

Eine Zusammenstellung des Inhaltes der Hefte 1 bis 139 der Mitteilungen über Forschungsarbeiten zugleich mit einem Namen- und Sachverzeichnis wird auf Wunsch kostenfrei von der Redaktion der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, Berlin N.W., Charlottenstr. 43, abgegeben.

Lehrer und Schüler technischer Schulen erhalten die Hefte zur Hälfte des angegebenen Preises, sofern sie Bestellung und Zahlung an den Verein deutscher Ingenieure, Berlin N.W. 7, Sommerstr. 4a, richten.

Literarische Unternehmungen d. Vereines deutscher Ingenieure:

ZEITSCHRIFT DES VEREINES DEUTSCHER INGENIEURE.

Redakteur: D. Meyer.

Berlin N.W. 7, Sommerstraße 4a

Geschäftsstunden 9 bis 4 Uhr.

Expedition und Kommissionsverlag: Julius Springer, Berlin W., Linkstr. 23/24.

Die Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure erscheint wöchentlich Sonnabends. Je einmal im Monat liegt ihr die Zeitschrift „Technik und Wirtschaft“ bei. Preis bei Bezug durch Buchhandel und Post 40 *M* jährlich; einzelne Nummern werden gegen Einsendung von je 1.30 *M* — nach dem Ausland von je 1.60 *M* — portofrei geliefert.

Anzeigen:

Das Millimeter Höhe einer Spalte kostet 25 Pf.
Bei 6, 12, 24, 48 maliger Wiederholung im Laufe eines Jahres: 10, 20, 30, 40 vH Nachlaß.
Für Stellengesuche von Vereinsmitgliedern, die unmittelbar bei der Annahmestelle, Linkstraße 23/24 aufgegeben und vorausbezahlt werden, kostet das Millimeter Höhe einer Spalte nur 12 Pf.

Beilagen:

Preis und erforderliche Anzahl sind unter Einsendung eines Musters bei der Expedition zu erfragen. Die Beilagen sind frei Berlin zu liefern.

Den Einsendern von Ziffer-Anzeigen wird für Annahme und freie Zusendung einlaufender Angebote mindestens 1 *M* berechnet.
Schluß der Anzeigen-Annahme: Montag Vorm.; für Stellengesuche: Montag Abend 7 Uhr.

TECHNIK UND WIRTSCHAFT.

MONATSSCHRIFT DES VEREINES DEUTSCHER INGENIEURE.

REDAKTEURE D. MEYER UND W. MATSCHOSS.

IN KOMMISSION BEI JULIUS SPRINGER BERLIN.

Die »Technik und Wirtschaft« liegt der ganzen Auflage der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure (Preis des Jahrgangs 40 *M*) allmonatlich bei. Sie ist außerdem für 8 *M* für den Jahrgang durch alle Buchhandlungen und Postanstalten sowie durch die Verlagsbuchhandlung von Julius Springer zu beziehen.

Anzeigen: Die ganze Seite 100 *M*, $\frac{1}{2}$ Seite 50 *M*, $\frac{1}{4}$ Seite 25 *M*, $\frac{1}{8}$ Seite 12,50 *M*. Ein kleinerer Raum als $\frac{1}{8}$ Seite wird nicht abgegeben.
Bei 3 6 12 maliger Wiederholung im Jahre.

5 10 20 vH Nachlaß.
Beilagen: Preis und erforderliche Anzahl sind unter Einsendung eines Musters bei der Verlagsbuchhandlung von Julius Springer zu erfragen.
Auflage des Blattes 27000.

**FORSCHUNGSARBEITEN
AUF DEM GEBIETE DES INGENIEURWESENS**

HERAUSGEGEBEN VOM VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE

Schriftleitung: D. Meyer und M. Seyffert

Heft 160

Ueber Kraftmaschinen-Regelung

von

M. F. GUTERMUTH



1914

SPRINGER-VERLAG BERLIN HEIDELBERG GMBH

PREIS JEDES HEFTES 1 MARK

ISBN 978-3-662-01720-3
DOI 10.1007/978-3-662-02015-9

ISBN 978-3-662-02015-9 (eBook)

Die theoretische Verfolgung des Regelvorganges bei Änderungen des Widerstandes von Kraftmaschinen lehrt, daß der Belastungsübergang und die auftretenden Geschwindigkeitsschwankungen nicht nur vom Ungleichförmigkeits- und Empfindlichkeitsgrad des Reglers sowie dem Verstellwiderstand der Steuerung abhängen, sondern auch wesentlich beeinflußt werden von den Regeleigenschaften der in Betracht kommenden Motoren selbst, wie Dampf- und Gasmaschinen, Dieselmotoren, Dampf- und Wasserturbinen; hierzu kommt der Einfluß der Größe der umlaufenden Schwungmassen und bei Mehrfachexpansions-Dampfmaschinen der Einfluß des Aufnehmerdampfes. Ferner zeigt sich die Kraftmaschinenregelung auch abhängig von der Art und Weise der Widerstandsänderung, die beispielsweise bei Transmissionsbetrieb wesentlich von derjenigen bei elektrischem Betrieb abweicht.

Im letzteren Falle hat nicht nur das System der Dynamomaschine, ob Gleich- oder Wechselstrom erzeugend, weitgehenden Einfluß auf den Regelvorgang, sondern auch die bei Belastungsänderungen auftretende Veränderung des elektrischen Zustandes der Dynamomaschinen, indem eine gewisse elektrische Selbstregelung auftritt, die sich ihrerseits noch verschieden gestaltet je nach der Art der elektrischen Erregung der Dynamomaschine und ihres Zusammenhanges mit dem Leitungsnetz mit oder ohne Akkumulatoren.

Die vorbezeichnete vielseitige Abhängigkeit der Reglerwirkung vom System und den Betriebsverhältnissen der Kraftmaschinen begründet das verschiedene Verhalten eines und desselben Reglers bei gleichartiger Belastungsänderung in den verschiedenen Verwendungsfällen, so daß nicht selten langwieriges Einstellen des Reglers und empirisches Ausprobieren der Regelvorgänge nötig werden.

Das Studium des Einflusses dieser mannigfachen in Betracht kommenden Faktoren auf den Regelvorgang, das bereits in der Literatur¹⁾ Gegenstand sowohl allgemeiner als auch durch Versuche gestützter Betrachtungen geworden ist, war auch die Aufgabe von Untersuchungen²⁾ im Maschinenbaulaboratorium der Technischen Hochschule Darmstadt, über welche nachfolgend auszugweise berichtet werden möge.

Die Regelversuche fanden vornehmlich an einer liegenden Verbund-Dampfmaschine, Abb. 1 und 2, von 300 und 450 mm Zylinderdurchmesser und 600 mm Kolbenhub statt; die Versuchsmaschine hat am Hochdruckzylinder Kuchenbeckersche Ventilsteuerung und am Niederdruckzylinder Rundschieber nach Wheelockscher Anordnung auf der unteren Seite des Zylinders. Die mittlere minutliche Umlauf-

¹⁾ s. z. B.: Tolle, Die Regelung der Kraftmaschinen; Thümmler, Fliehkraft und Beharrungsregler; Isaachsen, Die Bedingungen für eine gute Regulierung.

²⁾ zum größten Teil mit Mitteln des Vereines deutscher Ingenieure ausgeführt.

zahl beträgt 110. Mittels Riemens wird vom Schwungrad aus eine Schuckertsche Nebenschluß-Gleichstromdynamo für 140 V angetrieben, die zusammen mit einer Akkumulatorenbatterie auf das elektrische Lichtnetz der Hochschulgebäude arbeitet. Um Regler verschiedener Bauarten in ihrem Einfluß auf die Vorgänge bei Belastungsänderungen untersuchen zu können, kann an die Reglerwelle der Dampfmaschinensteuerung noch ein besonderer Reglerständer zum Einbau der Versuchsregler angeschlossen werden.

Obwohl die vergleichenden Untersuchungen über die Wirkungsweise verschiedener Regler noch nicht abgeschlossen sind, erscheint es doch nicht ohne Wert, über das Ergebnis eines Teiles der ausgeführten Regelversuche, insoweit Vorgänge von allgemeiner Bedeutung dabei in Frage kommen, zu berichten.

Zur Erzielung verwertbarer Versuchsbeobachtungen waren zeitraubende Vorbereitungen und häufige Aenderungen der Versuchseinrichtungen notwendig, um deren sorgfältige Durchführung sich besonders Hr. Laboratoriumsassistent Dipl.-Ing. A. Noll bemühte; aus seinen und ergänzenden Untersuchungen des Hrn. Dipl.-Ing. Walger ist der nachfolgende Bericht vornehmlich zusammengestellt.

Abb. 1 und 2. Liegende Verbund-Dampfmaschine von 300 und 450 mm Zyl.-Dmr. und 600 mm Hub als Versuchsmaschine.

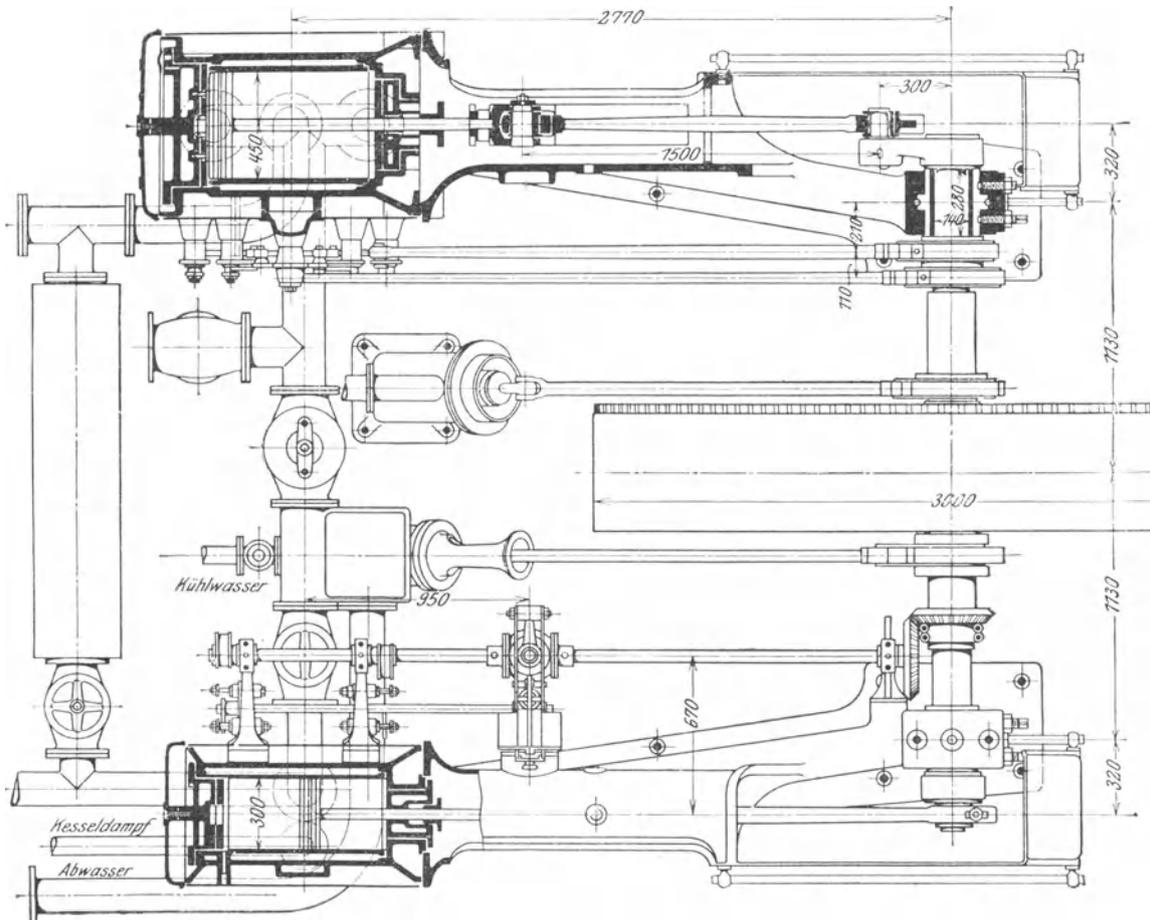


Abb. I.

Die behandelten Versuche sind mit dem zur Maschine gehörigen Steinle-Hartungschens Gewichtsregler ausgeführt, dessen Maß- und Gewichtverhältnisse aus Abb. 3 zu entnehmen sind. Die Reglerwelle wird durch ein Kegelrädergetriebe mit einem Uebersetzungsverhältnis $30 : 22 = 15 : 11$ angetrieben, wodurch sich ihre mittlere Umlaufzahl zu $110 \cdot \frac{15}{11} = 150$ i. d. Min. ergibt.

Versuchseinrichtungen und Meßgeräte.

Zur übersichtlichen Verfolgung der sich bei einer Belastungsänderung durch die selbsttätige Regelung ergebenden Veränderung der Dampfarbeit und elektrischen Leistung sowie des Ganges der Versuchsmaschine und der Regel- und Steuerstellung wurden während der in Betracht kommenden Beobachtungszeit folgende Werte durch graphische Aufzeichnung ermittelt:

- 1) Lagenänderung der Reglerhülse;
- 2) Aenderung der Stellkraft, d. i. der Zugwirkung in der Verbindungsstange zwischen Regler und Reglerwelle der Steuerung;
- 3) Aenderungen der indizierten Leistung;
- 4) Schwankungen der Umfangsgeschwindigkeit der Kurbelwelle;
- 5) Aenderung der Stromstärke und -spannung an den Polklemmen der Dynamomaschine.

Zu 1) Die Bewegung der Reglerhülse wurde mittels Hebelübertragung auf eine gleichmäßig umlaufende Papiertrommel in vergrößertem Maßstab aufgezeichnet.

Zu 2) Die vom Regler auf die Steuerung zu übertragenden Verstellkräfte wurden mittels eines in die senkrechte Verbindungsstange *S* eingebauten Federdynamo-

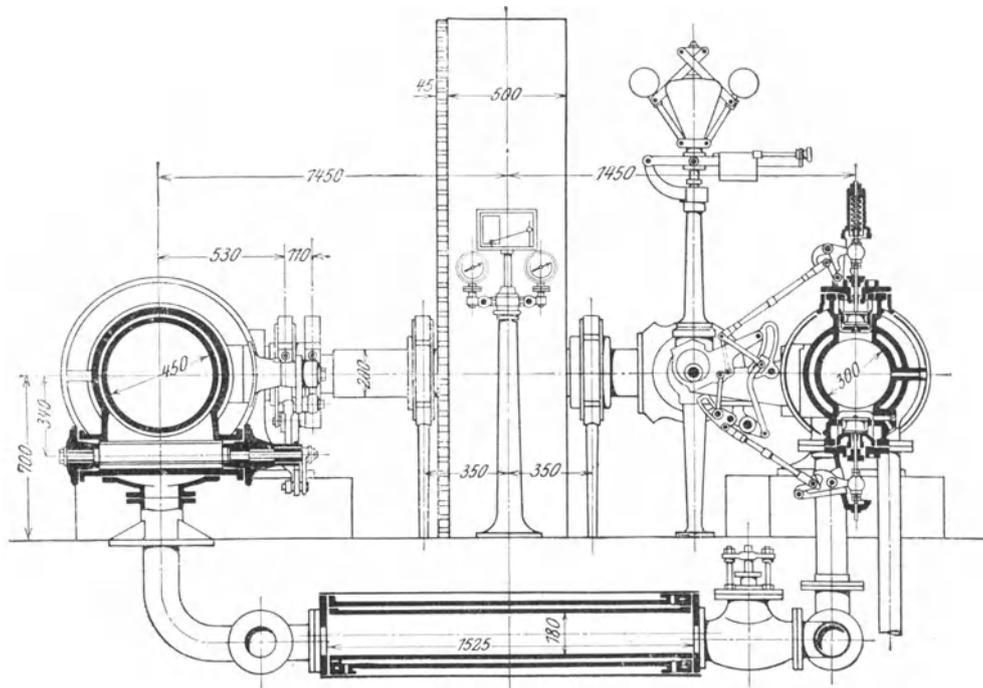
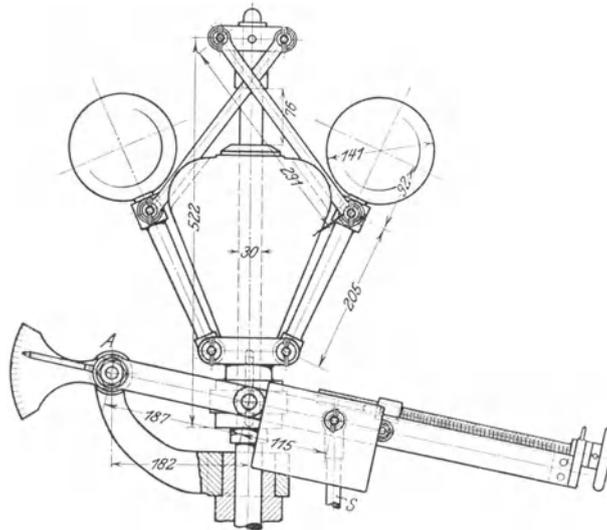


Abb. 2.

meters, Abb. 3, 4 und 5, gemessen und die Lagenänderungen der Feder mittels eines Schreibhebels in vergrößertem Maßstab auf die zur Aufschreibung des Hülsenhubes dienende Trommel übertragen. In der Ruhelage des Gestänges befindet sich die Feder bereits unter Spannung, um toten Gang bei der Uebertragung der Verstellkräfte zu vermeiden. Die Längenänderungen der Feder werden im Verhältnis 1:12 durch Hebel auf das Schreibzeug übersetzt. 1 mm Schreibstiftheub entspricht 0,55 kg Federspannung. Berücksichtigt ist bei der Ermittlung der Verstellkräfte auch der Gewichtanteil der Uebertragungshebel und -stangen.



Schwungpendel mit Kugel 11,26 kg	Belastungsgewicht mit Muffe 47,40 kg
Stützhebel 0,445 »	Verstellhebel 4,99 »
Laufgewicht 19,35 »	Spindel mit Handrad . . . 1,027 »
mittlere minutliche Umlaufzahl 150.	

Abb. 3. Steinle-Hartung-Regler.

Zu 3) Die Indizierung beider Dampfzylinder wurde mittels laufender Indikatoren vorgenommen. Der Umstand jedoch, daß hierbei sämtliche hintereinander aufgezeichneten Dampfdiagramme infolge der Schaltbewegung der Papiertrommel eine Verzerrung erleiden, hat dazu geführt, Diagramme nur bei ruhender Trommel schreiben zu lassen. Dies setzte aber eine Unterbrechung der Indizierung in dem Maße voraus, daß nur nach 2 oder 3 Umdrehungen durch gleichzeitiges Einschalten der vier Indikatoren mittels entsprechender Schalthebel je ein Diagramm aufgeschrieben wurde. Unter Berücksichtigung der zwischen den einzelnen Diagrammen verstrichenen Zeit konnte die Aenderung der indizierten Leistung durch Interpolation mit genügender Annäherung ermittelt werden.

Zu 4) Zur Messung der Umfangsgeschwindigkeiten der Kurbelwelle diente der Tachograph von Dr. Horn. Er wurde unmittelbar von der Kurbelwelle aus durch einen Gurtriemen, dessen Enden ohne Stoßfugen übereinander genäht waren, angetrieben. Die mittlere Geschwindigkeit der Papiertrommel betrug 10 mm/sk.

Zu 5) Die beim Belastungsübergang auftretenden Aenderungen der Stromstärke und der Spannung wurden anfänglich mittels gewöhnlicher Strom- und Spannungsmesser so aufgeschrieben, daß die Zeiger der Messer von Hand mittels eines zweiten besonders angebrachten Zeigers laufend verfolgt und dessen Stellungs-

änderungen wieder auf eine Papiertrommel übertragen wurden. Bei den späteren Versuchen erfolgte die Aufnahme von Stromstärke und Spannung selbsttätig durch Messer, die mit einem Hornschen Tachographen unmittelbar gekuppelt waren. Zur Erhöhung der Genauigkeit der Angaben des Spannungsschreibers wurden die Spannungskurven nicht mittels eines Nadelschreibzeuges, sondern mittels Durchlöcherung

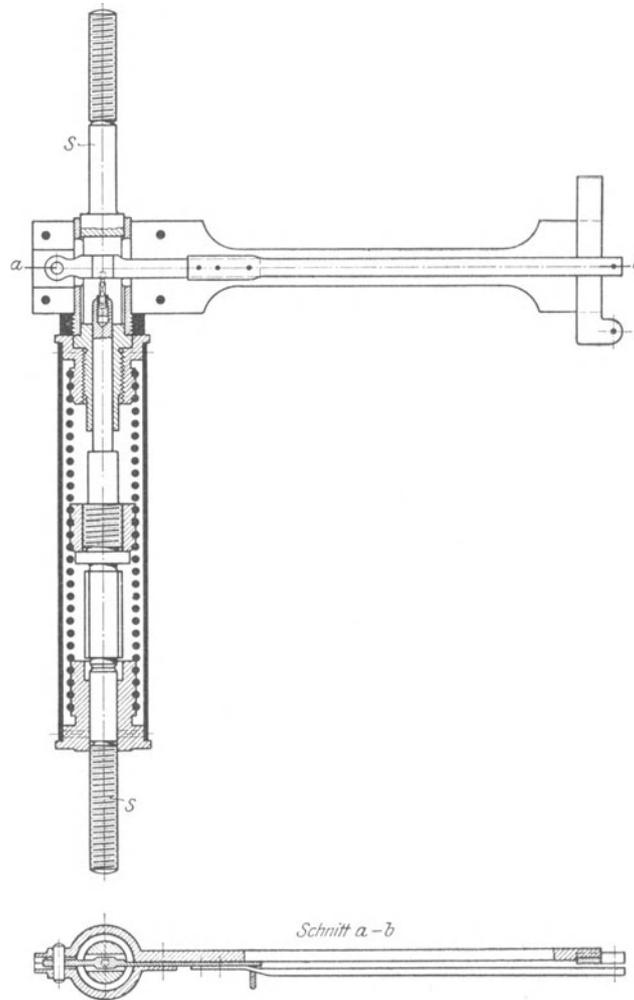


Abb. 4 und 5. Federdynamometer des Reglergehäuses zur Messung der Verstellkräfte.

des Diagrammpapiers durch elektrische Funken aufgeschrieben. Die Papiergeschwindigkeit wurde auch hier mit 10 mm/sk als zweckmäßig beibehalten.

Sämtliche Papiertrommeln, mit Ausnahme derjenigen der Indikatoren, wurden von der Kurbel- oder Steuerwelle aus angetrieben und ihre Geschwindigkeit dadurch festgelegt, daß auf den einzelnen Diagrammen jede Maschinenumdrehung mittels elektrisch betätigter Taster vermerkt wurde.

Allgemeines über die Ausführung der Versuche.

Zur Belastung des elektrischen Stromerzeugers diente vorwiegend ein großer Widerstand aus Konstantendraht, der eine höchste Belastung von etwa 500 Amp bei 140 V aufnehmen konnte. Ein Augenblicksschalter ermöglichte, plötzliche Aenderungen der Belastung in beliebigen Grenzen mittels eines einzigen Handgriffes zu erreichen. Bei einigen Versuchen wurde der Stromerzeuger auch auf eine zur elektrischen Beleuchtung der Hochschule dienende Akkumulatorenbatterie geschaltet, wobei Belastungsänderungen durch Aenderung seiner Erregung erzeugt wurden. Bei allen Regelversuchen befand sich die Maschine vor der zu verfolgenden Belastungsänderung im Beharrungszustand.

Der Arbeitsaustausch zwischen Dampfmaschine und Dynamo.

Der Arbeitsaustausch zwischen eingeleiteter, fortgeleiteter und Schwungrad-Arbeit während der Regelung unterscheidet sich grundsätzlich nicht von demjenigen während des Beharrungszustandes; nur führt der bei Belastungsänderung anfänglich bestehende verhältnismäßig große Unterschied zwischen ein- und fortgeleiteter Arbeit zu entsprechend großen Aenderungen der lebendigen Kraft der Schwungmassen und damit zu großen Aenderungen der Umfangsgeschwindigkeiten und der Umlaufzahlen.

In den Abbildungen 6 bis 8 ist für einzelne Umdrehungen vor, während und nach einer Belastungsabnahme von 50,8 auf 23 KW der Zusammenhang veranschaulicht, der zwischen der Kurbelumfangsgeschwindigkeit, der indizierten Dampfarbeit und der fortgeleiteten elektrischen Arbeit besteht, indem die in die Schwungmassen und aus ihnen wandernden Arbeitsbeträge durch die schraffierten Flächen hervorgehoben und die entsprechenden Geschwindigkeitsänderungen in den wellenförmigen Geschwindigkeitsdiagrammen aufgezeichnet sind.

Die Abszissen stellen die Kurbelwege oder die Zeit in Sekunden dar, während die Leistungsordinaten in KW ausgedrückt sind, weshalb die Arbeitsflächen KWsk bedeuten. Die Geschwindigkeitsordinaten drücken die auf die Minute bezogenen Umläufe aus.

Diagramm I, Abb. 6, bezieht sich auf eine Umdrehung während des Beharrungszustandes vor der Belastungsänderung, Diagramm II desgleichen nach der Belastungsänderung.

Die positiven und negativen Arbeitsflächen der Diagramme gleichen einander während einer Umdrehung aus, und die Geschwindigkeitskurven weisen die mit jeder Umdrehung sich rhythmisch wiederholenden, den Ungleichförmigkeitsgrad δ , der Bewegung kennzeichnenden Schwankungen auf, wobei die mittlere Umfangsgeschwindigkeit nach der Belastungsabnahme größer als vorher wird. Dieser Geschwindigkeitsunterschied ist bestimmend für den Ungleichförmigkeitsgrad δ , der Regelung.

Die Diagramme Abb. 7 und 8 veranschaulichen die Aenderung der indizierten Leistung, des Widerstandes und der Umfangsgeschwindigkeit für zwei unter der Einwirkung des Reglers stehende Arbeitsperioden nach eingetretener Belastungsabnahme; ersteres Diagramm für die Periode steigender, letzteres für diejenige wieder sinkender mittlerer Geschwindigkeit.

Diese Diagramme unterscheiden sich von denen des Beharrungszustandes dadurch, daß kein Ausgleich zwischen Dampf- und Widerstandsarbeit besteht, sondern im Diagramm Abb. 7 die erstere, im Diagramm Abb. 8 die letztere überwiegt. Der Arbeitsausgleich entsteht erst durch die Aenderung der lebendigen Kraft der Schwungmassen, deren mittlere Geschwindigkeit bei überschüssiger Dampfarbeit

Abb. 6 bis 8. Kurbelleistungs- und Geschwindigkeitsdiagramm.

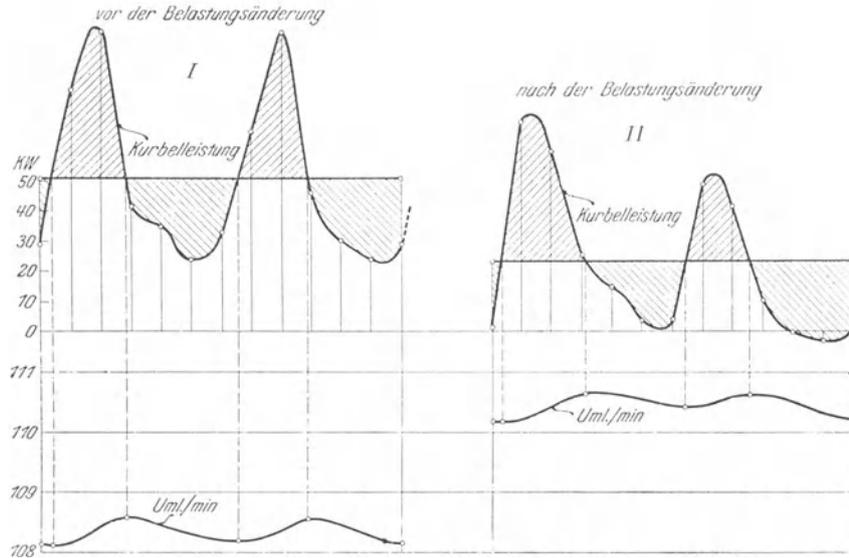


Abb. 6. im Beharrungszustand.

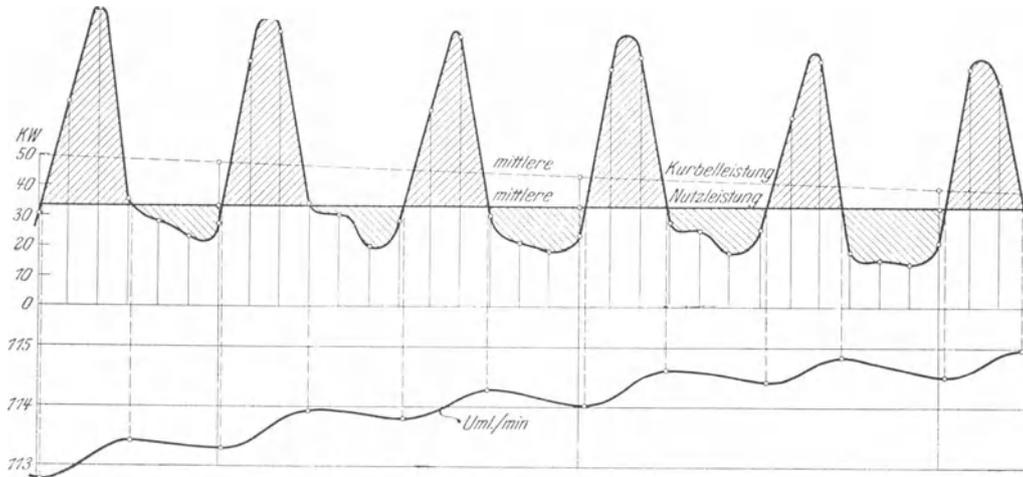


Abb. 7. während der Belastungsänderung bei steigender Geschwindigkeit.

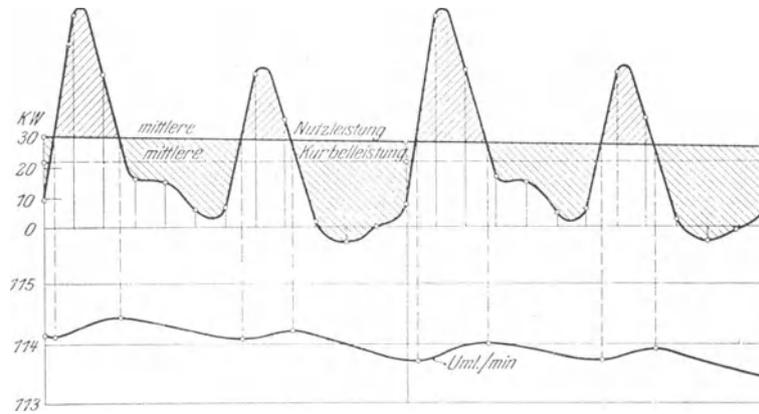


Abb. 8. während der Belastungsänderung bei fallender Geschwindigkeit.

zu-, bei überschüssiger Widerstandsarbeit abnimmt, wie dies in den Geschwindigkeitsdiagrammen auch zum Ausdruck kommt.

Hinsichtlich der Genauigkeit in der Ermittlung dieser Einzelheiten des verwickelten Regelvorganges ist zu bemerken, daß wohl die Fehler der Beobachtung und Messung bei der Bestimmung der elektrischen Leistung mit geeichten Meßgeräten nur gering ausfallen, für die indizierte und effektive Dampfarbeit dagegen größer werden können. Schon die Planimetrierung der Indikatorgramme ist mit Fehlern von mindestens 1 vH behaftet, dazu kommen noch die Ungenauigkeiten der Federeichung, so daß für die Ermittlung der indizierten Leistung eine größere Genauigkeit als 2 vH nicht angenommen werden kann, die sich bei kleinen Leistungen noch wesentlich verschlechtert. Der mechanische Wirkungsgrad der Dampfmaschine wird während der Regelung noch durch die schwankende Umlaufzahl und die vorübergehend auftretende anormale Dampfverteilung auf Hoch- und Niederdruckzylinder beeinflußt.

Diese Ungenauigkeiten der Messung haben auch dazu geführt, daß bei den späteren Versuchen auf die Indizierung der Dampfmaschine verzichtet und die Veränderung der Dampfarbeit mittelbar aus der elektrischen Nutzleistung, dem Tachogramm und der Größe der umlaufenden Massen ermittelt wurde, wie im nachfolgenden näher erläutert wird.

Vorversuch zur Bestimmung der Schwungmassen.

Wegen des bedeutenden Einflusses, den die Massenwirkung des Schwungrades, des Riemens und des Läufers der Dynamomaschine auf den Regelvorgang nehmen mußten, wurde die Größe des Schwungmomentes dieser Massen nicht nur aus ihren maßgebenden Ausführungswerten berechnet, sondern auch durch Versuch in folgender Weise ermittelt:

Der Stromerzeuger wurde bei Fremderregung mittels des Drahtwiderstandes mäßig belastet (etwa mit 20 KW) und in dieser Belastung unter gleichzeitigem Festklemmen der Regelwelle der Dampfmaschinensteuerung im Beharrungszustand erhalten. Unter fortlaufender Aufzeichnung von Umlaufzahl, Stromstärke und Spannung wurde er nun durch plötzliches Einschalten größeren Widerstandes bei unverändertem Füllungsgrad am Hochdruckzylinder stärker belastet und nach eingetretener Verminderung der Umlaufzahl um ungefähr 5 vH plötzlich unter den anfänglichen Zustand bis zu einer gleich großen Erhöhung der Umlaufzahl entlastet. Nach diesen Änderungen der Umlaufzahl von insgesamt 10 bis 11 vH wurde durch Einschalten des anfänglichen Belastungszustandes die ursprüngliche Umlaufzahl wieder hergestellt.

Um nun die den verschiedenen Umlaufzahlen bei gleichbleibendem Füllungsgrad entsprechenden nutzbaren Dampfleistungen in die Berechnung einführen zu können, wurden sie durch besondere Versuche bestimmt, indem für die verschiedenen in Betracht kommenden Umlaufzahlen bei feststehender Regelwelle die sich im Beharrungszustand einstellende effektive elektrische Leistung ermittelt wurde. Es ergab sich dabei, daß bei höherer Umlaufzahl die indizierte Dampfarbeit infolge vermehrter Dampfdrosselung abnahm, die mechanischen und elektrischen Verluste dagegen zunahmten, so daß eine deutliche Verminderung der nutzbaren Dampfleistung eintrat.

Aus diesen Erhebungen für die Veränderung der nutzbaren Dampfleistung mit der Umlaufzahl bei gleichbleibender Füllung konnten somit die Dampfleistungskurven für den vorher erörterten Versuch mäßiger Be- und Entlastung bei unveränderter Dampfmaschinensteuerung aufgezeichnet werden. In Abb. 9 sind für zwei Ent-

lastungen und eine Belastung die aufgetretenen Aenderungen der Umlaufzahl sowie die zugehörigen Aenderungen der nutzbaren Dampfleistung und der effektiven Dynamoleistung veranschaulicht. Der Unterschied der beiden letzteren, in den schraffierten Flächen hervorgehobenen Arbeiten kennzeichnet den Arbeitsbetrag, welcher bei den jeweiligen Geschwindigkeitsänderungen von den Schwungmassen aufgenommen oder abgegeben worden ist.

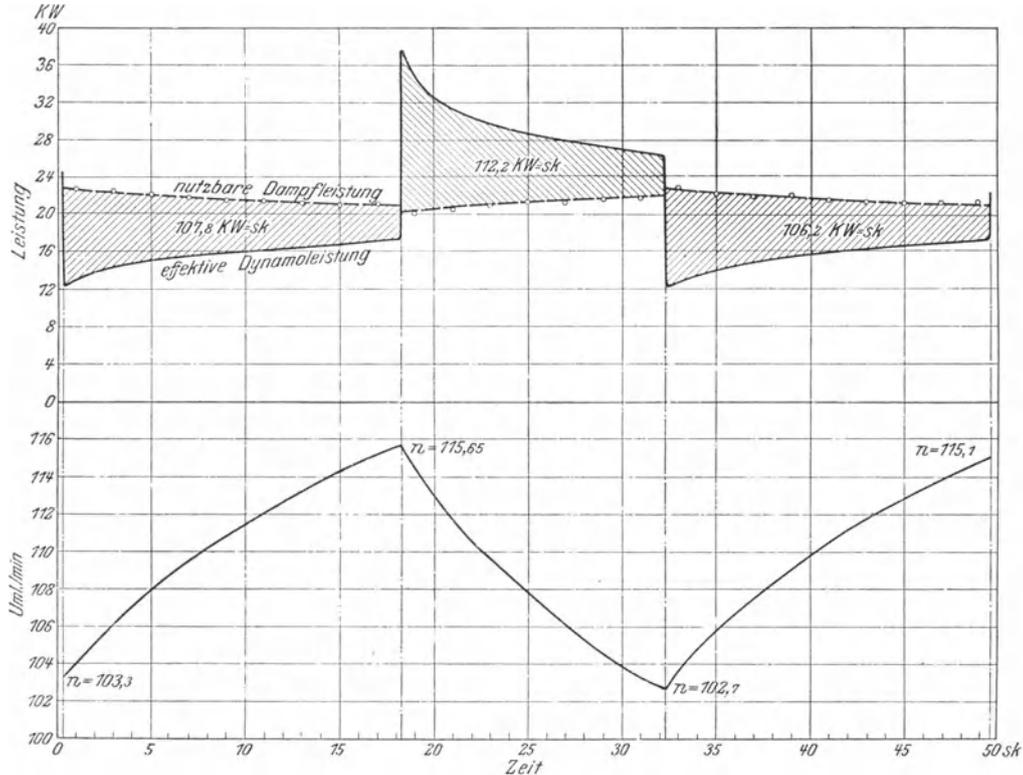


Abb. 9. Versuch zur Bestimmung der Schwungmassen-Energie.

Aus den Tachogrammen konnten für verschiedene Geschwindigkeiten der Dampfmaschine mittels der zugehörigen in die Schwungmassen übertragenen oder von diesen abgegebenen Arbeiten Werte für die Schwungmassen-Energie berechnet werden, deren arithmetisches Mittel für 100 Uml./min der Dampfmaschine eine Schwungmassen-Energie von

$$A_{100} = 399 \text{ KWsk}$$

ergab.

Aus den Abmessungen von Schwungrad, Riemen und Läufer berechnete sich ein Wert von $A_{100} = 402 \text{ KWsk}$, so daß für die weitere Benutzung der Einfachheit halber rd. $A_{100} = 400 \text{ KWsk}$ gesetzt werden kann.

Graphische Darstellung und Auswertung der Versuche.

Zur übersichtlichen Verfolgung des Regelvorganges sind die beobachteten Einzelheiten in ihrem zeitlichen Verlauf übersichtlich in Diagrammen zusammengestellt und durch Einzeichnung von rechnermäßigen Ergebnissen ergänzt und kontrolliert.

Die effektive elektrische Leistung des Stromerzeugers ist aus den Diagrammen des Strom- und Spannungsschreibers übertragen, wobei der Kurvenverlauf des

Stromschreibers für plötzliche Belastungsänderungen wegen der Trägheit des Instrumentes einer Berichtigung unterzogen wurde in Rücksicht auf den Umstand, daß sich die Stromstärke in dem verwendeten induktionsfreien Belastungswiderstand tatsächlich ebenso rasch ändert, wie die zugehörige Schaltbewegung.

Hinsichtlich der Wiedergabe der Veränderung der Umlaufgeschwindigkeit nach den Tachogrammen ist zu bemerken, daß der Deutlichkeit und Einfachheit wegen nur der den mittleren Umlaufgeschwindigkeiten entsprechende Kurvenzug dargestellt ist ohne Rücksicht auf die periodischen Schwankungen innerhalb einer Umdrehung (Ungleichförmigkeit des Schwungrades).

Zur Veranschaulichung der Arbeitsübertragung von der Dampfmaschine auf die Dynamomaschine wurde einerseits die Veränderung der fortgeleiteten elektrischen Leistung, andererseits die Veränderung der nutzbaren Dampfleistung eingezeichnet; wobei unter letzterer jene Arbeit zu verstehen ist, die sich aus der indizierten Dampfleistung unter Abzug der mechanischen und elektrischen Verluste der ganzen Maschinengruppe ermittelt. Im Beharrungszustande stimmt somit die nutzbare Dampfleistung mit der elektrischen Nutzleistung der Dynamo (effektiven Dynamoleistung) überein. Während der Regelung dagegen weichen beide Arbeiten voneinander ab, indem die Energieübertragung infolge der Geschwindigkeitsänderungen unter Mitwirkung der lebendigen Kraft der Schwungmassen stattfindet. Hierbei ist zu beachten, daß mit jeder Aenderung der effektiven Dynamoleistung auch eine sofortige Aenderung der elektrischen Verluste (Ankerverluste) verknüpft ist.

Die nutzbare Dampfleistung wurde in der ersten Zeit der Versuche aus der Veränderung der indizierten Leistung unter Berücksichtigung des mechanischen und elektrischen Wirkungsgrades von Dynamomaschine und Dynamo einschließlich des Riementriebes bestimmt. Bei den späteren Regelversuchen wurde die nutzbare Dampfleistung ohne Indizierung unmittelbar aus der effektiven Dynamoleistung unter Hinzufügung der vom Schwungrad aufgenommenen oder unter Abzug der vom Schwungrad abgegebenen Energie ermittelt, je nachdem eine Geschwindigkeitszu- oder -abnahme bei der Verfolgung des Regelvorganges in Betracht kam. Für die beobachteten Aenderungen der Umlaufzahl wurden daher die Aenderungen der lebendigen Kraft der Schwungmassen berechnet und die betreffenden Energiebeträge, bezogen auf die Zeitdauer der Umdrehung, von der effektiven Dynamoleistung aus punktwise aufgetragen; diese Endpunkte ergeben alsdann die Kurve der nutzbaren Dampfleistung. Die Richtigkeit des so gefundenen Verlaufes der effektiven Dampfleistung läßt sich auch noch am korrespondierenden Verlauf der Hülsenstellung, mit der die indizierte und damit auch die nutzbare Leistung der Dampfmaschine unmittelbar zusammenhängt, nachprüfen. Die von den Leistungskurven der Dampfmaschine und der Dynamo eingeschlossenen Flächen stellen die mit den Schwungmassen ausgetauschten Energiebeträge dar.

In das Diagramm des zeitlichen Verlaufes der Reglermuffenstellung wurden zum Vergleich die zur jeweiligen Umlaufzahl gehörigen statischen Muffenstellungen eingezeichnet, d. h. die Muffenstellungen, die der Regler ohne die hemmenden Wirkungen von Reibungswiderstand und Massenträgheit im Beharrungszustand bei der jeweiligen Umlaufzahl eingenommen hätte. Aus den Abweichungen dieser beiden Kurvenzüge läßt sich die im Regler erzeugte Verstellkraft ermitteln, die als »berechnete Verstellkraft« in das Diagramm der mittels der Federwage »gemessenen Verstellkraft« ebenfalls eingezeichnet ist. Es sei schon an dieser Stelle bemerkt, daß aus Gründen, die weiter unten besprochen werden sollen, die Verstellkraft nicht mit der gewünschten Genauigkeit gemessen werden konnte. Es ist diese Unsicherheit dadurch in den Diagrammen zum Ausdruck gebracht, daß die betreffende Kurve nur als eckige Verbindungslinie der Versuchspunkte gekennzeichnet ist.

Selbstregelung durch Einfluß der elektrischen Verhältnisse.

Bereits in der graphischen Darstellung des Vorversuches zeigen sich gewisse Einflüsse des elektrischen Betriebes, die auch bei den eigentlichen Regelversuchen zum Ausdruck kommen und daher der Besprechung der letzteren vorweg genommen werden sollen. Nach plötzlicher Aenderung des Nutzwiderstandes stellt sich nicht sofort die neue elektrische Belastung an der Dynamomaschine ein, sondern infolge der Schwankungen der Umlaufzahl ändert sich bei gleichbleibender Erregung die Spannung am Stromerzeuger etwa proportional der Umlaufzahl und die Leistung etwa mit dem Quadrat der Umlaufzahl. Bei Aenderungen der Umlaufzahl um 10 vH, wie sie im vorliegenden Fall stattgefunden haben, sind also bereits Leistungsschwankungen von etwa 20 vH zu erwarten. Tatsächlich traten noch größere Leistungsänderungen unmittelbar nach dem jedesmaligen Umschalten auf, woraus geschlossen werden muß, daß auch noch andre Einflüsse wirksam werden. Als ein solcher wurde namentlich die Aenderung der resultierenden Feldstärke durch die Ankerrückwirkung festgestellt. Diese Aenderung der Feldstärke hat die Eigentümlichkeit, daß sie auch bei plötzlicher Aenderung der magnetomotorischen Kraft infolge starker Selbstinduktion des Feldes nur allmählich eintritt, ähnlich der Trägheitswirkung von Schwungmassen bei Geschwindigkeitsänderungen. Der neue Belastungszustand wird daher, streng genommen, nur asymptotisch erreicht. Diese verschleppende Wirkung der Selbstinduktion tritt besonders deutlich auf, wenn eine Aenderung in der Erregerstromstärke vorgenommen wird; der Uebergang auf die korrespondierende Klemmenspannung kann alsdann mittels empfindlicher Geräte nicht selten 10 bis 15 sk lang verfolgt werden.

Die Wirkung der vorgenannten Selbstregelung einer Maschinenanlage, auf die auch andre Forscher¹⁾ bereits hingewiesen haben, ist bei Belastung mit Ohmschem Widerstand gering, besonders wenn der Regler mit geringem Ungleichförmigkeitsgrad arbeitet. Bei großem Ungleichförmigkeitsgrad dagegen kann sie unter Umständen ein gewisses Ueberregeln dadurch zur Folge haben, daß der Regler für einen größeren Belastungsunterschied, also energischer in Tätigkeit tritt, als der endgültigen neuen Belastung entsprechen würde. Wird die Dynamo durch eine Batterie belastet, so tritt dagegen Selbstregelung in ziemlich hohem Maße auf. Daher setzt sich bei Ladebetrieb der Regelvorgang aus den Einwirkungen des Reglers und den Wirkungen der Selbstregelung zusammen, die untereinander eine recht verwickelte Abhängigkeit zeigen.

Im praktischen Betriebe werden diese Erscheinungen dadurch wieder beeinflusst, daß namentlich bei starken Belastungsänderungen ein aufmerksamer Schaltbrettführer die Spannungsschwankung durch Regelung mit der Hand rasch auszugleichen sucht. Neuerdings wird für solche Betriebsverhältnisse ein selbsttätiger Spannungsregler angeordnet. Der von der Versuchsmaschine angetriebene Stromerzeuger war besonders spannungsempfindlich, und zwar deshalb, weil er nicht mit einer Spannung von 180 V, für die er gebaut ist, sondern nur mit 140 bis 150 V betrieben wird, wodurch auch die Erregung zu schwach wird. Neuere Stromerzeuger mit Wendepolen sind von den mit Ankerrückwirkung zusammenhängenden Spannungsschwankungen fast frei.

Zur besseren Veranschaulichung der bei der Versuchsmaschine sich einstellenden Selbstregelung bei Störung des Beharrungszustandes mögen die folgenden vier in den Diagrammen Abb. 10 bis 13 veranschaulichten Versuche dienen, während deren die Dynamomaschine an die Batterie angeschlossen und die Felderregung unverändert gehalten war.

¹⁾ Gensecke, Mittell. über Forschungsarbeiten Heft 53 S. 2 u. f.

Bei den Versuchen Abb. 10 und 11 wurde während des Beharrungszustandes der Maschine bei unveränderter Belastung der Regler vom Zeitpunkt *a* ab mit der Hand willkürlich durch Anheben verstellt und in Punkt *b* wieder frei gelassen. Mit dem Anheben des Reglers ohne Beeinflussung der Belastung war eine Verminderung der Umlaufzahl verbunden, welche ihrerseits, nachdem der Regler sich selbst überlassen war, von *b* ab ein Sinken der Reglerhülse in seine der niedrigeren Umlaufzahl entsprechende Gleichgewichtslage zur Folge haben mußte, wodurch

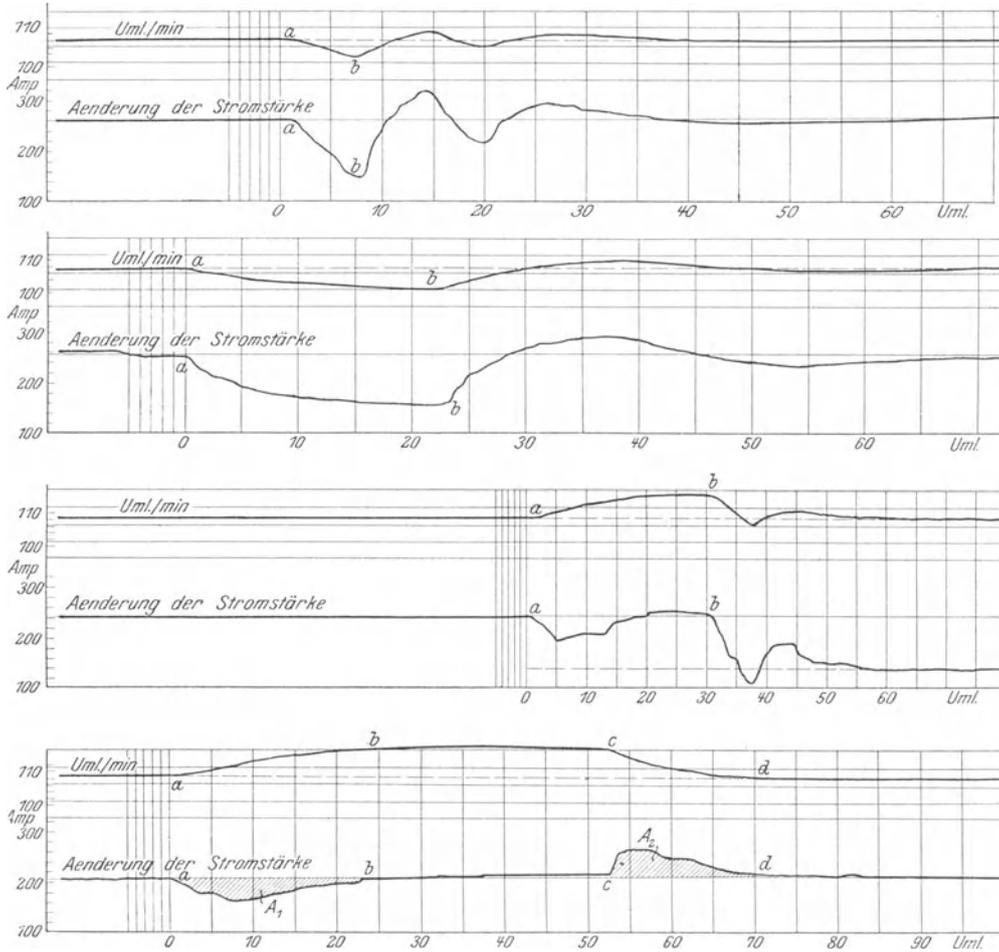


Abb. 10 bis 13. Verbundmaschine mit der Batterie arbeitend. Zusammenhang zwischen Umlaufzahl und Stromstärke bei gleichbleibender Erregung.

andererseits wieder eine Erhöhung des Füllungsgrades der Maschine und somit auch der Umlaufzahl eintrat. Da aber bei gleichbleibender Erregerspannung der Dynamomaschine die Stromstärke der Umlaufzahl proportional werden muß, so zeigt sich auch eine mit der Umlaufschwankung übereinstimmende Schwankung der elektrischen Leistung, die unmittelbar durch das die Stromänderungen darstellende Diagramm veranschaulicht wird.

Die beiden Versuche lassen die unmittelbare Abhängigkeit der elektrischen Leistung von der Umlaufzahl erkennen, und zwar entspricht im vorliegenden Falle der Veränderung der minutlichen Umlaufzahl um eine Umdrehung eine Aenderung der Stromstärke von 14 bis 18 Amp bei 150 V, d. i. 2 bis 2,5 KW. Die gleichen

Zusammenhänge zwischen Leistungsänderung und Umlaufzahl stellten sich bei einem Senken des Reglers ein.

Beim Versuch Abb. 12 wurde bei festgehaltener Regler- und Steuerungsstellung von Punkt *a* ab die Felderregung plötzlich geschwächt und unter Aufrechterhaltung dieser schwächeren Erregung von Punkt *b* ab Regler und Steuerung wieder sich selbst überlassen.

Die geringe Erregung bewirkte zunächst eine Verminderung der Stromstärke und damit der elektrischen Leistung, wodurch sich aber andererseits wegen unveränderter Steuerstellung eine Steigerung der Umlaufzahl und dieser zufolge eine Zunahme der Stromstärke einstellen mußte, der ein neuer Beharrungszustand folgte.

Nach Freigabe des Reglers und der Steuerung von Punkt *b* ab verursachte die für die seitherige Reglerstellung zu hohe Umlaufzahl ein Ansteigen der Hülse und damit eine Verkleinerung des Füllungsgrades und der Dampfleistung; daraus mußte andererseits eine Abnahme der Geschwindigkeit und der elektrischen Leistung folgen, wobei letztere in höherem Maße abnahm als die Dampfleistung, so daß sich wieder eine Periode ansteigender Geschwindigkeit und Leistung anschloß, der eine entgegengesetzte geringere Schwankung folgte, bis zum neuen Beharrungszustand bei verminderter mittlerer Leistung und etwas höherer Umlaufzahl als am Anfang. Der übereinstimmende Verlauf der Geschwindigkeits- und Stromkurven läßt auch hierbei wieder die proportionale Aenderung der elektrischen Leistung mit der Umlaufzahl erkennen.

Diagramm Abb. 13 wurde mit dauernd festgestellter Steuerung, also mit einer annähernd gleich bleibenden Dampfmaschinenhubleistung bei Schwächung der Dynamoerregung erhalten. Die sich mit geringerer Erregung von *a* ab einstellende Verminderung der elektrischen Leistung bedingte bei unveränderter Steuerstellung zunächst eine Zunahme der Umlaufzahl, der zufolge auch die elektrische Leistung sich wieder erhöhen mußte bis zu einem neuen Beharrungszustand bei *b*. Wurde letzterer im Punkte *c* nun dadurch unterbrochen, daß der ursprüngliche Erregerstrom wieder eingeschaltet wurde, so stieg vorübergehend bei abnehmender Umlaufzahl auf Kosten der Schwungradenergie die elektrische Leistung an und sank bald wieder auf die ursprüngliche Umlaufzahl und Leistung des anfänglichen Beharrungszustandes.

Bei diesem Versuch erfolgte die Aenderung der elektrischen Leistung lediglich auf Kosten der Schwungradenergie und umgekehrt.

Mit den beschriebenen vier Versuchen ist erwiesen, daß bei Aenderungen des Belastungszustandes eine Selbstregelung sowohl beim frei beweglichen wie beim festgehaltenen Regler eintritt und daß sich die elektrische Leistung übereinstimmend mit der Geschwindigkeit ändert.

Einfluß des Antriebes und des Rückdruckes der Steuerung auf den Regelvorgang.

An den Originaldiagrammen des Muffenhubes und der Verstellkräfte, Abb. 14 a, ist zu bemerken, daß auch im Beharrungszustande der Regler nicht ruhig steht, sondern ununterbrochen kleine zuckende, von der Umlaufzahl der Kurbelwelle jedoch unabhängige Bewegungen ausführt, die nicht etwa mit den theoretisch zu erwartenden und durch die ungleichförmige Maschinenbewegung bedingten kleinen Schwingungen innerhalb des Unempfindlichkeitsgrades zusammenhängen. Vielmehr sind diese Zuckungen des Reglers, wie aus ihrer periodischen Wiederkehr zu schließen ist, auf stoßartig wirkende Kräfte zurückzuführen, deren Ursache im Spiel der Zähne des Regler- und Steuerwellenantriebes und im Rückdruck des Steuerungsgetriebes auf

den Regler besteht. Diese dauernd auftretenden und periodisch sich wiederholenden Schwingungen im Stellzeug können während eines Regelvorganges teils fördernd, teils störend wirken. Um ein Bild über ihre Einzelwirkung zu erhalten, sind während des normalen Betriebes der Versuchsmaschine folgende Erhebungen angestellt worden.

Zur Ermittlung des Einflusses des Reglerantriebes auf die Hülsenbewegung wurde bei frei beweglichem Regler die Steuerung festgehalten, und zur Ermittlung

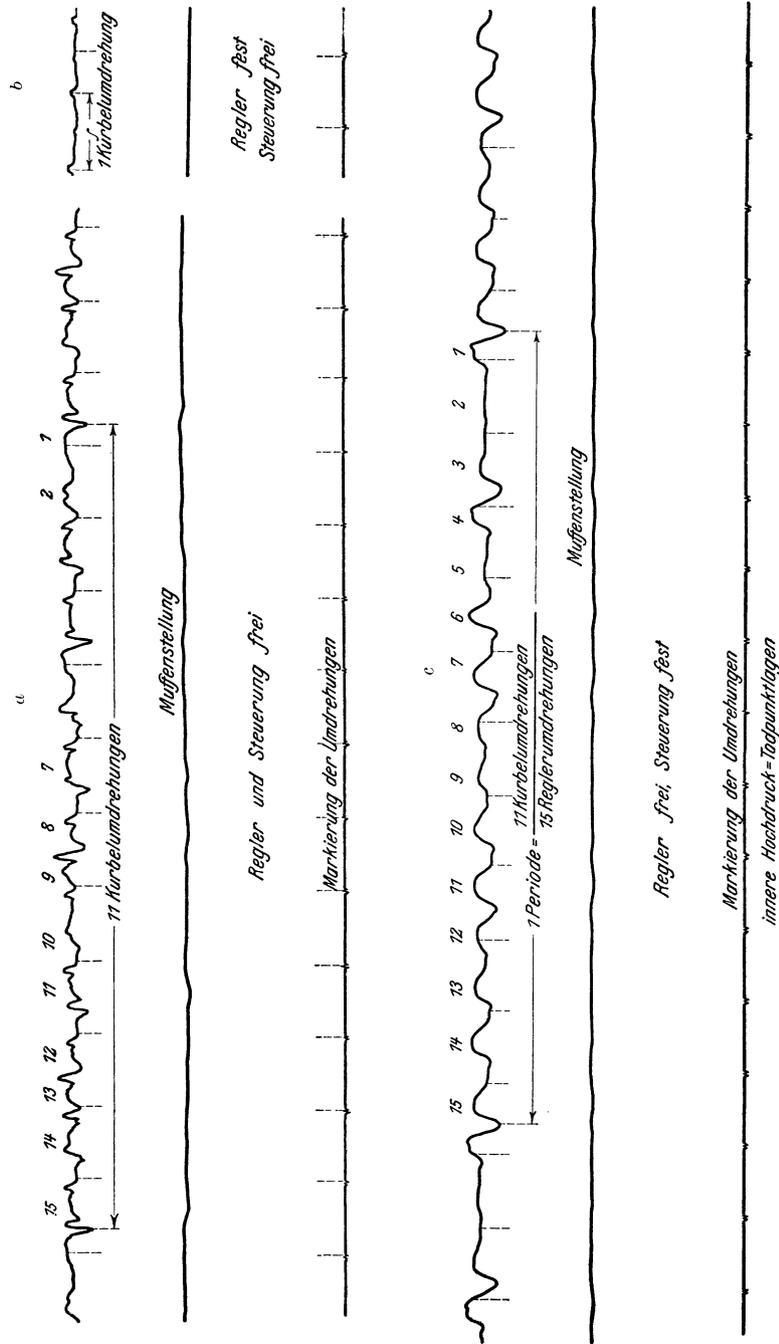


Abb. 14. Schaubild der Hülsenbewegung während des Beharrungszustandes der Maschinenbewegung.

des Einflusses des Rückdruckes der Steuerung wurde der Regler bei freibeweglicher Steuerung festgehalten.

Das bei festgestellter Steuerung erhaltene Schaubild der Hülsenbewegung, Abb. 14c, läßt einen gesetzmäßigen Verlauf in der Weise erkennen, daß sich nach 11 Kurbelumdrehungen die gleichen Schwingungsperioden im Zusammenhang mit der Uebersetzung von 15 : 11 des Reglergetriebes wiederholen, derzufolge sich der gleiche Zahneingriff nach 11 Umdrehungen der Steuerwelle wiederholt.

Es folgt daraus, daß die mit dem Antriebe der Steuerwelle und der Regler-
spindel zusammenhängenden Schwingungserscheinungen nur durch Ungenauigkeiten in der Zahnteilung oder der Aufkeilung der Räder bedingt sind, da andernfalls bei ganz gleichmäßigem Verhalten der Verzahnung ein periodisch veränderlicher Unterschied in der Bewegungsübertragung nicht auftreten würde.

Diese merklichen Schwingungen der Reglerwelle verursachten vorübergehende Störungen des Beharrungszustandes der Reglermassen und damit ebenso vorübergehende Bewegungen der Reglerhülse bis zu 1 mm, die im Federdynamometer des Reglerstellzeuges Kraftwirkungen bis zu 12,0 kg hervorriefen. Während einer Verstellung bei Belastungsänderung tragen diese Kräfte, wie bereits früher erörtert, gewissermaßen zur Erhöhung der Empfindlichkeit des Reglers dadurch bei, daß sie die Reibung der Ruhe überwinden und die Reglerenergie von dieser entlasten.

Der Reibungswiderstand des Reglers und seines Stellzeuges erscheint daher für die Verstellungsarbeit ausgeschaltet, der Unempfindlichkeitsgrad dementsprechend verkleinert und nur noch vom Verstellwiderstand der Steuerung abhängig, wenn die Massenwirkung des Reglers als unveränderlicher Einfluß betrachtet wird.

Die in Abb. 14b veranschaulichte Steuerungsrückwirkung bei feststehendem Regler und freibeweglicher Steuerung erweist sich von untergeordneter Bedeutung gegenüber dem Einfluß des Reglerantriebes; sie verursacht nur schwach mit jeder Umdrehung regelmäßig wiederkehrende Zuckungen, die eine vorübergehende Hemmung der Stellbewegung verursachen.

Regelversuche.

Die meisten nachfolgend beschriebenen Versuche wurden bei reinem Ladebetrieb der Dynamomaschine ausgeführt und die Belastungsänderungen durch Aenderungen des Erregerstromes hervorgerufen. Dabei kommt die Beeinflussung des Regelvorganges durch die mit dem Aus- und Einschalten von Widerstand zusammenhängenden elektrischen Vorgänge besonders deutlich zum Ausdruck. Selbst bei plötzlicher Schaltbewegung entsteht doch keine plötzliche Belastungsänderung, sondern die Selbstinduktion der Magnetbewicklung bewirkt einen ganz allmählichen Uebergang der Dynamomaschine in die neue Belastung. Dazu kommt die Eigentümlichkeit des Ladebetriebes, daß durch die Ankerrückwirkung und den Ohmschen Widerstand des Ankers eine der Belastungsänderung entgegenwirkende Aenderung der elektrischen Leistung entsteht, so daß sich der Belastungsunterschied für die Antriebsmaschine vermindert, da kleine Aenderungen der Umlaufzahl bereits große Belastungsänderungen verursachen. Dieser Zusammenhang führt in gewissem Grade zu einer dem eingeleiteten Regelvorgang zu Hülfe kommenden elektrischen Selbstregelung.

Regelvorgang einer Belastungsabnahme.

Abb. 15 stellt die bei reinem Ladebetrieb während einer durch plötzliche Umschaltung von 42,0 auf 12,6 KW bewirkten Entlastung aufgenommenen Kurvenzüge dar über elektrische Spannung und Stromstärke, Umlaufzahl, sowie Hülsenhub und

Zugkraft im Reglergestänge. Die Wechselwirkung zwischen den eingeleiteten Dampf- und den fortgeleiteten elektrischen Arbeiten sowie den Geschwindigkeitsveränderungen während des Entlastungsvorganges veranschaulichen die aus vorgenannten Kurven zusammengestellten Diagramme der Abbildung 16, wobei die Dampfarbeiten aus laufend abgenommenen Indikatorgrammen ermittelt wurden.

Infolge der vorausgehend dargelegten gegenseitigen Abhängigkeit der beobachteten Einzelheiten voneinander lassen sich Abweichungen vom normalen Zusammenhang unmittelbar erkennen und Beobachtungsfehler bis zu einem gewissen Grade auch ausscheiden.

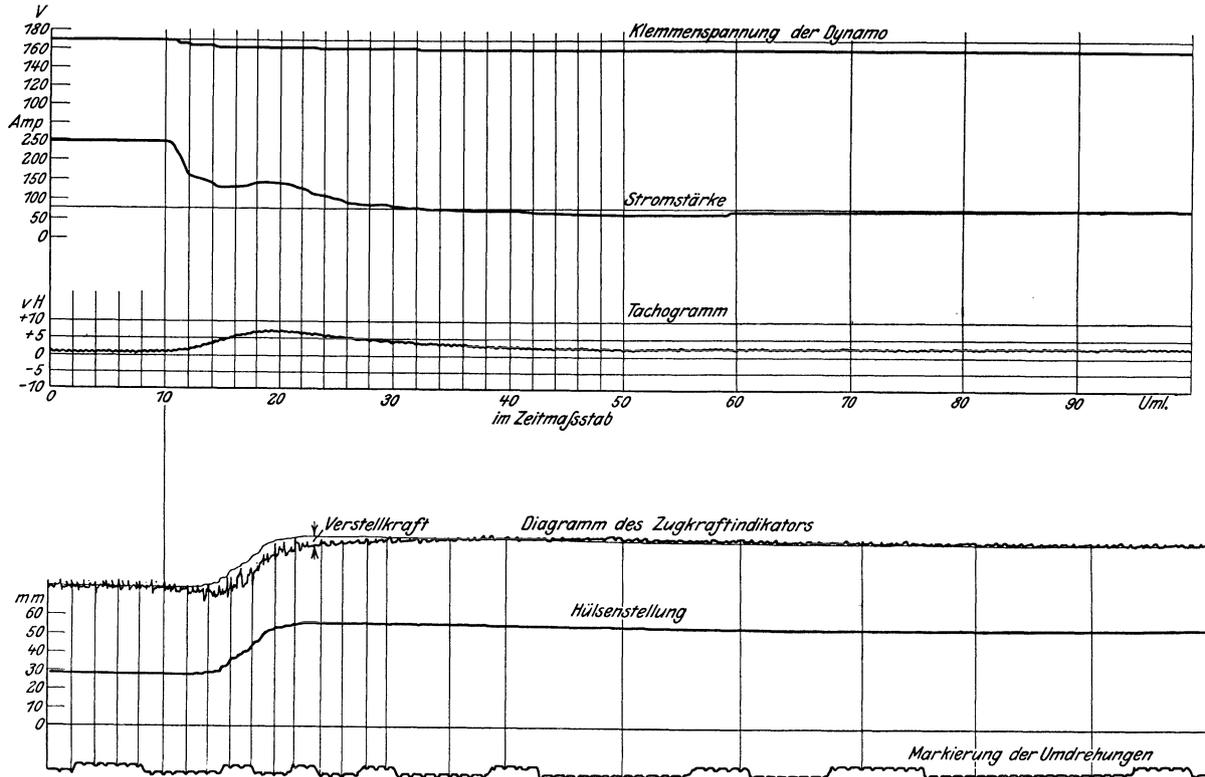


Abb. 15. Originaldiagramme eines Entlastungsversuches.

Bei der Verfolgung des durch Abb. 16 veranschaulichten Regelvorganges ist naturgemäß in erster Linie die Veränderung der mittleren Dampf- und der elektrischen Widerstandsarbeiten während der aufeinanderfolgenden Kurbeldrehungen von Bedeutung. In diesem Diagramm sind von den Ordinaten der Kurve N_i der indizierten Leistungen die Verlustarbeiten für Dampfmaschine und Dynamo abgezogen, um die Kurve N_e der effektiven oder nutzbaren Dampf- und elektrischen Arbeit, die zur Erzeugung der elektrischen Leistung N_{e1} in Betracht kommt, zu erhalten. Da beide Arbeiten während des Belastungsüberganges sich nicht decken, indem teils die Dampf- teils die elektrische Leistung überwiegt, müssen die betreffenden Ueberschußarbeiten, die durch die schraffierten Flächen dargestellt sind, von den Schwungmassen aufgenommen oder abgegeben werden, ein Vorgang, welcher die Größe und Art der mittleren Geschwindigkeitsänderungen, wie sie im unteren Kurvenzug der Abbildung 15 zum Ausdruck kommen, bestimmt.

Die beiden Leistungskurven N_e und N_{e1} kennzeichnen gewissermaßen den Strömungsvorgang der eingeleiteten und fortgeleiteten Arbeit, deren Unterschied die

Geschwindigkeitsschwankungen des Belastungsüberganges verursacht und deren vollkommener Ausgleich erst den Eintritt des neuen Beharrungszustandes ermöglicht. Neben diesen den Empfindlichkeitsgrad ε_r der Regelung bedingenden und nach einer mehr oder weniger großen Zahl von Kurbelumdrehungen verschwindenden Geschwindigkeitsänderungen bleiben die durch die veränderlichen Tangentialkräfte an der Kurbel entstehenden Geschwindigkeitsänderungen, welche den Ungleichförmigkeitsgrad δ_r der Kurbelwelle und des Schwungrades verursachen, als dauernde Schwingungen der Umfangsgeschwindigkeit bei allen Betriebsverhältnissen bestehen.

Hinsichtlich des Verlaufes der Dampfarbeit und der elektrischen Leistung während des Regelvorganges ist nun zu bemerken, daß innerhalb des Regler-Ungleichförmigkeitsgrades δ_r die Aenderung der nutzbaren Dampfarbeit unmittelbar aus der Kurve des Hülsenhubes und derjenigen der Geschwindigkeit, die Aenderung der elektrischen

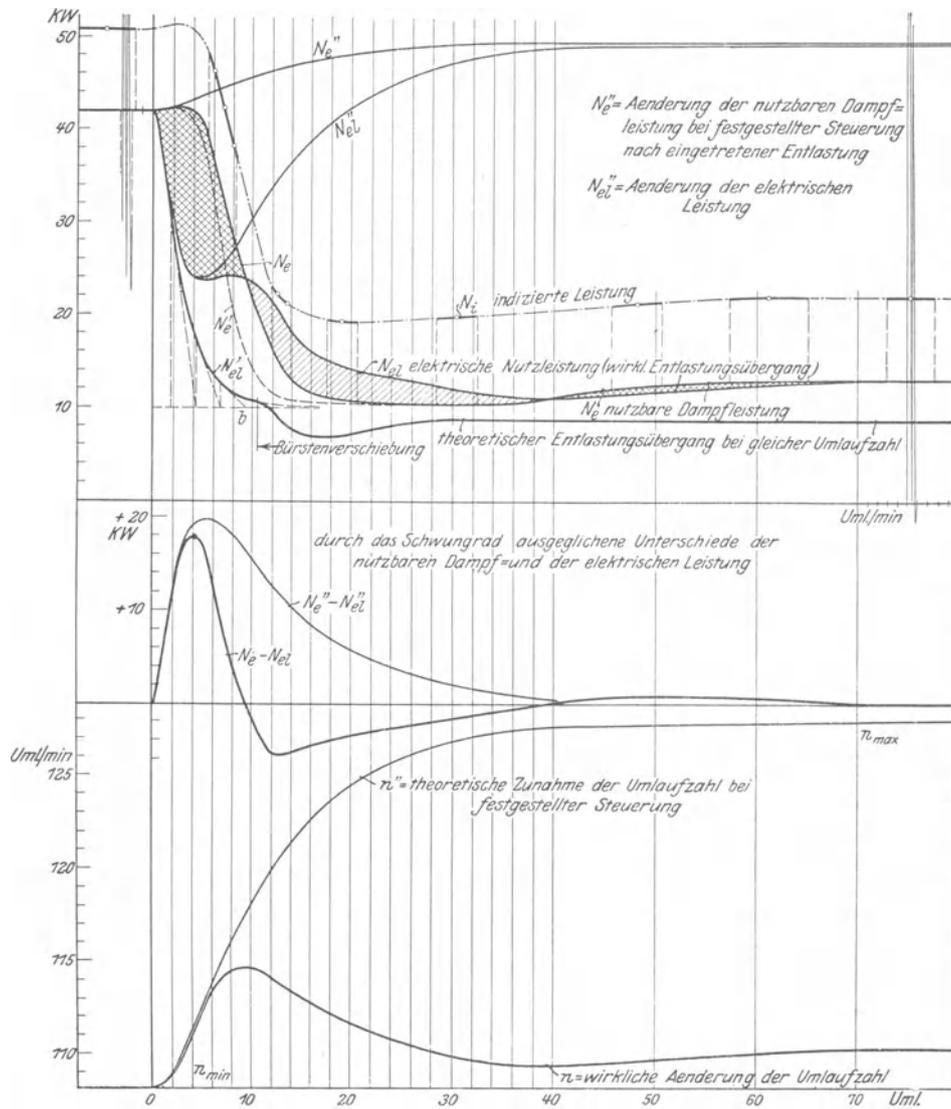


Abb. 16. Regelvorgang für eine Entlastung von 42 auf 12,6 KW bei Ladebetrieb.

Leistung bei dem hier vorliegenden Ladebetrieb unmittelbar aus der Geschwindigkeitskurve abgeleitet werden kann.

In Abb. 16 sind noch einige theoretisch bemerkenswerte Kurven eingetragen, auf die nachfolgend kurz hingewiesen werde.

Die Kurve N_{e1}' stellt jene Aenderung der elektrischen Leistung dar, die sich unter künstlicher Aufrechterhaltung der anfänglichen Umlaufzahl bei laufender Verstellung des Reglers in die Lage des neuen Beharrungszustandes etwa ergeben würde.

Der Verlauf dieser stetig abfallenden Kurve läßt sich im Zusammenhang mit dem bei veränderlicher Geschwindigkeit sich abwickelnden Regelvorgang aus der Leistungskurve N_{e1} ableiten, unter Berücksichtigung der Tatsache, daß sich die elektrische Leistung bei gleichbleibender Erregung proportional mit der Umlaufzahl ändert. Da der wirkliche Regelvorgang eine Geschwindigkeitsänderung aufweist, die durch das Tachogramm gekennzeichnet ist, und da dessen Ordinaten auch als Maß für die Abweichung der elektrischen Leistung von derjenigen bei gleichbleibender Umlaufzahl dienen können, so brauchen nur die auf den Maßstab der Leistungskurven bezogenen Ordinaten der Geschwindigkeitskurven abgezogen zu werden von den Ordinaten der Leistungskurven N_{e1} . In der Darstellung Abb. 16 ist nach früherem die einer Umdrehung in der Minute entsprechende Aenderung der elektrischen Leistung zu 2,0 KW angenommen.

Die Kurve N_{e1}' stellt somit die Grenzkurve für die Veränderung der elektrischen Leistung einer vollkommenen Regelung bei gleichbleibender Umlaufzahl, also bei einem astatischen Regler, für $n = 108,5$ dar; sie entspricht theoretisch einer Exponentialkurve mit stets gleicher Subtangente. Die Kurve der effektiven Dampfarbeit N_e muß sich in diesem Falle mit N_{e1}' decken, da andernfalls unverändliche Geschwindigkeit nicht bestehen könnte. Der nicht ganz stetige Verlauf der Kurve N_{e1} und damit auch N_{e1}' bei b ist durch die Verschiebung der Kollektorbürsten während der Regelung hervorgerufen.

Außer diesen unteren Grenzkurven des astatischen Reglers lassen sich auch obere Grenzkurven der Selbstregelung für Leistung und Geschwindigkeit ausmitteln, die sich für den entgegengesetzten Fall des unbeweglichen Reglers ergeben. Hierbei würde eine Aenderung der effektiven Leistung nach der Kurve N_{e1}'' und der elektrischen nach der Kurve N_{e1}'' eintreten, die ebenfalls wieder annähernd proportional mit der Aenderung der Umlaufzahl verläuft.

Da der Unterschied zwischen N_{e1}'' und N_{e1}' für unveränderte Bürstenstellung, dem Unterschied der Umlaufzahl von n_{\min} und n_{\max} entsprechen muß, so drückt die Fläche zwischen beiden Kurven die sich aus der Aenderung der Geschwindigkeit ergebende Arbeit der Schwungmassen aus.

Zwischen den beiden durch Selbstregelung festgelegten Grenzvorgängen des Maschinenbetriebes verläuft die wirkliche Regelung naturgemäß um so näher der unteren Grenzkurve für gleichbleibende Umlaufzahl, je größer der Gleichförmigkeits- und Empfindlichkeitsgrad des Reglers gewählt ist.

Die oberen Grenzkurven zeigen, daß bei einem unbeweglichen Regler durch Schwächung der elektrischen Erregung eine dauernde Entlastung der Dynamomaschine überhaupt nicht eintritt, sondern im Gegenteil infolge der mit der Geschwindigkeit zunehmenden Stromstärke auch die Belastung steigt.

Aus den vorstehenden Feststellungen darf die Folgerung gezogen werden, daß eine möglichst weitgehende Anpassung der Maschinenleistung an den mit einer Verminderung der Belastung verbundenen theoretischen Uebergang der elektrischen Leistung in den neuen Beharrungszustand einen leicht beweglichen Regler mit großer Energie, aber kleinem Ungleichförmigkeitsgrad voraussetzt. Die gleichen Schlußfolgerungen für die Eigenschaften des Reglers ergeben sich aus den bei einer Belastungszunahme eintretenden Steuerungs- und Reglerstellungen.

Regelung bei geringer Be- und Entlastung.

Der Verlauf des Regelversuches für eine Belastungserhöhung von 28 auf 41 KW ist durch die Diagramme der Abbildung 17 veranschaulicht, welche die Änderungen von Leistung, Umlaufzahl, Muffenhub und Verstellkraft während der Einwirkung des Reglers darstellt; desgleichen zeigt Abb. 18 die Veränderung derselben Einzelheiten für eine Entlastung von 51 auf 36 KW. In beiden Fällen wurde die Dampfmaschine mit Auspuff betrieben und die Dynamo auf Drahtwiderstand arbeitend, unabhängig von ihrer Klemmenspannung von der Batterie aus erregt, um starke Spannungsschwankungen zu vermeiden. Die Diagrammkurven verlaufen in

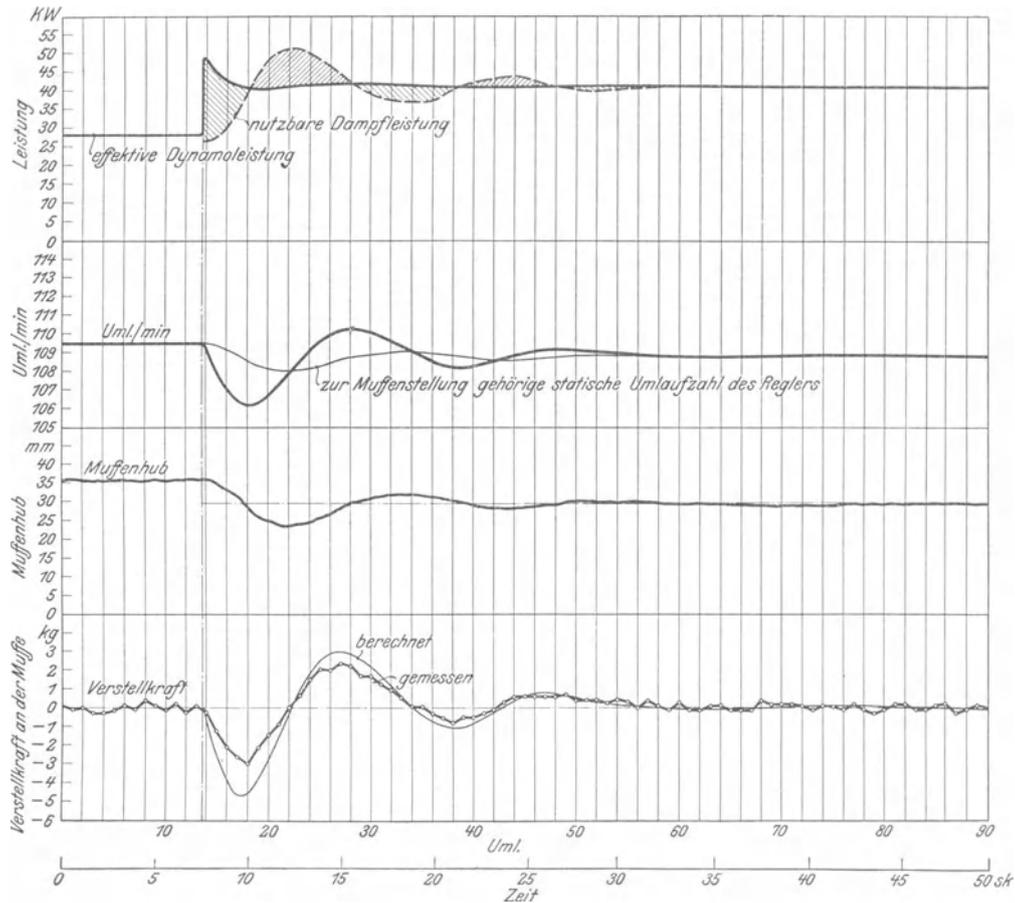


Abb. 17. Regelvorgang bei Belastungserhöhung von 28 auf 41 KW Drahtwiderstand. Erregung durch Batteriestrom.

ziemlich regelmäßigen, gedämpften Schwingungen um die neue Gleichgewichtslage; besonders bei den Diagrammen der Abbildung 18 sind diese Schwingungen während einer verhältnismäßig langen Zeit zu verfolgen. Bei beiden Regelversuchen ist der Einfluß der Ankerrückwirkung deutlich sichtbar, indem er bewirkt, daß der Belastungsunterschied zu Beginn des Regelvorganges größer ist als nach Erreichung des neuen Beharrungszustandes. Auch die Abhängigkeit der elektrischen Leistung von der Umlaufzahl ist aus den synchronen Schwingungen der Leistungs- und der Geschwindigkeitskurve zu erkennen.

An den Diagrammen der beiden Regelversuche, Abb. 17 und 18, ist die geringe Geschwindigkeit der Reglerbewegungen auffällig, die trotz großer Geschwin-

digkeitsänderungen der Kurbelbewegung und damit sich ergebender beträchtlicher Verstellkräfte nur etwa 5 mm/sk betrug. Infolgedessen kommen auch die Trägheitswirkungen der Reglermassen kaum zum Ausdruck. Die größten Beschleunigungskräfte betragen — von augenblicklichen Zuckungen abgesehen — nur etwa den hundertsten Teil der größten Verstellkräfte, obschon die beweglichen Massen des untersuchten Gewichtreglers mehr als 100 kg wiegen.

Die Ursachen der geringen Verstellgeschwindigkeit des Reglers sind auf Hemmungen des Steuerungsgetriebes zurückzuführen. Die Anhubkräfte der beiden Ein-

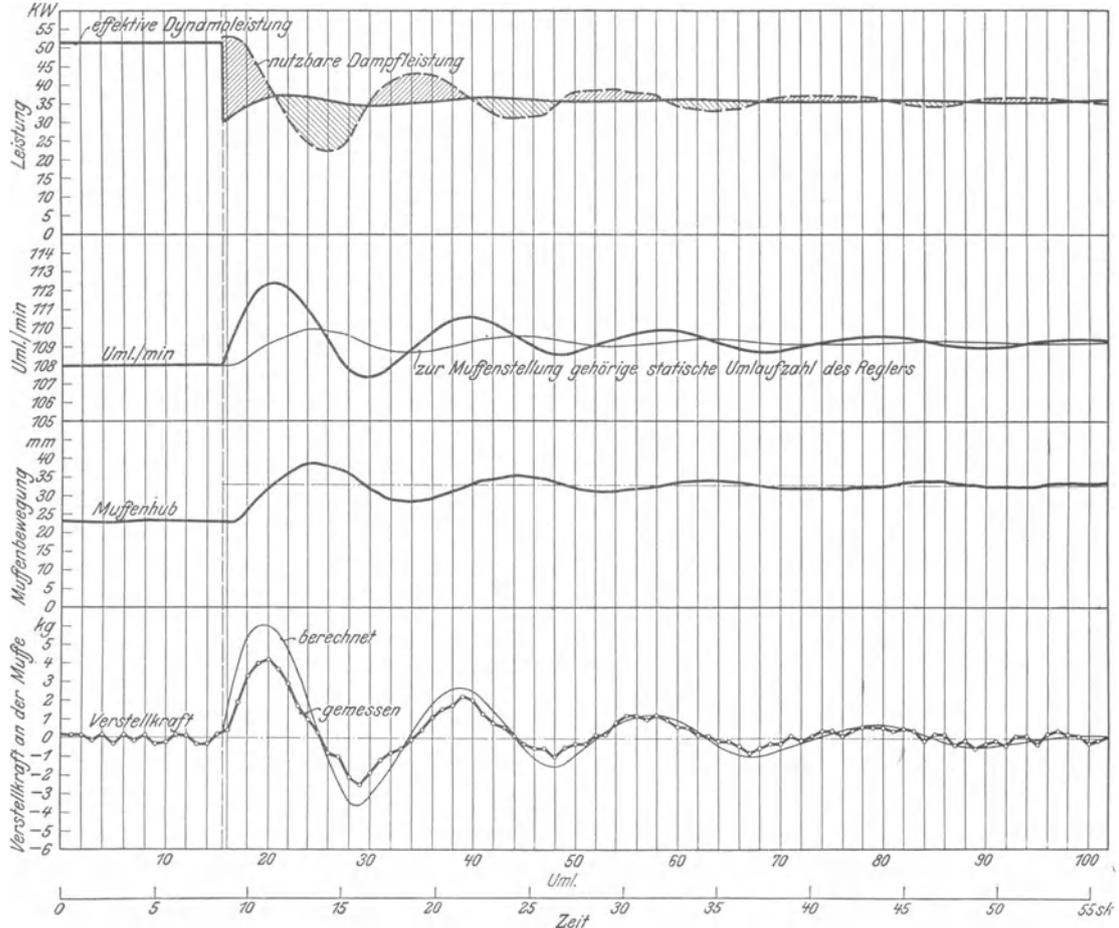


Abb. 18. Regelvorgang bei Entlastung von 51 auf 36 KW Drahtwiderstand. Erregung durch Batteriestrom.

laßventile rufen im Steuerungsgetriebe während einer Umdrehung so empfindliche Pressungen der vom Regler zu verstellenden Kulissensteine auf ihre Gleitbahn hervor, daß die Stellkraft des Reglers zur Ueberwindung des Reibungswiderstandes nicht ausreicht und somit beim jedesmaligen Anhub der Ventile die Verstellbewegung unterbrochen wird, so daß die Verstellung der Steuerung nur während des Ruhezustandes beider Einlaßventile, also nur ruckweise innerhalb kurzer Zeitabschnitte von etwa $\frac{1}{5}$ sk erfolgen kann. Je nach der Größe der Verstellkraft ergibt sich alsdann für eine bestimmte Stellverstellung eine mehr oder weniger häufige Unterbrechung.

Bei der vorliegenden Kuchenbecker-Steuerung konnte der Einfluß verschieden großer Stellkräfte auf die Verstellbewegung durch folgende Untersuchungen veranschaulicht werden:

Das Reglergestänge wurde von dem auf der Reglerwelle der Steuerung befindlichen Stellhebel losgekuppelt; nach Ausgleichung der auf die Reglerwelle einseitig wirkenden Steuerungsteile durch Gegengewichte wurde im Betriebszustand der Maschine durch verschieden große am Stellhebel angehängte Uebergewichte von 0,2 bis 5,0 kg eine Verstellung der Steuerung im Sinne einer Be- oder Entlastung eingeleitet und der Ausschlag der Reglerwelle mittels eines Stiftes auf einen mit

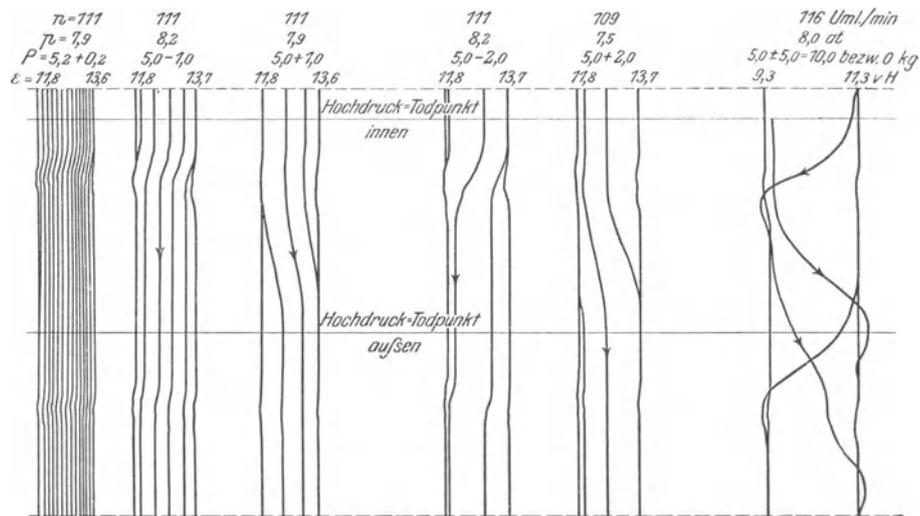


Abb. 19. Versuch über die Abhängigkeit der Steuerungsverstellung von der Stellkraft.

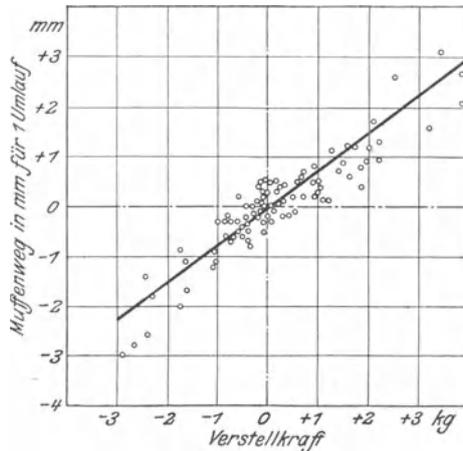


Abb. 20. Charakteristik der Muffenbewegung in ihrer Abhängigkeit von der Stellkraft.

der Steuerwelle sich drehenden Papierstreifen aufgeschrieben. Die hierbei gewonnenen Diagramme, Abb. 19, veranschaulichen den Vorgang der eingetretenen Steuerungsverstellung in dem vorbezeichneten Sinne. Bei einem Uebergewicht von 0,2 kg verteilte sich beispielsweise die Steuerverstellung für eine Füllungsänderung von 11,8 auf 13,6 vH auf 13 Umdrehungen; bei 2,0 kg genügten bereits 2 Umdrehungen, und bei 5,0 kg Stellkraft wurde die Verstellung der Steuerung für eine Füllungsänderung von 9,3 auf 11,3 vH schon während einer einzigen Umdrehung erreicht. Sämtliche

Diagramme lassen außerdem erkennen, daß die Verstellung des Kulissensteines vornehmlich nur während der Schlußbewegung des hinteren Einlaßventiles stattfindet.

Durch einen derartigen hemmenden Einfluß der Steuerung auf den Regelvorgang kann offenbar auch die Trägheit der Regler- und Stellzeugmassen nicht so zur Wirkung kommen, wie bei der theoretischen Behandlung der Regelung meist angenommen wird. Wird während der Zeitdauer der ruckweisen freien Beweglichkeit des Reglers der Verstellwiderstand jeweils unveränderlich angenommen, so sind die in dieser kurzen Zeit erreichte mittlere Geschwindigkeit und der zurückgelegte Weg

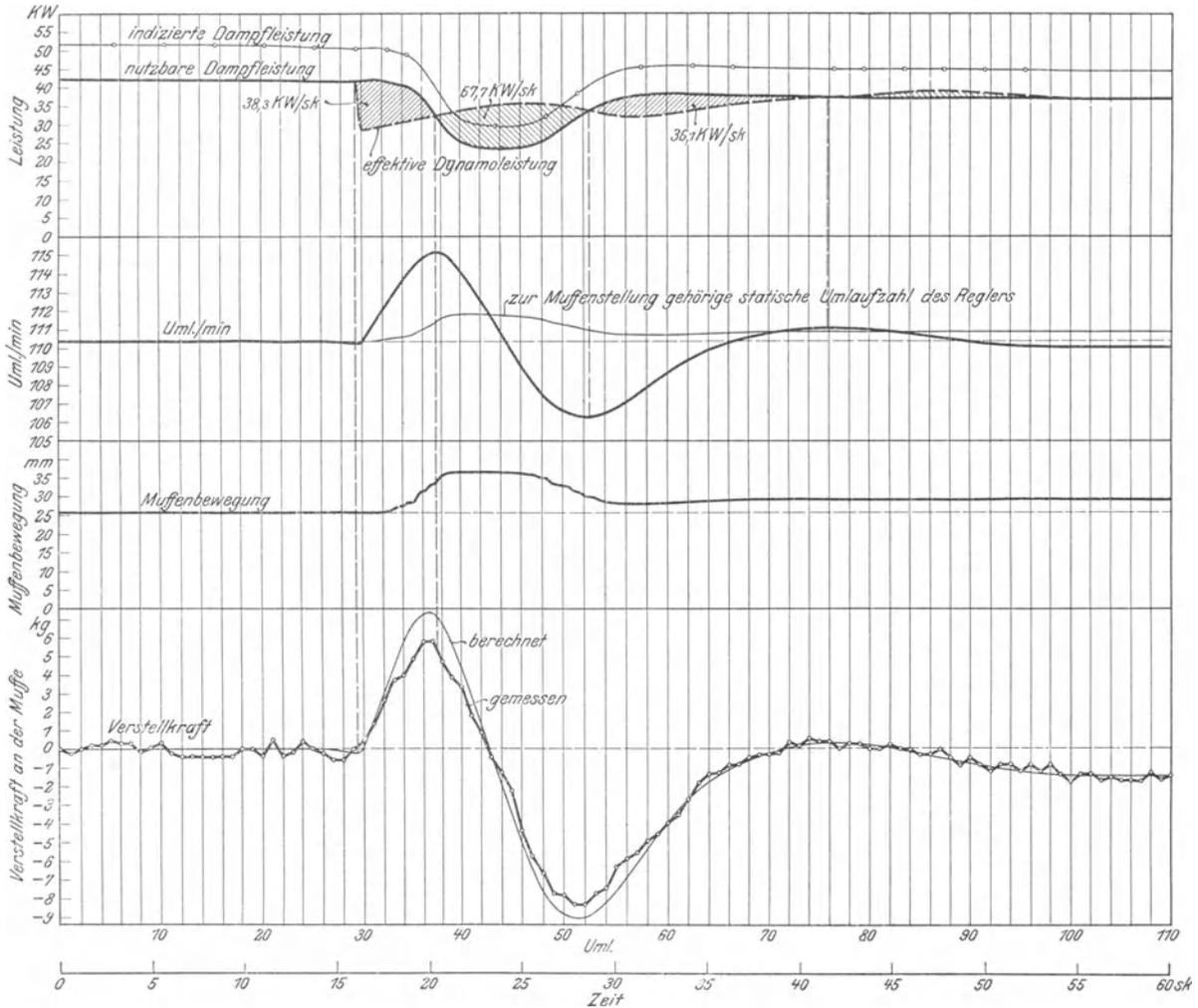


Abb. 21. Regelvorgang bei geringer Entlastung von 42 auf 37 KW Drahtwiderstand und leichter Klemmung der Reglerwelle. Selbsterregung der Dynamo.

proportional der wirksamen Kraft und umgekehrt proportional den zu bewegendenden Massen, die jeweils vom Ruhezustand aus beschleunigt werden müssen.

Diese lineare Gesetzmäßigkeit weist auch Abb. 20 auf, in der für eine Anzahl von Regelversuchen die während einer Maschinenumdrehung bewirkten Hülsenverschiebungen als Funktion der Verstellkraft aufgezeichnet worden sind. Obschon die Versuchspunkte stark verstreut sind, zeigt sich doch ziemlich deutlich die Proportionalität zwischen Verstellkraft und Hülsenweg. Die Abweichungen von der

bezeichneten Gesetzmäßigkeit dürften im wesentlichen in verschiedener Größe der Stoßwirkungen im Reglergetriebe und deren verschiedener zeitlicher Wirkung im Vergleich mit der Rückwirkung der Steuerung zu suchen sein. Bezüglich des Verstellwiderstandes ist auch noch zu beachten, daß er zum großen Teile in den Gelenken des Reglers erzeugt wird, was aus den Unterschieden der aufgezeichneten Diagramme für die gemessene und die berechnete Verstellkraft unmittelbar ersichtlich ist, Abb. 17 und 18.

Bei mäßigen Belastungsänderungen und daraus sich ergebenden geringen Verstellgeschwindigkeiten zeigen die gemessenen Verstellkräfte infolge des Tanzens des Reglers keine wesentlichen Verschiedenheiten von den berechneten, so daß ein

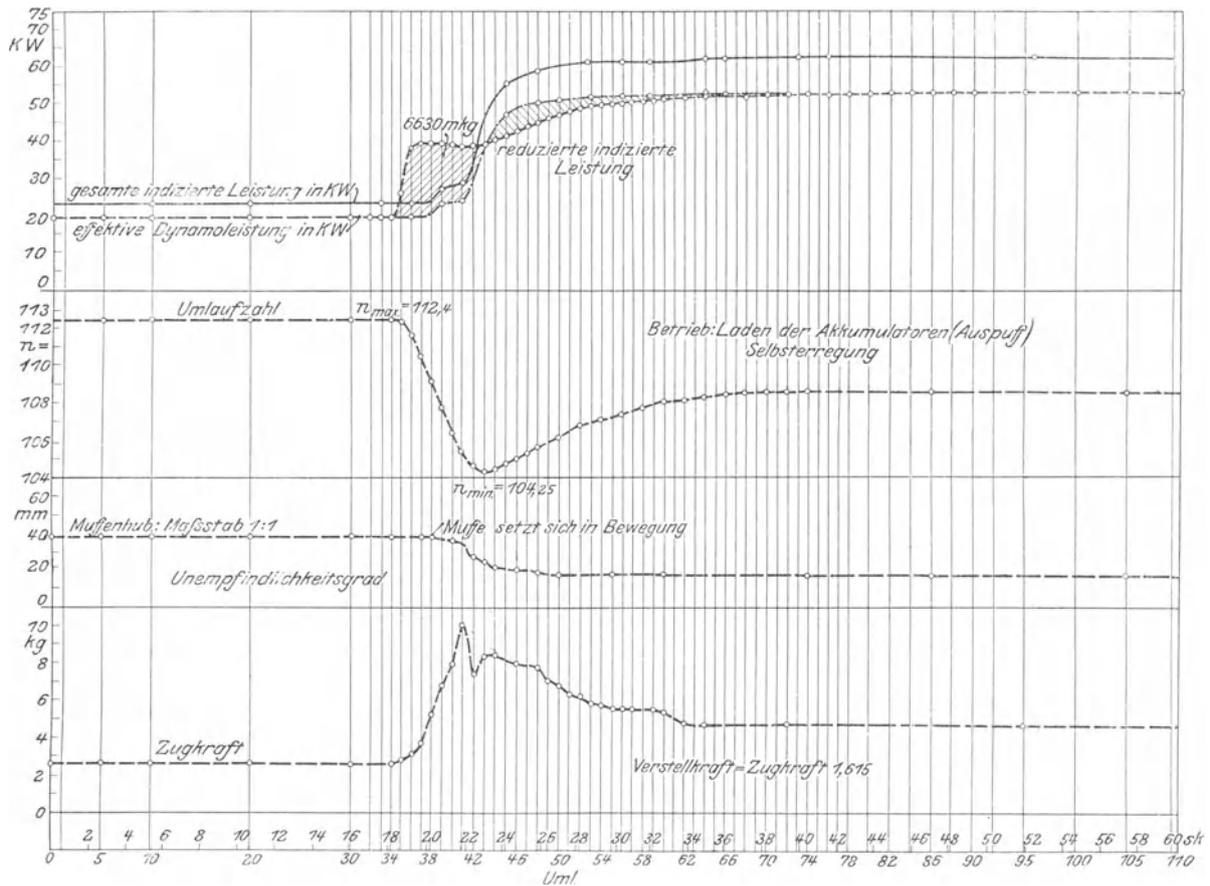


Abb. 22. Regelvorgang bei steigender Belastung. Dynamo mit Selbsterregung. Leichte Klemmung der Reglerwelle.

eigentlicher Unempfindlichkeitsgrad nicht besteht. Erst bei größeren Verstellgeschwindigkeiten treten merkliche Unterschiede beider Verstellkräfte auf. Bestimmte Anhaltspunkte bezüglich des Unempfindlichkeitsgrades können jedoch im vorliegenden Falle aus der gemessenen und der berechneten Verstellkraft nicht entnommen werden, weil die im Rädergetriebe der Reglerwelle auftretenden dauernden Stoßwirkungen einerseits zur Ueberwindung der Reibung in den Gelenken des Reglers mithelfen, anderseits aber auch wieder zu Klemmungen in den beweglichen Teilen des Reglers Veranlassung geben, die geeignet sind, dessen Bewegungswiderstand zu vergrößern.

Wesentlich andre Verhältnisse liegen bei dem in Abb. 21 dargestellten Regelvorgang mit demselben Regler vor, nachdem er in einen zweiten Bock mit besonderem Rädergetriebe eingebaut war. Wie sich nachträglich erst herausgestellt hat, war durch ungenauen Einbau eine leichte Klemmung der Reglerwelle entstanden, die einen solchen Einfluß auf die Regelung ausübte, daß selbst bei der geringen Belastungsänderung von 42 auf 37 KW der Regelvorgang unter sehr großen und unregelmäßigen Schwankungen der Umlaufzahl verlief. Dabei entspricht die nach zwei Geschwindigkeitsschwingungen erreichte Uebereinstimmung zwischen nutzbarer Dampfleistung und effektiver Dynamoleistung nur einem scheinbaren Beharrungszustand, der gewissermaßen nur zufällig und vorübergehend besteht, da die Umlaufzahl tiefer liegt als die ursprüngliche, obwohl eine Entlastung eingetreten ist. Die Kurven der gemessenen und der berechneten Verstellkraft zeigen auch nach Eintritt des neuen Beharrungszustandes noch eine Verstellkraft von etwa 2 kg an, die augenscheinlich nicht ausreichte, die zusätzliche Reibung an der Reglerwelle zu überwinden. Infolge Selbstregelung der Dynamomaschine verblieb die Dampfmaschine längere Zeit in diesem unnatürlichen Beharrungszustand. Die Anker rückwirkung der Dynamo zeigt Abb. 20 sehr deutlich dadurch, daß sich die anfängliche Belastungsabnahme von 13 KW während der Regelung auf 5 KW verminderte infolge der durch die Schwankungen der Umlaufzahl hervorgerufenen Aenderung der Klemmenspannung, Feldstärke und Primärspannung. Auch zeigt sich ein gewisser verschleppender Einfluß der Selbstinduktion auf die Leistungsschwankungen, indem die Höchstwerte immer erst einige Sekunden später als die ursächlichen Schwankungen der Umlaufzahl eintreten.

Abb. 22 stellt einen Belastungsversuch dar, bei dem die mit Selbstregelung arbeitende Dynamo wieder auf Ladung der Akkumulatorenatterie geschaltet war. Die nutzbare Dampfleistung wurde mittels periodischer Indizierung und unter Berücksichtigung des mechanischen und elektrischen Wirkungsgrades bestimmt. Die schon erwähnte Klemmung der Reglerwelle war auch bei diesem Versuch noch vorhanden. Die starke Selbstregelung zwischen Dynamo und Batterie, bei welcher einer Aenderung der Umlaufzahl um 1 vH schon eine Belastungsänderung von rd. 2,0 KW entsprach, ergab einen vom vorigen wesentlich abweichenden Charakter des Regelvorganges.

Da die Belastungszunahme durch Aenderung der Feldstärke hervorgerufen wurde, wobei die Selbstinduktion verzögernd wirkte, verlaufen die Schwingungen der Ueberschußarbeiten, der Geschwindigkeit und des Muffenhubes während des Regelvorganges sehr stark gedämpft, obgleich der Unterschied zwischen Anfangs- und Endbelastung verhältnismäßig groß ist. Auch hier tritt Beharrungszustand ein, ohne daß zwischen Reglerstellung und Umlaufzahl das normale Gleichgewicht herrscht, wie aus der Kurve der Verstellkraft zu ersehen ist. Infolge der starken Selbstregelung ist trotzdem ein dauerndes Beharren in dieser unnatürlichen Stellung möglich.

Regelvergang bei plötzlicher Entlastung von 39 auf 0 KW.

In Abb. 23 ist ein Regelversuch bei plötzlicher völliger Entlastung von 39 auf 0 KW dargestellt. Gegenüber den Versuchen mit geringer Belastungsänderung weist dieser insofern Abweichungen auf, als die früher beobachtete Regelmäßigkeit aller Kurvenzüge stellenweise ganz erheblich gestört erscheint.

Die Ursache dieser Erscheinung ist hauptsächlich in dem Umstande zu suchen, daß die in Abb. 20 zu beobachtende Gesetzmäßigkeit zwischen Verstellkraft und Muffenbewegung für große Belastungsänderungen nicht zutrifft. Infolge der mit der plötzlichen Entlastung eintretenden großen Geschwindigkeitsteigerung treten am Anfang der Verstellung so bedeutende Verstellkräfte auf, daß das bei geringen Verstell-

kräften beobachtete ruckweise Festhalten der Steuerung vermieden wird; die Muffe steigt rasch an und kommt im vorliegenden Falle erst nach einer Erhebung auf 53 mm für etwa 4 Umdrehungen vorübergehend zur Ruhe. Die aufgetretene Steigerung der Umlaufzahl würde zwar einen Muffenhub von 75 mm bedingt haben; diese Unterbrechung der Muffenbewegung ist aber dadurch verursacht, daß Kulissen und Kulissensteine des Steuergetriebes in den Endstellungen nicht ebenso eingelaufen sind wie in den Stellungen der Normalfüllung. Die Verhinderung des größten Hülsenauschlages war übrigens im vorliegenden Falle für den Regelvorgang insofern ohne Belang, als schon bei 53 mm Muffenhub die Steuerstellung für Nullfüllung erreicht war.

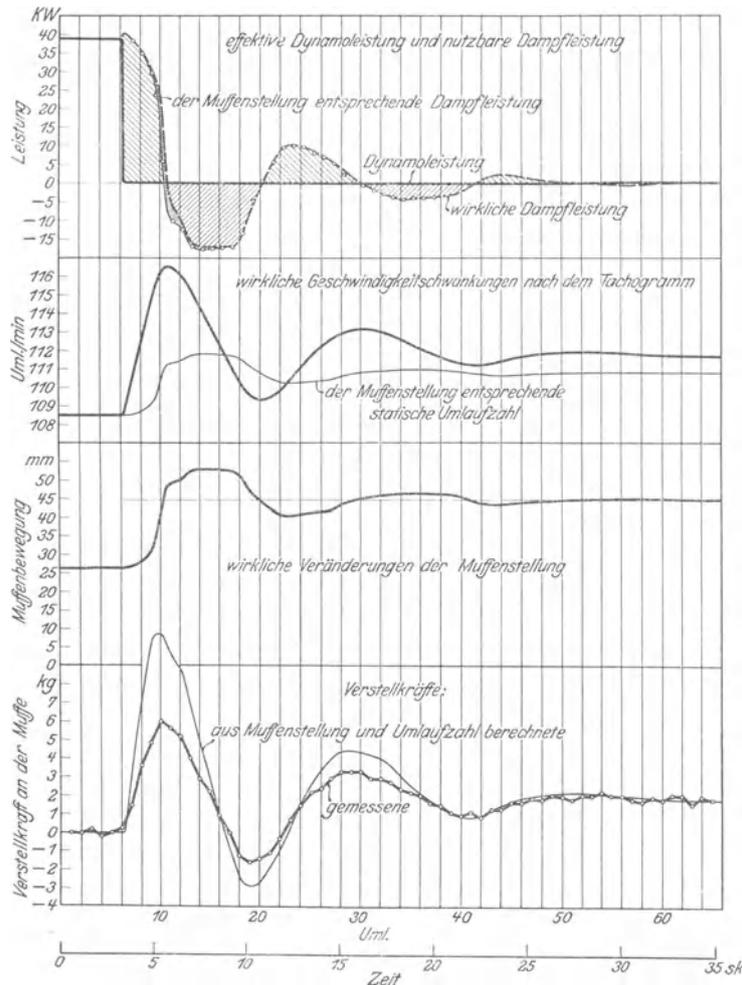


Abb. 23. Regelvorgang bei Entlastung von 39 auf 0 KW. Dynamo arbeitet auf Drahtwiderstand bei Selbsterregung.

Der Verlauf der Verstellkräfte zeigt noch die Eigentümlichkeit, daß sie im neuen Beharrungszustand des Leerlaufes nicht auf null zurückgehen, sondern dauernd in der Höhe von annähernd + 2 kg verbleiben, woraus geschlossen werden muß, daß ähnlich wie beim Versuch Abb. 22 diese Kraftwirkung im Reglerstellzeug durch den Rückdruck der Steuerung in ihrer Außenlage auf den Regler hervorgerufen wird.

Die Aenderung des Rückdruckes mit der Steuer- und Hülsenstellung zeigt Abb. 24, deren Ordinaten den bei verschiedener Hülsenstellung von der Steuerung ausgeübten Muffendrücken entsprechen. Es zeigt sich somit der Rückdruck in der Nähe der normalen Füllungen nur gering, dagegen beträchtlich zunehmend bei den oberen Muffenlagen.

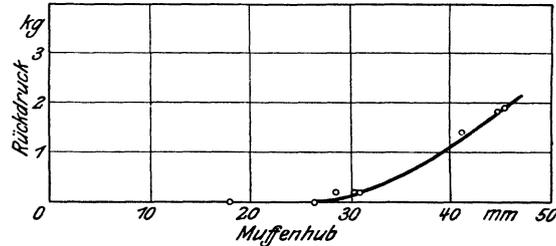


Abb. 24. Aenderung des Rückdruckes der Steuerung mit der Muffenstellung des Reglers. Normale Füllung bei 25 bis 30 mm Hülsenhub.

Bezüglich des Unterschiedes zwischen berechneter und gemessener Verstellkraft, der die auf Beschleunigung oder Verzögerung der Reglermassen sowie zur Ueberwindung des Reibungswiderstandes des Reglers aufgewendeten Muffenkräfte enthält, ist besonders bemerkenswert, daß der Einfluß der Massenwirkung des Reglers den Verlauf der mittleren Verstellkräfte nicht wesentlich beeinflusst.

Der Antrieb der Beschleunigungskräfte läßt sich für eine beobachtete Verstellgeschwindigkeit aus der Gleichung für die Bewegungsgröße $mv = \int p dt$ leicht berechnen.

Bei dem fraglichen Versuch betrug die größte auftretende Verstellgeschwindigkeit 25 mm/sk = 0,025 m/sk. Bei einer Größe der auf die Hülse bezogenen Reglermassen von 150 kg berechnet sich $mv = \frac{150 \cdot 0,025}{9,8} = 0,38$ kgsk. Der Integralwert der berechneten Verstellkräfte für den gleichen Zeitabschnitt berechnet sich dagegen zu 8,0 kgsk. Es folgt daraus, daß der Trägheitswiderstand der Reglermassen von dem Antrieb der Verstellkraft nur ungefähr 5 vH verbraucht, während 95 vH zur Ueberwindung von Reibungs- und Verstellwiderständen aufgezehrt werden. Aus der Abweichung der Kurve der gemessenen Verstellkraft von der berechneten kann außerdem festgestellt werden, daß etwa 40 vH in den Gelenken des Reglers und des Laufgewichthebels und der übrig bleibende Teil von 55 vH im Steuerungsmechanismus verbraucht wird.

Einfluß des Aufnehmers.

Bei der vorliegenden Versuchsmaschine beträgt der Aufnehmerinhalt einschließlich der Dampfübertrittsräume vom Hochdruck- zum Niederdruckzylinder 115 ltr, entsprechend dem 2,74fachen Kolbenhubraum des Hochdruckzylinders bzw. dem 1,22fachen des Niederdruckzylinders.

Es ist in dem Zusammenhang zwischen Füllungsänderung des Hochdruckzylinders und Aufnehmerwirkung begründet, daß der Dampfinhalt des Aufnehmers dem Regler stets entgegenarbeitet, und zwar bei Kondensationsbetrieb stärker als bei Auspuffbetrieb. Sein Einfluß kennzeichnet sich dadurch, daß bei einer Füllungsverkleinerung im Hochdruckzylinder die Gesamtleistung der Maschine weniger rasch abnimmt und bei einer Füllungsvergrößerung im Hochdruckzylinder weniger rasch zunimmt, als wenn der Aufnehmer nicht vorhanden wäre.

Zur Erkennung der Verschiedenheit im Regelvorgang mit und ohne Aufnehmerwirkung möge der vorhergehende Entlastungsversuch, Abb. 23, dienen, indem

die tatsächliche Aenderung der nutzbaren Dampfleistung dieses Versuches mit der Leistungsänderung verglichen wird, die den beobachteten Muffenstellungen im jeweiligen Beharrungszustand entsprechen würde. Von dem Entlastungsversuch unabhängige Beobachtungen über den Zusammenhang zwischen Reglerstellung und nutzbarer Dampfleistung im Beharrungszustand führten auf die beiden Leistungskurven, Abb. 25, deren Unterschied in den unvermeidlichen Abweichungen des Betriebszustandes der Maschine bei verschiedenen Untersuchungen hinsichtlich der Reibungs- und Wärmeverhältnisse begründet ist. Für den vorliegenden Regelversuch wurde die der Versuchsreihe I entsprechende Leistungsänderung benutzt, um die Abweichung festzustellen, welche die nutzbare Dampfleistung während des Regelvorganges durch den Einfluß des Aufnehmers erfährt; dabei ist als wirklich abgegebene nutzbare Dampfleistung die effektive Dynamoleistung einschließlich des jeweiligen Ankerverlustes angenommen.

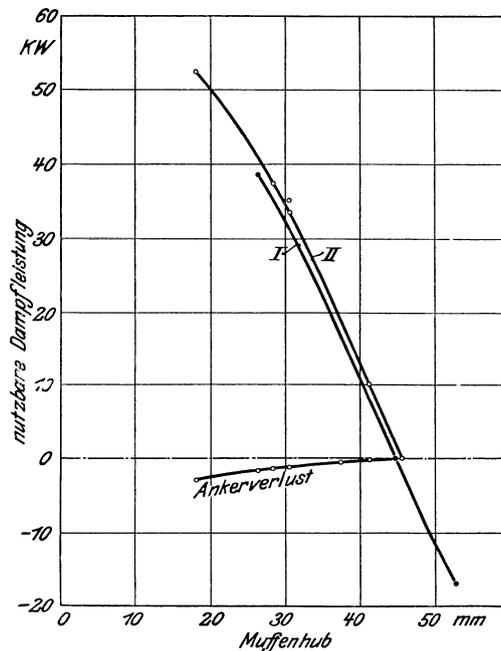


Abb. 25. Zusammenhang zwischen nutzbarer Dampfleistung und Muffenhub.

Bei Eintragung der aus Diagramm Abb. 25 abgeleiteten, den Veränderungen der Muffenstellung entsprechenden Leistungswerte in das Leistungsdiagramm des Regelversuches Abb. 23 ist außerdem berücksichtigt, daß der im Beharrungszustand ermittelte Zusammenhang zwischen Leistung und Hülsenstellung während des Regelvorganges nicht in jedem Augenblick Geltung hat, vielmehr nur die Muffenstellung bei Füllungsschluß eines Hochdruckhubes die Arbeit der expandierenden Dampfmenge festlegt.

Die so aus den Muffenstellungen des Reglers abgeleitete Leistungskurve, verglichen mit der Kurve der wirklichen nutzbaren Dampfleistungen, ergibt Abweichungen, die nur am Anfang des Regelvorganges deutlich in Erscheinung treten und bei den anschließenden Leistungsschwankungen um den Leerlauf überhaupt verschwinden. Diese die Wirkung des Aufnehmers kennzeichnenden Abweichungen lassen den Einfluß des Aufnehmers auf den gesamten Regelvorgang als sehr gering erscheinen. Aus den folgenden Betrachtungen über die Dampfwirkung des Aufnehmers bei Füllungsänderungen im Hochdruckzylinder er-

hellt des weiteren, daß das vorgenannte Ergebnis auch allgemeine Gültigkeit beanspruchen darf.

Einer bestimmten Füllung des HD-Zylinders gehört im Beharrungszustand immer eine bestimmte Dampfspannung im Aufnehmer an, die mit wachsender Füllung zunimmt und umgekehrt abnimmt. Findet ein Uebergang von einer größeren auf eine kleinere Füllung statt, so tritt mehr Dampf aus dem Aufnehmer aus, als von der Hochdruckseite zuströmt, bis sich der der kleineren Füllung entsprechende geringere Aufnehmerdruck eingestellt hat. Der übertretende Dampfüberschuß expandiert zusammen mit der normalen Füllungsdampfmenge im ND-Zylinder und leistet dabei eine Mehrarbeit gegenüber derjenigen Arbeit, die die Füllungsdampfmenge allein im ND-Zylinder geleistet haben würde. Die Mehrarbeit ist im wesentlichen durch die Größe der Entlastung bestimmt und kann unmittelbar aus dem sich ergebenden Unterschied der Aufnehmersdampfmenge vor und nach der Belastungsänderung bestimmt werden.

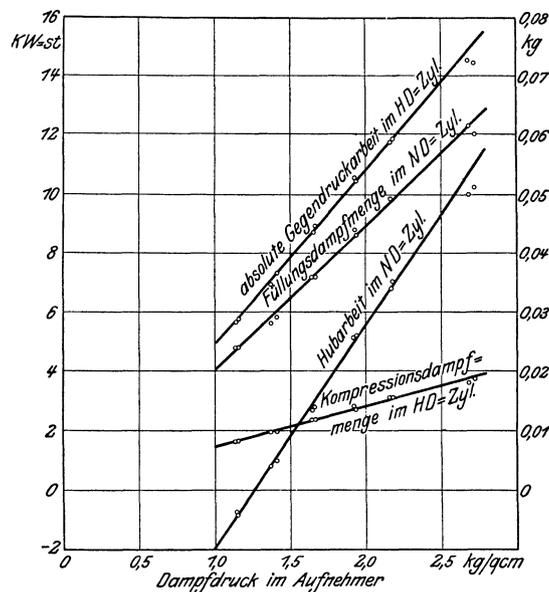


Abb. 26 Abhängigkeit der Gegendruckarbeit im HD-Zylinder und Hubarbeit im ND-Zylinder sowie der Kompressionsdampfmenge im HD- und der Füllungsdampfmenge im ND-Zylinder vom Aufnehmerdruck.

Als Beispiel diene eine Periode abnehmender Belastung. Während die Dampfleistung sinkt, wird im Aufnehmer stets eine höhere Spannung herrschen, als der augenblicklichen Füllung des HD-Zylinders im Beharrungszustand entsprechen würde. Durch die Aufnehmerspannung sind aber unabhängig von der HD-Füllung folgende Größen für einen Kolbenhub bestimmt:

- a) im ND-Zylinder mit gleichbleibender Füllung
 - 1) die Füllungsdampfmenge,
 - 2) die indizierte Hubarbeit,
- b) im HD-Zylinder bei gleichbleibendem Kompressionsgrad
 - 1) die Kompressionsdampfmenge eines Hubes,
 - 2) der Verlauf der Gegendruck- und Kompressionslinie und damit die Größe der Gegendruckarbeit.

Für die Versuchsmaschine wurde die Abhängigkeit dieser Größen von der Aufnehmerspannung durch Indizieren beim Betrieb mit verschiedener HD-Zylinderfüllung

ermittelt. Als Aufnehmerdruck wurde das arithmetische Mittel des Druckes bei Füllungsanfang und -ende aus den ND-Diagrammen bestimmt und die zusammengehörigen Werte beider Zylinderseiten zu einem Mittelwert zusammengezogen.

In Abb. 26 sind die oben erwähnten vom Aufnehmerdruck abhängigen Größen dargestellt; es ergibt sich für sie eine ziemlich genaue lineare Abhängigkeit von der Aufnehmerspannung.

In erster Linie ist aus diesem Diagramm festzustellen, daß die Aenderungen der Gegendruckarbeit am Hochdruckzylinder und der Hubarbeit im ND-Zylinder nur geringe Unterschiede aufweisen und sich infolgedessen zum größten Teile ausgleichen. Es berechnet sich beispielsweise für die Versuchsmaschine bei Verkleinerung der Aufnehmerspannung um 1 kg/qcm die Verminderung der Hubarbeit im ND-Zylinder zu 8 KWsk, die Zunahme der Hubarbeit im HD-Zylinder zu 6,30 KWsk, so daß die Hubarbeit beider Zylinder sich nur um 1,70 KWsk vermindert.

Was den Einfluß der Füllungs-dampfmengen auf die Aufnehmerwirkung angeht, so ergibt die Ueberlegung, daß bei einer Verkleinerung der Hochdruckzylinderfüllung die Aufnehmerspannung zunächst höher bleibt, als der verkleinerten HD-Füllung entsprechen würde; es strömt somit nicht nur eine größere Füllungs-dampfmenge in den ND-Zylinder, sondern es wird auch mehr Dampf im HD-Zylinder zurückkomprimiert als im normalen Betriebszustand der kleineren Füllung. Die Dampfmenge des Aufnehmers vermindert sich also aus zwei Gründen, wodurch ein beschleunigter Uebergang in die Verhältnisse des neuen Beharrungszustandes herbeigeführt wird.

Bezüglich der in Abb. 26 enthaltenen Kurven der Dampfmengen, um welche sich der Kompressionsdampf im HD-Zylinder und der Eintrittsdampf im ND-Zylinder verändert, möge angeführt sein, daß bei einer um 1 kg/qcm kleineren Aufnehmerspannung die dem Aufnehmer für je einen Kolbenhub entnommene Dampfmenge sich vermindert

für die ND-Seite um	0,0246 kg
» » HD- » »	0,0070 »
	insgesamt um 0,0316 kg,

wobei gleichzeitig eine Arbeitsverminderung von +1,70 KWst entsteht. Sind die Aufnehmerdrücke während des Regelvorganges selbst nicht beobachtet worden, so können sie aus der Maschinenleistung zu Anfang und Ende des betreffenden Leistungsüberganges ermittelt werden, wenn, wie in Abb. 27 geschehen, für die Versuchsmaschine der Zusammenhang zwischen nutzbarer Dampfleistung und Aufnehmerdruck aus den Indikator-diagrammen für verschiedene Leistungen vorher festgestellt wird.

Beispielsweise ermitteln sich für den Entlastungsversuch, Abb. 23, die der anfänglichen Leistungsänderung von 39 KW auf -17 KW zugehörigen Aufnehmerdrücke aus Diagramm Abb. 27 zu

$$p_1 = 1,89 \text{ kg/qcm}, \quad p_2 = 0,78 \text{ kg/qcm}.$$

Bei einem Aufnehmerinhalt von 0,115 cbm berechnet sich der Unterschied im Dampfinhalt zu 0,068 kg und der entsprechende Arbeitsüberschuß zu $0,068 \cdot \frac{1,70}{0,0316} = 3,7 \text{ KW-st}$.

Dieser Betrag stimmt mit der aus der graphischen Darstellung des vorliegenden Regelversuches Abb. 23 ermittelten Ueberschußarbeit von etwa 4 KWst befriedigend überein.

Auch für einen Leistungsübergang von Vollast zu Leerlauf, d. i. zwischen 70 und 0 KW, bei dem der Aufnehmereinfluß am größten werden muß, macht der

nutzbare Arbeitsüberschuß für die zugehörige Spannungsänderung des Aufnehmers von 1,65 kg/qcm nur 4,9 KW-st aus, durch deren Aufnahme im Schwungrade nur eine zusätzliche Steigerung der Umlaufzahl um $\frac{1}{2}$ vH entsteht. Da der Aufnehmerinhalt der Versuchsmaschine mit dem 2,74 fachen des Arbeitsraumes des HD-Zylinders verhältnismäßig groß erscheint, so kann durch die vorliegende experimentelle und rechnerische Feststellung allgemein als bestätigt gelten, daß bei Verbundmaschinen der Einfluß des Aufnehmerdampfes auf die Regelung nur von untergeordneter Bedeutung ist.

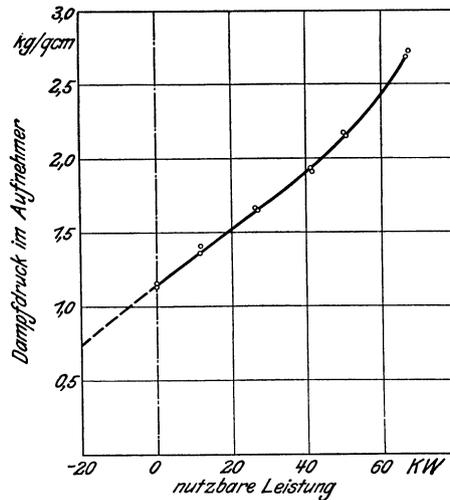


Abb. 27. Abhängigkeit des Aufnehmerdruckes von der Leistung.

Nur bei sehr leichtem Schwungrade kann sich die Aufnehmerwirkung mehr bemerkbar machen. In solchen Fällen ist daher die Regelung nicht durch Verkleinerung des Aufnehmers, sondern durch Vergrößerung der Schwungmassen zu verbessern.

Da aus Vorstehendem geschlossen werden kann, daß bei Dreifach-Expansionsmaschinen der zweite Aufnehmer zwischen Mittel- und Niederdruckzylinder keinen störenderen Einfluß auf den Regelvorgang ausübt als der erste Aufnehmer, so ist die allgemeine Auffassung vom nachteiligen Einfluß des Aufnehmers der Mehrfach-Expansionsmaschinen auf den Regelvorgang dahin richtig zu stellen, daß durch ihn eine wesentliche Veränderung der Geschwindigkeitsschwankungen beim Uebergang auf die neue Belastung nicht entsteht.

Dagegen ist eine merkliche Verschleppung des Regelvorganges bei Mehrfach-Expansionsmaschinen durch den Einfluß der periodischen Dampfzufuhr nachzuweisen, derzufolge die Leistungsänderung nicht in jedem Augenblick der Stellung des Reglers entspricht, da nur die bei Füllungsschluß im HD-Zylinder vorhandene Reglerstellung die Größe der Leistung einer Arbeitsperiode des Dampfes im Hoch- und Niederdruckzylinder bestimmt.

Dieser Verschleppungsvorgang sei daher noch näher verfolgt, und zwar der Einfachheit halber zunächst bei einer Tandemmaschine ohne Aufnehmer. Der aus dem HD-Zylinder austretende Dampf expandiert beim folgenden Kolbenhub unmittelbar im ND-Zylinder weiter, so daß die Arbeitsleistung einer HD Füllung sich also auf zwei aufeinanderfolgende Hübe, d. h. gerade auf eine volle Kurbeldrehung erstreckt. Beträgt die Füllungsdauer etwa 0,1 Umdrehung, so kann die vom Regler ausgeübte Stellerverstellung erst nach 0,4 Umdrehungen wirksam werden,

so daß die Anpassung der veränderten Füllung an die inzwischen eingetretene Belastungsänderung um $0,4 \frac{60}{n}$ sk verschleppt wird. Entsteht diese Verschleppung nach einem plötzlichen Uebergang der Leistung von L_1 auf L_2 KW, so hat das Schwungrad eine Arbeit

$$(L_1 - L_2) 0,4 \frac{n}{60} \text{ KWst}$$

aufzunehmen.

Würde eine solche Tandemaschine von gleichen Abmessungen und der gleichen Umlaufzahl wie die Versuchsmaschine von 70 auf 0 KW entlastet, so würde dieser zusätzliche Arbeitsbetrag durch Verschleppung der Reglerwirkung $76 \cdot 0,4 \frac{60}{110} = 15,2$ KWst ausmachen und eine zusätzliche Schwankung der Umlaufzahl um 1,7 vH zur Folge haben. Diese Werte sind also bereits bedeutend größer, als sich für den Einfluß des Aufnehmers bei der Versuchsmaschine ergeben hat.

Auf Grund der vorliegenden Untersuchung ist zu folgern, daß der Einfluß des Aufnehmers auf den Regelvorgang im allgemeinen praktisch belanglos angenommen werden kann; daß sich dagegen eine merkliche Verschleppung des Ueberganges auf eine neue Belastung durch die mit der periodischen Dampfzufuhr zusammenhängende Verspätung der Reglerwirkung ergeben kann.

Zwar scheint der Umstand, daß sich Tandemaschinen mit meist kleinen Aufnehmern im Durchschnitt leichter regeln lassen als Verbund- und Mehrfach-Expansionsmaschinen mit größeren oder mehrfachen Aufnehmern, gegen die vorstehenden Ausführungen zu sprechen. Hierzu muß aber bemerkt werden, daß die bei Belastungsänderungen auftretenden Geschwindigkeitsschwankungen auch noch von der Größe des Schwungrades im Verhältnis zur Maschinenleistung beeinflußt werden.

Da vielfach das Schwungradgewicht allein von dem Gesichtspunkt aus gewählt wird, die Ungleichförmigkeit der Maschine ein gewisses Maß nicht überschreiten zu lassen, so erhalten Tandemaschinen meist schwerere Schwungräder als Zwei- oder Dreikurbelmaschinen gleicher Leistung.

In letzterem Falle verursachen daher bei leichtem Schwungrad und größeren Belastungsschwankungen die gesamten Abweichungen der wirklichen Leistung von der vom Regler eingestellten empfindliche Störungen des gleichförmigen Ganges; diesem Nachteil kann alsdann nur mit einer Vergrößerung des Schwungradgewichtes begegnet werden, während sich eine Verkleinerung der Aufnehmer als eine an sich unzulängliche Maßregel erweisen müßte.

Einfluß des Ungleichförmigkeitsgrades.

Der Einfluß verschiedenen Ungleichförmigkeitsgrades auf den Regelvorgang wurde zunächst mit demselben Regler dadurch festzustellen gesucht, daß der Regler durch veränderte Uebertragung des Hülsenweges auf die Steuerung auf 4 und 9 vH Ungleichförmigkeitsgrad für den ganzen Hülsenhub eingestellt wurde, womit freilich auch eine Veränderung des Arbeitsvermögens des Reglers für gleiche Stellerverstellung verbunden war. Einige Tachogramme, Abb. 28, der Versuchsmaschine bei Ent- und Belastungen innerhalb der Grenzen 60 und 30 KW geben über die beobachteten Geschwindigkeitsschwankungen Aufschluß.

Zunächst fällt der abweichende Verlauf der Geschwindigkeitswellen des Entlastungs- und Belastungsversuches auf, indem sich im letzteren Fall eine wesentlich größere Wellenlänge als im ersteren einstellte, andererseits aber die Geschwindigkeitsschwankungen weniger lang anhielten. Der Grund hierfür scheint im Verhalten

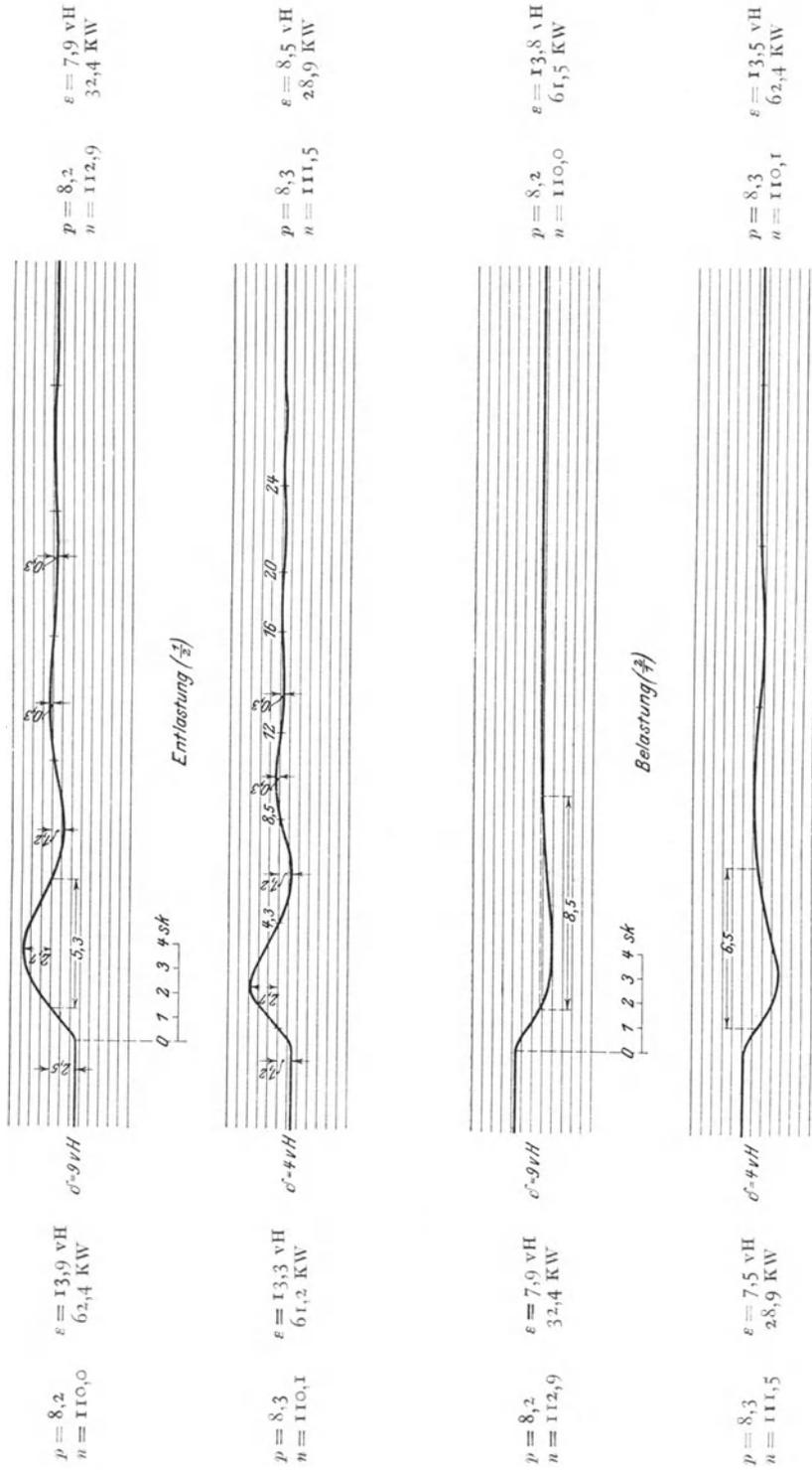


Abb. 28. Einfluß des Ungleichförmigkeitsgrades auf den Regelung bei Be- und Entlastungen im Ladobetrieb.

der Kuchenbecker-Steuerung bei der Verstellung des Kulissensteines zu liegen; hier beeinflußt bei der Entlastung die Rückwirkung der Steuerung den Regler im Sinne der Verstellung, bei der Belastung dagegen entgegengesetzt. Der verschiedene Ungleichförmigkeitsgrad macht sich bei beiden Regelvorgängen in dem Sinne bemerkbar, daß beim kleinen Ungleichförmigkeitsgrad die Geschwindigkeitswellen kleinere Länge als beim großen aufweisen, während die Amplituden übereinstimmen. Diese Erscheinung hängt mit der größeren Leistungsänderung zusammen, welche der Regler bei der geänderten Hebelübertragung für kleinen Ungleichförmigkeitsgrad bei gleichem Hülsenhub verursacht.

Zusammenfassung.

Der Bericht stellt einen Auszug aus noch nicht beendeten Vergleichsversuchen mit Reglern verschiedener Bauart dar und gibt die Regelversuche mit einer von einem Steinle-Hartungschenschen Gewichtsregler beherrschten liegenden Verbundmaschine wieder, die mittels Riemens eine Gleichstromdynamo antreibt. Zweck der Versuche war die Kennzeichnung der tatsächlichen Regelvorgänge in ihrer Abhängigkeit vom Verhalten des Reglers, der Dampfmaschinensteuerung und der Dynamomaschine bei Be- und Entlastung und Bestimmung des Aufnehmereinflusses.



Sonderabdrücke

aus der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure,
die in folgende Fachgebiete eingeordnet sind:

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none">1. Bagger.2. Bergbau (einschl. Förderung und Wasserhaltung).3. Brücken- und Eisenbau (einschl. Behälter).4. Dampfkessel (einschl. Feuerungen, Schornsteine, Vorwärmer, Überhitzer).5. Dampfmaschinen (einschl. Abwärmekraftmaschinen, Lokomobilen).6. Dampfturbinen.7. Eisenbahnbetriebsmittel.8. Eisenbahnen (einschl. Elektrische Bahnen).9. Eisenhüttenwesen (einschl. Gießerei).10. Elektrische Kräfteerzeugung und -verteilung.11. Elektrotechnik (Theorie, Motoren usw.).12. Fabrikanlagen und Werkstatteinrichtungen.13. Faserstoffindustrie.14. Gebläse (einschl. Kompressoren, Ventilatoren). | <ol style="list-style-type: none">15. Gesundheitsingenieurwesen (Heilung, Lüftung, Beleuchtung, Wasserversorgung und Abwässerung).16. Hebezeuge (einschl. Aufzüge).17. Kondensations- und Kühlanlagen.18. Kraftwagen und Kraftboote.19. Lager- und Ladevorrichtungen (einschl. Bagger).20. Luftschiffahrt.21. Maschinenteile.22. Materialkunde.23. Mechanik.24. Metall- und Holzbearbeitung (Werkzeugmaschinen).25. Pumpen (einschl. Feuerspritzen und Strahlapparate).26. Schiffs- und Seewesen.27. Verbrennungskraftmaschinen (einschl. Generatoren).28. Wasserkraftmaschinen.29. Wasserbau (einschl. Eisbrecher).30. Meßgeräte. |
|---|---|

Einzelbestellungen auf diese Sonderabdrücke werden gegen Voreinsendung des in der Zeitschrift als Fußnote zur Überschrift des betr. Aufsatzes bekannt gegebenen Betrages ausgeführt.

Vorausbestellungen auf sämtliche Sonderabdrücke der vom Besteller ausgewählten Fachgebiete können in der Weise geschehen, daß ein Betrag von etwa 5 bis 10 M eingesandt wird, bis zu dessen Erschöpfung die in Frage kommenden Aufsätze regelmäßig geliefert werden.

Zeitschriftenschau.

Vierteljahrsausgabe der in der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure erschienenen Veröffentlichungen 1898 bis 1910.

Preis bei portofreier Lieferung für den Jahrgang
3,— M für Mitglieder. 10,— M für Nichtmitglieder.

Seit Anfang 1911 werden von der Zeitschriftenschau der einzelnen Hefte einseitig bedruckte gummierte Abzüge angefertigt.

Der Jahrgang kostet

2,— M für Mitglieder.

4,— M für Nichtmitglieder.

Portozuschlag für Lieferung nach dem Ausland 50 Pfg für den Jahrgang. Bestellungen, die nur gegen vorherige Einsendung des Betrages ausgeführt werden, sind an die Redaktion der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure, Berlin NW., Charlottenstraße 43 zu richten.

Mitgliederverzeichnis d. Vereines deutscher Ingenieure.

Preis 3,50 M. Das Verzeichnis enthält die Adressen sämtlicher Mitglieder sowie ausführliche Angaben über die Arbeiten des Vereines.

Bezugsquellen.

Zusammengestellt aus dem Anzeigenteil der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure. Das Verzeichnis erscheint zweimal jährlich in einer Auflage von 35 bis 40000 Stück. Es enthält in deutsch, englisch, französisch, italienisch, spanisch und russisch ein alphabetisches und ein nach Fachgruppen geordnetes Adressenverzeichnis. Das Bezugsquellenverzeichnis wird auf Wunsch kostenlos abgegeben.