichung anschliessen. Bei der Messung speist man das Messobjekt aus dem einen Zweig des Kompensationsgerätes, wobei die gewünschte Eingangsspannung am Potentiometer eingestellt werden kann. Desgleichen wird am Phasenschieber eine bestimmte Eingangsphase eingestellt. Um gewisse Phasendrehungen und besonders Spannungsabfälle festzustellen, denen die Eingangsspannung beim Anlegen an den Verbraucher (zu messenden Vierpol) unterworfen ist, wird die wirkliche Eingangsspannung nach Grösse und Phase durch Kompensation bestimmt, wie dies anschliessend für die Ausgangswerte getan wird. Unter Verstellen des Phasenschiebers und des Ausgangspotentiometers wird nun auf Tonlosigkeit im Kopfhörer abgeglichen. Die wirkliche Phasenverschiebung und die Verstärkung ergeben sich aus der Differenz zwischen Eingang und Ausgang.

Während die Grösse des Spannungsübertragungsfaktors aus der Einstellung des Widerstandes R_5^* als Verhältniszahl zwi-

⁶⁾ H. Nyquist: Regenerations Theory. «Bell System Technical Journal» 1932.

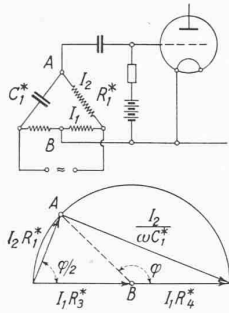


Abb. 4. Phasenschieber, darunter das zugehörige Spannungsdiagramm

schen Eingangs- und Ausgangsabgleichung hervorgeht, kann die Phasenlage aus dem Vektordiagramm (Abb. 4) berechnet werden. Es ist nämlich $\text{tg } \varphi/2 = 1/(\omega C_1^* R_1^*)$ für den Phasenschieber 1; das gleiche gilt naturgemäss für Phasenschieber 2.

Die charakteristischen Grössen (Werte des mechanischen Systems), die bei den Versuchen verwendet wurden, sind nachfolgend tabelliert; das Ergebnis der Messungen ist in

untenstehendem Polardiagramm (Abb. 5) in logarithmischem Masstab zusammengestellt.

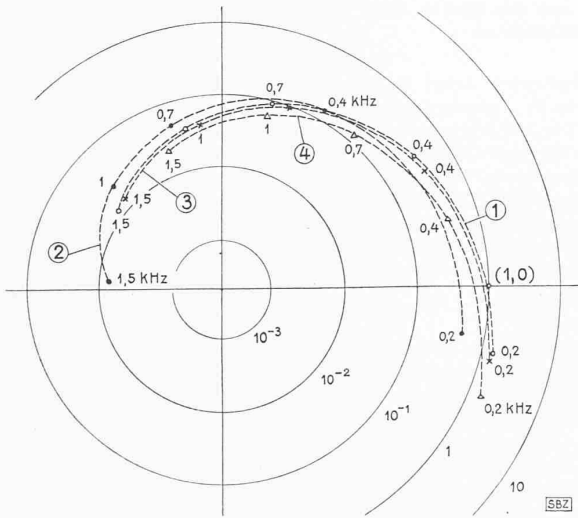


Abb. 5. Polardiagramm des Spannungsübertragungs-Vektors in logarithmischem Masstab

Kurve No.	T_a	T_s	T_e	$\frac{T_a}{T_s T_e} (T_s + T_e) \delta$
1	11	0,917	0,245	1,132
2	33	0,917	0,245	3,396
3	11	0,481	0,245	1,354
4	11	0,917	0,099	2,460

Das Kriterium von Hurwitz liefert für das mechanische System die Beziehung: $\frac{T_a}{T_s T_e} (T_s + T_e) \delta > 1$. Je stärker diese Ungleichung ist, desto stabiler ist die Regulierung. Im Vektordiagramm kommt dies im Abstand der betreffenden Kurve vom Punkt (1,0) zum Ausdruck. Damit die elektrischen Grössen nicht extreme Werte annehmen, wurden die charakteristischen Grössen im elektrischen System 10^3 mal kleiner gewählt als im mechanischen Schema.

Diskussion des polaren Vektordiagrammes:

Um den Versuchen einen realen Hintergrund zu geben, wurden Werte benutzt, die unlängst in einer Abhandlung publiziert wurden⁷⁾. Die dort abgeleiteten und experimentell konstatierten Einflüsse des Dampfdruckes zwischen Ventil und Turbine finden sich im elektrischen Modell bestätigt: Bei Verkürzung der Anlaufzeit des Dampfdruckes T_e tritt eine stabilisierende Wirkung ein: Kurve 1 geht in Kurve 4 über, rückt somit von Punkt (1,0) weg. Eine Verlängerung der Anlaufzeit der Maschine T_a wirkt stabilisierend, d. h. Kurve 1 geht in Kurve 2 über und rückt ebenfalls von Punkt (1,0) weg. Ferner ist eine stabilisierende Wirkung durch Verkürzung der Schliesszeit des Servomotors zu erreichen, wie dies durch das Abrücken der Kurve 3 von Kurve 1 und damit auch vom Einheitspunkt hervorgeht. Die Eigenschwingungsdauer des ganzen Reguliersystems beträgt rd. 3,5 s. Die entsprechende Eigenschwingungsdauer des elektrischen Modells ist $\tau = 3,5 \cdot 10^{-3}$ s, da dort alle Vorgänge 10^3 mal rascher vor sich gehen; demnach ist $f = 285$ Hz. In der Tat schneidet Kurve 1 die positive reelle Achse bei der Frequenz $f \sim 0,3$ kHz. Ferner hat eine Verkürzung der Anlaufzeit des Dampfdruckes eine Verkürzung der Eigenschwingungsdauer des Systems zur Folge. Die selbe Tendenz

⁷⁾ F. Weiss: Diss. Wien 1936. Der Einfluss von Dampfdruck auf die Regulierung von Dampfturbinen, «SBZ» Bd. 108, S. 137* (26. Sept. 1936).

geht auch aus dem Vergleich von Kurve 1 und 4 in Abb. 5 hervor, indem der Schnittpunkt der Kurve 4 mit der positiven reellen Achse einer höheren Frequenz entspricht.

Verfolgt man den beschriebenen Weg weiter, so sieht man leicht ein, dass der Spannungsübertragungsvektor auch graphisch gefunden werden kann, sobald man das elektrische Analogon der Regulierung ermittelt hat. Auf Grund dieser Überlegungen hat der Verfasser eine neue Methode zur Untersuchung der Stabilität von Regulierungen anhand des Vektorbildes geschaffen⁸⁾, die von der mechanisch-elektrischen Analogie überhaupt abseht und direkt den mechanischen Kraftübertragungsvektor ermittelt. Diese Methode gestaltet das Problem der Stabilität von Regulierungen wesentlich durchsichtiger und erlaubt auch in komplizierten Fällen eine befriedigende Lösung.

Zum Verwerfungsproblem des Eisenbahngeleises

Von Prof. M. BROSZKO, Techn. Hochschule Warschau (Manuskripteingang 11. Juli 1939)

[Zur Einführung in dieses, in der «SBZ» schon lange nicht mehr behandelte Problem, wiederholen wir als Abb. 1 aus Bd. 86, S. 201 (17. Okt. 1925) das Bild einer Schienenverwerfung, die sich unter dem Einfluss grosser Sommerhitze ereignet hatte. Es war am 9. August um 14.45 h, die Temperatur in der Sonne überstieg 50°C . Die Verwerfung ereignete sich auf 130 m Länge in einer 1650 m langen geraden Langsamfahr-Strecke, die sich im Umbau befand; dabei waren zahlreiche Schwellen vom umgebenden Schotter entblösst, was die Wärmeableitung in die Bettung erschwerte. Die Abweichung der S-förmig verworfenen Schienen aus der Geraden betrug nach jeder Seite etwa 50 cm. Bezüglich neuer schweizerischer Untersuchungen vergl. die Mitteilung auf S. 106. Red.]

Den Gleichungen der bisherigen Verwerfungstheorien liegt die Voraussetzung zugrunde, dass die Verwerfung der lückelosen Eisenbahngeleise durch Wärmespannungen sich im Gültigkeitsbereich des Hookeschen Gesetzes vollziehe. Die Unvereinbarkeit dieser Voraussetzung mit den Erfahrungstatsachen ist von F. Raab anhand der Ergebnisse eines Verwerfungsversuches dargelegt worden¹⁾. Unter Zugrundelegung der allgemeinsten Annahme über den Zusammenhang zwischen Kraft und Längenänderung werden im folgenden die Gleichungen einer allgemeinen, d. h. auch den unelastischen Verwerfungsvorgang umfassenden Verwerfungstheorie aufgestellt. Im Anschluss an den Vergleich der Ergebnisse dieser Theorie mit den versuchsmässigen Feststellungen werden weiterhin die Unsicherheiten gezeigt mit denen das vorliegende Versuchsmaterial behaftet ist.

Grundgleichungen

Den Angelpunkt für die theoretische Erfassung der Verwerfungserscheinung bildet die Erkenntnis, dass die Geleiseverwerfung mit der Knickung eines quergestützten Stabes wesentlich ist, und der Verwerfungsvorgang sich demzufolge mit den selben Methoden der Mechanik behandeln lässt, die bei der

⁸⁾ R. Feiss: Diss. Zürich 1939. Untersuchung der Stabilität von Regulierungen an Hand des Vektorbildes.

¹⁾ F. Raab, «Z.VDI» Bd. 78, 1934, S. 405.

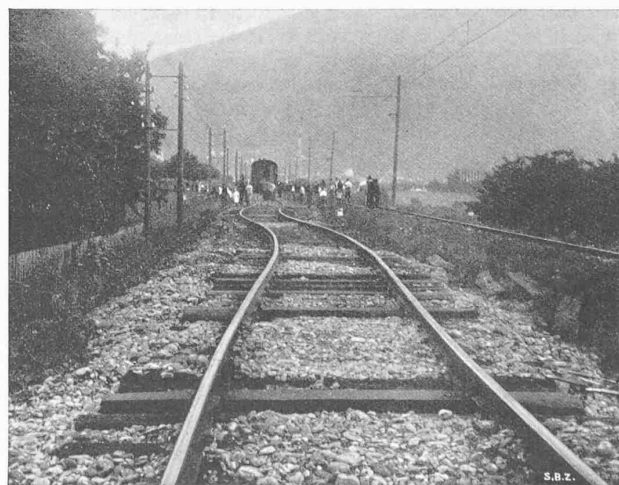


Abb. 1. S-förmige Geleiseverwerfung bei Masans auf der SBB-Strecke Zizers-Chur am 9. Aug. 1925, um 14.25 h, gegen Chur gesehen. Strecke im Umbau (Schwellen-Auswechslung)