

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

Zur Kritik der Turbinen-Regulatoren

Kröner, Hermann

1910

Die Isodrom-Regulatoren

[urn:nbn:de:bsz:31-282609](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-282609)

$$\varphi_{\max} = 0,067 \cdot 0,04 \cdot 100 = 0,268 \%$$

ein Betrag der füglich vernachlässigt werden kann.

Der Regulator wird schon nach der ersten Schwingung zur Ruhe kommen, denn die nächste Amplitude beträgt nur noch $\frac{1}{e^{2\pi}}$ von der ersten, praktisch genommen tritt für den Wert $\delta \tau_a = 2$ eine aperiodische Regulierung ein. Diesen Zustand kann man erzwingen, wenn man einen Ungleichförmigkeitsgrad einstellt von der Grösse

$$\delta = \frac{2}{\tau_a} = \frac{2 T_s}{T_a}$$

Indes ist zu beachten, dass die grösste auftretende Geschwindigkeitsschwankung der Grösse δ proportional ist und dass die bleibende Touren Differenz zwischen den verschiedenen Belastungsgraden mit δ zunimmt. Im übrigen nähert man sich dem Zustand, der durch die Beziehung $\delta \tau_a = 2$ gekennzeichnet ist, durch Vergrösserung von T_a also durch Anwendung grosser Schwungmassen und durch Verkleinerung von T_s also durch Anwendung rasch arbeitender Servomotoren. Beide Mittel bedeuten eine Verteuerung der Anlage.

Die Bestimmung der grössten vorkommenden Geschwindigkeitsschwankung lässt sich allgemein für beliebige Werte von $\delta \tau_a$ mit Buchstabenrechnung nicht durchführen. Es muss jeweils über die Grösse δ eine Annahme gemacht werden. Die Rechnung jedoch ist ganz einfach.*)

Die Isodrom-Regulatoren.

Wenn auch der ideale indirekte Regulator dem idealen direkten in der Weise nachsteht, dass der letztere stets aperiodisch reguliert, der erstere nur unter einer bestimmten Voraussetzung ($\delta \tau_a \geq 4$), so lassen sich immerhin mit dem indirekten Regulator, namentlich durch Verkleinerung der Schlusszeit des Servomotors auch mit mässiger Schwungmasse vollauf zufriedenstellende Ergebnisse erzielen. Indes haftet beiden Arten der Regulierung gemeinsam der grosse Nachteil an, dass eine bleibende Touren Differenz besteht zwischen den verschiedenen Graden der Maschinenbelastung im Beharrungszustand. Aus diesem Grund kann man auch nicht von einer vollkommenen Regulierung sprechen im Sinne einer absolut gleichbleibenden Maschinengeschwindigkeit. Dieser entschiedene Uebelstand tritt in manchen

*) In Bauersfeld „Die automatische Regulierung der Turbinen“ S. 67 ist ein Verfahren angegeben, zur raschen Bestimmung dieser Grösse, dort ist auch ein Zahlenbeispiel durchgerechnet.

Betrieben sehr störend auf und natürlich umso stärker, je grösser die bleibende Touren Differenz ist. Nun kann man ja diese Touren Differenz wohl beliebig klein machen, man hat aber gleichzeitig eine Abnahme der Stabilität und eine Zunahme der Regulierdauer in Kauf zu nehmen.

Es ist jedoch hier noch ein weiterer besonders wichtiger Umstand zu beachten.

Der vorsichtige Konstrukteur hat auch daran zu denken, wie er bei einer schon ausgeführten Anlage ($T_a = \text{konst.}$) ohne Aufwand von Geld und viel Zeit die Regulierung auf den für den betreffenden Betrieb möglichst günstigsten Zustand einstellen kann.

Hierzu stehen nun zwei Wege offen:

1. Erhöhung der Schlussgeschwindigkeit des Servomotorkolbens also Verkleinerung von T_s durch Erhöhung des Betriebsdrucks im Windkessel der Pumpe.*)

2. Vergrößerung des Ungleichförmigkeitsgrades des Tachometers.

Eine Erhöhung des Betriebsdruckes im Windkessel wird einfach dadurch erreicht, dass man das sog. Ueberströmventil an der Pumpe auf einen höheren Druck einstellt. Dieses Ventil hat die Aufgabe, die während der Ruhepausen der Regulierung geförderte übrige Pressflüssigkeit wieder in den Sammelbehälter gelangen zu lassen.

Allein, einerseits ist dieses Hilfsmittel nicht besonders wirksam, indem die Geschwindigkeit mit der Wurzel aus dem Ueberdruck wächst, andererseits droht durch die Erhöhung des Drucks eine nicht zu unterschätzende Gefahr für die Sicherheit des Betriebs. Mit der Erhöhung des Drucks steigt nämlich die Anstrengung des Materials, vermindert sich aber hauptsächlich die Zuverlässigkeit der Dichtungen. Ändert sich aber der Luftinhalt des Windkessels durch Entweichen von Luft, so ist nach ganz wenigen Regulierspielen die Güte der Regulierung ganz gewaltig erniedrigt. Für normale Verhältnisse kann man annehmen, dass der Regulator in der Minute nicht mehr als 3—5 vollständige Zylindervolumina an Pressflüssigkeit braucht, die Pumpe soll

*) Es ist hier zu bemerken, dass man neuerdings davon Abstand genommen hat, bei Anlagen mit hohem Gefälle dieses letztere selbst als Betriebsdruck für die Servomotoren auszunützen und zwar aus dem Grunde, weil Wasser als Pressflüssigkeit bei den hohen Geschwindigkeiten, welche im Krafteinschalter auftreten und bei der Kompliziertheit der Schaltgänge desselben, die steuernden Kanten sehr bald ausfrisst und zu unliebsamen Betriebsstörungen Veranlassung gibt und dies trotz Anwendung von Reinigungsmitteln. Zudem hat man in der Kapselpumpe, welche für die hier gewöhnlich in Betracht kommenden Lieferungen noch ziemlich klein ausfällt, ein Regulatordetail gefunden, das mit samt dem zugehörigen Windkessel und Oelbehälter eine Filteranlage bezüglich der Kosten unterbietet. Als Flüssigkeit wird allgemein Oel verwendet.

indes stets etwas mehr liefern, also 6—10 Volumina.*) Ist nun bei einer ausgeführten Anlage die Pumpe z. B. für 6 Zylindervolumina pro Minute gebaut und hat der Regulator bei normalem Windinhalt eine Schlusszeit von $T_s = 1$ Sekunde, so wird dieselbe wenn alle Luft aus dem Windkessel entwichen ist, auf $T_s = 10$ Sekunden erhöht, da dann die Dimension der Pumpe die Schlusszeit bestimmt.

Infolge dieser Gefahr ergibt sich eine durch praktische Versuche gegebene obere Grenze für den Betriebsdruck der Pumpen, die man nicht überschreiten soll, und man wird nur in den äussersten Notfällen zu diesem Hilfsmittel greifen.

Eine Erhöhung der Ungleichförmigkeit des Tachometers ist dagegen vollständig gefahrlos für den Betrieb, und dieser Weg ist schliesslich für eine fertige Anlage der einzige, wenn es sich darum handelt, eine möglichst schwingungsfreie Regulierung zu erhalten. Wenn es nun noch vorkommt, dass die Schwungmassengrösse in der Ausführung kleiner ausfällt, als der Berechnung der Anlage zu Grunde liegt, so ist man vollends genötigt, sehr hohe Werte der Ungleichförmigkeit des Tachometers einzustellen, um eine genügende Stabilität der Regulierung zu erzielen.

Für Anlagen, die eine grosse bleibende Touren Differenz zwischen den verschiedenen Belastungsgraden der Maschine nicht vertragen, ist es alsdann nötig, dass der Maschinenwärter bei jeder grösseren Belastungsänderung durch einen Eingriff in die Regulierung die alte Tourenzahl wieder herstellt. Dieser Eingriff ist nämlich möglich, sobald man irgend einen Punkt der Rückführung relativ zum Rückführungsgestänge beweglich anordnet. Durch diese Erweiterung der Rückführung hat man es in der Hand, bei jeder Belastung die Tourenzahl innerhalb den Grenzen von 0 bis n_{max} des Tachometers beliebig einzustellen. Dieselbe Vorrichtung kann auch zum Anlassen und Abstellen der Maschine benützt werden.

Die Rückführstange CG (s. Fig. 1) trägt an ihrem oberen Ende Gewinde, in welchem eine zum Handrad ausgebildete Mutter relativ zur Stange bewegt werden kann. An dieser Mutter ist im Punkt C der Regulatorhebel MC derart angebracht, dass er durch dieselbe auf- und abbewegt wird, jedoch eine Drehung des Handrades zulässt. Ist die Maschine voll belastet und im Beharrungszustand, so steht der Punkt C in seiner obersten Grenzlage, und die Tourenzahl ist diejenige, entsprechend der unteren Hubbegrenzung der Tachometerhülse, also die niederste.

Der Beharrungszustand ist nur möglich, wenn der Krafteinschalter in seiner Mittellage sich befindet. Wollen wir also die Maschine mit

*) Siehe Thomann: „Die Wasserturbinen“, S. 300 u. f.

dieser Vollbelastung auf eine Tourenzahl bringen, welche der Mittellage der Hülse zwischen den beiden Hubbegrenzungen entspricht, so müssen wir die Lage des Hebels *MC* solange ändern, bis er — sich drehend um den fest zu denkenden Drehpunkt *D* — in die horizontale Lage kommt. Zu dem Zweck schrauben wir zunächst den Punkt *C* mittelst des Handrades nach abwärts. Bei dieser Bewegung ist im ersten Moment die Tachometerhülse als Stützpunkt zu betrachten und der Krafteinschalter wird durch diese Bewegung gesenkt, d. h. in einem derartigen Sinn aus seiner Deckstellung verschoben, dass eine Öffnungsbewegung des Servomotors eintreten muss. Die nächste Folge ist nun eine Erhöhung der zugeführten Arbeit, eine Erhöhung der Maschinengeschwindigkeit, ein Steigen der Tachometerhülse. Dieser letztere Vorgang bewirkt nun das Zurückschieben des Krafteinschalters in seine Deckstellung. Bei dem hierauf folgenden Stillstand des Servomotorkolbens ist es erreicht, dass die Tachometerhülse von ihrer untersten Hubbegrenzung etwas abgerückt ist, d. h. dass die Maschine bei der gleich gebliebenen Belastung mit einer etwas höheren Tourenzahl läuft; gleichzeitig hat sich der Regulatorhebel *MC* etwas gedreht und zwar im Sinne einer Annäherung an die horizontale Lage. Führt man mit dem Abwärtsschrauben des Punktes *C* solange fort, bis der Regulatorhebel vollständig horizontal ist, so ist auch die Tourenzahl der Maschine gleich der mittleren des Tachometers und der Zweck ist erreicht. Wenn wir uns den Vorgang auch noch rein dynamisch erklären wollen, so hat einfach der Servomotorkolben eine um einen kleinen Betrag grössere Füllung der Maschine eingestellt, und das ist auch ganz natürlich; denn: soll dieselbe Arbeit bei höherer Tourenzahl geleistet werden, so ist einfach ein Mehraufwand von zugeführter Energie notwendig.

Aus der Beschreibung dieses Vorgangs erhellt nun sofort die Verwendung dieses Handrads als Abstell- und Ablassvorrichtung und es ist leicht einzusehen, dass um die Turbine vollständig abzustellen, das Handrad solange nach oben geschraubt werden muss, bis der Servomotor geschlossen hat und umgekehrt. So einfach und leicht bedienlich nun dieser Notbehelf ist, so ist er doch nur ausreichend, wenn Belastungsänderungen sehr selten vorkommen, oder wenn der Wärter infolge Kenntnis der Eigenart des Betriebs auf Belastungsänderungen vorbereitet ist.

Indes birgt dieser Eingriff in die Regulierung eine bedeutende Gefahr in sich.

Wir nehmen an, die vollbelastete Maschine, die der Wärter eben auf die mittlere Tourenzahl gebracht hat, werde plötzlich, vielleicht durch einen Kurzschluss, vollständig entlastet. Die Schwungmassen

beschleunigen sich, es tritt eine Erhöhung der Tourenzahl ein, die Tachometerhülse steigt an und leitet die Schlussbewegung des Servomotors ein. Die Hülse steht in der Mitte ihres Hubes, sie kann nach oben nur einen Weg gleich der Hälfte des Hubes zurücklegen. Da man nun bekanntlich die der neuen Beharrungsstellung entsprechende Lage des Regulatorhebels *MC* dadurch erhält, dass man sich denselben als um den fest zu denkenden Punkt *D* schwingend denkt, so kann jetzt der Punkt *C* ebenfalls nur die Hälfte seines Hubes zurücklegen, um die neue Ruhestellung aufzusuchen. Der Krafteinschalter schliesst bei der Füllung $\frac{1}{2}$ ab und der Regulator bleibt bei dieser Füllung in Ruhe. Das ganze Drehmoment entsprechend der halben Füllung wirkt auf Beschleunigung der Massen, die Maschine geht durch.

Dieser Uebelstand ist hervorgerufen durch die Verkürzung der Rückführstange *CG* infolge Herabschraubens des Punktes *C* relativ zum Gestänge und kann erst dadurch wieder behoben werden, dass die ursprüngliche Länge wieder hergestellt wird.

Wollen wir eine schwach belastete Maschine mit einer kleineren Tourenzahl laufen lassen, als die eindeutige Zuordnung für diese Belastung bestimmt, so müssen wir durch Aufwärtsschrauben des Punktes *C* eine Verlängerung der Rückführstange *CG* hervorrufen. Ist dies geschehen, so ergibt sich bei einer darauffolgenden Vollbelastung der Maschine der Uebelstand, dass der Servomotorkolben gar nicht in seine dementsprechende Endlage gelangen kann; die Maschine kann die Vollbelastung nicht aufnehmen, bevor nicht die ursprüngliche Länge der Rückführstange eingestellt ist.

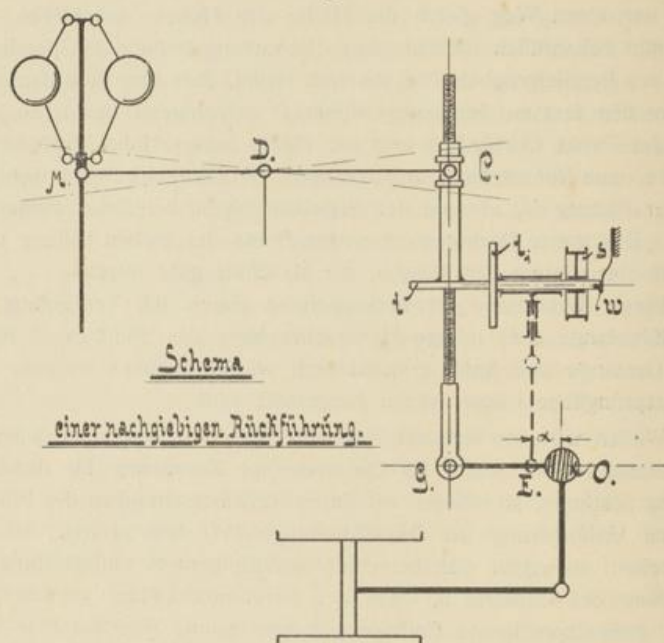
Dieser Zustand ist natürlich für Betriebe mit rasch aufeinanderfolgenden Belastungsänderungen unhaltbar.

Es ist indes die Wirkung der Verlängerung und Verkürzung der Rückführstange im Auge zu behalten, und es kann der Gedanke nicht mehr fern liegen, nach einer Vorrichtung zu suchen, welche dieses Geschäft automatisch besorgt. Eine derartige Vorrichtung eröffnet aber eine ganz erfreuliche Perspektive, indem sich sofort der weitere Gedanke ganz von selbst aufdrängt: ein stark statisches Tachometer in Anwendung zu bringen, da ja eine bleibende Tourendifferenz nicht mehr auftritt.

Diese Ueberlegungen haben denn auch zur Lösung des Problems geführt, nämlich zur Anwendung der sog. nachgiebigen Rückführung. Dieselbe erfüllt tatsächlich den Zweck, den grossen schwingungsdämpfenden Einfluss eines grossen, in die Regulierung eingestellten Ungleichförmigkeitsgrades auszunutzen unter gleichzeitiger automatischer Ausschaltung der grossen bleibenden Tourendifferenz, wie sie bei starrer Anordnung der Rückführung auftreten würde.

Die Anordnung einer solchen Rückführung ist in Fig. 5 schematisch angedeutet.

Fig. 5.



Die Rückführungsstange GC trägt in ihrem oberen Teil Gewinde, auf welchem eine mit Muttergewinde versehene und unten zu einem Teller t ausgebildete Hülse drehbar angeordnet ist. Der Regulatorhebel MDC ist bei C derart mit der Tellerhülse verbunden, dass er von dieser wohl auf- und abbewegt werden, aber eine Drehbewegung derselben um die Stange GC nicht hindern kann. Gegen diesen Teller t ist nun ständig mittelst einer Feder ein zweites Teller t , leicht angedrückt, das durch die Welle w und die Riemenscheibe s ständig eine von der Maschine selbst herrührende gleichmässige Rotationsgeschwindigkeit erhält. Befindet sich die Maschine im Beharrungszustand, so berührt der Teller t den Teller t , im Mittelpunkt, der Berührungspunkt hat den Radius O ; sodass von t , keinerlei Bewegung auf t übertragen werden kann. Tritt dagegen bei der Regulierbewegung ein Steigen oder Fallen der Stange GC ein, so hat der Berührungspunkt einen von O verschiedenen Radius, es wird die Rotationsbewegung des Tellers t , auf den Teller t übertragen und damit eine Verschiebung des Punktes C relativ zur Stange bewerkstelligt. Der Sinn dieser Relativbewegung ist nun derart gewählt, dass diejenige Bewegung, welche Punkt C von dem

Teller t , erhält, nun gerade entgegengesetzt gerichtet ist derjenigen, welche er von dem Servomotor erhält.

Tritt z. B. eine Entlastung ein, so bewegt der Servomotor zunächst den Punkt C nach unten, alsbald tritt aber der Teller t in Tätigkeit und schraubt den Punkt C wieder nach oben und zwar so lange, bis die Berührung der beiden Teller wieder in dem Mittelpunkt von t , stattfindet. Da der Teller t , keinerlei Verschiebung erleidet, so tritt offenbar immer nur dann Ruhe, d. h. Beharrungszustand ein, wenn Punkt C seine ursprüngliche Lage wieder erreicht hat. Da nun andererseits im Beharrungszustand der Krafteinschalter in der Mittellage sich befinden muss, so ist für diese Anordnung der Rückführung Beharrungszustand nur für eine einzige Stellung der Tachometerhülse möglich, d. h. die Maschinengeschwindigkeit ist für alle Belastungsfälle dieselbe, eine bleibende Tourendifferenz ist ausgeschaltet.

Die ganze Aenderung durch diese nachgiebige Anordnung der Rückführung gegenüber der starren, liegt also darin, dass der eindeutige Zusammenhang der letzteren zwischen Tachometer und Servomotor-kolben aufgegeben und so umgestaltet ist, dass sämtlichen Stellungen des Servomotors eine und nur eine einzige Stellung der Hülse im Beharrungszustand entspricht.

Das Bedenkliche, das bei oberflächlicher Betrachtung dieser Aenderung anhaftet, schwindet sofort, wenn man sich vor Augen hält, dass der Regulator anfänglich wie ein solcher mit starrer Rückführung arbeitet und dass erst später im Laufe des Reguliervorganges andere Faktoren zur Geltung kommen, welche die Regulierung in dem eben besprochenen Sinn beeinflussen.

Selbstverständlich wird man als Gleichgewichtsgeschwindigkeit des Regulators die günstigste Tourenzahl der Turbine wählen.

Diese Art der Regulatoren hat Ing. Prof. A. Budau*) „Isodrom-regulatoren“ geheissen und die Aenderung der Rückführung „Isodrom-vorrichtung“. Wir wollen diese Bezeichnung beibehalten.

Es fragt sich nun, welchen Einfluss hat eine derartige Vorrichtung auf den Reguliervorgang selbst. Bezüglich der Regulierdauer besteht ein Unterschied zwischen diesen Regulatoren und denen mit starrer Rückführung.

Lassen wir nämlich die Welle w der Isodromvorrichtung immer rascher laufen, so wird die Wirkung der Rückführung immer mehr ausgeschaltet, ist die Winkelgeschwindigkeit der Welle w unendlich gross, so haben wir keine Rückführung mehr, die Tachometerhülse

*) „Elektrotechnik und Maschinenbau“ Zeitschrift des Elektrotechnischen Vereins Wien. 1908. Heft 1 und 2.

muss sich wieder ganz in ihre Anfangsstellung gesenkt haben bis Ruhe des Servomotors eintritt, die Schwingungen erhalten sich mit gleichbleibender Amplitude, der Regulator ist labil. Je rascher also die Welle w der Isodromvorrichtung sich bewegt, desto länger erhalten sich die Schwingungen. Lassen wir nun die Welle w langsamer und langsamer laufen, so wird die Regulierdauer immer kleiner, der Regulator immer besser; wird die Geschwindigkeit der Welle w zu 0, so haben wir den Regulator mit starrer Rückführung. Die Isodromvorrichtung bedeutet also zunächst gegen die starre Rückführung eine Verschlechterung, insofern sie unter sonst gleichen Verhältnissen eine Verlängerung der Regulierdauer bewirkt.

Im Uebrigen erzielen wir genau wie beim Regulator mit starrer Rückführung eine um so bessere Regulierung, je kleiner T_s und je grösser T_a . Auch durch Vergrösserung von δ wird die Stabilität erhöht. Während man aber beim Regulator mit starrer Rückführung mit der Einschaltung eines grossen Ungleichförmigkeitsgrades auch eine grosse bleibende Tourendifferenz mit in Kauf nehmen musste, hat man beim Isodromregulator nach dieser Seite nichts zu befürchten. Es fragt sich nur, ob nicht die grösste auftretende Geschwindigkeitsschwankung durch eine grosse Ungleichförmigkeit ungünstig beeinflusst wird.

Der hydraulische Isodrom-Regulator mit idealem Tachometer ($T_r = 0$; $T_K = 0$) unter besonderer Berücksichtigung der aperiodischen Regulierung.

Unter der Voraussetzung der Verwendung eines idealen Tachometers ($T_r = 0$; $T_K = 0$) ergibt sich die Aufstellung der Bewegungsgleichungen wie folgt:

Um die Hebelübersetzungen aus der Rechnung auszuschalten, nehmen wir wieder an, der Punkt G bewege sich mit derselben Geschwindigkeit wie der Servomotorkolben. Die absolute Bewegung des Rückführpunktes C setzt sich demgemäss zusammen aus der absoluten Bewegung des Punktes G nämlich: $\frac{dm}{dt}$ und der relativen der Tellerhülse t , welche mit $\frac{dn}{dt}$ bezeichnet werde. Bezeichnet ferner z den Ausschlag des Punktes C von der Mittellage, zugleich Null-Lage, aus nach oben oder unten gemessen, so ergibt sich die Gleichung:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{dm}{dt} - \frac{dn}{dt}$$

Die relative Geschwindigkeit $\frac{dn}{dt}$ des Punktes C hängt nur ab von der konstant zu denkenden Rotationsgeschwindigkeit der Welle w und von der Grösse des Berührungsradius r der beiden Teller.