

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 74 (1956)
Heft: 40: Sonderheft zum Zweiten Kongress der FEANI, Zürich, 11.-14. Oktober 1956

Artikel: Physikalische Erklärung der Regelvorgänge
Autor: Stein, T.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-62712>

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 02.04.2026

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

aus einer ernsthaften und grundlegenden Auseinandersetzung mit dem Wesen und dem Sinn technischen Schaffens. Und da sind es wiederum vor allem die nationalen Vereinigungen, in denen eine solche Auseinandersetzung gepflegt werden kann und von denen auch die Anregungen für eine Pflege auf breiterer Grundlage ausgehen müssen.

3. Die Anfangsworte unserer Bundesverfassung lauten: Im Namen Gottes des Allmächtigen. Mögen diese Worte über allem stehen, was immer die Europäische Vereinigung der Ingenieure tut!

Ad. Ostertag

Physikalische Erklärung der Regelvorgänge

DK 621—53

Von Dipl. Ing. T. Stein, Schio, Italien ¹⁾

1. Bedeutung des PID-Begriffs

Die Regelungstechnik und gewisse Gebiete der Elektrotechnik haben gemeinsame physikalische Grundlagen: die Schwingungsgesetze. In der Radiotechnik trachtet man die Schwingungen bis zur Resonanz zu erregen, während das grundlegende Problem der Regelung darin besteht, sie abklingen zu lassen, um die Stabilität zu sichern [6]. Aber die Mittel, die Schwingungen zu beeinflussen, sind dieselben.

Trotz dieser Affinität wurde die Regelungstechnik nicht für elektrische Maschinen begründet, sondern für Wasserturbinen. Bereits 1893 hat Stodola [1] die Stabilitätsbedingungen für die Regelung von Wasserturbinen berechnet und die Ergebnisse durch Einführung von dimensionslosen Grössen und Zeitkonstanten verallgemeinert. Bis zum Ersten Weltkrieg beschränkte sich die Regelungstheorie ausschliesslich auf den Drehzahlregler.

Bei der Unmöglichkeit, in den Dampfzentralen die Kessel mit ihrer sprunghaft ansteigenden Einheitsleistung von Hand zu beherrschen, ging man in den USA mit einem Schlag zu deren Automatisierung über, ohne Anwendung irgend einer Theorie. Man versuchte, durch blosses Ausprobieren die beobachteten Pendelungen zu bekämpfen und führte hierzu komplizierte und kostspielige Stabilisatoren ein. Indem man statt dessen durch theoretische Analyse nach der physikalischen Ursache der Unstabilität forschte [2], gelang es, einfache und billigere Regler zu bauen, was die wirtschaftliche Automatisierung auch der kleineren Kessel in Europa gestattete.

Eine weitere Expansion der Regeltechnik ergab sich in den USA durch die «Automation» industrieller Vorgänge und Anlagen. Diesmal haben die Amerikaner als Ausgangspunkt neue theoretische Grundlagen von entscheidender Bedeutung für das Verständnis der Regeltechnik geschaffen: den PID-Begriff, welcher die Proportional-Wirkung (P), die integrale (I) und die differentiale Wirkung (D) des Reglers kennzeichnet. Zur besseren gegenseitigen Verständigung zwischen Regler-Konstrukteur und -Benutzer, zwischen Theoretikern und Praktikern zwecks rascher Verbreitung der Automation wurden ferner auf dieser Grundlage Normen der Regelungstechnik für Begriffe und Definitionen festgelegt. Hiernach wurde auch, ausser in England und Deutschland, in Italien [17] und in der Schweiz [19] eine einheitliche Nomenklatur geschaffen.

Die umfangreiche mathematische Arbeit, die zur Klärung der Probleme der Regelung geleistet wird, kann in der Praxis besser verwertet werden, wenn alle Autoren in ihren Arbeiten die gleichen normalisierten Begriffe und Formelzeichen verwenden. So wird eine den Theoretikern und Praktikern gemeinsame Sprache entstehen, welche gestattet, die auf einem Gebiet erreichten Ergebnisse auf andere Gebiete der Regeltechnik zu übertragen.

2. Verzögerungen behindern die Stabilität

Ausser dem wohlbekanntesten Drehzahlregler wurden in den thermischen Anlagen zahlreiche neue Regler eingeführt, für die jede theoretische Grundlage fehlte: Druckregler und Strömungsregler für Dampf, Luft und Gas, Brennstoffregler, Regler für die Rauchgaszusammensetzung und Temperaturregler.

¹⁾ Vortrag an der Jahresversammlung der Associazione Elettrotecnica Italiana (AEI) in Triest September 1956. Erweiterte Fassung unter Berücksichtigung der Besonderheiten des schweizerischen Normenentwurfes für die Nomenklatur der Regelungstechnik [19].

Bei der mathematischen Untersuchung zur Schaffung von Grundlagen für das übereinstimmende physikalische Verhalten von Reglerkategorien mit ganz verschiedener Zweckbestimmung und Konstruktion [2] fand der Verfasser, dass es trotz der anscheinenden Vielfalt nur zwei Regler-Kategorien gibt: Strömungsregler (Mengenregler) und Niveauregler (Zustandsregler). Für jede dieser beiden Kategorien lassen sich physikalische Gesetze bestimmen, welche für alle Regler der betreffenden Kategorie gelten. Eine klare Einsicht in das Verhalten der Regler setzt auch heute voraus, dass man die Verschiedenheit der beiden Kategorien und deren Ursache nicht übersieht.

Wenn die Regelgrösse (Druck, Temperatur, Drehzahl) sich augenblicklich, ohne Verzögerung, mit der Stellung des Stellorgans ändern würde, gäbe es keine Stabilitätsprobleme. Aber im Regelkreis treten Verzögerungen auf. Speichervorgänge in der geregelten Anlage schaffen für jedes der speichernden Regelkreisglieder eine Phasen-Nacheilung. Auch im Regler können verzögernde Phasenverschiebungen auftreten. Bei einer Gesamtnacheilung von 180° entsteht Resonanz mit ungedämpften, harmonischen Schwingungen. Es gibt auch Totzeiten und, im ersten Augenblick, Reaktionen in verkehrter Richtung, zum Beispiel den Druckstoss. Alle diese Erscheinungen behindern die Stabilität.

Bei Reglern mit Hilfsenergie kann die Rückführung, welche die Stellung des Servomotors auf den Regler einwirken lässt, ein Mittel zur Stabilisierung sein: sie gibt ein Signal, das in Phase mit der Stellung des Servomotors ist, während ohne Rückführung der Servomotor dem Regler mit einer Verzögerung von 90° folgt, die sich derjenigen in der geregelten Anlage hinzufügt.

3. Die Selbstregelung hilft stabilisieren

Von der ursprünglichen Theorie des Drehzahlreglers wurde mathematisch abgeleitet, dass ein Regler mit Hilfsenergie ohne Rückführung keinesfalls stabil sein kann. Diese These wurde seinerzeit in den Hochschulen als ebenso unumstössliches Axiom gelehrt, wie die Unmöglichkeit, ein perpetuum mobile zu verwirklichen. Aber in der Praxis konnte man mit gutem Erfolg die Rückführung von Druckreglern weglassen, für die genau die selben mathematischen Formeln gelten wie für den Drehzahlregler [2]. Jedoch pendelten diese Regler unter gewissen Betriebsbedingungen. Es war also nicht bloss zur Ehrenrettung der Mathematik notwendig, den Widerspruch zwischen Theorie und Praxis aufzuklären, sondern um vorzuberechnen, in welchen Fällen es zulässig ist, die Rückführung wegzulassen. Dies um die Regler zu vereinfachen und um ausserdem jede *bleibende Abweichung der Regelgrösse bei verschiedenen Belastungen* (Statik) zu vermeiden.

Der Fall, dass ein technisches Produkt eine Vollkommenheit besitzt, die in der Praxis die von der Theorie berechneten Grenzen überschreitet, ist derart aussergewöhnlich, dass es sich um eine allgemeine, damals von der Theorie nicht beachtete Erscheinung handeln musste. Der Verfasser fand als Ursache die physikalische Gesetzmässigkeit, dass in der Natur fast sämtliche Vorgänge die Tendenz haben, von selbst nach einer Störung ein neues Gleichgewicht zu finden [4]. Diese Tatsache, die Selbstregelung benannt wurde, hilft dem Regler, stabil zu bleiben, weil Selbstregelung und Regler beide die Tendenz haben, nach Störungen einen neuen Beharrungszustand herzustellen. Nachdem die mathematische Formel für diese Erscheinung durch Einführung der Selbstregelungskon-

stanten ermittelt war, konnte man rechnerisch die Fälle vorausbestimmen, in denen es zulässig oder nicht zulässig ist, die Rückführung wegzulassen.

Im schweizerischen Normenentwurf [19] wird das Endergebnis der Selbstregelung durch die Tatsache registriert, dass in gewissen geregelten Anlagen (Regelstrecken) ein statisches Uebertragungsverhalten zwischen Eingangsgrösse und Ausgangsgrösse vorliegt. Es kommt nachfolgend darauf an, physikalisch zu erklären, wie dieses statische Verhalten zustande kommt, um zu erkennen, warum diese «Statik» der geregelten Anlage bei verschiedenartigen Regelaufgaben in ganz anderem Mass den Regler unterstützt. Der normalisierte Begriff «Uebertragungsfaktor» entspricht dem reziproken Wert der «Selbstregelungskonstanten», die mit dem «Ausgleichsgrad» der deutschen Reglernormen übereinstimmt. Da es hier darauf ankommt, den Einfluss der Selbstregelung möglichst direkt darzustellen, wird die ursprüngliche Bezeichnung «Selbstregelungskonstante» nachfolgend beibehalten; diese ist proportional zur Selbstregelung und sinkt in den wenigen Fällen auf Null, wo keine Selbstregelung in der geregelten Anlage auftritt, deren Uebertragungsverhalten dann also rein astatisch ist. Bei der Drehzahlregelung von Dampfkraftmaschinen ist die Selbstregelung vernachlässigbar schwach und blieb deshalb bei der ursprünglichen Theorie unbemerkt.

Im Vergleich mit der Rückführung hat die Selbstregelung zwei Mängel:

1. Die stabilisierende Wirkung der Rückführung bleibt bei allen Belastungen praktisch die selbe. Die Wirkung der Selbstregelung wird hingegen bei niedrigen Belastungen schwächer. Ihre stabilisierende Wirkung beruht auf der Tatsache, dass auch die kleinsten Abweichungen der Regelgrösse von sich aus, ohne Einwirkung des Reglers, eine stabilisierende Veränderung der durch das Stellorgan strömenden Menge hervorrufen, eine Veränderung, die ein neues Gleichgewicht herstellt. Bei niedrigen Belastungen ist normalerweise die Strömungsmenge durch das Stellorgan — und deshalb auch ihre stabilisierende Veränderung — geringer und daher nimmt die Selbstregelungskonstante ab.

2. Bei zunehmender Stellgeschwindigkeit des Servomotors wird die stabilisierende Wirkung der Rückführung immer stärker. Die Wirkung der Selbstregelung wird dagegen schwächer, weil die Zeit zur Entwicklung ihrer stabilisierenden Wirkung fehlt. Daraus ergibt sich bereits, dass es für einen Servomotor mit Rückführung nicht möglich ist, die Stabilität zu verbessern, indem man die Stellzeit verlängert, um die Selbstregelung zu begünstigen, weil die stabilisierende Wirkung der Rückführung sich derart vermindert, dass beide Wirkungen sich kompensieren können [5].

Die Rechnung ergibt, dass für einen Zugregler eines Kessels die stabilisierende Wirkung der Selbstregelung tausendmal stärker sein kann als diejenige der Rückführung [4], die daher weggelassen werden kann, wobei trotzdem die Stabilität auch bei Teillast erhalten bleibt.

Bei einem Dampfdruckregler ist die Wirkung der Selbstregelung zum Beispiel nur zweimal stärker als diejenige der Rückführung bei Vollast, und sie sinkt proportional mit der Verringerung der Belastung. Dies erklärt die bei niedriger Belastung beobachteten Pendelungen, die man vermeiden kann, indem man den Servomotor mit dem Stellorgan so verbindet, dass bei niedriger Belastung, also kleiner Oeffnung, seine Stellgeschwindigkeit kleiner ist, was die Wirkung der Selbstregelung verstärkt (Bild 2b).

Bei Wasserturbinen hat die Selbstregelung besondere Bedeutung in der Bekämpfung der Störlwirkung des Druckstosses und hilft auch bei Teillast, weil auch der Druckstoss bei Teillast geringer wird, wie die Selbstregelungskonstante. Die Einführung einer vorübergehenden Statik zwischen der elektrischen Spannung und dem Wasserstand im Wasserschloss wirkt als «künstliche» Selbstregelung stabilisierend [11].

Bei drehzahlgeregelten Verstellpropellern von Flugzeugen tritt eine aerodynamische Selbstregelung auf, die auch im Leerlauf bestehen bleibt. Rechnerisch liess sich die in der Praxis nicht beobachtete, aber nachher bestätigte Tatsache vorausbestimmen, dass diese Selbstregelung es nur bei beschränkten Stellgeschwindigkeiten gestattet, die Rückführung wegzulassen und dass man, um die in der Folge beobachteten Pendelungen auszuschalten, entweder die Stellzeit verlängern

oder eine Rückführung oder einen Beschleunigungsregler anbringen muss [7].

Bei der Spannungsregelung von elektrischen Maschinen [15] tritt der Fall mangelnder Selbstregelung nicht auf. Auch bei Teillasten besteht beinahe dasselbe magnetische Feld im Generator, so dass am Ende der Kette der Erregerwirkungen nach einer Aenderung der Stellgrösse auch bei Teillast fast dieselbe Selbstregelung auftritt wie bei Vollast.

4. Strömungsregler

Es ist auch wichtig, sich über die wenig beachtete Tatsache Rechenschaft zu geben, dass selbst wenn die Selbstregelungskonstante null ist, gewisse Regler mit Hilfsenergie keine Rückführung brauchen. Die meisten Regler²⁾ variieren eine das Stellorgan durchfliessende Strömungsmenge (Flüssigkeit, Luft, Gas, Dampf, Brennstoff). Wenn die Regelgrösse ebenfalls eine Strömung ist (Strömungsmenge, Stromstärke, elektrische Leistung), bleibt im Falle von geringfügiger Phasenverschiebung in der geregelten Anlage die Regelgrösse annähernd in Phase mit der Stellgrösse. Deshalb hebt eine Nacheilung des Servomotors um 90° (Regler ohne Rückführung) die Stabilität nicht auf [2].

Von dieser Ueberlegung ausgehend ist es gelungen, die Regelung der Uebergabeleistung auf einen völlig konstanten Wert, unabhängig von der Frequenz, zu verwirklichen (Bild 1b), im Gegensatz zur allgemeinen These, dass dies unmöglich sei. Die mathematische Untersuchung sowie praktische Beobachtungen ergeben die merkwürdige Tatsache, dass die Rückführung eines Leistungsreglers von Wasserturbinen sogar die Stabilität stören kann, statt sie zu verbessern, weil sie eine Voreilung bewirkt, welche den Druckstoss vergrössert [13]. Auch eine andere, mit der Strömungsmenge in Phase befindliche Regelgrösse kann die Rückführung ersetzen, z. B. die Beschleunigung von Schwungmassen.

5. Niveau-Regler

Aber der grösste Teil der Regler hat als Regelgrösse nicht die Strömungsmenge selbst, sondern ein Niveau (Bild 2), das sich nach der durch das Stellorgan verursachten Abweichung der Strömungsmenge erst mit einer Phasennacheilung von 90° verändert. In einem Reservoir variiert der Wasserspiegel, der durch einen Schwimmer geregelt wird, gemäss der vom Speichervermögen des Behälters verursachten Nacheilung. In ähnlicher Weise rufen andere Speichervorgänge Phasennacheilungen hervor: bei Druckregelung das Gasvolumen, beim Drehzahl-Regler das GD^2 , bei der Temperaturregelung das Wärmespeichervermögen der erwärmten Stoffe und Apparate, auf dem Gebiet der Elektrizität die magnetische Trägheit. Es kann also eine ganze Kette aufeinanderfolgender Verzögerungen durch Speichervorgänge zusammenwirken.

6. Der Regler kann Verzögerungen aufholen

Schon wenn man den Fall eines einzigen verzögernden Speichervorgangs betrachtet, wird ein Niveauregler ohne Rückführung und ohne Selbstregelung instabil. Die Wirkung des Stellorgans auf das geregelte Niveau folgt mit einer Phasen-Nacheilung von 90°, während der Regler ohne Rückführung eine weitere Nacheilung von 90° hervorruft, also zusammen 180°. Die Schwingungen klingen nur dann ab, wenn die Phasennacheilung weniger als 180° beträgt. Bei einer Nacheilung von 180° entsteht eine Resonanz — wie in der Radiotechnik — was die Stabilität aufhebt.

Die Rückführung, die durch die Stellung des Servomotors betätigt wird, ist mit dem Servomotor in Phase. So erhält man eine stabilisierende «Proportional-Wirkung P» ohne Schaffung einer zusätzlichen Verzögerung zwischen Regelgrösse und Strömungsmenge, die durch das Stellorgan fliesst. Aber die starre Rückführung schafft eine bleibende Statik, d. h. eine permanente Abweichung der Regelgrösse bei verschiedenen Belastungen. Dies ist nicht nur zulässig, sondern — z. B. im Ausmass von etwa 3% — notwendig für den

²⁾ Die folgenden Betrachtungen gelten nicht für elektrische Regler, in denen das Stellorgan nicht eine Strömungsgrösse, sondern direkt eine Spannung variiert, also ein Niveau (Spannungsregler, Ward-Leonard Aggregat). Für diese Regler existiert aber auch normalerweise nicht der hier untersuchte Fall von mangelnder Selbstregelung.

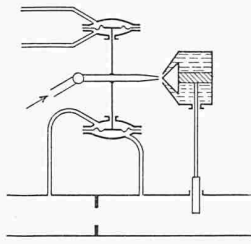


Bild 1a. Regelung der Strömungsmenge; oft in konstantem Verhältnis zu einer anderen Strömungsmenge geregelt

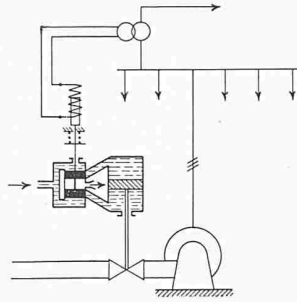


Bild 1b. Regelung der Uebergabeleistung zwischen zwei elektrischen Netzen

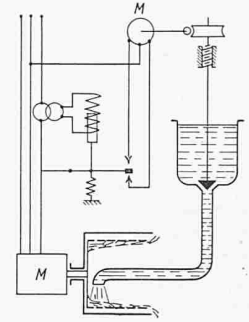


Bild 1c. Regelung der Stromaufnahme des Antriebsmotors einer Zentrifuge durch elektrischen Servomotor, der auf den Stoffzufluss einwirkt

Bild 1. Strömungsregler brauchen, auch wenn sie mit Hilfsenergie arbeiten, in günstigen Fällen keine Rückführung, weil die geregelte Strömungsmenge annähernd in Phase mit der Strömungsmenge ist, die das Stellorgan durchfließt (Bild 2 befindet sich auf S. 613, rechts oben)

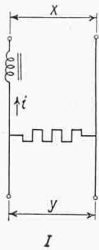


Bild 3a. Eine Induktivität verursacht eine Integral-Wirkung I, weil sie den Strom i , d. h. die Ausgangsgröße y gegen die Eingangsspannung x um 90° nachzulaufen lässt

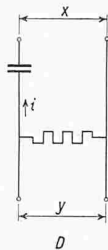


Bild 3b. Eine Kapazität verursacht eine Differential-Wirkung D, weil sie den Ausgang y gegen den Eingang x um 90° voreilen lässt

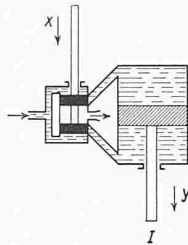


Bild 3c. Beim Integrator ist die Geschwindigkeit des Kolbens dem Hub x des Ventils proportional, daher ist der Hub y das Integral I von x

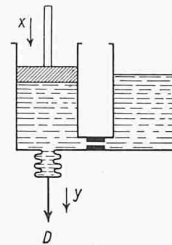


Bild 3d. Eine Aussenblende schafft einen Druck, welcher der Geschwindigkeit der Kolbenverstellung x proportional ist; also misst y den Differentialquotienten D von x

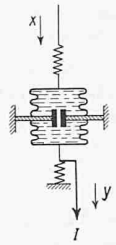


Bild 3e. Als Umkehrung bewirkt eine Zwischenblende an Stelle der nach aussen führenden Blende eine Nacheilung von y gegen x und erzeugt so eine Integral-Wirkung I

Bild 3. Integral- und Differential-Wirkung. Beispiele von Elementen, die eine Integral-Wirkung I oder eine Differential-Wirkung D zwischen Eingang x und Ausgang y des Reglers herbeiführen

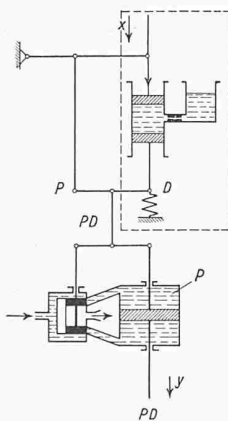


Bild 4a. Der PD-Regler misst mit y die Summe des Hubes (P) und der Geschwindigkeit, also des Differentialquotienten (D) von x

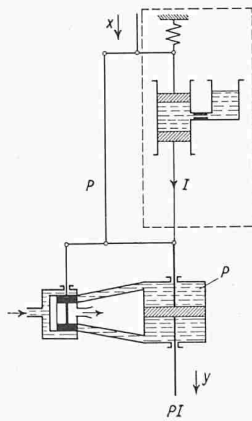


Bild 4b. Die Umkehrung in einem PI-Regler ergibt sich, indem man das selbe Beschleunigungselement mit Blende nach aussen vom Ausgang y statt vom Eingang x aus betätigt.

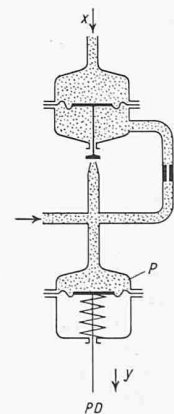


Bild 4c. Man erhält durch eine weitere Umkehrung wieder einen PD-Regler, indem man an Stelle der nach aussen führenden Blende eine Zwischenblende einbaut und so eine Nacheilung statt der Voreilung der Rückführung verursacht

Bild 4. Die Umkehrung der Integral- (I) und Differential-Wirkung (D) schafft in Kombinationen mit der Proportional-Wirkung (P) Varianten von PD- und PI-Reglern

Bild 5. Aufschaltung der Störgrösse und periodischer Eingriff zur Ausschaltung der destabilisierenden Wirkung der Totzeit. Beispiel: Regelung der Rauchgaszusammensetzung eines Kessels mit einem Rauchgasprüfer, der eine Totzeit von einer halben Minute hat. Ohne die verzögerte Abweichung des Rauchgasprüfers abzuwarten, wird der Servomotor 4 durch ein Messorgan 2 der Störgrösse (Dampfmenge) und ein Messorgan 3 der Brennluft derart verstellt, dass das Mengenverhältnis beider Messwerte konstant bleibt. Die restlichen Abweichungen der Rauchgaszusammensetzung werden vom Rauchgasprüfer 1 mit einer Verspätung von einer halben Minute gemessen. Der Unterbrecher 5 unter-

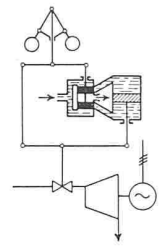
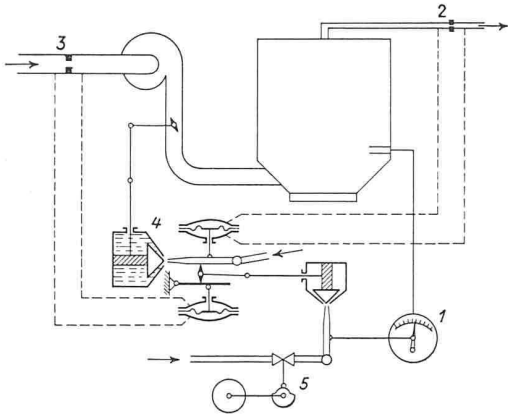


Bild 2 a. Drehzahlregler einer Kraftmaschine

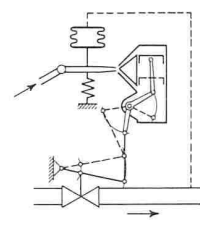


Bild 2 b. Druckregler

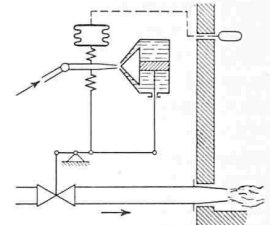


Bild 2 c. Temperaturregler für die Brennstoffzufuhr

Bild 2. Niveauregler regeln ein Niveau, das der Abweichung der Strömungsmenge, die das Stellorgan durchfliesst, erst mit einer Phasen-Nacheilung von mindestens 90° folgt

bricht die Korrekturfunktion des Rauchgasprüfers während z. B. einer Minute, sodass sich im Rauchgasprüfer nach Ablauf der Totzeit der Messwert einstellt, welcher der Stellung des Servomotors 4 entspricht. Während der kurzen periodischen Öffnungen des Unterbrechers 5 korrigiert der Rauchgasprüfer die Proportionalität zwischen Dampf und Luft

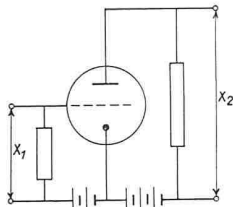


Bild 6 a. Der elektronische Verstärker hat keine Verzögerungen

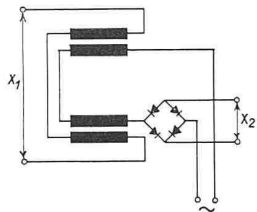


Bild 6 b. Im Transduktor entsteht eine leichte Nacheilung infolge der magnetischen Trägheit.

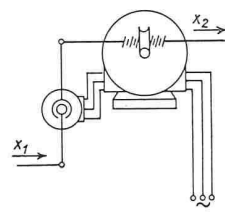


Bild 6 c. Im elektrischen Servomotor verursachen die Schwungmassen eine Phasen-Nacheilung.

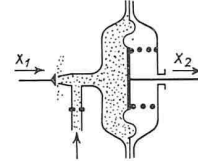


Bild 6 d. Der pneumatische Servomotor verursacht Totzeiten durch seine Unempfindlichkeit.

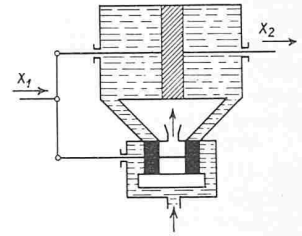


Bild 6 e. Der hydraulische Servomotor mit seinen grossen Stellkräften kann als idealer Verstärker ohne Nacheilung oder Totzeit betrachtet werden, wenn man ihn als reinen Verstärker ohne Nacheilung oder Totzeit betrachtet werden, wenn man ihn als reinen Verstärker benutzt; falls er hingegen eine Integral-Wirkung ausüben soll, wächst seine Unempfindlichkeit proportional mit seiner Integralzeit, was Totzeiten hervorruft

Bild 6. Verstärkerorgane

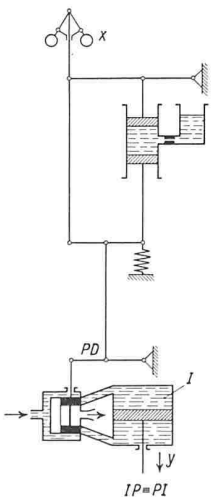


Bild 7 a. Der Drehzahlregler mit hydraulischem Beschleunigungselement (PD) hat einen Servomotor mit Integral-Wirkung I, welcher die PD-Wirkung integriert und so in eine $IP \equiv PI$ -Wirkung verwandelt

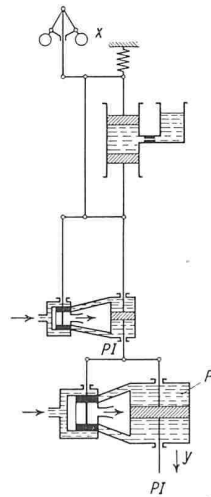


Bild 7 b. Beim Drehzahlregler mit vorübergehender Statik erhält man direkt die Umkehrung in einen PI-Regler, indem man das Beschleunigungselement nicht durch das Messorgan (x), sondern durch die Rückführung (y) antreibt, sodass der Servomotor als reiner Verstärker ohne Unempfindlichkeit wirkt

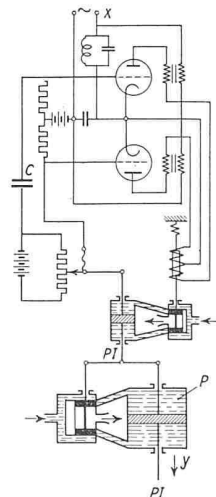


Bild 7 c. Der elektronische Regler bewirkt die Beschleunigung der Rückführung durch Einbau einer elektrischen Kapazität C

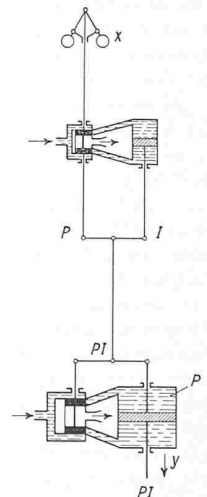


Bild 7 d. Der Proportional-Wirkung P des Reglers wird die Integral-Wirkung I eines Integrators hinzugefügt

Bild 7. Identische proportional-integrale PI-Regler für Wasserturbinen

Parallelbetrieb von mehreren Dampfturbinen-Einheiten. Indem man hier einen Beschleunigungsregler hinzufügt, der im Vergleich zum Drehzahlregler eine «Differential-Wirkung D» herstellt, schafft man eine Voreilung von 90° . So könnte man, falls es sich um einen einzigen Speichervorgang handelt, die Nacheilung von 90° zwischen Variation der Strömungsmenge, die durch die Turbine fließt, und Drehzahlabweichung aufholen; für diesen «Niveauregler» gelten dann ähnliche Bedingungen wie für einen Strömungsregler.

Für Wasserturbinen wäre es bei der Schwierigkeit, den Druckstoss zu bekämpfen, notwendig, eine Statik einzuführen, die einen Wert von 50 % übersteigen kann, was als permanenter Wert durchaus unzulässig ist. Auch bei vielen Reglern von industriellen Vorgängen muss man die Proportional-Wirkung P im Beharrungszustand aufheben, indem man eine «Integral-Wirkung I» einführt. Die Integral-Wirkung schaltet mit der Zeit die Proportional-Wirkung aus (vorübergehende Statik).

7. Das PID-Gesetz

Wie die Proportional- (P), Integral- (I) und Differential-Wirkung (D) anzuwenden ist, ergibt sich in einfacher Weise aus dem von den Amerikanern eingeführten PID-Begriff. Man betrachtet als eine Einheit sämtliche Teile des Reglers vom Messorgan der Regelgrösse bis zum Stellorgan unter Einschluss des Servomotors. Diese Einheit kann man als «Regler» oder als Regeleinrichtung bezeichnen. Man beschränkt sich darauf, mathematisch die Beziehung zwischen dem Eingang, also der Regelgrösse x , die der Stellung des Messorgans entspricht, und der Stellung y des Stellorgans als Ausgangsgrösse zu bestimmen.

Wir müssen zugeben, dass in Europa in der Reglertheorie aus Gründen der mathematischen Vereinfachung ein Ausgangspunkt gewählt wurde, der verschleiert, was physikalisch im Regler geschieht. Man basierte sich auf die einfache Proportionalität zwischen der Stellung des Messorgans und der Geschwindigkeit des Servomotors. Um aber wirklich zu wissen, was im Regler zwischen Messorgan (x) und Stellorgan (y) vorgeht, muss man zwei homogene Grössen vergleichen: nicht eine Stellung mit einer Geschwindigkeit, sondern zwei Stellungen. Sonst erkennt man nicht, dass zwischen der Stellung des Messorgans x und der Stellung des Stellorgans y eine Integralwirkung auftritt: die Geschwindigkeit des Servomotors ist der Stellung des Messorgans proportional, daher entspricht die Stellung des Servomotors dem Integral der Messorganstellung. Die Tatsache der Integralwirkung im Servomotor erklärt bis dahin unverständliche Erscheinungen (Abschnitt 13).

Das amerikanische PID-Gesetz ist vollgültig für Niveauregler ohne Selbstregelung: Hier schafft einzig die Proportionalwirkung P die Stabilität. Die Integralwirkung (I), die mit der Zeit die Proportionalwirkung ausschaltet, muss mit einer gewissen Verlangsamung eingeführt werden, um nicht die durch die P-Wirkung geschaffene Stabilität zu zerstören. Es ist aber zulässig, schneller zu integrieren, d. h. schneller die vorübergehende Proportionalwirkung aufzuheben, wenn man eine Differentialwirkung (D) einführt.

Hinzuzufügen ist die von den Amerikanern nicht berücksichtigte Tatsache, dass eine genügend grosse Selbstregelungskonstante die Proportionalwirkung P ersetzen kann, und dass in günstigen Fällen die Strömungsregler auch ohne Selbstregelung keine Proportionalwirkung brauchen. In beiden Fällen kann man eine reine Integralregelung (ohne Rückführung) verwenden, die in Europa sehr verbreitet ist, weil die Regler einfach werden und sie die Regelgrösse astatistisch konstant halten.

Als Mass der erforderlichen Verlangsamung der Integralwirkung kann man die Integralzeit³⁾ einführen, die von genügender Dauer sein muss, um nicht die von der Proportionalwirkung geschaffene Stabilität aufzuheben [4]. Man findet

³⁾ Der Verfasser hat vorgeschlagen, in den definitiven italienischen Normen als «Integralzeit» den Zeitwert zu benennen, der die Langsamkeit der Integral-Wirkung [18] bestimmt. Es ist dies der Reziprokwert der Konstanten des Integralgliedes der Regelgleichung (im Gegensatz zur abweichenden Definition in den provisorischen italienischen [17] und schweizerischen Normen [19]). So gilt der Begriff «Integralzeit» ganz allgemein, also auch für rein astatistische Integralregler, bei denen er aus ganz anderen Kenngrössen zusammengesetzt ist als beim Regler mit vorübergehender Statik [16, 18].

dann, dass auch die Wirkung der Selbstregelung mit der Integralzeit zunimmt. Wenn man die vorübergehende Statik als Mass des statischen Verhaltens des Reglers und die Selbstregelungskonstante der Regelstrecke als Mass für das statische Verhalten der geregelten Anlage ansieht, so erkennt man, dass die Integralzeit nicht so stark abgekürzt werden darf, dass hierdurch die stabilisierende Wirkung des statischen Verhaltens von Regler und geregelter Anlage unzulässig herabgesetzt wird.

8. Die Einführung von Speicher-Elementen schafft sowohl die Integralwirkung I als auch die Differentialwirkung D

Hier zeigt sich die physikalische Aehnlichkeit zwischen Elektrizität und Regelung. Im Vergleich mit der Proportionalwirkung P hat die Integralwirkung I eine Nacheilung von 90° und die Differentialwirkung D eine Voreilung von 90° .

Um beide Wirkungen, also Nacheilungen und Voreilungen, herbeizuführen, erzeugt man im Regler das, was in der geregelten Anlage von selbst geschieht. Infolge von Speichervorgängen verändert sich dort das Niveau im Speicher im Vergleich zur Strömungsmenge mit einer Nacheilung von 90° , aber umgekehrt hat die Strömungsmenge eine Voreilung von 90° gegen das Niveau. Es genügt daher, in den Regler Speicherelemente einzuführen, an ihnen Strömungsmenge und Speicherniveau zu messen und in geeigneter Weise auf den Regler wirken zu lassen, um beliebig nacheilende integrale (I) oder voreilende differentiale (D) Phasenverschiebungen zu erzeugen.

Eine Induktivität (Bild 3a) bewirkt eine durch die Spannung y gemessene Nacheilung des Stromes i gegen die Eingangsspannung x infolge magnetischer Speicherwirkung. In Bild 3b bildet eine elektrische Kapazität den Speicher, und man misst durch y die Stromstärke i , die um 90° gegen den Speichervorgang voreilt.

Beim hydraulischen Integrator (Bild 3c) speichert das Oelvolumen (y) über dem Kolben die Oelmenge, die der Öffnung x des Ventils proportional ist; y entspricht daher dem Integral I von x . An Stelle eines zu x proportionalen Querschnittes und einem konstanten Druckunterschied, der von der Pumpe des Servomotors geliefert wird, arbeitet man bei der Anordnung nach Bild 3d mit einem festen Querschnitt (Blende), wobei der Oelstrom, der durch die Bewegung von x verdrängt wird, einen zur Geschwindigkeit der Bewegung proportionalen Druckunterschied herstellt; so entsteht eine Differentialwirkung. Eine zwischengeschaltete statt nach aussen führende Blende schafft umgekehrt im Beispiel nach Bild 3e eine Integralwirkung I. Für die kombinierten Regler PD und PI (Bild 4) besteht ausserdem eine weitere Umkehrmöglichkeit.

9. Umkehrbarkeit der I- und der D-Wirkung durch die Rückführung

Eine starre, augenblicklich wirkende Rückführung (P) bringt den Eingang x , d. h. die Regelgrösse, in Phase mit dem Ausgang, also mit der Stellung y des Servomotors. Wenn man dagegen die Rückführwirkung um 90° nacheilen lässt (Bild 4c), hat der Servomotor eine Voreilung von 90° gegen die Rückführung, die zusammen mit dem Messorgan x auf den Servomotor einwirkt. Mit einer starren Rückführung erhält man die selbe Wirkung, indem man der Proportionalwirkung P eine Differentialwirkung D hinzufügt, die ebenfalls eine Voreilung des Servomotors um 90° hervorruft (Beschleunigungsregler).

Die Rückführung des Servomotors nacheilen zu lassen hat also die selbe Beschleunigungswirkung gegen das Messorgan (Bild 4a), wie das Hinzufügen eines Beschleunigungselements. In beiden Fällen gelangt man zu einem PD-Regler. Logischerweise hat eine Beschleunigung der Rückführung die umgekehrte Wirkung. Der wohlbekanntere PI-Regler mit vorübergehender Statik (Bild 4b) stellt deshalb einen Regler mit beschleunigter Rückführung dar. Gleiche Beschleunigungselemente D in den Bildern 4a und 4b haben also umgekehrte Wirkung, je nachdem sie vom Messorgan (x) oder vom Servomotor (y) angetrieben sind.

10. Abweichendes Verhalten verschiedener PID-Kombinationen

Man darf nicht die stabilisierende Integralwirkung eines PI- oder PID-Reglers mit einer Phasennacheilung in einem

Servomotor mit Rückführung verwechseln, indem man vom nicht funktionellen Anschein ausgeht, dass auch in gewissen Servomotoren ohne Rückführung der Servomotor eine Integralwirkung herstellt (Bild 7a). Beim PID-Begriff dient die Integralwirkung dazu, die stabilisierende Proportionalwirkung der vorübergehenden Statik nur verzögert auszuschalten. Hierbei ist vorausgesetzt, dass die Proportionalwirkung augenblicklich reagiert. Eine Verzögerung in einem Servomotor mit Rückführung verzögert hingegen die stabilisierende Proportionalwirkung, schafft eine zusätzliche Nacheilung und stört daher die Stabilität.

Deshalb geben nicht alle Regler, die Elemente mit Proportional-, Integral- und Differentialwirkung besitzen, die gleichen Resultate [9, 10, 16, 18]. Dies weil in gewissen PID-Kombinationen eine Vorrichtung mit Integralwirkung die Proportionalwirkung verzögert, die so nicht augenblicklich auf den Ausgang y in Funktion des Eingangs x des Reglers wirkt. Als extremer Fall schaltet ein in Reihe mit einem PD-Regler geschalteter Servomotor mit Integralwirkung die Differentialwirkung vollkommen aus (siehe Abschnitt 13). Daraus ergibt sich, dass ein PID-Regler, der die Summe der drei P-, I- und D-Wirkungen auf den Ausgang y wirken lässt, als ideale Kombination zu betrachten ist, die die beste Stabilität ergibt.

11. Aufschaltung der Störgrösse und periodischer Eingriff

Zwischen der Bewegung des Stellorgans und deren Wirkung auf die Regelgrösse kann in der geregelten Anlage eine ganze Kette von Verzögerungen auftreten, teils durch die Trägheit infolge von Speichervorgängen, teils durch Totzeiten. Wenn die Kette sich auf eine bis drei Speicherträgheiten, sowie nicht zu lange Totzeiten beschränkt, ist die Differentialwirkung ein vorzügliches Mittel, um die Verzögerung aufzuheben und so die Stabilität zu erhalten. Aber wenn die in der Kette aufeinanderfolgenden Trägheiten und die Totzeit bedeutend sind, genügt die Differentialwirkung nicht mehr, um die Stabilität zu sichern. In diesem Fall muss man die Aufschaltung der Störgrösse einführen. Man misst die Störgrösse, zum Beispiel die veränderte Belastung, und lässt sofort die Oeffnung des Stellorgans in entsprechendem Mass folgen — ohne abzuwarten, dass sich die Regelgrösse ändert. Diese Massnahme (die der Compound-Wicklung in elektrischen Maschinen entspricht) stellt nicht wie die Regelung einen geschlossenen Regelkreis dar, daher bestehen auch keine Stabilitätsprobleme. Man kann damit zwar nicht die absolute Genauigkeit erzielen, die Arbeit des Reglers beschränkt sich aber auf eine leichte Korrektur der Ungenauigkeiten, was auch mit Verspätung geschehen kann, ohne der Stabilität zu schaden. Die Aufschaltung der Störgrösse, die heute in steigendem Mass angewendet wird, wurde als Methode zur Schnellregelung von Hochdruckkesseln auf Grund theoretischer Untersuchungen entwickelt [3].

Mit dem beschriebenen Mittel gelingt es nicht, die destabilisierende Wirkung der Totzeit vollkommen aufzuheben. Es ist zweckmässig daran zu erinnern, dass dies in den Fällen restlos möglich ist [2], in denen es zulässig ist, die Regelung auf einen kurzen periodischen Eingriff zu beschränken (Bild 5). Wenn die Unterbrechung des Reglereingriffs länger ist als die Totzeit, entspricht nach Ablauf der Totzeit die Regelgrösse wieder der Stellung des Stellorgans, als ob die Totzeit null wäre. Diese Massnahme wurde bei der Regelung der Verbrennungsluft durch einen Rauchgasprüfer angewendet, der zum Ansaugen der Rauchgasprobe mit einer Totzeit von einer halben Minute arbeitet [2].

12. Vermeidung von Verzögerungen in den Verstärkerorganen

Jedes geeignete Mittel ist anzuwenden, um weder Phasennacheilungen noch Totzeiten im eigentlichen Regler hervorzurufen, vom Messorgan unter Einschluss der Verstärkerorgane bis zum Servomotor (Bild 6). Mit Rücksicht auf Verzögerungen ist der elektronische Verstärker ideal, da es bei ihm weder Totzeit noch Trägheit gibt. Der Transduktor hat eine leichte Trägheit, aber keine Totzeit. Die Verstärkung kann auch durch den Servomotor stattfinden. Im elektrischen Servomotor verursacht das GD^2 des Motors eine Phasennacheilung; eine Totzeit, wie sie durch elektrische Kontakte entsteht, kann vermieden werden, indem man induktive Kraftschalter verwendet [14]. Der pneumatische Servomotor, der mit einem kompressiblen Medium arbeitet, hat die geringste

Stabilität, weil die Reibung in umgekehrter Richtung wirkt, wenn man von der Oeffnungsbewegung zum Schliessen übergeht, was durch die Kompressibilität eine Unempfindlichkeit verursacht, die eine Totzeit hervorruft [16]. Ausserdem entstehen durch lange Luft-Rohrleitungen entstabilisierende Phasennacheilungen infolge der Kompressibilität. In den USA, wo pneumatische Regler sehr verbreitet sind, um leicht weite Entfernungen zu überwinden, glaubt man aus diesem Grund oft an die Unmöglichkeit, eine Regelung mit einer Integralwirkung zu verwirklichen (astatischer Regler). In Europa, wo der stabilere hydraulische Servomotor stark entwickelt wurde, verwendet man oft in thermischen Anlagen mit dem grossen Vorteil der Einfachheit den astatischen Regler ohne Rückführung mit reiner Integralwirkung. Als weitere Vereinfachung kann man bei hydraulischen Reglern auch auf die Einführung von Differentialwirkungen verzichten, die oft nur dazu dienen, die Totzeiten pneumatischer Regler zu bekämpfen [14].

Der hydraulische Servomotor hat die Unempfindlichkeit null, wenn keine Undichte zwischen Kolben und Zylinder besteht. Seine Unempfindlichkeit ist der Sickerölmenge und seiner Integralzeit³⁾ proportional [16]. Mit grossen Steuerventilen und geeigneten Uebersetzungsverhältnissen zwischen Messorgan und Ventil kann man seine Unempfindlichkeit beliebig vermindern, so dass er ein reiner proportionaler Verstärker ohne Nacheilung und ohne Unempfindlichkeit wird, wie andere, in den Regler eingebaute Zwischenverstärker. Dies gilt wenigstens für Wasserturbinen, deren Regelung verhältnismässig langsam ist. Für diese ist mit dem hydraulischen Servomotor im selben Ausmass ein idealer Verstärker verwirklicht, wie analog ein moderner Drehzahlregler als ideale Konstruktion gilt, bei der man in der Rechnung die Massenträgheit des Reglers nicht mehr in Betracht zu ziehen hat. Bei einem Servomotor von Wasserturbinen mit ausschliesslich verstärkender Wirkung eine Phasennacheilung in die Rechnung einzuführen, trübt den klaren Einblick und schafft ausserdem unnütze mathematische Komplikationen.

Ganz anders liegen aber die Dinge beim hydraulischen Servomotor, der eine Integralwirkung ausüben soll. Eine Verlängerung der Integralzeit³⁾ erhöht proportional die Unempfindlichkeit, welche die Stabilität stört [16]. Man sollte daher die Integralwirkung nicht in den Hauptservomotor verlegen, sondern in ein vorgeschaltetes Element, zum Beispiel einen Membranbalg, der, im Gegensatz zu einem Kolben, ohne Sickerverluste und ohne Reibung arbeitet. Es ist wichtig festzustellen, dass man die Unempfindlichkeit in den Mess-, Integrier- und Differentierorganen absolut auf null herabsetzen kann, indem man nur elastische Verbindungen ohne Spiel und ohne Reibung verwendet [14].

13. Identische PI-Regler für Wasserturbinen

Mit diesen physikalischen Grundlagen kehren wir zum Ursprung der für Wasserturbinen geschaffenen Reglertheorie zurück [1]. Es blieb lange unerklärlich, warum völlig verschiedenartige Regler von Wasserturbinen sich identisch verhalten können. Ganz besonders seltsam erscheint die Tatsache, dass ein Beschleunigungsregler, der gegenüber einem Drehzahlregler mit vorübergehender Statik um 90° schneller reagiert, trotzdem nicht besser, sondern identisch regelt [8, 12].

Wenn man erkennt, dass die Beschleunigungsregler bei Wasserturbinen (Bild 7a) einen Servomotor mit Integralwirkung haben, so folgt daraus, dass die Integralwirkung des Servomotors die Differentialwirkung des Beschleunigungsreglers wegintegriert, wodurch die Differentialwirkung verschwindet und sich auf eine Proportionalwirkung reduziert. Die Proportionalwirkung, die nach dem PID-Begriff allein imstande ist, die Stabilität herbeizuführen, muss auf einem Umweg eingestellt werden, indem man das Verhältnis zwischen zwei Zeitkonstanten des Reglers ändert: die Integralzeit und die Differentialzeit [16].

Der Drehzahlregler mit vorübergehender Statik (Bild 7b) ist an und für sich schon ein proportional-integraler PI-Regler, der gestattet, direkt durch die vorübergehende Statik die stabilisierende Proportionalwirkung P einzustellen. Auch für den Druckstoss gilt, dass er ausschliesslich durch die Proportionalwirkung stabilisiert werden kann. Er bedingt eine so starke Störung, dass hierzu Statikwerte bis 50 % und darüber notwendig sind. Eine lange Integralzeit sichert nicht

