



UNIVERSITÄTS-
BIBLIOTHEK
PADERBORN

Universitätsbibliothek Paderborn

Beitrag zur Theorie und Berechnung der hydraulischen Regulatoren für Wasserkraftmaschinen

Schmoll von Eisenwerth, Adolph

Berlin, 1904

Einleitung

urn:nbn:de:hbz:466:1-44587

EINLEITUNG.

Die vorliegende Arbeit ist angeregt worden durch den Aufsatz von A. Pfarr: „Der Reguliervorgang bei Turbinen mit indirekt wirkendem Regulator“ (Z. d. V. d. J. 1899). Dort wurde der Reguliervorgang unter Voraussetzung konstanter Schlusszeit entwickelt. Es wurde darauf hingewiesen, dass diese Voraussetzung nicht streng zutrifft, dass vielmehr bei mechanischen Regulatoren eine Abhängigkeit zwischen Schlusszeit und Winkelgeschwindigkeit der Turbine besteht, die aber bei den verhältnismässig kleinen Schwankungen der Winkelgeschwindigkeit vernachlässigt werden darf.

Es soll nun hier untersucht werden, inwiefern Abweichungen von der Voraussetzung konstanter Schlusszeit bei *hydraulischen* Regulatoren sich geltend machen können. Die Untersuchung wird sich auf die hydraulischen Regulatoren im engeren Sinne (hydrostatische Regulatoren) erstrecken, es werden also die sog. Durchflussregulatoren nicht in den Rahmen dieser Betrachtung gezogen.

Ist die Schlusszeit nicht konstant, so wird die zeitliche Aenderung der Turbinenfüllung innerhalb eines Regulierabschnittes („Oeffnen“ oder „Schliessen“) nicht mehr durch eine Gerade, sondern durch eine Kurve, die „Füllungskurve“, veranschaulicht. Wenn diese ermittelt ist, so kann daraus bei gegebenen Schwungmassen und Arbeitsgrössen der Turbine die Aenderung der Umdrehungszahlen während dieses Regulierabschnittes abgeleitet werden. Ebenso ist für eine vorgeschriebene maximale Aenderung der Umdrehungszahlen die Berechnung der erforderlichen Schwungmassen aus der Füllungskurve möglich. Zweckmässig machen wir dabei von der

genügend genauen Voraussetzung Gebrauch, dass die Turbinendrehmomente den Füllungen proportional verlaufen und bei den verhältnismässig geringen Schwankungen der Winkelgeschwindigkeit von dieser unabhängig sind. (Vergl. den oben erwähnten Aufsatz von Pfarr.) Dann kann die Füllungskurve unmittelbar als Darstellung des zeitlichen Verlaufes der Turbinendrehmomente benützt werden. Die Belastungsänderung vollziehe sich plötzlich und das widerstehende Moment der Arbeitsmaschinen und dergl. bleibe vom Augenblick der erfolgten Belastungsänderung an unveränderlich. Die graphische Dar-

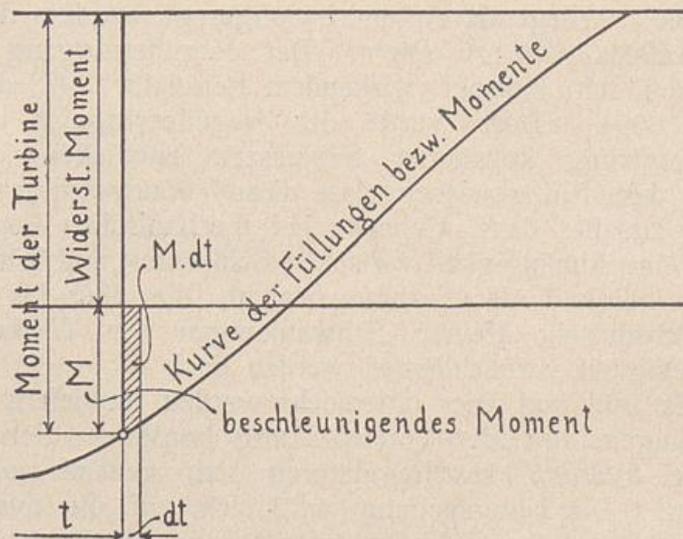


Fig. 1.

stellung des widerstehenden Momentes ist dann eine Parallele zur Zeitachse. Die beschleunigenden bzw. verzögernden Momente M werden durch die Unterschiede zwischen der Geraden des widerstehenden Momentes und der Füllungs- bzw. Momenten - Kurve dargestellt. (s. Fig. 1.)

Aus der bekannten Beziehung zwischen Winkelbeschleunigung ω , Moment M und Trägheitsmoment der Schwungmassen J ,

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{M}{J}; \quad \omega = \frac{1}{J} \int M \cdot dt,$$

folgt, dass der zeitliche Verlauf der Winkelgeschwindig-

keiten ω (oder auch der diesen proportionalen Umdrehungszahlen n) der Turbine durch die Integralkurve der zeitlich dargestellten Momente M gegeben ist. Durch graphische oder mechanische Integration der Füllungs-differenzen ist es daher auch bei verwickelter Form der Beziehung zwischen Füllung und Zeit stets möglich, die Kurve der Umdrehungszahlen und insbesondere deren Höchstwerte aus der Füllungskurve abzuleiten.

Die Füllungskurven nun ergeben sich aus den Kolbenwegdiagrammen des Servomotors, sobald der Zusammenhang zwischen den Kolbenstellungen und den Turbinenfüllungen bekannt ist.

Wir setzen vorläufig voraus, dass

1. die Turbinenfüllungen den Kolbenwegen des Servomotors proportional sind,
2. die Steuerbewegung so rasch erfolgt, dass die Steuerquerschnitte des Servomotors praktisch als plötzlich voll eröffnet angesehen werden können.

Dann können noch folgende Umstände eine veränderliche Geschwindigkeit der Füllungsänderung bedingen:

I. Die zu bewegenden Massen des Reguliergetriebes und namentlich auch die Druckflüssigkeit des Servomotors selbst müssen bei jedem Kolbenhub beschleunigt werden.

Bleiben die Verstellwiderstände des Leitapparates während des Kolbenhubes unveränderlich, so wird die Kolbenbewegung offenbar nur allmählich in eine gleichförmige übergehen können. Daher ist streng genommen eine gleichförmige Füllungsänderung nur bei unendlich kleinen Massen möglich. Je grösser diese Massen im Verhältnis zu den beschleunigenden Kräften sind, um so grösser wird die Abweichung der richtigen Füllungskurve von der „ideellen“ Füllungslinie (für massenlos gedachten Servomotor) sein.

In vielen Fällen wird freilich die Annäherung der Kolbengeschwindigkeit des Servomotors an den Beharrungszustand rasch genug erfolgen, dass von einem gewissen Punkte ab die Füllungskurve näherungsweise als geradlinig angesehen werden darf. Diese annähernd gerade Füllungslinie liegt aber zeitlich verschoben gegen den Bewegungsanfang, während die „ideelle“ Füllungslinie im Anfangspunkt der Bewegung beginnt. An sich scheint diese Verschleppung der Füllungsänderung geringfügig, da es sich meist nur um Bruchteile von

Sekunden handelt. Trotzdem kann hierdurch der Reguliervorgang wesentlich ungünstiger ausfallen, als nach der „ideellen“ Füllungsänderung zu erwarten wäre. Namentlich würde man die Wirkung einer kurzen (ideellen) Schlusszeit sehr überschätzen, wenn man den Einfluss etwa vorhandener grösserer Massen des Servomotors auf den Bewegungsvorgang ausser acht liesse.

Bei nicht zu kleinen Belastungsänderungen erhält man meist genügend genaue Werte für die grössten Schwankungen der Umdrehungszahlen, wenn man den Berechnungen die Asymptote der Füllungskurve statt dieser selbst zugrunde legt. Die zeitliche Verschiebung der Asymptote gegen den Anfangspunkt der Bewegung des Servomotors hat bei diesem Verfahren etwa die Bedeutung einer „Spielraumzeit“ (s. d. oben genannten Aufsatz von *A. Pfarr*). Zu ihrer Ermittlung ist die Kenntnis des tatsächlichen Bewegungsvorganges erforderlich, wenn man sich nicht auf ganz unsichere Schätzung einlassen will.

II. Ausser diesem Beschleunigungsvorgange treten beträchtliche Aenderungen der Treibkolbengeschwindigkeiten dann auf, wenn der Verstellungswiderstand des Leitapparates sich je nach der eingestellten Füllung ändert, wie dies z. B. bei *Fink* schen Drehschaufeln meist der Fall ist.

Die hierdurch bedingte Aenderung in der Kolbengeschwindigkeit wird sich namentlich bei grösseren Belastungsänderungen bemerklich machen, da hierbei ausgedehntere Füllungsbereiche mit grösseren Verschiedenheiten der Verstellungswiderstände durchlaufen werden. Bei grösseren Belastungsänderungen und bei stark veränderlichem Verstellungswiderstande wird man daher, auch abgesehen von dem unter I) besprochenen Beschleunigungsvorgang, keine gerade Füllungslinie voraussetzen dürfen.

Bei kleineren Füllungsänderungen und geringer Massenwirkung wird man zwar die Schlusszeit für die betreffende Aenderung als konstant ansehen dürfen, aber ihre Grösse nach der in Betracht kommenden mittleren Füllung bzw. Verstellkraft berechnen.

In den Erörterungen unter I. und II. war zunächst angenommen, dass die Turbinenfüllungen den Kolbenwegen des Servomotors proportional sind. In vielen

Fällen, auch bei zweckmässigen Reguliervorrichtungen, z. B. häufig bei *Fink* schen Drehschaukeln, ändert sich aber das Verhältnis zwischen Füllungsänderung und Kolbenweg beträchtlich. In solchen Fällen sind die Füllungskurven unter Berücksichtigung des Zusammenhanges zwischen Füllung und Kolbenstellung aus den Kolbenwegdiagrammen abzuleiten. Auch wenn das Kolbenwegdiagramm als eine gerade Linie aufgefasst werden darf (bei kleinen Massen des Servomotors usw. und bei konstantem Verstellungswiderstande) wird man bei stark sich änderndem Verhältnis zwischen Füllungsänderung und Kolbenweg keine geraden Füllungslinien den Berechnungen der Umdrehungszahlen für grössere Füllungsänderungen zugrunde legen dürfen. — Es besteht dann im allgemeinen auch nicht mehr Uebereinstimmung im Verlauf der sog. Tachometerbahn und der Füllungskurve. Die gezwungene Bewegung der Tachometerhülse wird nämlich gewöhnlich unmittelbar von der Kolbenbewegung abgeleitet, derart, dass Proportionalität zwischen Kolbenweg und Hülsenweg besteht. Sind nun die Füllungen den Kolbenwegen nicht proportional, so auch nicht die Tachometerhülsenwege den Füllungen. (Dieselbe Erscheinung tritt natürlich auch bei mechanischen Regulatoren ein, wenn die Hülsenbewegung in proportionale Abhängigkeit von der Winkelgeschwindigkeit der Turbine gebracht ist, dagegen keine Proportionalität zwischen Winkelgeschwindigkeit und Füllungsänderung besteht.) Während die Füllungskurve für die Ermittlung des zeitlichen Verlaufes der Umdrehungszahlen innerhalb eines Regulierabschnittes maassgebend ist, lässt sich mit Hilfe der Tachometerbahn der Eintritt eines neuen Abschnittes (Augenblick der Umsteuerung usw.) bestimmen.

Es war ferner unter 2., Seite 3, die Voraussetzung gemacht, dass die Steuerbewegung plötzlich erfolge. Dies trifft für die normalen Steuerungen genau genug zu, wenn grössere Belastungsänderungen in Frage stehen und wenn die Schwungmassen an der Turbinenwelle usw. nicht zu gross sind. Bei verhältnismässig langsamer Steuerbewegung beeinflusst auch der zeitliche Verlauf der Querschnittsänderung der Steuerkanäle die Bewegung des Servomotorkolbens. Die Untersuchung dieses Falles lässt sich annäherungsweise auf den Fall plötzlicher Eröffnung zurückführen, indem man die stetige

Querschnittsänderung durch stufenweise plötzliche Aenderungen ersetzt.

In jedem Falle ist die Form des Kolbenwegdiagrammes für den Verlauf des Reguliervorganges von Bedeutung. Wir stellen uns daher zunächst allgemein die Aufgabe, die Beziehung zwischen den vom Kolben des Servomotors zurückgelegten Wegen und den dazu erforderlichen Zeiten zu ermitteln.

Zu diesem Zwecke werden wir die dynamische Gleichgewichtsbedingung für die bei der Kolbenbewegung wirkenden Kräfte aufstellen. Aus dieser Bedingung wird sich infolge des Zusammenhanges der Kräfte mit den Grössen: Kolben-Weg, -Geschwindigkeit und -Beschleunigung die gesuchte Beziehung zwischen Weg und Zeit ergeben.

Während die dynamische Gleichgewichtsbedingung gleich den allgemeineren Fall der veränderlichen Verstellkräfte umfassen mag, erscheint es zweckmässig, bei der Auflösung der Bewegungsgleichung zuerst den einfacheren Fall (unveränderliche Verstellkräfte während eines Kolbenhubes) zu behandeln. An die Lösung soll eine Erörterung der Verhältnisse geknüpft werden, die das Auftreten von nachteiliger Massenwirkung bei der Kolbenbewegung bedingen bzw. verhindern. Das Verfahren zur Ermittlung der Füllungskurve mit Berücksichtigung der Massenwirkung wird an einem Zahlenbeispiel erläutert werden, ebenso die Verwendung des Resultates und seiner zweckmässigen Vereinfachung zur weiteren Untersuchung des Reguliervorganges. In ähnlicher Weise wird dann der Fall der veränderlichen Verstellkraft behandelt.