



Hans Schöpflin

**Projektierung
von Regelungsanlagen**

15

REIHE AUTOMATISIERUNGSTECHNIK

Herausgegeben von B. Wagner und G. Schwarze



Projektierung von Regelungsanlagen

Hans Schöpflin



VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

REIHE] AUTOMATISIERUNGSTECHNIK

Bereits erschienene Titel

- 1 *Schwarze*: Grundbegriffe der Automatisierungstechnik
- 2 *Gottschalk*: Bauelemente der elektrischen Steuerungstechnik
- 3 *Berg*: Hydraulische Steuerungen
- 4 *Schöpflin*: Netzregelungen
- 5 *Schubert*: Digitale Kleinrechner
- 6 *Sydow*: Elektronische Analogrechner und Modellregelkreise
- 7 *Götte*: Elektronische Bauelemente in der Automatisierungstechnik
- 8 *Bojartschenkow/Schinjanski*: Magnetische Verstärker
- 9 *ten Brink/Kauffold*: Entwurf und Ausführung von Steueranlagen
- 10 *Schwarze*: Regelkreise mit P- und I-Reglern
- 11 *Peschel*: Regelkreise mit PID-Reglern
- 12 *Stuchlik*: Programmgesteuerte Universalrechner
- 13 *Kautsch*: Elektrische Meßverfahren für nichtelektrische Größen
- 14 *Ehrhardt*: Fernsteuerung
- 15 *Schöpflin*: Projektierung von Regelungsanlagen

Als nächste Bände erscheinen:

- 16 *Lüdke*: Betriebserfahrungen mit einer automatischen Großanlage
- 17 *Meyer/Schroedter*: Betriebsmeßtechnik
- 18 *Fritsch*: Grundlagen der elektrischen Antriebsregelung
- 19 *Ahner/Bode*: Elektronische Datenverarbeitung in der Ökonomie
- 20 *Dittmann*: Kennwertermittlung von Regelgeräten und Regelstrecken
- 21 *Fuchs*: Digitale Regelungen
- 22 *Borgwardt*: Gasanalysen—Meßtechnik
- 23 *Finger*: Elektrische Wägetechnik
- 24 *Obenhaus*: Fernmeßeinrichtungen

Lektor: Dipl.-Ing J. Reichenbach

DK 62-53 (083.9)

ES 20 K 2

Bestellnummer 4/3/3277

Alle Rechte vorbehalten. Copyright 1964 by VEB Verlag Technik, Berlin

VLN 201 Dg. Nr. 370/69/64 Deutsche Demokratische Republik

Satz und Druck: Engelhard-Reyhersche Buchdruckerei KG, Gotha

Einbandgestaltung: Kurt Beckert

Inhaltsverzeichnis

Tafelübersicht	4
Vorwort	5
1. Voraussetzungen der Projektierung	7
1.1. Zielsetzung des Auftraggebers	7
1.2. Abschätzung der Realisierbarkeit	8
1.3. Ökonomische Betrachtung	9
2. Erarbeitung der technischen Aufgabenstellung	10
2.1. Studium des Objektes	11
2.2. Vereinbarung der Meß- und Regelgrößen	12
2.3. Feststellung der Störgrößen und Vereinbarung der Stellgrößen	13
2.4. Übergangsfunktionen der Strecke	14
2.5. Abschätzung der Regelgenauigkeit	25
2.6. Wahl der Hilfsenergie und des Gerätesystems	36
3. Entwurf der Prinzipiöslösung	38
3.1. Entscheidung über Steuerung oder Regelung	38
3.2. Zweckmäßigkeit einer Hilfsgrößenaufschaltung	40
3.3. Auswahl des geeigneten Reglers und Bemessung der Parameter	51
3.4. Bemessung der Stelleinrichtung	62
4. Der vollständige Projektinhalt	65
4.1. Die Aufgabenstellung	66
4.2. Das Projekt	66
4.3. Die Ausführungsunterlagen	68
5. Tendenzen der Weiterentwicklung	68
Literaturverzeichnis	70
Sachwörterverzeichnis	72

Tafelübersicht

Tafel 1: Rechentabelle	31
Tafel 2: Rechentabelle	35
Tafel 3: Bewertungsverhältnisse für Regler	37
Tafel 4: Bewertungsverhältnisse für Stellantriebe	37
Tafel 5: Voraussetzungen für die Verbesserung der Regelung durch Hilfs- größenaufschaltung	48
Tafel 6: Einstellparameter für stetige Regler	54
Tafel 7: Einstellparameter für unstetige Regler	59
Tafel 8: Eignung verschiedener Reglertypen	61

Vorwort

Als Teilgebiet der Automatisierungstechnik steht die Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik im Mittelpunkt des Geschehens. Diese Technik kann jedoch nur wirksam werden, wenn die Produktionsanlage ein automatisierungsgerechtes Stadium erreicht hat. Dazu ist erforderlich, daß die Mechanisierungsfragen geklärt sind, Meßwerte gebildet werden können und Stellorte für Eingriffe in den Prozeß existieren. Außerdem gehören Transporteinrichtungen, Wägemaschinen und ein breites Sortiment von Spezialmaschinen genauso zur industriellen Automatisierungstechnik wie Meßwertverarbeitungsanlagen zur Verbesserung der Verwaltungsarbeit.

Bei der Vielseitigkeit der Produktionsbedingungen, Anforderungen und Lösungsmöglichkeiten ist der Aufbau von Regelkreisen fast immer mit einer speziellen Untersuchung und Bemessung verbunden. Wenn die Regelungstheorie heute auch so weit entwickelt ist, daß die prinzipielle Lösung einer Aufgabe unabhängig von der Art des Objektes erfolgen kann, sofern gewisse Kennwerte vorliegen, verbleibt für die Verwirklichung immer noch ein großer Arbeitsaufwand bezüglich des Verfahrens, der Schaltung, der Anpassung, der Sicherheit und Geräteauswahl, um eine befriedigende Lösung zu erreichen.

Die Einordnung des Stoffes erfolgt nach Möglichkeit in einer dem Projektierungsablauf angemessenen Reihenfolge. Die Ermittlung und Auswertung von Übergangsfunktionen konzentriert sich dabei auf eine Methode, bei der mit einem Minimum von Streckenparametern gearbeitet wird. So werden alle regelungstechnischen Aussagen auf durch Übertragungsfaktor, Zeitkonstante und Totzeit gekennzeichnete proportionale oder integrale Strecken bezogen. Die Optimierungsbedingungen werden unter der Zielsetzung des aperiodischen Einlaufens der Regelgröße bei kürzester Ausregelzeit angegeben. Bei allen Bemessungsfragen wurde angestrebt, neben den rein technischen Vor- und Nachteilen einer Lösung auch eine wirtschaftliche Gewichtung der möglichen Varianten zu geben.

Vorausgesetzt werden für das Verständnis dieses Bandes Grundkenntnisse über eine regelungstechnische Betrachtungsweise sowie über das zur Verfügung stehende Sortiment von Meßwertumformern, Reglern und Stellrichtungen. Über die Auslegung von Stellventilen konnten nur einige wichtige Gesichtspunkte aufgeführt werden, da die eingehende Behandlung dieser Frage über die Konzeption dieses Bandes hinausgehen würde. Diesbezüglich und auch über andere Spezialfragen sei auf die bereits erschienenen oder in Vorbereitung befindlichen anderen Bände der REIHE AUTOMATISIERUNGSTECHNIK verwiesen.

Zur zeichnerischen und begrifflichen Symbolik der Regelungs- und Steuerungstechnik sei auf die Entwürfe von TGL 14091 und 14591 aufmerksam gemacht, mit denen eine ausführliche Unterlage auf diesem Gebiet geschaffen wurde. Die Ausführungs- und Bearbeitungsform von Projekten

hängt vom Bearbeitungsumfang ab und ist in der jeweils zweckmäßigen Form meist durch Betriebsnormen festgelegt, so daß dieses Thema nur in Form einer Aufzählung des technisch notwendigen Projektinhaltes behandelt werden kann. Außerdem ist durch gesetzliche Festlegungen und Verordnungen die grundsätzliche Verfahrensweise festgelegt.

Für die wertvollen Hinweise und weitere Anregungen bei der Korrekturlesung des Manuskriptes möchte ich an dieser Stelle den Herren Dipl.-Ing. *B. Wagner*, Dipl.-Ing. *R. Müller* und Ing. *H. Siehler* besonders danken.

Hans Schöpflin

1. Voraussetzungen der Projektierung

1.1. Zielsetzung des Auftraggebers

Bevor ein Projektierungsauftrag angenommen wird, ist es zweckmäßig, zunächst die Motive des Kunden zu ergründen. Dabei ist festzustellen, welche wirtschaftliche Bedeutung das Vorhaben hat und worauf es dem Kunden im speziellen Fall ankommt. Weiter läßt sich bei einer derartigen Aussprache auch schon eine grobe Abschätzung der Realisierungsmöglichkeit, des Aufwandes und des Zeitbedarfes für Projektierung, Montage und Inbetriebsetzung vornehmen. Diese Fühlungnahme mit dem künftigen Auftraggeber läßt darüber hinaus auch eine Einschätzung zu, bis zu welchem Grad bereits regelungs- und steuerungstechnische Kenntnisse und Erfahrungen vorliegen, auf die man sich bei der Projektierung stützen kann. Es ist ein wesentlicher Unterschied, ob ein Auftrag aus einem Betrieb heraus gegeben wird, in dem bereits Regelungsanlagen in Betrieb sind, wo dann häufig auch eine Automatisierungsgruppe besteht, oder ob ein Auftrag aus einem Betrieb kommt, in dem erst mit der Automatisierung begonnen werden soll. Während im ersten Fall die Vorstellungen meist sehr klar und technisch begründet sind, bestehen im zweiten Fall teilweise doch recht verschwommene und unklare Vorstellungen über die dem Stand der Technik entsprechenden Möglichkeiten. Hier ist dann zunächst eine Beratung am Platze, die mit einer Besichtigung des betreffenden Betriebes oder Werkteiles verbunden werden sollte. Vor einer schwierigen Aufgabe steht der Projektant von Regelungsanlagen, wenn es sich um völlig neuartige Investitionsvorhaben handelt. In diesen Fällen liegen häufig keine genügenden Erfahrungen über das Verhalten der vorgesehenen neuen Aggregate oder der zum erstmaligen Einsatz kommenden technologischen Verfahren vor. Es ist dann eine mühsame, aber andererseits auch verantwortliche und befriedigende Aufgabe, trotzdem die notwendigen Anhaltspunkte zu erfragen, zu messen, zu berechnen oder durch Analogieschlüsse zu erhalten, um das Regelungsverfahren entwerfen zu können. Je nach dem entstehenden Risiko und der Bedeutung der Anlage ist es dabei unter Umständen angebracht, zunächst eine kleine Versuchsanlage zu entwerfen und zu erproben, bevor das endgültige Projekt bearbeitet wird.

An den Anfang dieses Abschnittes wurde die Frage nach dem Motiv gestellt, das den Wunsch auslöste, eine Regelungsanlage vorzusehen. Dieses Motiv bestimmt entscheidend den Lösungsweg, den zulässigen Aufwand, die erforderliche Sicherheit der Geräte und Schaltungen wie auch die gesamte Konzeption. Im Vordergrund stehen in diesem Zusammenhang immer wieder folgende Forderungen:

- a) Einsparung von Arbeitskräften;
- b) Qualitätsverbesserung der Produkte;
- c) Schutz von Anlagen vor unzulässigen Betriebszuständen;

- d) höchstmögliche Auslastung einer Anlage;
- e) Erhöhung der Betriebssicherheit;
- f) Entlastung der Menschen von besonderen physischen oder psychischen Einflüssen am Arbeitsplatz;
- g) Verbesserung des Wirkungsgrades von Produktionsprozessen und Arbeitsvorgängen;
- h) Beherrschung extrem schneller Vorgänge;
- i) zentrale Überwachung und Steuerung einer Produktion;
- j) automatische Erfassung und Berechnung von Werten für statistische Zwecke.

Anzustreben ist von der Projektierung her, daß neben der Hauptforderung des Kunden möglichst noch weitere der genannten Gesichtspunkte durch die Regelungsanlage erfüllt werden können.

1.2. Abschätzung der Realisierbarkeit

Bei der Untersuchung der Lösungsmöglichkeit einer gestellten Regelungsaufgabe muß sich der Projektant zunächst einen Einblick in die Technologie der künftigen Regelstrecke verschaffen. Besteht Klarheit über die Meßbarkeit der benötigten Regelgrößen, so ist danach festzustellen, durch welche Störgrößen die Regelgrößen beeinflußt werden, wo die Angriffspunkte der Störgrößen zu suchen sind und in welcher Art, periodisch, sprungförmig oder auch impulsartig, diese Störgrößen wirken. Weiter ist in Betracht zu ziehen, durch welche Stellgröße man diesen Störgrößen entgegenwirken kann. Dabei ist es zweckmäßig, sofern bereits eine Handregelung vorhanden ist, festzustellen, wie diese Handregelung vorgenommen wird, welche Meßgrößen vom Bedienungspersonal neben der Regelgröße noch beachtet werden und wo eine Verstellung vorgenommen wird. Bei einer derartigen Untersuchung läßt sich dann auch meist in Erfahrung bringen, ob der Stellbereich groß genug ist, ob die Anlage überhaupt über genügende Reserven verfügt, um allen Störungen entgegenwirken zu können, und wodurch gefährliche Betriebssituationen eintreten können.

Mit diesen Kenntnissen ist bereits eine Abschätzung des Lösungsweges möglich. Der Projektant wird dabei von dem ihm zur Verfügung stehenden Gerätesortiment ausgehen. In diesem Zusammenhang sind die Einflußfaktoren: verlangte Genauigkeit, mögliche Hilfsenergie, Leistungsvermögen der Stelleinrichtungen und Beständigkeit der Geräte gegenüber aggressiven Medien unter anderen in Betracht zu ziehen.

An Hand des technologischen Prinzipschaltbildes der Anlage können dann die vorhandenen, möglichen oder auch zusätzlich notwendigen Meßstellen und Stellorte eingetragen werden. Darauf baut sich der erste Entwurf eines Signalfußbildes auf, das den Wirkungszusammenhang zwischen den Meßstellen, Reglern, Stelleinrichtungen, Rückführungen und sonstigen Hilfeinrichtungen darstellt. Sind die notwendigen Meßmethoden bekannt, gibt es geeignete Meßwertwandler für die benötigten Meßgrößen, so ist auch meist die Regelungsaufgabe zu lösen. Schwieriger oder auch unlösbar werden die Probleme, wenn keine geeigneten Betriebsmeßgeräte existieren oder nur Labormeßgeräte für das betreffende Meßproblem vorhanden sind.

Von seiten der Regelstrecke selbst können weitere Schwierigkeiten in Erscheinung treten, die mit einem ungünstigen oder variablen Zeitverhalten, mit einer nicht eindeutigen Zuordnung zwischen Stell- und Regelgröße, mit einer starken Nichtlinearität oder auch mit Mehrfachstörungen im ursächlichen Zusammenhang stehen.

Aus all diesen Komponenten läßt sich, entsprechende Erfahrung vorausgesetzt, ein Urteil darüber ableiten, ob die vom Kunden gestellten Forderungen erfüllbar sind. Stellen sich dabei unüberwindlich scheinende Probleme ein, so bleibt immer noch die Möglichkeit einer Umstellung der vorhandenen oder projektierten technologischen Anlage oder sogar der Übergang auf ein anderes technologisches Verfahren, das einer Automatisierung besser zugänglich ist. Das typische Beispiel dafür ist der Übergang von der diskontinuierlichen oder chargenweisen Produktion zur kontinuierlich fließenden Produktion.

Auch die räumlichen Bedingungen dürfen bei diesen Untersuchungen nicht außer acht gelassen werden. Die Unterbringung der Geräte vor Ort, in Gebäuden oder im Freien, die Zentralisierung oder Dezentralisierung der Bedienungs- und Überwachungsstände ist für die Geräteauswahl, den Raumbedarf, die Kosten, die nötigen Bedienungs- und Wartungskräfte von entscheidender Bedeutung.

Zusammenfassend bleibt festzustellen, daß die durchgängige Automatisierung älterer Produktionsanlagen oft auf große Schwierigkeiten stößt. Es bleibt dort meist nur übrig, geeignete Teilprozesse mit Meß-, Steuerungs- und Regelungsgeräten zu versehen, wobei die Tendenz besteht, den wirtschaftlichen Aufwand gering zu halten, indem Direktregler, Fallbügelregler oder andere unstetige Regler eingesetzt werden und auf zentrale Warten verzichtet wird. Grundsätzlich anders liegen die Bedingungen für neue Investitionsvorhaben, die, wenn sie mit einer automatisierungsgeordneten Technologie versehen werden, auch eine umfassende Anwendung von Meß-, Steuerungs-, Regelungs- und Auswertungsgeräten zulassen. Es ist hier unumgänglich, daß bereits bei der technologischen Projektierung und beim Maschinen- und Apparatebau die automatisierungstechnische Seite berücksichtigt wird, was in genügender Breite nur möglich ist, wenn regelungs- und steuerungstechnische Kenntnisse zum Allgemeinwissen jedes Ingenieurs gehören.

1.3. Ökonomische Betrachtung

Die Ingenieur Tätigkeit allgemein und die Projektierung speziell beinhaltet ihrem Wesen nach neben der Technik eine ökonomische Komponente. Diese Tendenz äußert sich darin, daß angestrebt wird, bestimmte Eigenschaften eines Gerätes, einer Maschine oder Anlage zu einem Maximum und andere zu einem Minimum zu gestalten. So sollen in der Regel der Wirkungsgrad, die Sicherheit, die Anwendbarkeit, die Einfachheit, die Übersichtlichkeit, die Genauigkeit, die Lebensdauer und die Leistungsfähigkeit der Maximalbedingung genügen, während die Kosten, das Volumen, das Gewicht, die Wartung und ähnliches der Minimalbedingung gehorchen sollen. Diese Optimierungsfragen sind sehr schwierig zu behandeln, da die angestrebten Eigenschaften nicht voneinander isoliert behandelt werden können. Die Betonung und Verbesserung einer Eigenschaft wirkt

sich häufig negativ auf andere Komponenten aus. Will man sich nicht nur auf das subjektive, auf Intuition beruhende Abwägen der Eigenschaften und ihrer Bewertungsmaßstäbe verlassen, so gibt es folgende Möglichkeiten zur annähernd objektiven Bewertung:

- a) Anfertigung von zwei oder drei Varianten des Projektes durch verschiedene Bearbeiter;
- b) Anfertigung von zwei Varianten des Projektes durch den gleichen Bearbeiter und Diskussion der Unterlagen vor einem geeigneten Kreis von Fachleuten.
- c) Anfertigung eines Projektes nach einer mit dem Kunden abgestimmten Aufgabenstellung, in der die zu beachtenden Eigenschaften möglichst konkret festgelegt werden.

Festzustellen, ob und in welchem Umfang die im Abschn. 1.1 genannten Zielsetzungen ökonomisch gerechtfertigt sind, ist in erster Linie Aufgabe des Investitionsträgers oder seines Beauftragten. Der Projektant der Automatisierungsanlage kann dabei meist nur eine beratende Funktion ausüben. Seine Hauptaufgabe liegt darin, innerhalb des ökonomisch gesetzten Limits die technischen Hilfsmittel so einzusetzen, daß eine vollkommene, dem Stand der Technik entsprechende, betriebssichere und wartungsarme BMSR-Anlage¹⁾ entsteht. Die Betriebssicherheit und damit der Wartungsaufwand sind im Rahmen der Wirtschaftlichkeituntersuchung ein entscheidender Faktor, weil die damit verbundenen Lohn-, Material- und Produktionsausfallkosten als ständige Belastung auf der Anlage ruhen. Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung und die Ermittlung des vertretbaren Aufwandes für Zwecke der Automatisierung erscheint es angebracht, von den im Abschn. 1.1 genannten Zielsetzungen auszugehen. Je nachdem, welche Komponente im Vordergrund steht, ist die Berechnung mehr auf die Lohnkosten der einzusparenden Bedienungskräfte, die Investitionssumme der Produktionsanlage, den Produktionswert selbst oder auch auf die durch Qualitätsmängel des Produktes in folgenden Verarbeitungstufen entstehenden Kosten aufzubauen.

2. Erarbeitung der technischen Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung ist die Basis für den Projektierungsvertrag und damit die Arbeitsrichtlinie für den Projektanten der BMSR-Anlage. Es ist darum notwendig, gewisse Untersuchungen vor dem Abschluß des Hauptvertrages durchzuführen, deren Finanzierung zweckmäßig in einem Vorvertrag gesichert wird. Dabei fallen Arbeiten bei beiden Vertragspartnern an, weil die Ausarbeitung einer guten Aufgabenstellung nur in Gemeinschaftsarbeit möglich ist. Einerseits sind dem künftigen Betreiber die bestehenden technischen Möglichkeiten darzulegen, andererseits muß sich der Projektant dagegen sichern, überspitzte oder unlösbare Forderungen gestellt zu bekommen, die, wenn erst einmal im Vertrag enthalten, später zu unfruchtbaren Auseinandersetzungen führen können. In den folgenden Abschnitten wird auf die mitunter recht umfangreichen Untersuchungen

¹⁾ BMSR ist die Abkürzung für „Betriebs-Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik“.

zur Fixierung der Aufgabenstellung näher eingegangen. Die anzuwendenden Arbeitsmethoden hängen dabei allerdings davon ab, ob es sich um Rekonstruktionsmaßnahmen an einer bestehenden Anlage, um Neubauten ohne vergleichbare Vorbilder oder auch um ein Produktionsverfahren handelt, für das Vorbilder bestehen, die gewisse Analogieschlüsse zulassen.

2.1. Studium des Objektes

Bei der Vielzahl der Produktionsverfahren in allen möglichen Zweigen einer entwickelten Volkswirtschaft ist es meist unmöglich, einen Regelungstechniker für die Projektierung zu finden, der ein versierter Fachmann für die speziell gerade zu bearbeitende Aufgabe ist. Es sollte zwar angestrebt werden, daß eine gewisse Spezialisierung der Projektierungsingenieure für BMSR-Einrichtungen erreicht wird, jedoch entbindet auch dies nicht von einem eingehenden Studium des zur Bearbeitung stehenden Gesamtprojekts.

Die Einarbeitung in das Produktionsverfahren beginnt zweckmäßig an Hand des technologischen Prinzipschaltbildes der Anlage. Dabei ist wichtig, sich die notwendigen Kenntnisse nicht nur im Selbststudium mittels einer Beschreibung zu verschaffen, sondern einen geeigneten Gesprächspartner zu finden. Das kann entweder der Projektant der technologischen Anlage, der Technische Leiter oder der Betriebsingenieur einer bestehenden Anlage sein. Wenn der Betrieb bereits eine Betriebskontrollabteilung, eine Meß- oder Regelungsgruppe besitzt, ist es immer sehr wertvoll, auch Mitarbeiter dieses Bereiches in die Beratung mit einzubeziehen.

Der Beratung über das Produktionsprinzip, die besonderen Eigenschaften des Verfahrens und die wesentlichen meß- und regelungstechnischen Notwendigkeiten sollte unbedingt eine eingehende Besichtigung der Anlage selbst oder eines ähnlichen Werkes folgen, um die prinzipielle Vorstellung abzurunden und einen konkreten Eindruck von den Umweltbedingungen, den Dimensionen und räumlichen Verhältnissen zu erlangen. Dabei spielen bei der späteren Projektierung besonders diese Umweltbedingungen für die zur Verwendung kommenden Geräte eine ausschlaggebende Rolle. Worauf ist dabei besonders zu achten ?

- a) Betriebsklimatische Verhältnisse (Innenraumanlage — Freiluftanlage);
- b) Extremwerte von Raumtemperatur und Feuchtigkeit;
- c) Einwirkungen von Gasen, Stäuben und Dämpfen;
- d) Aggressivität und Explosionsneigung der eingesetzten Medien;
- e) Entfernungen zwischen der Anlage und den Bedienungsständen bzw. der Warte;
- f) Aufbau der zentral unterzubringenden Geräte und Hilfseinrichtungen in vorhandenen oder vorgesehenen Räumen;
- g) Zur Verfügung stehenden Hilfsenergiequellen (Druckluft, Elektroenergie) sowie deren Belastbarkeit, Zuverlässigkeit und Qualität;
- h) Mechanisierungsgrad der Anlage;
- i) Art der Produktionsweise (kontinuierlich, in Chargen oder als Stückgutfertigung);
- j) Arbeitsrhythmus (ein- oder mehrschichtig).

Die Feststellung dieser und anderer wichtigen Produktionsbedingungen ist unumgänglich. Auch wenn keine Besichtigung möglich ist, weil es sich vielleicht um eine noch im Projektierungsstadium befindliche Anlage handelt, müssen diese Fragen geklärt werden. Die Projektierungsunterlagen mit Anlagenschema, Leitungsplänen, Stoff- und Energiebilanzen, Berechnungen und Annahmen, Grundrissen und Querschnittzeichnungen müssen dann das visuelle Bild ersetzen. Das ist zwar schwieriger zu übersehen, aber dafür bietet sich der Vorteil, auf die Gestaltung der Anlage vom regelungstechnischen Standpunkt aus noch Einfluß nehmen zu können.

Die Berücksichtigung regelungstechnischer Notwendigkeiten beim Entwurf von Aggregaten, Maschinen und Produktionsverfahren bezüglich Zeitverhalten, Eingriffsmöglichkeit sowie Meßbarkeit der in Frage kommenden Regelgrößen ist von maßgebender Bedeutung für den späteren Aufwand an Automatisierungsmitteln und die erreichbaren Ergebnisse. So, wie Mathematik, Physik und Elektrotechnik zum Grundwissen jedes Ingenieurs gehören, verlangt die künftige Technik darüber hinaus auch Kenntnisse der Automatisierungstechnik in den Entwicklungs- und Projektierungsstellen der Produktionsmittel herstellenden Industriezweige. Die heute noch übliche Methode der nachträglichen Installierung der BMSR-Geräte an einem technologischen Aggregat ist keine zweckmäßige Lösung. Eine gewisse Grundausstattung in regelungs- und steuerungstechnischer Hinsicht sollte vom Herstellerbetrieb des Aggregats mitgeliefert und garantiert werden. Die Normierung der elektrischen, pneumatischen und hydraulischen Steuersignale gestattet es dann später, Ergänzungen, Verknüpfungen und Aufschaltung von Führungsgrößen zusätzlich vorzunehmen und an die betrieblichen Erfordernisse anzupassen.

2.2. Vereinbarung der Meß- und Regelgrößen

An Hand des technologischen Prinzipschemas des zu bearbeitenden Projektes werden in Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber die für eine Überwachung bzw. Regelung notwendigen Meßgrößen eingetragen. Bei dieser Gelegenheit sind für jede Meßstelle folgende technische Daten festzustellen und zu vermerken:

- a) *Physikalische Größe*, die gemessen werden soll (Temperatur, Druck, Durchfluß, Leistung, Drehzahl, pH-Wert, Leitfähigkeit, Dichte usw.);
- b) *Meßbereich*, in dem die physikalische Größe überwacht werden soll;
- c) *Grenzwerte*, die betrieblich auftreten können;
- d) *Genauigkeitsanforderungen*;
- e) *Nebenbedingungen*, unter denen die Messung erfolgen wird (Absolutdruck bei Durchflußmessungen, Pulsation bei Druckmessungen, Temperatur bei Dichtemessungen usw.);
- f) *Eigenschaften und Art* des Mediums, in dem die Messung erfolgen soll (Wasser, Dampf, Schwefelsäure, Alkohol usw.);
- g) *Meßprinzip*, das in Frage kommt oder vom Kunden bevorzugt wird;
- h) *Einbauort* des Meßfühlers;

- i) *Verwendungszweck* der Meßgröße (Anzeige, Registrierung, Zählung, Betriebskontrollanlage, Regelung oder Steuerung), mit Anzeige oder Registrierung vor Ort, in der Warte oder an beiden Stellen;
- j) *Sicherstellung* des Meßwertes (Fehlermeldung durch Grenzwertsignal oder Aufbau von zwei voneinander unabhängigen Meßeinrichtungen).

Bei der Durchsprache der notwendigen Meßstellen erkennt der geübte Projektant von BMSR-Anlagen bereits den Schwierigkeitsgrad der Realisierung. Auf Grund seiner Kenntnis der Gerätesortiments und der an früheren Projekten gesammelten Erfahrungen ist er in der Lage, seinen Einfluß geltend zu machen, um z. B. überspitzte Genauigkeitsforderungen zu entkräften oder für die Regelung nicht geeignete Meßverfahren zu umgehen. Noch nicht erprobte Meß- oder Regelverfahren sollten in ein Projekt nicht aufgenommen werden, sondern den zuständigen Industrieeinrichtungen zur Bearbeitung übergeben werden. Um den organischen Aufbau der Anlage, speziell der Warte, nicht zu stören, ist es unter Umständen angebracht, entsprechenden Platz vorzusehen und, wenn der Kunde es wünscht, auch Geräte dafür zu projektieren. Eine Garantie für die Funktionsfähigkeit und Betriebssicherheit kann in diesen Fällen jedoch nicht gegeben werden.

2.3. Feststellung der Störgrößen und Vereinbarung der Stellgrößen

Den Störgrößen in einem zu projektierenden Regelkreis wird im allgemeinen viel zu wenig Beachtung geschenkt. Dabei sind das die Größen, die eine Regelung überhaupt erst notwendig machen. Das liegt daran, daß die Störgrößen häufig nicht direkt meßbar sind und auf nicht leicht überschaubaren Wegen in die Regelstrecke gelangen, wie z. B. die Falschlufte bei einer Verbrennungsregelung. Von der Vielzahl der auftretenden Störungen sind die meisten jedoch von untergeordneter Bedeutung, weil entweder ihr Einfluß nur unwesentlich auf die Regelgröße einwirkt oder die Änderungsgeschwindigkeit so klein ist, daß sie für den Regelkreis keine Belastung darstellen. Es verbleiben dann oft ein oder zwei bedeutende Störgrößen, über deren Verhalten und Angriffspunkte an der Regelstrecke nähere Ermittlungen notwendig sind. Handelt es sich um die Rekonstruktion einer älteren Anlage, so wird man durch Beobachtung des Betriebsgeschehens und durch Befragung des Betriebspersonals sicher Aufschlüsse darüber bekommen, welche Störgrößen als beachtenswert gelten und wie diese sich quantitativ auf die konstant zu haltende Meßgröße auswirken. Besteht direkt oder indirekt eine Möglichkeit, die gefährlichen Störgrößen vor dem Eintritt in die Strecke zu messen, so sollte unbedingt davon Gebrauch gemacht werden. Die Güte der Regelung läßt sich in dynamischer Hinsicht wesentlich verbessern, wenn eine Störgrößenaufschaltung angewendet werden kann oder die Störgrößen selbst ausgeregelt werden. Das trifft besonders dann zu, wenn zwischen Angriffspunkt der Störgröße und Meßort der Regelgröße wesentliche Verzögerungs- oder Speicherglieder auftreten.

Besteht Klarheit über die Angriffspunkte und Auswirkungen der wesentlichen Störgrößen, so ist als nächstes zu untersuchen, wie und wo Gegenwirkungen erzeugt werden können. Solche Gegenwirkungen, die in der Lage sind, einen Störeinfluß zu kompensieren, werden Stellgrößen genannt.

Geeignete Stellgrößen müssen gewisse Bedingungen erfüllen, wenn der beabsichtigte Zweck erreicht werden soll. Die Auswahl ist dabei oft leider nicht sehr groß, weil die Technologie des Objektes bestimmte Stellorte und Stellgrößen festlegt.

Auch in Hinsicht auf die Auslegung der Steleinrichtungen sind die Störgrößen zu beachten. Handelt es sich um Festwertregelungen, bei denen bekanntlich der Sollwert konstant bleibt, so ist der notwendige Stellbereich direkt durch die auf die Regelstrecke einwirkenden Störgrößen bestimmt. Ist die gelegentliche oder ständige Verstellung des Sollwertes notwendig, wie bei Programmregelungen oder Folgeregelungen, so wird der notwendige Stellbereich durch den Sollwertbereich und die Amplituden der Störgrößen bestimmt.

2.4. Übergangsfunktionen der Strecke

Zwei Wege führen zur Ermittlung der Übergangsfunktion der Strecke, der Grundlage jeder regelungstechnischen Betrachtung in der Verfahrenstechnik: entweder die meßtechnische Aufnahme der Funktion an der vorliegenden und bereits in Betrieb befindlichen Strecke oder die Berechnung dieser Funktion aus den technologischen Daten der Anlage.

Auf den ersten Blick erscheint die praktische Messung der Übergangsfunktion ein einfacher Vorgang zu sein. Aber wie soll der Projektant selbst an einer bereits lange in Betrieb befindlichen Anlage die Messung ausführen? Dazu wäre eine quantitative Messung des Stellstroms, das ist der in die Strecke eintretende Massen- oder Energiestrom, und der künftigen Regelgröße notwendig. Die dazu erforderlichen Geräte sind im Projektstadium entweder nicht vorhanden, oder der provisorische Einbau ist zu aufwendig.

Von Sonderfällen abgesehen, wird sich der Projektant seine Information über das Verhalten der Regelstrecke über die für den Handbetrieb der Anlage installierten Meßinstrumente beschaffen müssen. Sofern die künftige Regelgröße registriert oder angezeigt wird, läßt sich mittels einer möglichst sprunghaften Verstellung des Stellstroms das Zeitverhalten der Strecke erkennen. Auch wenn der Änderungsbetrag des Stellstroms nicht bekannt ist, kann so das Zeitverhalten ermittelt werden. Dabei ist, wenn kein Schnellschreiber verwendet werden kann, den Anzeigeeinstrumenten wegen ihrer geringeren Reibung und besseren Ablesbarkeit der Vorzug zu geben.

Von einer ebenen Instrumentenskala lassen sich so mit einem auf die Glasplatte gelegten Papierstreifen, auf dem in bestimmten Zeitabständen die Zeigerstellungen markiert werden, die Meßwerte abnehmen. Bei etwas Übung ist es möglich, jede Sekunde eine Markierung anzubringen, wenn man sich den Takt geben läßt.

Die Aufnahme der exakten Übergangsfunktion setzt eine sprungförmige Anregung der Strecke am Stellort voraus. Leider ist es in den meisten Fällen nicht zulässig oder nicht möglich, die Stellgröße sprungartig zu verstellen. Die realisierbaren Anregungsfunktionen sind fast immer „Rampenfunktionen“, weil man die integral wirkenden Steleinrichtungen nur mit einer endlichen Geschwindigkeit bewegen kann (Bild 1). Dieser Sachverhalt hat jedoch zur Folge, daß die erhaltene Übergangsfunktion sowohl von der Rampenanstiegszeit T_y wie auch von der Rampenamplitude A_y abhängig

ist. Theoretisch ist es möglich, jede durch eine definierte Anregung erhaltene Übergangsfunktion auf die „Sprung-Übergangsfunktion“ umzurechnen. Zur Vermeidung dieses nicht unerheblichen Aufwandes ist folgendes zu beachten:

- Die Änderungsgeschwindigkeit $\frac{A_y}{T_y}$ ist möglichst groß und die Amplitude A_y möglichst klein zu halten.
- Wenn die Rampenanstiegszeit $T_y < 0,1 T_a$ ist, kann der Fehler vernachlässigt werden (T_a Anlaufzeit).
- Ist $0,1 T_a < T_y < 0,3 T_a$, so erhält man die „Sprung-Übergangsfunktion“ mit genügender Genauigkeit, wenn man eine Scherung der Funktion vornimmt (Bild 2).
- Ist $T_y > 0,3 T_a$, so ist es notwendig, die erhaltene „Rampen-Übergangsfunktion“ umzurechnen bzw. mittels eines Analogrechners experimentell auszuwerten und zu korrigieren.

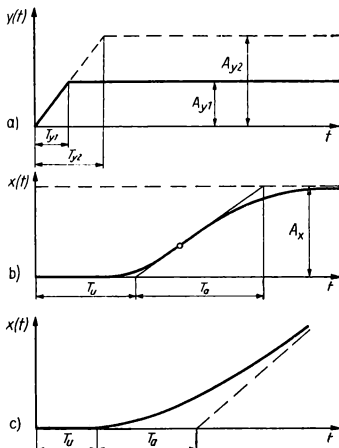


Bild 1. Abhängigkeit aufgenommenener Übergangsfunktionen vom Stellsignal

- Stellfunktion;
- Übergangsfunktion einer Strecke mit Ausgleich;
- Übergangsfunktion einer Strecke ohne Ausgleich

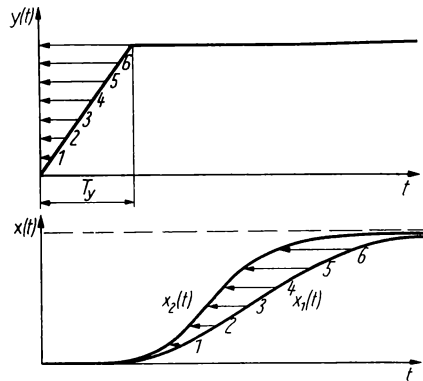


Bild 2. Korrektur einer „Rampen-Übergangsfunktion“ zur „Sprung-Übergangsfunktion“

- aufgenommene Funktion;
- korrigierte Funktion

Durch eine Stellübergangsfunktion ist die zu untersuchende Regelstrecke häufig nicht genügend gekennzeichnet. Es ist zweckmäßig, nach Erreichen des Beharrungswertes dem positiven Stellsprung einen negativen folgen zu lassen. Dabei kann festgestellt werden, ob das Zeitverhalten unabhängig vom Vorzeichen der Stellgröße ist. Bei der Temperaturregelung von industriellen Öfen treten derartige Unterschiede häufig auf. Wenn möglich, sollten die Übergangsfunktionen auch noch bei extremen Werten der Haupt-

Störgröße aufgenommen werden, um in Erfahrung zu bringen, ob die Strecke im zu erwartenden Arbeitsbereich als linear anzusehen ist. An Wärmeaustauschern, wie Dampfüberhitzern und Kühlern, wird man eine starke Abhängigkeit der Regelstreckenparameter von der Durchflußmenge feststellen. Das betrifft in erster Linie die Zeitkonstanten der Übergangsfunktion. Die Anpassung des Reglers an derartige Strecken muß dann dem ungünstigsten Zustand Rechnung tragen. Als ungünstigster Zustand ist im allgemeinen der zu betrachten, dessen Stellübergangsfunktion den kleinsten Wert für das Verhältnis von Anlaufzeit T_a zur Verzugszeit T_v besitzt. Eine optimale Anpassung des Reglers ist dann nur für diesen Zustand möglich. Ausregelzeit und Regelfläche sind bei derartigen nichtlinearen Strecken von der Störgröße abhängig. Durch Wahl einer geeigneten statischen Kennlinie der Stelleinrichtung läßt sich eine gewisse Kompensation dieser Fehlanspassung erreichen, worauf später noch eingegangen wird.

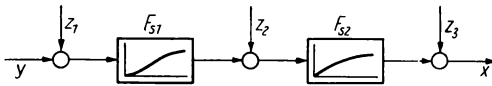


Bild 3. Die möglichen Angriffspunkte der Störgröße an einer Regelstrecke

Für die Abschätzung der erreichbaren Regelgenauigkeit genügt die Stellübergangsfunktion allein nicht. Dazu ist die Kenntnis der Störübergangsfunktion notwendig. Nur wenn die Hauptstörgröße den gleichen Angriffspunkt wie die Stellgröße hat, sind beide Übergangsfunktionen bezüglich ihrer Zeitkonstanten gleich. Die Übertragungsfaktoren sind dagegen fast immer unterschiedlich, weil die Störgröße häufig eine andere physikalische Dimension besitzt als die Stellgröße.

Die Auswertung von aufgenommenen Übergangsfunktionen dient der Gewinnung von typischen Konstanten der Regelstrecke. Diese Konstanten müssen so bestimmt werden, daß es mit ihrer Hilfe möglich ist, den geeigneten Regler auszusuchen und die günstigen Einstellparameter des Reglers zu berechnen. Um diese Optimierungsaufgabe zu lösen, sind gewisse Normierungen und Vereinfachungen notwendig, die sowohl die Streckenparameter als auch die verschiedenen Streckentypen betreffen.

Die aufgenommene Übergangsfunktion kann bezüglich ihrer Zeitkonstanten unabhängig von gewähltem Maßstab und der Dimension der Ordinate ausgewertet werden. Für die Bestimmung des Proportionalfaktors K_S oder des Integrationsfaktors K_{IS} ist es jedoch unbedingt notwendig, festzuhalten, mit welcher Dimension und welcher Einheit der dazugehörige Stellsprung ausgeführt wurde¹⁾. Es ist sehr wichtig, sich einzuprägen, daß K_S und K_{IS} immer Verhältniswerte der Dimensionen und Einheiten der Regelgröße zur Stellgröße sind. Es hat sich als zweckmäßig herausgestellt, die Übertragungsfaktoren mit ihren wirklichen physikalischen Einheiten auszuweisen und zu verwenden und nicht mit Prozentangaben zu operieren. Dann behalten die regelungstechnischen Betrachtungen immer eine überschaubare Verbindung zur Realität, und der physikalische Inhalt der ver-

¹⁾ In den Bänden „Grundbegriffe der Automatisierungstechnik“ und „Regelkreise mit I- und P-Reglern“ von G. Schwarze sind diese Begriffe näher erläutert.

wendeten Parameter ist weiterhin erkennbar. Sich einschleichende Rechen- und Konzeptionsfehler lassen sich durch Dimensionsproben und Vergleich mit den realen Größenordnungen bei dieser Methodik leichter ausmerzen. Im Rahmen dieses Bandes ist eine sinnvolle Beschränkung der in Betracht zu ziehenden Streckentypen erforderlich. Es hat sich für den überwiegenden Teil der Projektierungsarbeiten als ausreichend herausgestellt, die Auswertung der Übergangsfunktionen für folgende Streckentypen zu behandeln:¹⁾

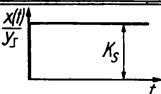
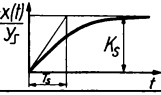
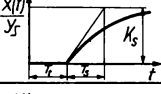
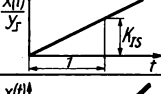


Glied	Übergangsfunktion	Frequenzgang
P		$F(j\omega) = K_S$
PT_S		$F(j\omega) = \frac{K_S}{1+j\omega T_S}$
$PT_T T_S$		$F(j\omega) = \frac{K_S \cdot e^{-j\omega T_T}}{1+j\omega T_S}$
I		$F(j\omega) = \frac{K_{IS}}{j\omega}$
IT_S		$F(j\omega) = \frac{K_{IS}}{j\omega(1+j\omega T_S)}$
IT_T		$F(j\omega) = \frac{K_{IS} \cdot e^{-j\omega T_T}}{j\omega}$

Bild 4. Die wesentlichen typischen Regelstrecken

- | | |
|---|-------------------|
| a) proportionale Strecke | P -Glied |
| b) proportionale Strecke mit Verzögerung 1. Ordnung | PT_S -Glied |
| c) proportionale Strecke mit Verzögerung 1. Ordnung und Totzeit | $PT_S T_T$ -Glied |
| d) integrale Strecke | I -Glied |
| e) integrale Strecke mit Verzögerung 1. Ordnung | IT_S -Glied |
| f) integrale Strecke mit Totzeit | IT_T -Glied |

Diese Streckentypen und die dazugehörigen idealen Sprung-Übergangsfunktionen sowie die dazugehörigen Frequenzgänge sind in Bild 4 dargestellt.

¹⁾ An Stelle von PT_S - oder IT_S -Glied ist neuerdings auch die Bezeichnung PT_1 - oder IT_1 -Glied üblich. Die Indexzahl kennzeichnet in dieser Schreibweise die Anzahl der Verzögerungszeitkonstanten.

Während die Bestimmung der Streckenparameter für die P -, PT_S -, IT_S - und I -Typen keine Schwierigkeiten bereitet, ist es für die PT_tT_S - und IT_tT_S -Typen ohne Hilfsmittel nur noch dann möglich, wenn diese in der dargestellten idealen Form auftreten. Die realen Übergangsfunktionen sind jedoch meist so verschliffen, daß Totzeit und Zeitkonstante nicht mehr auf den ersten Blick erkennbar sind. Es besteht dann die Aufgabe, eine „Ersatztotzeit“ und eine „Ersatzzeitkonstante“ so zu bestimmen, daß die damit verbundene Vernachlässigung weiterer Zeitkonstanten in der Regelstrecke zulässig bleibt. Unter zulässigen Fehlern sei hier eine Toleranz von $\pm 10\%$ für die Bestimmung der Reglerparameter und der Regelgenauigkeit verstanden.

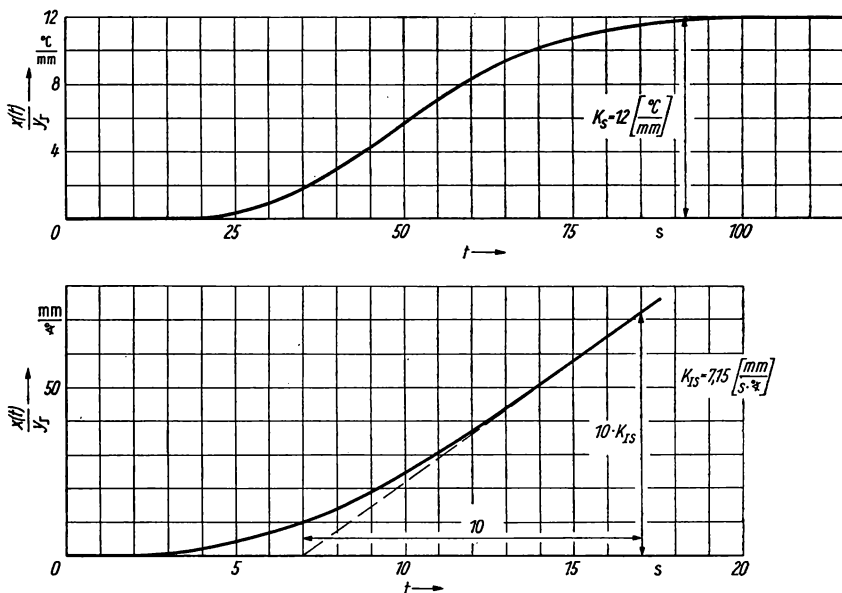


Bild 5. Zahlenmäßige Auswertung aufgenommener Übergangsfunktionen

Im Bild 5 sind zwei experimentell aufgenommene Übergangsfunktionen dargestellt, deren Ersatzzeitkonstanten ermittelt werden sollen.

Für die Strecke mit Ausgleich geht man so vor, daß man sich auf Transparentpapier eine Schar von e-Funktionen der Art

$$y = C \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

mit T als Parameter aufzeichnet. Die Größe C ist dabei an und für sich beliebig. Entscheidet man sich für $C = 100$ mm, so hat man die zu analysierende Übergangsfunktion so umzuzeichnen, daß der Ordinatenwert K_S im Diagramm ebenfalls 100 mm entspricht. Legt man dann die auf Transparentpapier gezeichnete Kurvenschar auf die Übergangsfunktion, so kann man durch Verschiebung in Richtung der Zeitachse eine e-Funktion

finden, die der Übergangsfunktion möglichst gut entspricht. Eine Deckungsgleichheit wird jedoch in der Regel nicht zu erzielen sein. Da es sich um ein Näherungsverfahren handelt, sucht man durch Augenschein zu erreichen, daß die im Bild 7 angelegten Fehlerflächen ober- und unterhalb der Ersatzfunktion zusammen zu einem Minimum werden. Die Ersatzzeitkonstante T_S und die Ersatztotzeit T_t sind danach unmittelbar im Zeitmaßstab der Übergangsfunktion abzulesen.

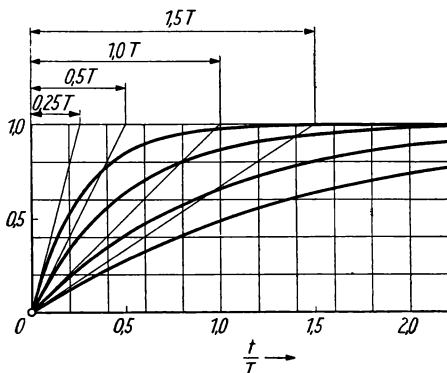


Bild 6. Kurvenschar von e-Funktionen $y = C(1 - e^{-\frac{t}{T}})$ mit T als Parameter

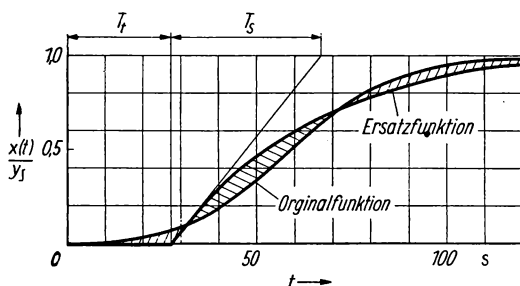


Bild 7. Ermittlung einer definierten Ersatzfunktion

Die im Bild 8 gezeigte I-Strecke ist ohne wesentliche Hilfskonstruktionen auswertbar. Es ist lediglich eine Asymptote an die Funktion zu legen. Der Schnittpunkt von Asymptote und Abszisse entspricht der Summe von $(T_t + T_S)$. Die Totzeit T_t ist durch den Ablösepunkt der Funktion von der t -Achse festgelegt. Ist $T_t > T_S$, so kann die Strecke ohne wesentlichen Fehler auch als IT_t -Glied betrachtet werden. Dann ist für T_t der Asymptotenschnittpunkt mit der Abszisse einzusetzen.

Es können natürlich gelegentlich Übergangsfunktionen auftreten, die mit dem beschriebenen Auswertungsprinzip nicht erfaßbar sind. Für diese Fälle sei auf die Literatur [18] [19] [27] verwiesen, die Hinweise auch auf andere Auswertungsverfahren enthält.

Am Anfang dieses Abschnitts wurde von der Möglichkeit gesprochen, Übergangsfunktionen aus den technologischen Daten einer Anlage zu berechnen. Es sei hier darauf hingewiesen, daß diese Möglichkeit zwar theoretisch besteht, jedoch mit einem erheblichen Rechenaufwand verbunden ist. Der Regelungstechniker ist dazu allein, von einfachen Fällen abgesehen, kaum in der Lage. Als Voraussetzungen gehören dazu genaue technologische Kenntnisse des Verfahrens, wie sie bestenfalls dem Entwickler und Konstrukteur der Anlage zur Verfügung stehen. Neben den geometrischen Abmessungen des Objektes werden dazu benötigt: Stoffflußübersichten,

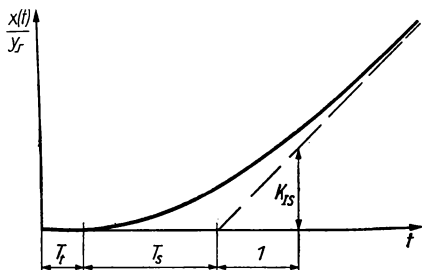


Bild 8. Bestimmung der Zeitkennwerte einer integralen Strecke

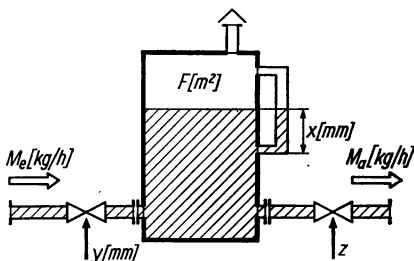


Bild 9. Schema einer Standregelstrecke

Materialkennziffern, thermodynamische Kennziffern, Aggregatzustände der Medien und die physikalischen Gesetze, nach denen der Prozeß abläuft. Derartige Untersuchungen übersteigen normalerweise die Möglichkeiten eines Automatisierungsprojektes. Wenn die notwendigen Kennwerte vorliegen, sollten derartige Untersuchungen an mit Analog- oder Digitalrechnern ausgerüstete Rechenzentren gegeben werden. Andererseits sei bemerkt, daß die Größenordnung der Streckenparameter in einfachen Fällen auch für den Projektanten der BMSR-Anlage abschätzbar ist.

So läßt sich der Integrationsfaktor einer Standregelstrecke aus der Differenz der zu- und abfließenden Mengen unter Berücksichtigung des freien Querschnittes am Meßort elementar berechnen.

1. Beispiel

Der Integrationsfaktor K_{IS} einer Standregelstrecke soll bestimmt werden (Bild 9). Bekannt sind folgende technische Daten der Strecke:

die Oberfläche der Flüssigkeit auf der Niveauhöhe des Meßbereichs

$$F = 1,2 \text{ m}^2$$

der mittlere Zufluß

$$M_e = 5600 \text{ kg/h}$$

die Dichte der Flüssigkeit

$$\varrho = 860 \text{ kg/m}^3$$

der Übertragungsfaktor des Stellgliedes $K_{SG} = \frac{\Delta M_e}{\Delta y} = \frac{1000}{30} \frac{\text{kg}}{\text{h} \cdot \text{mm}}$

Mit diesen Werten läßt sich ein Volumenvergleich ansetzen.

$$\Delta x \cdot F = \Delta t \frac{\Delta M_e}{\varrho}$$

Andererseits ist mit Hilfe der Definitionsgleichung für den Integrationsfaktor

$$K_{IS} = \frac{\Delta x / \Delta t}{\Delta y}$$

der Lösungsweg gegeben.

$$K_{IS} = \frac{\frac{\Delta M_e}{\varrho \cdot F}}{\frac{\Delta M_e}{K_{SG}}} = \frac{K_{SG}}{\varrho \cdot F} = \frac{1000}{30 \cdot 860 \cdot 1,2} = 32,3 \frac{\text{mm}}{\text{mm} \cdot \text{h}},$$

$$K_{IS} = \underline{\underline{9,0 \cdot 10^{-3} \frac{\text{mm/s}}{\text{mm}}}}$$

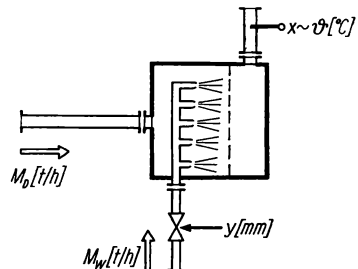


Bild 10. Einspritzkühler

Der so berechnete Integrationsfaktor der Strecke gibt, in Worten ausgedrückt, an, welche Änderungsgeschwindigkeit das Flüssigkeitsniveau annimmt, wenn das Ventil um einen Millimeter verstellt wird. Vorausgesetzt ist dabei, daß die Verstellung vom Beharrungszustand (Zufluß gleich Abfluß) aus vorgenommen wird. Als Eingangsgröße der Regelstrecke ist hierbei die Ventilstellung anzusehen. Oft ist es jedoch zweckmäßiger, nicht die Ventilstellung, sondern den in die Strecke eintretenden Massenstrom als Eingangsgröße zu nehmen, weil über die Auslegung und Art des einzusetzenden Ventils erst in einem späteren Projektierungsstadium Festlegungen getroffen werden. Der Integrationsfaktor K_{IS}^* nimmt dann natürlich einen anderen Zahlenwert und eine andere Dimension an. Beide Kenn-

größen der integralen Regelstrecke stehen mit dem Übertragungsfaktor des Stellgliedes in folgender Relation:

$$K_{IS}^* = \frac{K_{IS}}{K_{SG}} = \frac{9,0 \cdot 10^{-3} \cdot 30}{1000} \frac{\text{mm} \cdot \text{h} \cdot \text{mm}}{\text{s} \cdot \text{mm} \cdot \text{kg}},$$

$$K_{IS}^* = \underline{\underline{2,7 \cdot 10^{-4} \frac{\text{mm/s}}{\text{kg/h}}}}.$$

Als nächstes Beispiel für die näherungsweise Berechnung von Streckenparametern aus den technologischen Daten einer Strecke wird ein Einspritzkühler gewählt, dessen Übertragungsfaktor K_S bestimmt werden soll (Bild 10).

2. Beispiel

Gegeben sind nachstehende Daten:

normal eintretende Dampfmenge	$M_D = 12 \text{ t/h}$
Dampftemperatur	$\vartheta_D = 250 \text{ }^\circ\text{C}$
Dampfdruck	$p_D = 5,0 \text{ kp/cm}^2$
Kühlwassertemperatur	$\vartheta_W = 40 \text{ }^\circ\text{C}$
Temperatursollwert des austretenden Dampfes	$\vartheta_k = 200 \text{ }^\circ\text{C}$

Aus einem *is*-Diagramm oder einer Dampftafel werden die spezifischen Wärmeinhalte von Wasserdampf für 250 und 200 °C sowie von Wasser für 40 °C bei einem Druck von 5,0 kp/cm² entnommen und die Differenzbeträge festgestellt.

$$\Delta i_D = i_{1D} - i_{2D} = 706,8 - 682,2 = 24,6 \text{ kcal/kg},$$

$$\Delta i_W = i_{1W} - i_{2W} = 40,1 - 682,2 = -642,1 \text{ kcal/kg}.$$

Mit diesen Werten läßt sich die notwendige Einspritzwassermenge M_W bestimmen.

$$M_W = \frac{M_D \cdot \Delta i_D}{\Delta i_W} = \frac{12 \cdot 24,6}{642,1} = 0,46 \text{ t/h}.$$

Die stationären Verhältnisse für den Normalzustand sind damit gegeben. Zur Ermittlung des Übertragungsfaktors K_S dieser Strecke genügen wegen der nichtlinearen Abhängigkeit des Wärmeinhaltes von der Temperatur diese Angaben nicht. Es ist festzustellen, welche Temperaturänderung der Regelgröße bei einer kleinen Wassermengenänderung eintritt. Darum werden jetzt noch die Differenzbeträge der Wärmeinhalte zwischen den Temperaturzuständen 250 und 210 °C für Dampf sowie 40 und 210 °C für den Wasser-Dampf-Übergang bestimmt.

$$\Delta i'_D = 706,8 - 687,2 = 19,6 \text{ kcal/kg},$$

$$\Delta i'_W = 40,1 - 687,2 = -647,1 \text{ kcal/kg}.$$

Hieraus folgt für den Temperaturzustand 210 °C des austretenden Dampfes eine notwendige Wassermenge von

$$M'_W = \frac{M_D \cdot \Delta i'_D}{\Delta i'_W} = \frac{12 \cdot 19,6}{647,1} = 0,366 \text{ t/h}.$$

Damit sind die notwendigen Voraussetzungen erfüllt, um den Übertragungsfaktor K_S dieses Einspritzkühlers bestimmen zu können.

$$K_S = \frac{\Delta \vartheta_x}{\Delta M_W} = \frac{210 - 200}{0,366 - 0,460} = - \frac{10}{0,104} = - 96 \frac{^\circ\text{C}}{\text{t/h}}.$$

Wegen der hohen Dampfgeschwindigkeit und des kleinen Volumens der Mischkammer kann die zeitliche Verzögerung hier vernachlässigt werden. Nicht zu vernachlässigen sind dagegen die im Temperaturfühler anfallenden Zeitkennwerte, die für ein Thermoelement mit Schutzrohr Werte der Größenordnung von $T_i \approx 8 \text{ s}$ und $T_S \approx 20 \text{ s}$ annehmen können.

Als nächste Regelstrecke wird ein elektrisch beheizter Ofen bezüglich seiner Streckenparameter berechnet.

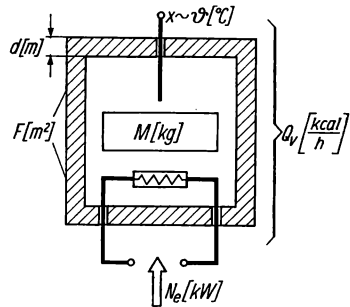


Bild 11. Elektrisch beheizter Ofen

3. Beispiel

Ermittelt wurden folgende technische Daten des Ofens:

Einsatzmasse (einschl. der Ofeneinbauten)	M	$= 500 \text{ kg}$
spezifische Wärme des Einsatzes bei Solltemperatur	c	$= 0,12 \frac{\text{kcal}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}$
wirksame Oberfläche des Ofens	F	$= 6,0 \text{ m}^2$
mittlere Dicke der Isolierungsschicht	d	$= 0,3 \text{ m}$
Wärmedurchgangszahl	ϱ	$= 1,8 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}}$
Temperatursollwert	ϑ_k	$= 750 \text{ }^\circ\text{C}$
Außentemperatur	ϑ_a	$= 50 \text{ }^\circ\text{C}$

Mit diesen Angaben lassen sich sowohl die Wärmeverluste Q_V wie auch die Speicherwärme L_S des Ofens feststellen.

$$Q_V = \frac{\varrho \cdot F}{d} (\vartheta_k - \vartheta_a) = \frac{1,8 \cdot 6,0}{0,3} (750 - 50) = 25200 \frac{\text{kcal}}{\text{h}},$$

$$L_S = c \cdot M (\vartheta_k - \vartheta_a) = 0,12 \cdot 500 (750 - 50) = 42000 \text{ kcal}.$$

Der Übertragungsfaktor des Ofens kann unmittelbar aus den stationären Werten berechnet werden. Die elektrische Heizleistung muß die Wärme-

verlustleistung decken. Unter Verwendung der Beziehung $1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}$ läßt sich die Wärmeverlustleistung in elektrischen Einheiten ausdrücken.

$$Q_{Ve} = \frac{25 \cdot 200}{860} = 29,3 \text{ kW},$$

$$K_S = \frac{\Delta \vartheta_x}{\Delta Q_{Ve}} = \frac{750 - 50}{29,3 - 0} = 23,9 \frac{^\circ\text{C}}{\text{kW}}.$$

Die Verzögerungszeitkonstante ließe sich durch Ansatz und Lösung der dynamischen Vorgang beschreibenden Differentialgleichung

$$Q_e = \frac{dL_S}{dt} + Q_{Ve}$$

bestimmen. Hier soll jedoch ein anderer Weg beschritten werden, der auf dem Analogieschluß zu einem elektrischen RC-Glied beruht.

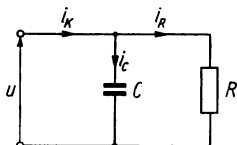


Bild 12. Elektrische Analogieschaltung des Ofens

Es bestehen folgende Analogien:

Temperatur $\vartheta \triangleq$ Spannung u ,

Wärmeleistung $Q \triangleq$ Strom i_K ,

Wärmewiderstand $\frac{\vartheta}{Q_V} \triangleq$ el. Widerstand $R = \frac{u}{i_R}$,

Wärmekapazität $\frac{L_S}{\vartheta} \triangleq$ el. Kapazität $C = \frac{1}{u} \int i_C dt$.

Aus der bekannten Beziehung für die Zeitkonstante von RC-Gliedern: $T = RC$ folgt für die Zeitkonstante des Ofens

$$T_S = \frac{\vartheta}{Q_V} \cdot \frac{L_S}{\vartheta} = \frac{L_S}{Q_V} = \frac{42 \cdot 000}{25 \cdot 000} = 1,66 \text{ h}.$$

Durch Einsetzen der Bestimmungsgleichungen von L_S und Q_V erhält man

$$T_S = \frac{c \cdot M \cdot d}{\rho \cdot F},$$

das gleiche Ergebnis, das auch über die Differentialgleichung gefunden werden kann.

Nimmt man die Übergangsfunktion eines derartigen Ofens auf, so wird man feststellen, daß neben der oben näherungsweise berechneten Hauptzeitkonstante T_S weitere kleine Verzögerungen vorhanden sind, die teils durch den Temperaturfühler und teils durch interne Zirkulationsvorgänge im Ofen bedingt sind.

Schwierig werden derartige Berechnungen, wenn es sich um Strecken mit mehreren Speichern handelt, die in Reihe oder parallel geschaltet sind.

Leider besitzen viele Regelstrecken, wie Wärmeaustauscher, Destillationskolonnen und Reaktoren, derartige Eigenschaften, die sich einer elementaren Berechnung entziehen. Im Literaturverzeichnis sind einige Hinweise für die rechnerische oder modellmäßige Behandlung derartiger Strecken enthalten [1] [3] [8] [11] [13] [15] [20] [23] [24].

2.5. Abschätzung der Regelgenauigkeit

Um Aussagen über die erreichbare Genauigkeit einer Regelung machen zu können, sind einige Voraussetzungen notwendig. Dabei ist zwischen statischer und dynamischer Regelgenauigkeit zu unterscheiden. Die statische Genauigkeit, die nach Abklingen aller Ausgleichsvorgänge bei konstant gehaltenen Störgrößen erreicht wird, ist abhängig vom Reglerprinzip (z. B. P -Abweichung), von der Ansprechempfindlichkeit des Reglers und Meßwandlers sowie vom Abgleichfehler des Meßfühlers und von der Reproduzierbarkeit des eingestellten Sollwertes. Die Größenordnung dieses statischen Fehlers von $1 \dots 3\%$ ist meist den Typenblättern der vorgesehenen Geräte zu entnehmen und bereitet keine wesentlichen Schwierigkeiten, da über den Sollwert eine Korrektur möglich ist.

Anders liegen die Verhältnisse bei der Abschätzung des dynamischen Fehlers. Um in dieser Hinsicht Aussagen machen zu können, ist es erforderlich, über den Angriffspunkt, die Amplitude und die Zeitfunktion der betrachteten Störgröße Angaben zu erhalten oder entsprechende Vereinbarungen zu treffen. Die Parameter der Regelstrecke müssen natürlich ebenfalls vorliegen. Die Reglerparameter lassen sich danach mit Hilfe von geeigneten Näherungsformeln bestimmen (s. Abschn. 3.3), wenn über die Art des Regelverlaufs bzw. dessen Dämpfung Festlegungen getroffen werden.

Der Bestimmung der Übergangsfunktion wird meist eine sprunghaft einwirkende Störgröße zugrunde gelegt, weil die Ansicht besteht, daß diese Störung den ungünstigsten Fall darstellt. Wenn jedoch die im Betrieb später einwirkenden Störungen periodische Komponenten enthalten, ist diese Methode nicht in jedem Fall ausreichend. Jeder Regelkreis besitzt eine bestimmte Eigenfrequenz ω_k , auch wenn der Kreis auf aperiodisches Verhalten der Regelgröße optimiert wurde. Diese Eigenfrequenz ω_k bildet eine typische Grenze für die in der Störung z enthaltenen Frequenzen ω_z dergestalt, daß für

$$\omega_z \ll \omega_k$$

eine Dämpfung der Störamplitude, für

$$\omega_z \approx \omega_k$$

eine Verstärkung der Störamplitude eintritt und für

$$\omega_z \gg \omega_k$$

die Störamplituden so auf die Regelgröße x einwirken, als wenn kein Regler angeschlossen wäre. Es ist also wichtig, darauf zu achten, daß keine wesentlichen Störfrequenzen in der Nähe der Eigenfrequenz des Kreises liegen. Ferner ist selbstverständlich, daß Störfrequenzen oberhalb ω_k durch

den Regler nicht mehr gedämpft bzw. beseitigt werden können. Für den Fall der Führungsstörung w_z bestehen inverse Verhältnisse. Für $\omega_z \ll \omega_k$ wird, wie beabsichtigt, die Führungsgröße exakt auf die Regelgröße übertragen. In Bild 13 sind die drei typischen Störfälle eines Regelkreises, die Führungsstörung z_w , die Eingangsstörung z_y und die Ausgangsstörung z_x , im Signalflußbild dargestellt. In der logarithmischen Frequenz-Amplituden-Darstellung (Bild 14) sind die dazugehörigen typischen Frequenzkennlinien angegeben. Der wirksame Arbeitsbereich des Regelkreises

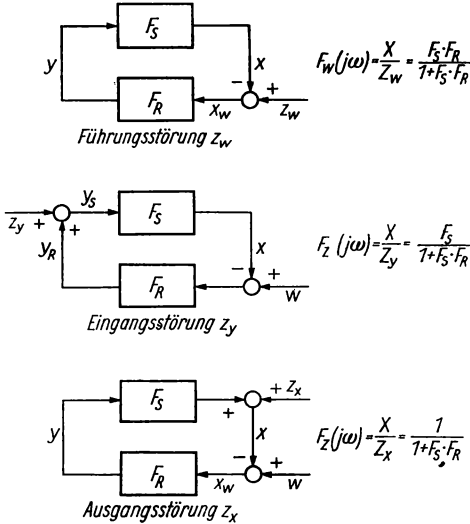


Bild 13. Die drei typischen Störmöglichkeiten eines Regelkreises

liegt in allen drei Fällen nur in dem Frequenzbereich von $\omega_z \approx 0 \dots 0,5 \omega_k$. Für den Wert der Eigenfrequenz ω_k des Kreises kann annähernd

$$\omega_k \approx \frac{1}{2 T_t}$$

gesetzt werden, wenn der zugehörige *PI*-Regler auf den aperiodischen Grenzfall der Störübergangsfunktion eingestellt wird.

Für Sprungstörungen z_y sind aus Bild 15 die maximalen Amplituden der Regelabweichung x_m für einen Kreis mit $PT_1 T_S$ -Strecke und aperiodisch angepaßtem *PI*-Regler als Funktion des Verhältnisses T_S/T_t der Zeitkennwerte zu entnehmen.

Für verzögert einwirkende Störungen z_x zeigt Bild 16 ebenfalls die maximale Auslenkung x_m der Regelgröße x für verschiedene Werte T_z/T_S als Parameter über dem Verhältnis der Zeitkennwerte T_S/T_t .

Neben den beschriebenen relativ groben Abschätzungsmöglichkeiten des zu erwartenden Regelergebnisses sei nachstehend eine grafisch-analytische Methode zur Gewinnung der interessierenden Übergangsfunktion

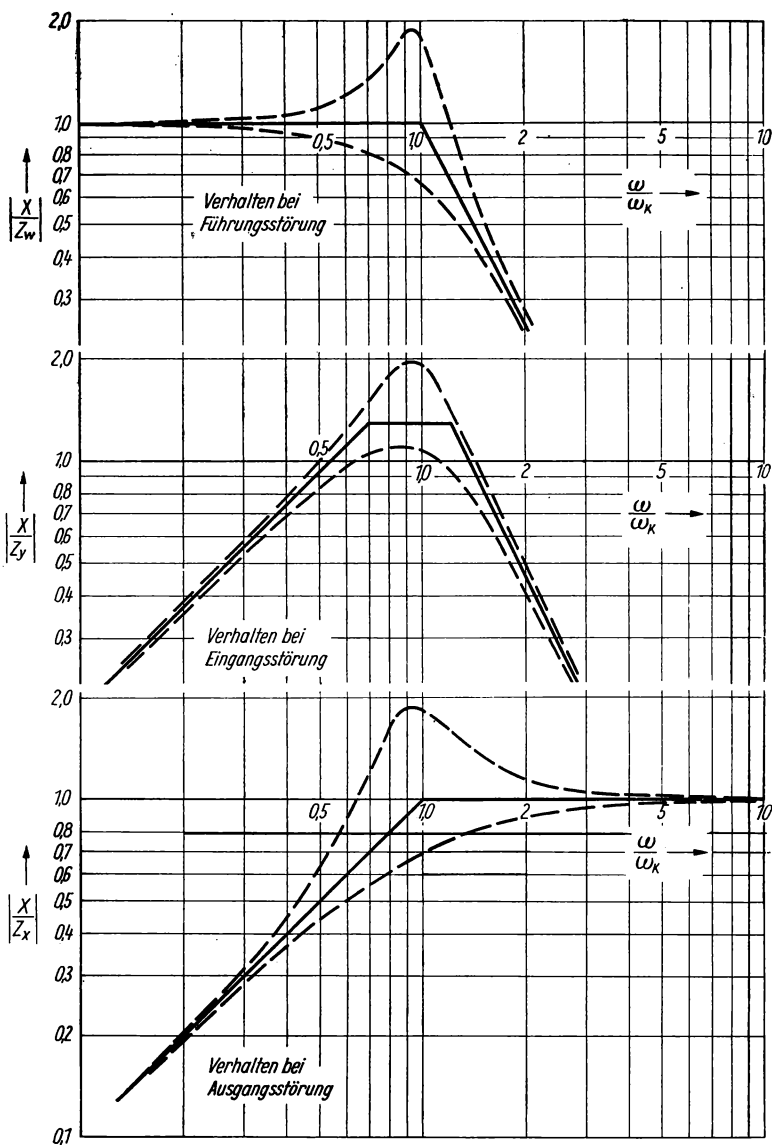


Bild 14. Frequenzkennlinien der Schaltungen von Bild 13

beschrieben, die es gestattet, für beliebige Störfunktionen ein sicheres Ergebnis zu erhalten. Es sei nicht verschwiegen, daß dazu allerdings ein Arbeitsaufwand von ein bis zwei Stunden nötig ist, um eine Übergangsfunktion zu konstruieren. Dafür sind andererseits jedoch keine speziellen Kenntnisse der Laplace-Transformation für dieses Verfahren erforderlich.

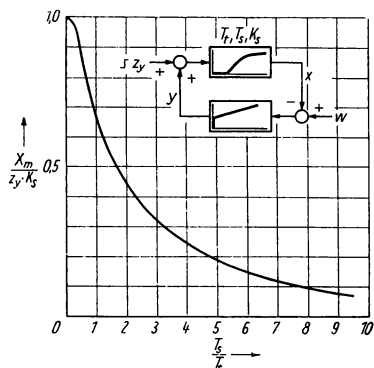


Bild 15. Maximale Regelabweichung bei sprunghaft einwirkender Eingangsstörung z_y auf eine PT_1TS -Strecke mit einem auf aperiodisches Verhalten angepaßten PI -Regler

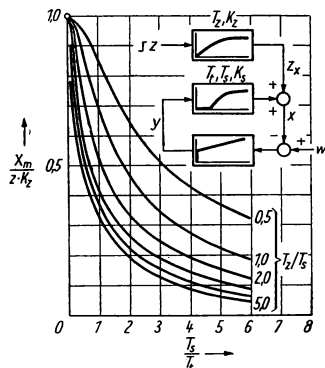


Bild 16. Maximale Regelabweichung bei verzögert einwirkender Ausgangsstörung z_x auf einen Kreis mit PT_1TS -Strecke und einem auf aperiodisches Einschwingverhalten angepaßten PI -Regler

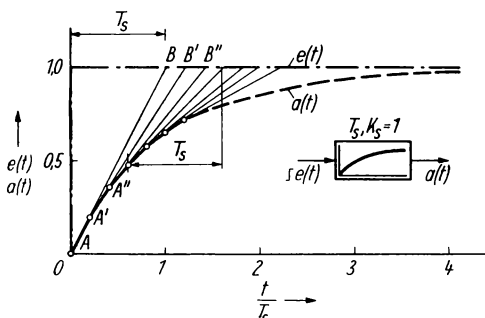


Bild 17. Grafische Konstruktion der Übergangsfunktion eines PT_S -Gliedes

Zur Einführung sind zunächst einige Vorbemerkungen zu machen. Die e -Funktion $a(t) = K_S (1 - e^{-t/T_S})$ läßt sich auf einfache Weise grafisch, mittels einer fortlaufenden Tangentenkonstruktion, zeichnen (Bild 17). Dazu ist die durch K_S bestimmte Asymptote zu zeichnen und die Zeitkonstante T_S darauf abzutragen. Durch die Punkte A, B ist die erste Anstiegstangente der zu zeichnenden Funktion festgelegt. Zum Zeitpunkt $t = 0,2 T_S$ wird auf dieser Tangente der Punkt A' markiert und auf der

Asymptote zum Zeitpunkt $t = 1,2 T_S$ der Punkt B' . Die Verbindungsgerade $A' B'$ ist die zweite Tangente der gesuchten Funktion. Auf gleiche Weise wird zum Zeitpunkt $t = 0,4 T_S$ der Punkt A'' und zum Zeitpunkt $t = 1,4 T_S$ der Punkt B'' markiert und die dritte Tangente gezogen usw. Je kleiner die Zeitintervalle bei der Konstruktion gewählt werden, um so genauer wird die e-Funktion als Hüllkurve der Tangenten abgebildet. Die so gezeichnete e-Funktion entsteht, als Ausgangssignal $a(t)$ eines PT_S -Verzögerungsgliedes, wenn ein Sprungsignal $e(t)$ mit der Sprunghöhe Eins als Eingangssignal darauf wirkt. Wird als Eingangssignal $e(t)$ dagegen wie im Bild 18 eine Rampenfunktion gegeben, so hat auch die das Ausgangssignal $a(t)$ darstellende e-Funktion eine andere Gestalt. Die Konstruktion ist prinzipiell gleich, wenn man die Rampenfunktion durch eine hinreichend feinstufige Treppenfunktion annähert.

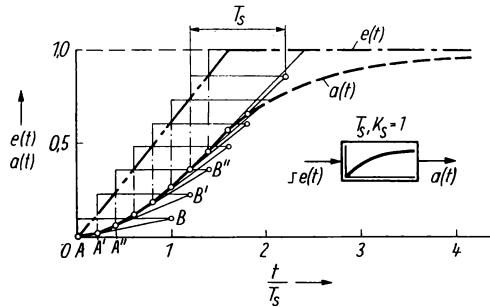


Bild 18. Grafische Konstruktion der Übergangsfunktion eines PT_S -Gliedes bei Anregung durch eine Rampenfunktion

Im Beispiel des Bildes 18 wurde eine Treppenbreite von $0,2 T_S$ gewählt. Die Bestimmungspunkte B, B', B'' usw. liegen hierbei nicht mehr auf der Höhe der Asymptote, sondern sind jetzt auf dem Niveau der jeweiligen Treppenstufen anzubringen. Die Zeitdifferenz zwischen $AB, A'B', A''B''$ usw. hat wie bisher die Größe T_S . Auf diese Weise läßt sich die Antwort $a(t)$ eines PT_S -Gliedes auf jede beliebige Anregungsfunktion $e(t)$ mit praktisch völlig ausreichender Genauigkeit konstruieren.

Nach den einleitenden Bemerkungen soll jetzt der im Bild 19 dargestellte Regelkreis eines elektrisch beheizten Ofens bezüglich der Antwort der Regelgröße $x(t)$ auf eine sprungförmige Störgröße $z(t)$ hin untersucht werden. Die Einstellwerte K_R und K_{IR} des Reglers wurden nach den im Abschn. 3.3 enthaltenen Optimierungsformeln für den aperiodischen Grenzfall berechnet.

Streckenkonstanten einschl. Meßwandler:

$$K_S = 0,5 \text{ mA/kW},$$

$$T_S = 300 \text{ s},$$

$$T_t = 100 \text{ s}.$$

Reglereinstellung einschl. Stelleinrichtung:

$$K_R = \frac{0,6 \cdot T_S}{K_S \cdot T_t} = \frac{0,6 \cdot 300}{0,5 \cdot 100} = 3,6 \frac{\text{kW}}{\text{mA}},$$

$$K_{IR} = \frac{0,15 \cdot T_S}{K_S \cdot T_t^2} = \frac{0,15 \cdot 300}{0,5 \cdot 100^2} = 9 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kW}}{\text{mA} \cdot \text{s}}.$$

Störgröße mit Sprungcharakter:

$$z = +10 \text{ kW},$$

hervorgerufen durch einen plötzlichen Spannungsanstieg des Netzes.

Die Konstruktion des zeitlichen Verlaufs der Regelgröße wird an Hand der Diagramme im Bild 20 erläutert. Zunächst wird im Diagramm die Übergangsfunktion der Regelstrecke allein bei Einwirkung der Störgröße von

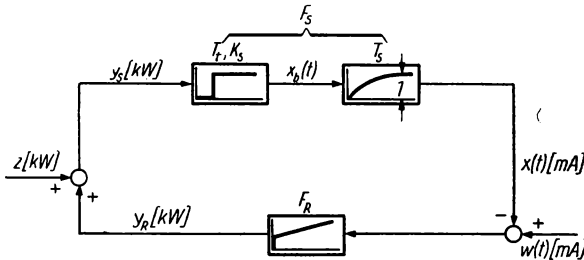


Bild 19. Blockschaltbild zum Beispiel der grafischen Ermittlung der Störübergangsfunktion des geschlossenen Kreises mit PT_1T_S -Strecke

$z = 10 \text{ kW}$ mit Hilfe der Tangentenkonstruktion eingetragen [Kurve $x_0(t)$]. Dabei ist zu beachten, daß durch die Totzeit eine Verschiebung der Kurve von $T_t = 100 \text{ s}$ in Richtung der Zeitachse zu berücksichtigen ist. Der Endwert der Funktion ist durch K_S und z bestimmt.

$$x_0(t) = z \cdot K_S = 10 \cdot 0,5 = 5 \text{ mA}.$$

$$t \rightarrow \infty$$

Von jetzt an wird der Kreis wieder als geschlossen betrachtet. Der durch z angestoßene Regelvorgang kann erst nach Ablauf der Totzeit T_t am Reglereingang und damit auch am Ausgang des PI -Reglers wirksam werden. Das Stellsignal y_R subtrahiert sich von diesem Zeitpunkt an von z , und das resultierende Eingangssignal y_S der Strecke

$$y_S(t) = z(t) - y_R(t)$$

wirkt als Zeitfunktion mit zunächst noch unbekanntem Verlauf. Wählt man hinreichend kleine Zeitintervalle, so lassen sich stückweise bei jedem Kreislauf der Signalwirkungen die interessierenden Zeitfunktionen $x(t)$ und $y_S(t)$ berechnen und konstruieren.

Die einzelnen Arbeitsschritte der grafisch-analytischen Lösung werden mit Hilfe der Rechentabelle (Tafel 1) vorgenommen. Dort sind in der Kopfzeile die notwendigen Größen aufgetragen. Nach Wahl eines geeigneten Zeitschrittes $\Delta t = 50 \text{ s}$ kann die Konstruktion beginnen. Dabei werden die Tabellenwerte in folgenden Schritten teils errechnet und teils dem Diagramm entnommen.

Arbeitsmethodik

1. *Schritt*: Bestimmung von x_3 zum Zeitpunkt $t_3 = T_t + \Delta t = 150 \text{ s}$ als Wirkung von $y_{S1} = z - y_{R1} = 10 - 0 = 10 \text{ kW}$ nach der Tangentenmethode liefert als Diagrammwert ein $x_3 = 0,8 \text{ mA}$.

2. *Schritt*: Berechnung der Proportional- und Integralwirkung des Reglers infolge des Signals x_3 nach den Gleichungen

$$y_{P3} = K_R \cdot x_3 = 3,6 \cdot 0,8 = 2,88 \text{ kW},$$

$$y_{I3} = K_{IR} \cdot \int_0^{t_3} x \, dt = 9 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 \cdot \frac{50}{2} = 0,18 \text{ kW}.$$

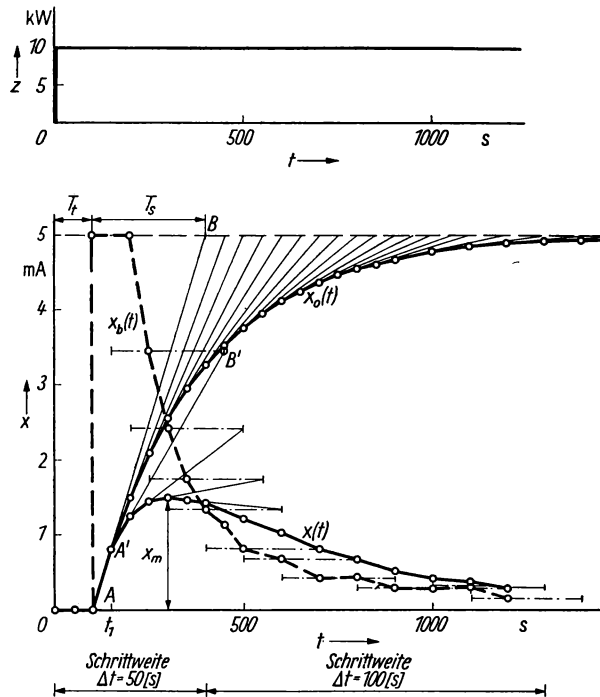


Bild 20. Grafische Bestimmung der Zeitfunktionen der Signale des Regelkreises nach Bild 19

3. Schritt: Addition der P - und I -Wirkung des Reglers zum Stellsignal

$$y_{R3} = y_{P3} + y_{I3} = 2,88 + 0,18 = 3,06 \text{ kW}.$$

4. Schritt: Berechnung der resultierenden Stellwirkung am Streckeneingang.

$$y_{S3} = z - y_{R3} = 10,0 - 3,06 = 6,94 \text{ kW}.$$

5. Schritt: Bestimmung der Hilfsgröße

$$x_{b5} = K_S \cdot y_{S3} = 0,5 \cdot 6,94 = 3,47 \text{ mA}$$

und Eintragung dieses Wertes in das Diagramm zum Zeitpunkt

$$t_5 = t_3 + T_t = 150 + 100 = 250 \text{ s}.$$

6. Schritt: Anwendung der Tangentenkonstruktion im Diagramm, wobei das Treppenniveau x_{b5} zur Festlegung der Tangente $A'B'$ dient.

7. Schritt: Ablesen des neuen x -Wertes $x_4 = 1,25 \text{ mA}$ zur Zeit $t_4 = 200 \text{ s}$ auf der Tangente $A'B'$ und Eintragung dieser Größe in die Tabelle.

Tafel 1. Rechentabelle

Nr.	t [s]	x_b [mA]	x [mA]	y_P [kW]	Δy_I [kW]	y_I [kW]	y_R [kW]	y_S [kW]
0	0	5,0	0	0	0	0	0	10,0
1	50	5,0	0	0	0	0	0	10,0
2	100	5,0	0	0	0	0	0	10,0
3	150	5,0	0,8	2,88	(0,18)	0,18	3,06	6,94
4	200	5,0	1,25	4,50	(0,47)	0,65	5,15	4,85
5	250	3,47	1,45	5,22	(0,64)	1,26	6,48	3,52
6	300	2,42	1,50	5,40	(0,66)	1,92	7,32	2,68
7	350	1,76	1,45	5,22	(0,61)	2,53	7,75	2,25
8	400	1,34	1,45	5,22	(0,61)	3,14	8,36	1,64
9	450	1,13	—	—	—	—	—	—
10	500	0,82	1,20	4,30	(1,17)	4,31	8,61	1,39
11	600	0,70	1,05	3,80	(1,04)	5,35	9,15	0,85
12	700	0,42	0,80	2,90	(0,85)	6,20	9,10	0,90
13	800	0,45	0,70	2,52	(0,68)	6,88	9,40	0,60
14	900	0,30	0,55	1,98	(0,54)	7,42	9,40	0,60
15	1000	0,30	0,42	1,51	(0,40)	7,82	9,33	0,67
16	1100	0,33	0,40	1,44	(0,38)	8,20	9,64	0,36
17	1200	0,18	0,30	—	—	—	—	—
18	∞	0	0	0	0	10,00	10,00	0

Damit ist ein Arbeitszyklus durchlaufen, und der nächste Zyklus beginnt mit dem im 7. Schritt ermittelten Wert als Basis von neuem beim 1. Schritt. Die maximale Auslenkung von x , also die gesuchte maximale Regelabweichung x_m , wird meist schon nach drei bis vier Zeitschritten gefunden. Interessiert der Einschwingvorgang als Ganzes, um ein eventuelles Überschwingen festzustellen, so sind zehn bis fünfzehn Zeitschritte zu konstruieren. Zur Zeitersparnis kann man das Zeitintervall Δt im Verlauf der Kurvenbestimmung vergrößern, wenn die Änderungsgeschwindigkeit der Funktionen kleiner wird. Im Beispiel Bild 20 wurde vom Zeitpunkt $t = 400 \text{ s}$ an Δt von 50 auf 100 s vergrößert. Die Hilfsfunktion $x_b(t)$ zeigt dadurch eine gewisse Unregelmäßigkeit der Bestimmungspunkte, die bei der exakten Aufnahme der Funktion nicht auftreten würde. Für den hier vor-

liegenden Zweck genügt es vollkommen, durch die Bestimmungspunkte eine glatte mittlere Kurve zu legen. Wie der Kurvenverlauf zwischen $t = 500 \dots 1200$ s zeigt, ist mit einer ins Gewicht fallenden Überschwingung der Regelgröße $x(t)$ nicht mehr zu rechnen, so daß eine Weiterführung der Konstruktion oberhalb $t = 1200$ s keine wesentlichen weiteren Kenntnisse über den Funktionsverlauf mehr liefern würde.

Diese Methodik erfordert eine gewisse Geduld und Konzentration. Rechen- oder Zeichenfehler pflanzen sich durch alle folgenden Etappen hindurch fort und sind dann nicht mehr auszugleichen. Dafür wird jedoch ein sehr klarer Einblick in die Dynamik der Signale im Regelkreis vermittelt, wie er durch die geschlossenen rein mathematischen Lösungsmethoden nicht erreicht wird. Weiter sei bemerkt, daß die rein mathematische Lösung, um anschaulich zu werden, auch grafisch punktweise aufgetragen werden muß, wozu ebenfalls ein nicht unerheblicher Zeitaufwand gehört. Darum bedient man sich in schwierigen Fällen des Modellregelkreises, um mit

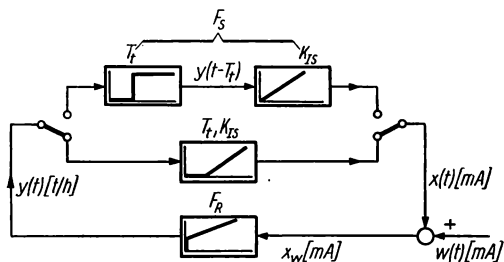


Bild 21. Blockschaltbild zum Beispiel der grafischen Ermittlung der Führungsübergangsfunktion des geschlossenen Kreises mit IT_t -Strecke

erträglichem Zeitaufwand die gesuchten Zeitfunktionen zu erlangen und parallel dazu auch die günstigsten Einstellwerte der Regler experimentell zu bestimmen.

Als nächstes Beispiel der schrittweisen Bestimmung einer Übergangsfunktion wird eine IT_t -Strecke, z. B. eine Standregelung mit PI -Regler, behandelt, wie im Bild 21 dargestellt. Es soll die Führungsübergangsfunktion $F_w(t) = \frac{x(t)}{w(t)}$ bei sprunghörmiger Verstellung der Führungsgröße $w(t)$ grafisch bestimmt werden.

Streckenkonstanten (einschl. Meßwandler):

$$K_{IS} = 0,1 \frac{\text{mA/s}}{\text{t/h}},$$

$$T_t = 20 \text{ s}.$$

Der Kreis wird im Betrieb überwiegend durch Störgrößen z_y (am Streckeneingang) beeinflusst. Darum erfolgte eine Optimierung nach den Einstellformeln des Abschnitts 3.3.

Reglereinstellungswerte (einschl. Stellglied):

$$K_R = \frac{0,46}{K_{IS} \cdot T_t} = \frac{0,46}{0,1 \cdot 20} = 0,23 \frac{\text{t/h}}{\text{mA}},$$

$$K_{IR} = \frac{0,21}{K_{IS} \cdot T_t^2} = \frac{0,21}{0,1 \cdot 20^2} = 0,53 \cdot 10^{-2} \frac{\text{t/h}}{\text{mA} \cdot \text{s}}.$$

Es soll geprüft werden, ob der Kreis auch für Führungsstörungen $z_w(t)$ noch ein brauchbares Verhalten zeigt. Die Größe des Sollwertsprunges ist

$$\Delta w = 5,0 \text{ mA}.$$

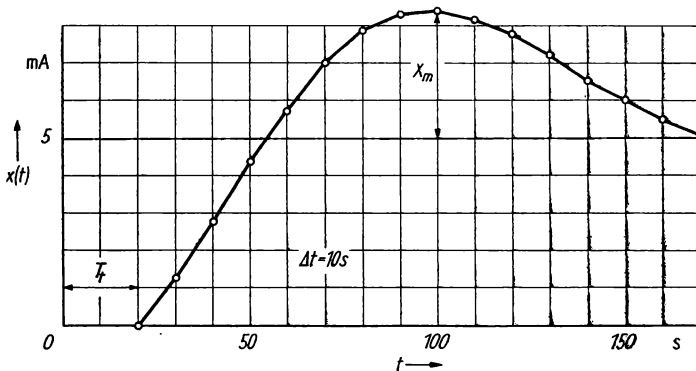
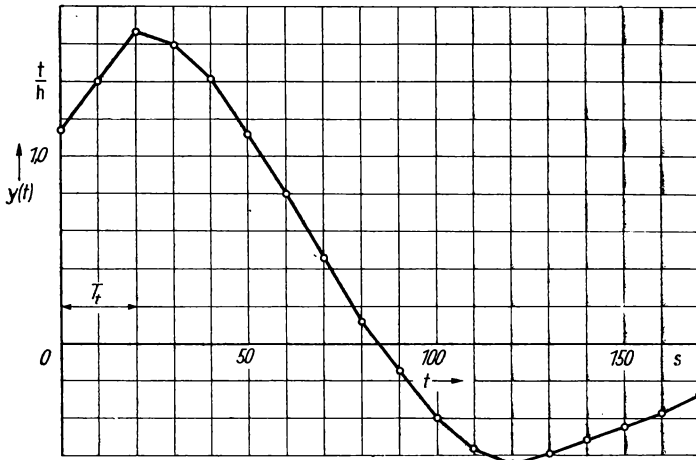


Bild 22. Grafische Bestimmung der Zeitfunktionen der Signale des Regelkreises nach Bild 21

Ähnlich wie im vorigen Beispiel wird auch hier wieder eine Rechentabelle (Tafel 2) für die benötigten Funktionswerte angelegt. Die Bestimmungsmethode wird in den nachstehend aufgeführten Schritten beschrieben. Als Zeitintervall wurde hier ein Wert $\Delta t = 10$ s gewählt.

Tafel 2. Rechentabelle

Nr.	t [s]	x_w [mA]	y_P [t/h]	$\angle y_I$ [t/h]	y_I [t/h]	y [t/h]	x [mA]
0	0	5,0	1,15	—	0	1,15	0
1	10	5,0	1,15	0,26	0,26	1,41	0
2	20	5,0	1,15	0,26	0,52	1,67	0
3	30	3,7	0,85	0,23	0,75	1,60	1,28
4	40	2,2	0,50	0,16	0,91	1,42	2,80
5	50	0,6	0,14	0,07	0,98	1,12	4,40
6	60	−0,8	−0,19	0	0,98	0,80	5,80
7	70	−2,0	−0,46	−0,07	0,91	0,45	7,00
8	80	−2,9	−0,67	−0,13	0,78	0,11	7,90
9	90	−3,3	−0,76	−0,17	0,61	−0,15	8,3
10	100	−3,4	−0,78	−0,18	0,37	−0,41	8,4
11	110	−3,2	−0,75	−0,18	0,19	−0,56	8,2
12	120	−2,9	−0,67	−0,16	0,03	−0,64	7,8
13	130	−2,2	−0,50	−0,12	−0,09	−0,59	7,2
14	140	−1,5	−0,35	−0,07	−0,16	−0,51	6,5
15	150	−1,0	−0,23	−0,05	−0,21	−0,44	6,0
.
.
.
n	∞	0	0	0	0	0	5,0

Arbeitsmethodik

1. Schritt: Die zum Zeitpunkt t_0 wirksam werdende Regelabweichung x_{w0} steuert den Regler und erzeugt über die eingestellte P -Wirkung gleichzeitig das Stellsignal

$$y_0 = K_R \cdot x_{w0} = 0,23 \cdot 5,0 = 1,15 \text{ t/h}.$$

Da vor Ablauf der Totzeit T_t keine Wirkung von y auf x möglich ist, wird sofort die Stellgröße y_2 nach den Gleichungen

$$y_{P2} = K_R \cdot x_{w2} = 0,23 \cdot 5,0 = 1,15 \text{ t/h},$$

$$y_{I2} = K_{IR} \cdot \int_0^{t_2} x_w \cdot dt = 0,53 \cdot 10^{-2} \cdot 5 \cdot 20 = 0,52 \text{ t/h},$$

$$y_2 = y_{P2} + y_{I2} = 1,15 + 0,52 = 1,67 \text{ t/h}$$

bestimmt und in die Tabelle eingetragen.

2. Schritt: Mit dem Stellsignal im Intervall $t_0 \dots t_1$ ist die Regelgröße x_3 zum Zeitpunkt $t_3 = 30$ s nach der Gleichung

$$\begin{aligned} x_3 &= x_2 + K_{IS} \cdot \frac{y_0 + y_1}{2} \cdot \Delta t = 0 + 0,1 \frac{1,15 + 1,42}{2} \cdot 10 \\ &= 1,28 \text{ mA} \end{aligned}$$

bestimmbar und wird in das Diagramm und in die Tabelle eingetragen.

3. Schritt: Aus x_3 ist die Regelabweichung

$$x_{w3} = w - x_3 = 5,0 - 1,28 = 3,72 \text{ mA}$$

zu bestimmen und mit dieser neuen Eingangsgröße am Regler die Stellwirkung y_3 auszurechnen.

$$\begin{aligned} y_3 &= y_{P3} + y_{I3} = K_R \cdot x_{w3} + \left(y_{I2} + K_{IR} \frac{x_{w2} + x_{w3}}{2} \Delta t \right) \\ &= 0,23 \cdot 3,72 + (0,52 + 0,53 \cdot 10^{-2} \cdot 0,5 (5,0 + 3,72) \cdot 10) \\ &= 1,60 \text{ t/h.} \end{aligned}$$

Damit ist ein Arbeitszyklus beendet, und der neue Wert x_4 läßt sich unter sinngemäßer Anwendung des 2. Schrittes erhalten. Durch zyklische Wiederholung des 2. und 3. Schrittes erhält man dann die weiteren Funktionswerte, die im Diagramm und in der Tabelle aufgeführt sind.

Wie das Ergebnis zeigt, ist das Führungsverhalten dieses Kreises relativ ungünstig. Es entsteht eine Überschwingung von $x_m = 3,4$ mA entsprechend 68% des Sollwertsprunges. Aus der Tendenz der Übergangsfunktion $x(t)$ zwischen $t = 100 \dots 150$ s ist zu erkennen, daß die Schwingung danach schnell abklingt und weitere wesentliche Überschwingungen nicht mehr auftreten werden. Wenn die entstehende erste Überschwingung x_m in dieser Größe nicht zulässig ist, muß der K_{IR} -Wert des Reglers verkleinert oder sogar weggelassen werden. Wie die Auswertung zeigt, ist mit einem PI-Regler an einer I-Strecke ein aperiodisches Führungsverhalten nicht zu erreichen. Verwendet man darum nur einen P-Regler, so muß bei Streckenstörungen z_y eine bleibende Regelabweichung in Kauf genommen werden.

2.6. Wahl der Hilfsenergie und des Gerätesystems

Wenn man von den sog. Direktreglern absieht, die die Hilfsenergie dem zu regelnden Medium unmittelbar entnehmen, sind die modernen Regelgeräte, wie Meßwandler, Regler, Verstärker, Zeitglieder und Stellantriebe, auf eine spezielle Hilfsenergie angewiesen. Der viel zitierte Leitspruch „elektrisch messen — pneumatisch regeln — hydraulisch stellen“ ist heute nicht mehr richtig. Es besteht allgemein die Tendenz, möglichst alle Geräte mit einer einzigen Hilfsenergieform zu speisen und davon nur abzuweichen, wenn zwingende Gründe vorliegen. Bei den Meßwandlern und Reglern bestehen heute praktisch nur noch zwei Varianten, die elektrische und die pneumatische Hilfsenergie. Auf seiten der Stellantriebe sind alle drei Hilfsenergieformen anzutreffen.

Als Auswahl Gesichtspunkte sind in diesem Zusammenhang die Bewertungsfaktoren in der Reihenfolge

Betriebssicherheit, Leistungsfähigkeit, Wartungsaufwand, Preis und Einbaubedingungen

zu berücksichtigen, die in jedem Fall sorgfältig gegeneinander abzuwägen sind, um eine optimale Gesamtlösung zu finden. Zur Orientierung werden in den nachstehenden Tabellen einige Bewertungsrelationen angegeben, die als grobe Durchschnittswerte anzusehen sind. Die in die Tafeln 3 und 4 eingetragenen Prozentzahlen sind auf Geräte mit pneumatischer Hilfsenergie, die gleich 100% gesetzt wurden, bezogen.

Tafel 3. Bewertungsverhältnisse zwischen Reglern einschl. Meßwandler bei elektrischer und pneumatischer Hilfsenergie

Gesichtspunkt	Hilfsenergie	
	elektrisch	pneumatisch
Betriebssicherheit	150%	100%
Genauigkeit	300%	100%
Preis	200%	100%
Wartungsaufwand	70%	100%
Qualität der Wartungskräfte	200%	100%

Tafel 4. Bewertungsverhältnisse zwischen Stellgetrieben mit verschiedenen Hilfsenergien

Gesichtspunkt	Hilfsenergie		
	elektrisch	pneumatisch	hydraulisch
Max. Stelleistung	300%	100%	1000%
Max. Stellgeschwindigkeit	25%	100%	200%
Betriebssicherheit	150%	100%	80%
Preis	400%	100%	300%
Wartungsaufwand	50%	100%	200%

Mit der Verbesserung und Vervollständigung der elektrischen Regelsysteme ist deren Anteil in den letzten Jahren erheblich angestiegen. Durch Entwicklung kontaktarmer Bauweisen, Verwendung von Magnetverstärkern, Langlebensdauerrohren und Transistoren konnte die Betriebssicherheit so erhöht werden, daß die früher teilweise berechnigte Abneigung gegen elektrische Geräte heute nicht mehr begründet ist. Die Anpassungs- und Kombinationsfähigkeit dieser Systeme auch in Verbindung mit der Steuerungstechnik und der Meßwertübertragung sowie der Meßwertverarbeitung ist auf andere Weise nicht möglich.

Die großen Vorteile der Pneumatik liegen auf anderen Gebieten. Die Preisgünstigkeit pneumatischer Stellantriebe und Regler ist einer dieser Vor-

züge. Weiter ist das pneumatische System für Anlagen mit explosiven Medien eindeutig im Vorteil, weil keine zusätzlichen Aufwendungen für den Ex-Schutz notwendig sind. Voraussetzung jeder pneumatischen Regelungsanlage bleibt jedoch eine einwandfreie Luftaufbereitungsanlage mit Reservestellung, wie man sie nur für Großanlagen errichten kann.

Vollkommen auf hydraulischer Basis beruhende Regelungsanlagen werden in der Verfahrenstechnik nicht mehr angewendet, wenn man von Spezialfällen, wie Dampfturbinenregelungen, Steuerungen von Werkzeugmaschinen und Transporteinrichtungen, absieht. Eine Berechtigung hat die Hydraulik im Rahmen der BMSR-Technik nur noch am Stellantrieb, wenn besonders große Stelleistungen benötigt werden.

3. Entwurf der Prinziplösung

Auf der Grundlage der im Projektierungsauftrag enthaltenen abgestimmten Aufgabenstellung kann die eigentliche Projektierungsarbeit begonnen werden. In ein sinnvoll vereinfachtes technologisches Schema der Anlage, in dem die Störquellen sowie die Meß- und Stellorte eingetragen sind, gilt es jetzt, die geeignete signalmäßige Verknüpfung einzutragen. Hierbei ist es zunächst noch gleichgültig, welcher Typ der Steuer- oder Reglerfunktion in die Wirkungskette zwischen Meß- und Stellort einzufügen ist. Zur Klärung dieser Frage ist eine individuelle Behandlung und Betrachtung jeder Wirkungskette notwendig. Die dabei zu beachtenden Gesichtspunkte liegen in den Fragestellungen:

- a) Steuerung oder Regelung ?
- b) Aufschaltung von Hilfsgrößen ?
- c) Zeitverhalten des Reglers ?
- d) Stetiger oder unstetiger Reglertyp ?

3.1. Entscheidung über Steuerung oder Regelung

Zur Konstanthaltung oder gesetzmäßigen Beeinflussung einer physikalischen Größe ist nicht unbedingt ein Regelkreis notwendig. Wenn eindeutig festliegt, in welcher Weise und nach welcher Gesetzmäßigkeit die interessierende Meßgröße x von einer oder mehreren Störgrößen z abhängt, so ist es durchaus möglich und unter gewissen Voraussetzungen auch sinnvoll, eine Steuerung vorzusehen.

Als Voraussetzungen dieser Verfahrensweise sind zu nennen:

- a) Die Störgröße z muß mit einem Meßwertumformer erfaßt werden können.
- b) Die nicht erfaßbaren Störgrößen dürfen auf die interessierende physikalische Größe x keine wesentlichen Wirkungen ausüben.
- c) Die Größe x muß über eine Stellgröße y in definierter Weise schneller beeinflussbar sein, als es von der Störung z her möglich ist.

Aus dieser Aufzählung ist bereits zu entnehmen, daß der Geräteaufwand bei Anwendung einer stetigen Steuerung nicht geringer ist als bei einer Regelung. Wirtschaftliche Vorteile bietet also eine stetige Steuerung nicht. Die Vorteile einer Steuerung sind darin zu sehen, daß es auf diese Weise möglich ist, Stabilitätsprobleme zu vermeiden und auch solche physikalischen Größen annähernd konstant zu halten, deren ständige stetige Messung unmöglich ist. Das trifft für solche Größen zu, die z. B. nur als Laboranalysen zu erhalten sind oder deren automatische Messung nur in großen Zeitabständen bzw. nur mit untragbar großen Verzögerungen möglich ist.

Die Bemessung und Auswahl der richtigen Steuereinrichtung und der dazu geeigneten Steuerfunktion ist durchaus keine leichtere Aufgabe als die Festlegung eines Reglers. Mit den Bezeichnungen aus Bild 23 lautet die Bemessungsregel für den Frequenzgang des Steuergerätes:

$$F_{St}(j\omega) = \frac{F_{Sz}(j\omega)}{F_{Sy}(j\omega)}.$$

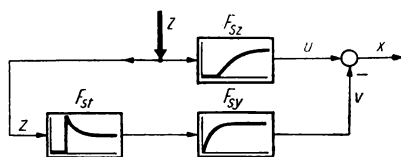


Bild 23. Steuerschaltung zur Beseitigung der von z hervorgerufenen Störwirkung auf die Größe x

F_{Sz} gestörte Strecke; F_{Sy} Stellstrecke; F_{St} Steuergerät

Beispiel:

Mit den Frequenzgängen

$$F_{Sz} = \frac{K_1}{1 + j\omega T_1} e^{-j\omega T_{t1}} \quad (PT_S T_t\text{-Glieder})$$

und

$$F_{Sy} = \frac{K_2}{1 + j\omega T_2} \quad (PT_S\text{-Glieder})$$

folgt für das Steuergerät

$$F_{St} = \frac{K_1}{K_2} \cdot \frac{1 + j\omega T_2}{1 + j\omega T_1} e^{-j\omega T_{t1}}.$$

Abgesehen von dem Proportionalfaktor K_1/K_2 ist zu erkennen, daß zur exakten Realisierung dieses Frequenzganges F_{St} ein PT -Glieder und ein PD -Glieder sowie ein T_t -Glieder in Reihe zu schalten sind. Ist die Totzeit T_t klein gegenüber T_1 , so kann man auf das Totzeitglied im Steuergerät verzichten, indem die Zeitkonstante des Verzögerungsgliedes dann zu $T_1 + T_{t1}$ gewählt wird. Eine weitere Vereinfachung ist möglich, wenn $T_2 \ll T_1$ ist.

In diesem Fall kann auch das *PD*-Glied im Steuergerät entfallen, so daß dann nur noch die relativ einfache Steuerfunktion

$$F_{St} = \frac{K_1}{K_2} \cdot \frac{1}{1 + j\omega (T_1 + T_{tt} - T_2)}$$

zu realisieren ist. Diese Vereinfachungen haben natürlich zur Folge, daß gewisse vorübergehende Abweichungen der Meßgröße von ihrem Sollwert in Kauf genommen werden müssen.

3.2. Zweckmäßigkeit einer Hilfsgrößenaufschaltung

Durch die sinnvolle Aufschaltung von Hilfsgrößen kann der einfache Regelkreis in seiner Qualität auf ein höheres Niveau gebracht werden. Die Wirkung von Störgrößen auf die Regelgröße wird dabei weiter abgeschwächt, als es durch einen noch so vollkommenen *PID*-Regler im einfachen einschleifigen Kreis möglich ist. So ist die Hilfsgrößenaufschaltung heute in großem Maßstab in fast allen hochwertigen Regelanlagen zu finden. Andererseits ist es unnötig, eine schwierigere Schaltung zur Anwendung zu bringen, als es technisch und ökonomisch notwendig ist. Sind die Störgrößen in ihrer Amplitude oder auch in ihren Frequenzkomponenten so gelagert, daß sie keine wesentliche Belastung des einschleifigen Regelkreises darstellen, so sind zusätzliche Hilfsgrößenaufschaltungen überflüssig.

Als häufig zur Anwendung kommende Methoden der Verbesserung des Regelverhaltens sind zu nennen:

- a) die proportionale Störgrößenaufschaltung;
- b) die Störgrößenaufschaltung über ein differenzierendes Glied;
- c) die Störgrößenkonstanthaltung;
- d) die Grob-Fein-Regelung;
- e) die Aufschaltung einer Hilfsregelgröße;
- f) die Kaskadenschaltung;
- g) die Verwendung einer Modellregelstrecke;
- h) die Aufschaltung einer Hilfsstellgröße.

In den folgenden Ausführungen werden die Vor- und Nachteile, die Anwendungsbereiche und Bemessungsprinzipien dieser Schaltungen gegeneinander abgegrenzt. Es liegt in der Natur dieser Schaltungen, daß die Abgrenzung nicht immer eindeutig sein wird, weil mehrere Faktoren, wie Realisierbarkeit der Kompensationsglieder, Zeitverhalten der Strecken, Angriffspunkte der Störgrößen, Art des vorgesehenen Reglers und weitere Einflüsse, dabei von Bedeutung sind. Die Ausführungen beschränken sich darum auf das Wesentliche der jeweiligen Schaltung, um die dem Projektanten zur Verfügung stehenden Möglichkeiten darzulegen und entsprechende Anregungen zu vermitteln. Dabei wird vorausgesetzt, daß eine Hauptstörgröße existiert, deren Wirkung auf die Regelgröße möglichst ausgeschaltet werden soll, und daß die weiteren Störgrößen demgegenüber nur eine geringe Auswirkung haben. Generell wird vorausgesetzt, daß der Regelkreis in sich stabil ist und der Regler bereits bezüglich seiner Parameter optimiert wurde.

Die proportionale Störgrößenaufschaltung

Prinzip: Die Störgröße z wird über ein Kompensationsglied F_H auf die Stellgröße y aufgeschaltet.

Voraussetzungen: Die Störung z muß im wesentlichen als z_v -Störung anzusehen sein. Die Regelstrecke soll lineares Verhalten zeigen und das Streckenelement F_{S1} möglichst keine Totzeit enthalten.

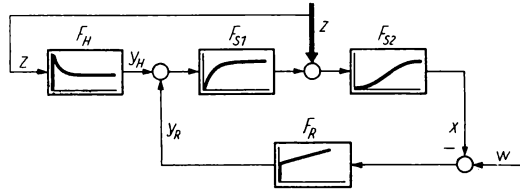


Bild 24. Störgrößenaufschaltung zur Stellgröße

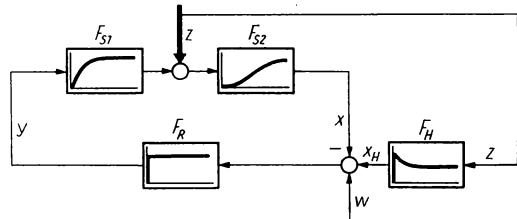


Bild 25. Störgrößenaufschaltung zur Regelgröße

Bemessung: Aus der Übertragungsfunktion

$$\frac{X}{Z}(j\omega) = \frac{F_H + \frac{1}{F_{S1}}}{\frac{1}{F_{S1} \cdot F_{S2}} + F_R}$$

folgt für $\frac{X}{Z}(j\omega) \rightarrow 0$

$$F_H = -\frac{1}{F_{S1}},$$

die Bestimmungsgleichung für das Kompensationsglied. Da es nur selten möglich ist, diese Gleichung exakt für alle Frequenzen zu erfüllen, hat man darauf zu achten, daß die Gleichung für die in z enthaltenen Frequenzkomponenten erfüllt wird. Wie man sich leicht überzeugen kann, wird F_H nur dann ein reines P -Glied, wenn F_{S1} ebenfalls ein reines P -Glied ist. Enthält F_{S1} Verzögerungen, so muß für den vollständigen Ausgleich F_H als PD -Glied ausgelegt werden.

In der Schaltung nach Bild 25 erfolgt die proportionale Störgrößenaufschaltung nicht am Stellort wie im Bild 24, sondern am Reglereingang. Die

Voraussetzungen sind wie im vorgenannten Fall. Als Regler kommt hierbei nur ein P -Regler in Frage. Die Bemessungsvorschrift lautet in diesem Fall:

$$F_H = -\frac{1}{F_{S1} \cdot F_R}$$

Die Störgrößenaufschaltung über ein differenzierendes Glied

Prinzip: Die Störgröße z wird über ein geeignetes Kompensationsglied der Form

$$F_H = K_H \frac{j\omega T_H}{1 + j\omega T_H}$$

auf den Reglereingang geschaltet. Dabei handelt es sich um eine Übergangsfunktion, die auch als „Verschwindimpuls“ bezeichnet wird.

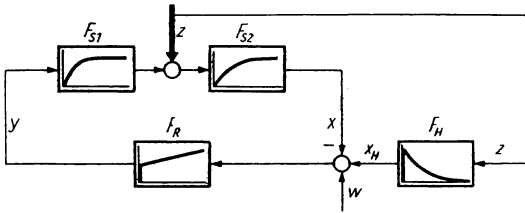


Bild 26. Nachgebende Störgrößenaufschaltung

Voraussetzungen: Die Störgröße soll im wesentlichen als z_y -Störung (Speisestörung) wirksam sein. Das Streckenelement F_{S1} darf keinen bedeutenden Totzeitanteil besitzen.

Bemessung: Aus der Übertragungsfunktion

$$\frac{X}{Z}(j\omega) = \frac{F_H + \frac{1}{F_{S1} \cdot F_R}}{1 + \frac{1}{F_{S1} \cdot F_{S2} \cdot F_R}}$$

folgt für $\frac{X}{Z}(j\omega) \rightarrow 0$

$$F_H = -\frac{1}{F_{S1} \cdot F_R},$$

die Bemessungsvorschrift für das Kompensationsglied. Wenn F_{S1} ein reines P -Glieder und F_R einen PI -Regler darstellen, so ergibt sich daraus für F_H ein D -Glieder mit Verzögerung erster Ordnung. Fällt F_{S1} als PT -Glieder an, so erhält man für F_H ein D_2 -Glieder mit Verzögerung zweiter Ordnung.

Vorteile: Bei dieser D -Aufschaltung der Störgröße kann der Regler ein PI -Verhalten besitzen. Außerdem beeinflussen Linearitätsabweichungen

die statische Regelgenauigkeit nicht. Die dynamische Regelgenauigkeit wird wesentlich besser, als es z. B. mit einem *PID*-Regler allein möglich wäre.

Nachteile: Wenn die Störgröße sehr unruhig ist, wird das Stellglied stark beansprucht. In derartigen Fällen wird diese Schaltung problematisch, wenn man das Störspektrum im Kompensationszweig nicht durch einen geeigneten Tiefpaß begrenzen kann.

Die Störgrößenkonstanthaltung

Prinzip: Die Störgröße wird vor ihrem Eintritt in die Regelstrecke einer separaten Regelung unterworfen und somit vor Eintritt in die Strecke gedämpft.

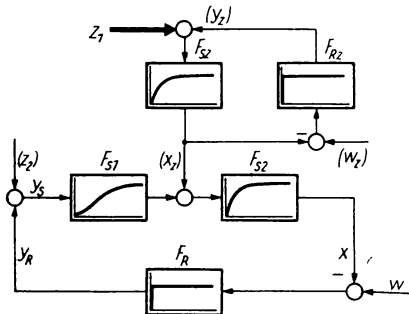


Bild 27. Dämpfung der Störgröße
(Störgrößenkonstanthaltung)

Voraussetzungen: Die Hauptstörgröße muß meßbar und beeinflussbar sein, um einen Regler F_{Rz} anschließen zu können.

Bemessung: Die Übertragungsfunktion der Schaltung

$$\frac{X}{Z_1}(j\omega) = \frac{1}{\left(\frac{1}{F_{Sz}} + F_{Rz}\right) \left(\frac{1}{F_{Sz}} + F_R \cdot F_{S1}\right)}$$

erreicht um so besser ein Minimum, wenn

$$|F_{Rz}(j\omega)| \gg |F_{Sz}(j\omega)|$$

gewählt werden kann. Dieses Ergebnis bedarf einer Erklärung. In den meisten Fällen wird nur der Hilfsregler F_{Rz} als wählbares Übertragungsglied anzusehen sein. Dabei sind jedoch die Stabilitätsbedingungen für den Hilfsregelkreis F_{Rz} und F_{Sz} einzuhalten, so daß die Bemessung dieser Schaltung mit der üblichen Optimierung eines Regelkreises identisch ist.

Vorteile: Diese Schaltung wirkt dann besonders günstig, wenn die Hauptstörgröße z_1 primär als Ausgangsstörung der Regelstrecke wirkt. Sehr wirtschaftlich ist diese Schaltungsvariante dann zu verwirklichen, wenn als Hilfsregler F_{Rz} ein Regler ohne Hilfsenergie verwendet werden kann. Bereits ein einfacher *P*-Regler verbessert hierbei die dynamische Regelgenauigkeit ganz beträchtlich.

Die Grob-Fein-Regelung

Prinzip: Durch Reihenschaltung von zwei Regelkreisen wird eine unerwünschte Störwirkung z_1 in zwei Etappen gedämpft.

Voraussetzungen: Als technische Bedingung ist ein beidseitiger Energie- oder Massenstrom notwendig. Es muß auf einfache Weise möglich sein, eine mehrfache Messung und eine mehrfache Stelleinwirkung vorzunehmen.

Bemessung: Die Übertragungsfunktion dieser Schaltung

$$\frac{X_2}{Z_1}(j\omega) = \frac{1}{(1 + F_{R1} \cdot F_{S1}) (1 + F_{R2} \cdot F_{S2})}$$

strebt einem Minimum zu, wenn gleichzeitig

$$|F_{R1} \cdot F_{S1}| \gg 1 \text{ und } |F_{R2} \cdot F_{S2}| \gg 1$$

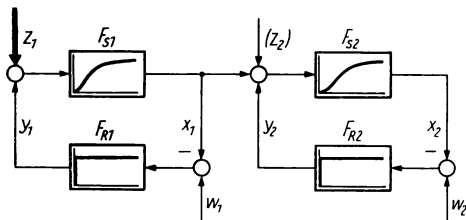


Bild 28. Grob-Fein-Regelung einer Strecke

gewählt werden können. Dieses Ergebnis läuft ähnlich wie im vorigen Fall darauf hinaus, jeden Kreis für sich zu optimieren. Dabei ist zu beachten, daß die Eigenfrequenzen der beiden Kreise nicht gleich werden.

Die Aufschaltung einer Hilfsregelgröße

Prinzip: Der Regelstrecke wird eine Hilfsgröße entnommen, um dem Regler über ein geeignetes Kompensationsglied ein Vorhaltssignal zu vermitteln.

Voraussetzungen: Die Hilfsregelgröße muß die Wirkung der Hauptstörgröße wesentlich schneller anzeigen als die Regelgröße selbst. Das heißt mit anderen Worten: F_{S3} enthält die wesentlichen Zeitkonstanten der gesamten Strecke. Die Störgröße muß praktisch als z_1 -Störung der Strecke anzusehen sein.

Bemessung: Die Übertragungsfunktion dieser Schaltung bezüglich der Wirkung von z_1 auf x :

$$\frac{X}{Z_1}(j\omega) = \frac{\frac{F_{S3}}{F_{S1} \cdot F_R}}{(F_H + F_{S3}) + \frac{1}{F_{S1} \cdot F_{S2} \cdot F_R}}$$

strebt einem Minimum zu, wenn

$$F_H(j\omega) = K_{S3} - F_{S3}(j\omega)$$

gewählt wird. Dieses Ergebnis läßt sich so deuten, daß dem Streckenelement F_{S3} ein Kompensationsglied parallelzuschalten ist, das so beschaffen ist, daß die Parallelschaltung wie ein P -Glieder mit dem Übertragungsfaktor K_{S3} wirkt. Ist $F_{S3} = \frac{K_{S3}}{1 + pT_{S3}}$, so gilt für das Kompen-

sationsglied $F_H = K_{S3} \frac{pT_{S3}}{1 + pT_{S3}}$, das leicht zu verwirklichen ist. Von Ausnahmen abgesehen, begnügt man sich mit einem DT -Glieder zur Kompensation, auch dann, wenn F_{S3} Verzögerungen höherer Ordnung oder zusätzlich eine Totzeit besitzt. Die Bemessungsbedingung wird dann nur näherungsweise erfüllt. Die Festlegung der Parameter des Reglers F_R ist in

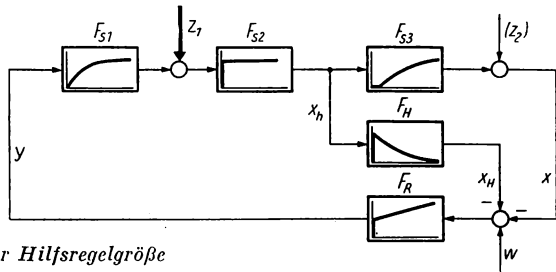


Bild 29. Aufschaltung einer Hilfsregelgröße

dieser Schaltung nicht mehr unabhängig vom Hilfsgrößeneinfluß. Das Kompensationsglied F_H bestimmt entscheidend die Reglereinstellung, weil es eine Zeitkonstante der Regelstrecke kompensiert und damit die Ordnung der Regelstrecke scheinbar vermindert.

Die Kaskadenschaltung

Prinzip: Der Regelstrecke wird eine Hilfsregelgröße x_h entnommen und einem Folgeregler F_{R1} zugeführt. Die Führungsgröße für den Folgeregelkreis bestimmt der vorgeschaltete Führungsregler F_{R2} , der seinerseits von der eigentlichen Regelgröße x und dem Sollwert w beaufschlagt ist.

Voraussetzungen: Die Hauptstöörgröße z_1 muß als Eingangsstörung z_y wirken. Die Regelstrecke $F_{S1} \cdot F_{S2}$ muß durch die Entnahmestelle der Hilfsregelgröße so aufgeteilt werden, daß die wesentlichen Verzögerungen in F_{S2} enthalten sind.

Bemessung: Aus der Gesamtübertragungsfunktion der Schaltung

$$\frac{X}{Z_1}(j\omega) = \frac{1}{\frac{F_H \cdot F_{R1}}{F_{S2}} + F_{R1} \cdot F_{R2} + \frac{1}{F_{S1} \cdot F_{S2}}}$$

ist eine allgemeine Bemessungsvorschrift nicht erkennbar. Nur im speziellen Fall, bei gegebenen Werten für F_{S1} , F_{S2} und F_H , kann eine günstige Be-

stimmung der Reglerparameter vorgenommen werden. Dies erfolgt in der Weise, daß zuerst der schnelle Folgekreis $F_{S1} - F_H - F_{R1}$ für sich allein betrachtet auf Störverhalten z_y optimiert wird. Der so bestimmte Folgekreis wird dann als Übertragungsglied betrachtet, das in Reihe mit dem Streckenteil F_{S2} liegt, und für diese Anordnung wird der Regler F_{R2} auf Störverhalten z_x optimiert. Die Optimierung eines Kreises auf z_x -Störungen ist identisch mit der Optimierung auf Führungsverhalten (s. Abschn. 3.3).

Vorteile: Den Vorteil der Kaskadenschaltung erkennt man durch Vergleich mit dem Störverhalten eines einschleifigen Kreises. Dazu wird im Bild 30 $F_H = 0$ und $F_{R1} = 1$ gesetzt. Die Übertragungsfunktion für das Störverhalten lautet dann

$$\frac{X}{Z_1}(j\omega) = \frac{1}{F_{R2} + \frac{1}{F_{S1} \cdot F_{S2}}}.$$

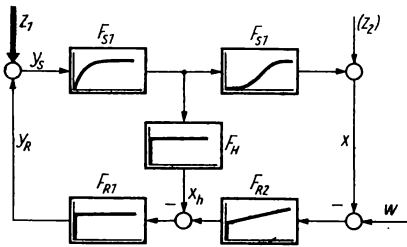


Bild 30. Kaskadenschaltung

Daraus ist näherungsweise abzulesen, daß die Kaskadenschaltung das Störverhalten mindestens um den Wert des P -Faktors des Folgereglers verbessert.

Die Verwendung einer Modellregelstrecke

Prinzip: Der Regelkreis wird über eine Modellregelstrecke geschlossen, die den gleichen Stell- und Störwirkungen wie die Originalstrecke ausgesetzt ist.

Voraussetzungen: Diese Schaltung wird verwendet, wenn x nicht ständig meßbar ist, jedoch über ein mathematisches oder physikalisches Modell als proportionales Abbild x_M gewonnen werden kann. Dazu ist erforderlich, daß die wesentlichen Störgrößen entweder direkt oder über Meßwertumformer auf das Modell wirken können.

Bemessung: Aus der Übertragungsfunktion dieser Schaltung

$$\frac{X}{Z_1}(j\omega) = \frac{F_{S2}}{1 + F_{S1} \cdot F_R \cdot F_{SM}}$$

ist zu entnehmen, daß der Betrag der Übertragungsfunktion $|F_{SM}|$ möglichst groß gegen den Betrag der Funktion des Streckenteils $|F_{S2}|$ im interessierenden Frequenzbereich zu wählen ist, damit $\frac{X}{Z_1}(j\omega)$ möglichst klein wird. Für die Übergangsfunktion des Modells sind danach möglichst kleine Zeitkonstanten, gemessen an denen der Strecke, anzustreben.

Die Aufschaltung einer Hilfsstellgröße

Prinzip: Die Regelstrecke wird zusätzlich einer Hilfsstellgröße y_h unterworfen, die in der Lage ist, die Regelgröße vorübergehend schneller zu korrigieren, als es durch die Hauptstellgröße y möglich ist.

Voraussetzungen: Es muß die Möglichkeit bestehen, einen zweiten Stellort an der Strecke wirksam werden zu lassen, der die Strecke so aufteilt, daß die wesentlichen Verzögerungen der Strecke im Teil F_{S1} zwischen Hauptstellgröße und Hilfsstellgröße liegen.

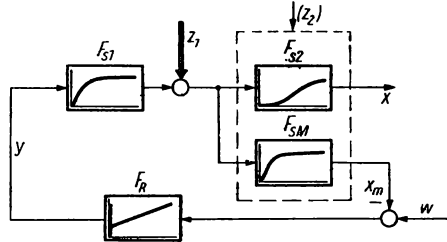


Bild 31. Regelung mit Modellregelstrecke

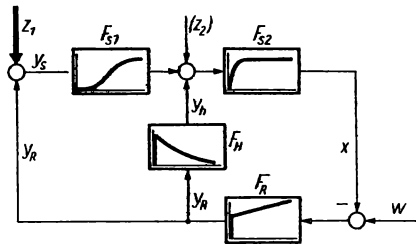


Bild 32. Aufschaltung einer Hilfsstellgröße

Bemessung: Die Übertragungsfunktion dieser Schaltung für das Störverhalten z_1 lautet

$$\frac{X}{Z_1}(j\omega) = \frac{1}{\frac{1}{F_{S2}} + F_R(F_{S1} + F_H)}$$

Dieser Ausdruck strebt einem Minimum zu, wenn das Kompensationsglied so bemessen wird, daß

$$F_H(j\omega) = K_{S1} - F_{S1}(j\omega)$$

gilt. Ähnlich wie im Fall der Verwendung einer Hilfsregelgröße ist auch hier dafür zu sorgen, daß die Parallelschaltung von F_{S1} und F_H wie ein P -Glieder wirkt. Die Problematik, ein geeignetes Kompensationsglied zu finden, wenn F_{S1} eine Totzeit oder mehrere Zeitkonstanten enthält, besteht auch hier.

Tafel 5. Voraussetzungen für die Verbesserung der Regelung durch Hilfsgrößenaufschaltung

Schaltungsprinzip	Störart		Störgröße ist		Regelgröße ist		Hilfs- regel- größe ist meßbar	Hilfs- stell- größe ist einzu- richten
	z_x	z_y	meßbar	nicht meßbar	meßbar	nicht meßbar		
Störgrößenaufschaltung	—	+	+	—	+	—	—	—
Störgrößenkonstanthaltung	+	(+)	+	—	+	—	—	+
Grob-Fein-Regelung	—	—	—	+	+	—	+	+
Hilfsregelgrößenaufschaltung	—	+	—	+	+	—	+	—
Kaskadenschaltung	—	+	—	+	+	—	+	—
Modellregelstrecke	—	+	+	—	—	+	—	+
Hilfsstellgrößenaufschaltung	+	—	—	+	+	—	—	—
Steuerung einer Größe	—	+	+	—	(+)	+	—	(+)

Tafelzeichen: + geeignet; (+) bedingt geeignet; — ungeeignet

Zusammenfassend werden in der nachstehenden Tafel 5 einige Auswahlrichtlinien für die geeignete Variante der Verbesserung eines Regelkreises durch Hilfsgrößenaufschaltung gegeben.

Mit den bisher behandelten Schaltungen sind natürlich nicht alle Möglichkeiten ausgeschöpft. So gibt es z. B. für Standregelungen die oft benutzte Methode der Dreikomponentenregelung (Aufschaltung von zwei Störgrößen in Differenzschaltung) oder für die Regelung von Destillationsprozessen die Methode der „Überkreuzregelung“ als Verfahren, die an spezielle Technologien gebunden sind. In ökonomischer Hinsicht bleibt zu bemerken, daß die Anwendung einer durch Hilfsgrößen verbesserten Regelung fast immer teurer wird als der einschleifige Kreis. In Zweifelsfällen ist es trotzdem angebracht, die aufwendigere Schaltung zu projektieren, um die notwendigen Geräte zur Verfügung zu haben und spätere Änderungen an der Regelstrecke zu vermeiden.

Rechenbeispiele

Als *Beispiel 1* wird nachstehend für eine Störgrößenaufschaltung über ein differenzierendes Glied der Rechnungsgang angegeben (s. Bild 26).

Gemessen wurden die beiden Übertragungsfunktionen der Strecke

$$F_{S1} = \frac{K_{S1}}{1 + j\omega T_{S1}}, \quad F_{S2} = \frac{K_{S2}}{1 + j\omega T_{S2}} e^{-j\omega T_{t2}}$$

mit den Kennwerten

$$K_{S1} = 3,0, \quad K_{S2} = 2,5, \quad T_{S1} = 8 \text{ s}, \quad T_{S2} = 85 \text{ s}, \quad T_{t2} = 23 \text{ s}.$$

Aus den Gleichungen für die Bestimmung der Parameter des *PI*-Reglers (Tafel 6) für eine *PT_ST_I*-Strecke mit *z_y*-Störung folgt

$$K_R = \frac{0,6 \cdot T_{S2}}{K_{S1,2} \cdot T_t} = \frac{0,6 \cdot 85}{3,0 \cdot 2,5 \cdot 23} = \underline{\underline{0,295}},$$

$$K_{IR} = \frac{0,7}{K_{S1,2} \cdot T_t} = \frac{0,7}{3,0 \cdot 2,5 \cdot 23} = \underline{\underline{40,5 \cdot 10^{-3} \frac{1}{s}}}.$$

Dabei wurde die kleine Zeitkonstante T_{S1} vernachlässigt. Die Bestimmungsgleichung für die Übertragungsfunktion F_H des Gliedes im Signalfuß der Störgröße *z* lautet in diesem Fall

$$F_H = - \frac{1}{F_{S1} \cdot F_R} = - \frac{1}{\frac{K_{S1}}{1 + j\omega T_{S1}} \left(K_R + \frac{1}{j\omega} K_{IR} \right)}.$$

Durch Umrechnung erhält man

$$F_H = - \frac{j\omega \left(\frac{1}{K_{S1} \cdot K_{IR}} + j\omega \frac{T_{S1}}{K_{S1} \cdot K_{IR}} \right)}{1 + j\omega \frac{K_R}{K_{IR}}}.$$

Diese Funktion ist mit üblichen Zeitgliedern nicht zu verwirklichen. Es ist notwendig, eine weitere Näherung einzuführen, indem auch hier $T_{S1} = 0$ gesetzt wird. Dann nimmt F_H die Form eines differenzierenden Gliedes mit Verzögerung 1. Ordnung an.

$$F_H \approx - \frac{1}{1 + j\omega \frac{K_R}{K_{IR}}} \cdot \frac{j\omega \frac{K_R}{K_{S1} \cdot K_{IR}}}{1 + j\omega \frac{K_R}{K_{IR}}} = K_H \frac{j\omega T_H}{1 + j\omega T_H}.$$

Daraus folgt für die Parameter des Zeitgliedes K_H und T_H :

$$\text{Übertragungsfaktor } K_H = \frac{1}{K_{S1} \cdot K_R} = \frac{1}{3,0 \cdot 0,295} = \underline{\underline{1,13}},$$

$$\text{Zeitkonstante } T_H = \frac{K_R}{K_{IR}} = \frac{0,295}{4,05 \cdot 10^{-3}} = \underline{\underline{73 \text{ s}}}.$$

Als *Beispiel 2* wird der Fall der Benutzung einer Hilfsregelgröße behandelt (s. Bild 29). Die Bemessungsgleichung für die Übertragungsfunktion des Gliedes F_H im Signalfluß der Hilfsregelgröße x_h lautet

$$F_H = K_{S3} - F_{S3}.$$

Gemessen wurde

$$F_{S3} = \frac{K_{S3}}{1 + j\omega T_{S3}} e^{-j\omega T_{t3}}$$

mit

$$K_{S3} = 0,63, \quad T_{S3} = 135 \text{ s}, \quad T_{t3} = 10 \text{ s},$$

Die Totzeit T_{t3} wird mit zur Zeitkonstante T_{S3} gerechnet und mit einer Ersatzzeitkonstante $T_{S3}^* = T_{S3} + T_{t3} = 145 \text{ s}$ gearbeitet.

$$\begin{aligned} F_H &= K_{S3} - \frac{K_{S3}}{1 + j\omega T_{S3}^*} \\ &= \frac{K_{S3} (1 + j\omega T_{S3}^*) - K_{S3}}{1 + j\omega T_{S3}^*} \\ &= \frac{K_{S3} \cdot j\omega T_{S3}^*}{1 + j\omega T_{S3}^*} = \frac{0,63 \cdot j\omega 145}{1 + j\omega 145}. \end{aligned}$$

Damit sind die für F_H notwendigen Parameter bestimmt. Der Übertragungsfaktor K_H und die Zeitkonstante T_H des differenzierenden Zeitgliedes mit Verzögerung 1. Ordnung lauten

$$K_H = 0,63, \quad T_H = 145 \text{ s},$$

3.3. Auswahl des geeigneten Reglers und Bemessung der Parameter

Sieht man einmal von den selbstverständlichen Voraussetzungen ab, die darin bestehen,

daß die von dem Meßwertumformer oder dem Meßfühler selbst gelieferten Signale bezüglich ihrer Größe und Signalart zum Regler passen müssen,

daß mit dem Reglerausgangssignal die Stelleinrichtung auszusteuern ist,

daß der Regler für Hilfsgrößenaufschaltungen genügend viel Eingänge besitzt,

daß seine konstruktive Gestaltung den Einsatzbedingungen entspricht usw.,

so ist die Bestimmung des richtigen Reglers in funktionstechnischer Hinsicht von entscheidender Bedeutung. Die Lösung dieser Aufgabe ist relativ schwierig, da genaugenommen alle theoretischen und praktischen Erkenntnisse der Regelungstechnik hierbei zu beachten sind. In den folgenden Abschnitten wird versucht, durch sinnvolle Beschränkung auf die häufigen Anwendungsfälle einen Leitfaden zu geben, der bei minimalem Aufwand einer günstigen Lösung nahekommt.

Es beziehen sich auch hier die Betrachtungen über die Auswahl eines geeigneten Reglers und die Bestimmung der Reglerparameter auf die beiden elementaren Streckentypen, der PT_sT_t - und der IT_t -Strecke. Die Optimierungsregeln sind dabei auf den Fall zugeschnitten, daß eine sprungförmige Störung des Kreises nach Möglichkeit zu einem aperiodischen Verhalten der Regelgröße mit kürzester Einschwingdauer führt. Unterliegt ein Regelkreis andersgearteten Störungen, wie beispielsweise sinusförmigen, impulsartigen oder rampenförmigen Störungen, so wird das optimale Verhalten bei einer für Sprungstörungen bemessenen Reglereinstellung nicht erreicht. Von wenigen Ausnahmen abgesehen, führt eine Einstellung des Reglers nach den im folgenden aufgeführten Regeln jedoch zu brauchbaren Ergebnissen. Wegen der nur näherungsweisen Kenntnis der Streckenkenntnisse, der Optimierungsverfahren sowie der Vernachlässigung von Einflüssen, die im Projektstadium nicht erkannt werden, ist eine gewisse Korrektur der Reglerparameter bei der Inbetriebsetzung nicht zu vermeiden. Der große Vorteil einer näherungsweisen Berechnung der Reglerparameter liegt darin, daß nicht generell falsch bemessene Geräte eingesetzt werden und daß die Regelkreise nicht mit völlig falschen Reglereinstellungen in Betrieb genommen werden. Ohne die Durchrechnung einiger Varianten ist die begründete Auswahl des geeigneten Reglertyps nicht möglich. Die Typenauswahl beschränkt sich ja nicht nur auf die Festlegung des P -, PI -, PD - oder PID -Zeitverhaltens von stetigen Reglern, sondern umfaßt auch die Prüfung der Anwendbarkeit von Reglern mit unstetigem Ausgangssignal. Aus ökonomischen und technischen Gründen sollte speziell bei elektrischen Reglern immer geprüft werden, ob im zur Bearbeitung stehenden Fall nicht ein Zweipunkt-, Dreipunkt- oder gestasteter Dreipunktregler bzw. ein PI -ähnlicher Regler mit impulsmoduliertem Ausgangssignal eingesetzt werden kann, wozu die folgenden Ausführungen als Orientierungshilfe dienen sollen.

P-Regler

Vorteile: Als einfachster Regler unter den stetigen Vertretern ist dieser Typ bei reinen P -, I - oder PT_S -Strecken anwendbar und erfüllt dabei auch vollkommen seine Aufgabe. Der Proportionalitätsfaktor K_R kann in diesen Fällen theoretisch beliebig groß gewählt werden. Die Einstellung bereitet keine Schwierigkeiten.

Nachteile: Da praktische Systeme immer mit Verzögerungen behaftet sind, ist nur ein endlicher Wert von K_R realisierbar. Mit Hilfe der in Tafel 6 enthaltenen Optimierungsbedingungen ist der zulässige K_R -Wert zu errechnen und zu prüfen, ob die bleibende Regelabweichung im betrachteten Fall noch zulässig ist. Dazu dienen für verschiedene Störungsfälle die Gleichungen für Strecken mit Ausgleich:

$$\begin{aligned}\lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{X}{Z_y}(j\omega) &= \frac{K_S}{1 + K_S \cdot K_R}, \\ \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{X}{Z_x}(j\omega) &= \frac{1}{1 + K_S \cdot K_R}, \\ \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{X}{Z_w}(j\omega) &= \frac{K_S \cdot K_R}{1 + K_S \cdot K_R}.\end{aligned}$$

Für Strecken ohne Ausgleich gilt die Beziehung

$$\lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{X}{Z_y}(j\omega) = \frac{1}{K_R}.$$

Bei Führungsverhalten oder Z_x -Störungen entsteht an I -Strecken keine bleibende Regelabweichung.

I-Regler

Vorteile: Reine I -Regler sorgen im stationären Zustand für ein vollständiges Ausregeln von Störgrößen. Als hydraulischer Strahlrohrregler hat dieser Typ wegen seines einfachen Aufbaus und der Möglichkeit, unmittelbar eine gewisse Stelleistung abzunehmen, in der Vergangenheit verbreitet Anwendung gefunden. Elektrische oder pneumatische I -Regler werden kaum angewendet.

Nachteile: Für I -Strecken ist dieser Typ nicht verwendbar. Bei P -Strecken mit Verzögerungen sind, gemessen an den anderen Reglertypen, aus Stabilitätsgründen nur sehr kleine Eigenfrequenzen erreichbar. Das Stör- und Führungsverhalten derartiger Kreise ist dementsprechend ungünstig.

PI-Regler

Vorteile: Für P -Regelstrecken mit Verzögerungen höherer Ordnung oder Totzeitanteil findet der PI -Regler ein weites Anwendungsgebiet. Er ist nicht wesentlich teurer als ein P -Regler und garantiert dafür im stationären Fall für den vollständigen Abbau der Regelabweichung. Auch bei nicht konstanten Streckenparametern (z.B. nichtlineare Strecken) ist die Reglereinstellung nicht kritisch, weil im Gegensatz zum PID -Regler das Optimierungsziel auch bei Fehlanpassung nicht sehr beeinflusst wird.

Nachteile: Die Eigenfrequenz des Reglers ist im Vergleich zum *P*-Regler niedriger, was zur Folge hat, daß die Ausregelzeit etwas größer wird. Bei Anfahrvorgängen oder beim Übergang von Hand- auf Automatikbetrieb kann die *I*-Komponente des Reglers zu einer einmaligen großen Überschwingung führen, wenn nicht ein Regler mit selbsttätiger Strukturumschaltung verwendet wird.

PD-Regler

Vorteile: Dieser Typ hat in statischer Hinsicht die gleichen Eigenschaften wie ein *P*-Regler. In dynamischer Hinsicht sind bessere Eigenschaften erreichbar, wenn es sich um Strecken mit überwiegender Verzögerung handelt und der Totzeitanteil nicht wesentlich ist. (*PD*-Regler werden vorwiegend bei Drehzahl- oder Spannungsregelungen benutzt.)

Nachteile: Die statische Regelgenauigkeit ist wie beim *P*-Regler von der erreichbaren Kreisverstärkung abhängig. Wenn der Störgröße ein höherfrequenter Anteil geringer Amplitude überlagert ist, erfährt diese Frequenzkomponente eine beträchtliche Verstärkung und kann die Stelleinrichtung unnötig stark beanspruchen.

PID-Regler

Vorteile: Dieser Typ vereinigt die Vorteile des *PI*- und *PD*-Reglers in einem Gerät. Statische und dynamische Regelgenauigkeit sind gleichermaßen gut.

Nachteile: Die Einstellung der Reglerparameter muß exakt erfolgen. Bei ungenauer Einstellung oder sich verändernden Streckenparametern gehen die Vorteile verloren, und die Regelung wird schlechter als bei Verwendung eines *PI*-Reglers. Es ist darum häufig günstiger, anstelle eines *PID*-Reglers einen *PI*-Regler zu verwenden und zusätzlich eine geeignete Hilfsgrößenaufschaltung vorzunehmen.

Eine übersichtliche Darstellung der Einstellparameter für die verschiedenen Typen von stetigen Reglern an idealisierten Strecken wird in Tafel 6 gegeben. Für die $PT_S T_t$ -Strecke gelten die Näherungsformeln nur für ein Verhältnis der Zeitkennwerte $T_S/T_t > 1$. Sind Strecken zu bearbeiten, die ein Verhältnis der Zeitkennwerte $T_S/T_t < 1$ haben, so können die Reglerparameter nach den Formeln für die PT_t -Strecke berechnet werden, indem für T_t in diesen Formeln die Summe aus Totzeit und halber Zeitkonstante gesetzt wird.

Eine andere Kategorie von Reglern steht dem Projektanten in Form der unstetigen Regler zur Verfügung. Als Zwei- oder Mehrpunktregler, wie z. B. als Fallbügelregler, sind diese Geräte verbreitet in Gebrauch. Die Berechnung von Regelkreisen mit unstetigen Reglern ist allerdings schwieriger als die von stetigen Reglern, weil sich ein unstetiger Vorgang mathematisch nicht so einfach formulieren läßt. Als neue Bemessungsgrößen treten die Amplitude des Schaltsprungs Q bei Zweipunktregelkreisen, die Geschwindigkeit des Stellantriebs V_M bei Dreipunktreglern, die Impulsdauer T_d und die Impulsperiode T_0 bei getasteten Reglern sowie die Ansprechgröße X_a in den Betrachtungskreis. Die Bemessungsformeln sind für die nachstehend behandelten Regler in der Tafel 7 zusammengefaßt.

Tafel 6. Einstellparameter für stetige Regler an $PT_S T_t$ -, PT_t -, und IT_t -Strecken für z -, z_v - und z_w -Sprungstörungen zur Erzielung einer annähernd aperiodischen Übergangsfunktion kürzester Dauer

Regler- typ	$PT_S T_t$ -Strecke ($T_S/T_t > 1$)		PT_t -Strecke	IT_t -Strecke	
	z_w -Störung z_x -Störung	z_y -Störung	z_y -Störung	w -Stö- z_x -Stör- ung	z_y -Störung
I	—	$K_{IR} = \frac{1}{2(T_S + T_t)} \cdot K_S$	$K_{IR} = \frac{0,55}{K_S \cdot T_t}$	—	—
	$K_R = \frac{0,3 \cdot T_S}{K_S \cdot T_t}$	$K_R = \frac{0,3 \cdot T_S}{K_S \cdot T_t}$	$K_R = \frac{0,4}{K_S}$	$K_R = \frac{0,3}{K_{IS} \cdot T_t}$	$K_R = \frac{0,3}{K_{IS} \cdot T_t}$
PI	$K_R = \frac{0,35 \cdot T_S}{K_S \cdot T_t}$	$K_R = \frac{0,6 \cdot T_S}{K_S \cdot T_t}$	$K_R = \frac{0,3}{K_S}$	—	$K_R = \frac{0,6}{K_{IS} \cdot T_t}$
	$K_{IR} = \frac{0,29}{K_S \cdot T_t}$	$K_{IR} = \frac{0,15 \cdot T_S}{K_S \cdot T_t^2}$	$K_{IR} = \frac{0,7}{K_S \cdot T_t}$	—	$K_{IR} = \frac{0,15}{K_{IS} \cdot T_t^2}$
PD	$K_R = \frac{0,4 \cdot T_S}{K_S \cdot T_t}$	$K_R = \frac{0,8 \cdot T_S}{K_S \cdot T_t}$	—	—	—
	$K_{DR} = \frac{0,15 \cdot T_S}{K_S}$	$K_{DR} = \frac{0,25 \cdot T_S}{K_S}$	—	—	—
PID	$K_R = \frac{0,6 \cdot T_S}{K_S \cdot T_t}$	$K_R = \frac{0,95 \cdot T_S}{K_S \cdot T_t}$	—	—	$K_R = \frac{0,95}{K_{IS} \cdot T_t}$
	$K_{IR} = \frac{0,6}{K_S \cdot T_t}$	$K_{IR} = \frac{0,4 \cdot T_S}{K_S \cdot T_t^2}$	—	—	$K_{IR} = \frac{0,4}{K_{IS} \cdot T_t^2}$
	$K_{DR} = \frac{0,3 \cdot T_S}{K_S}$	$K_{DR} = \frac{0,4 \cdot T_S}{K_S}$	—	—	$K_{DR} = \frac{0,4}{K_{IS}}$

Zweipunktregler

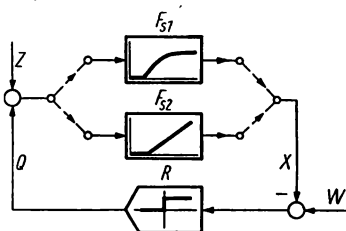
Vorteile: Der Zweipunktregler gestattet, besonders in Form eines Meßwerkreglers, sehr preisgünstige und betriebssichere Regelkreise aufzubauen. Es wird dazu kein Stellgetriebe oder Motor benötigt, sondern als Stelleinrichtung genügt ein Glied mit Schaltverhalten. Das dynamische Verhalten ist trotzdem für alle Störfälle sowohl an P - wie auch an I -Strecken ausgezeichnet.

Nachteile: Die Regelstrecke und die den Stellstrom liefernde Quelle werden ständig impulsartig beansprucht, was besonders bei nichtelektrischen Stelleinrichtungen stört. Die Regelgröße führt prinzipiell eine Arbeitsschwingung aus. Bei wesentlichem Totzeitanteil in der Strecke wird die Amplitude der Arbeitsschwingung zu groß, so daß der Zweipunktregler dann nicht mehr sinnvoll zu verwenden ist. Die bei bleibenden Störeinwirkungen auftretende mittlere Regelabweichung und die Amplitude der Arbeitsschwingung sind nach den folgenden Gleichungen abzuschätzen. Diese Gleichungen gelten unter der Voraussetzung eines symmetrischen Ausgangszustandes (Impulsdauer = Impulspause).

Bild 33. Zweipunktregler an P - oder I -Strecke

$$F_{S1} = \frac{K_S}{1 + j\omega T_S} e^{-j\omega T_t}$$

$$F_{S2} = \frac{K_{IS}}{j\omega} e^{-j\omega T_t}$$



Arbeitsschwingungen bei

$$PT_S T_t\text{-Strecke:} \quad x_f \approx \pm \frac{Q \cdot K_S \cdot T_t}{2 \cdot T_S};$$

$$IT_t\text{-Strecke:} \quad x_f \approx \pm \frac{Q \cdot K_{IS} \cdot T_t}{2}.$$

Schwingungsdauer der Arbeitsschwingung:

$$T_f \geq 4 T_t.$$

Bleibende mittlere Regelabweichung bei $PT_S T_t$ -Strecke und mit

$$z_p\text{-Störung:} \quad x_p \approx \frac{Z \cdot T_t \cdot K_S}{T_S};$$

$$z_w\text{-Störung:} \quad x_p \approx \frac{T_t}{T_S} \left(W - \frac{Q \cdot K_S}{2} \right).$$

Bleibende mittlere Regelabweichung bei IT_t -Strecke mit

$$z_p\text{-Störung:} \quad x_p \approx \frac{Z \cdot T_t \cdot K_S}{T_S};$$

$$z_w\text{-Störung:} \quad x_p = 0.$$

Dreipunktregler mit integraler Stelleinrichtung

Vorteile: Einfacher, billiger Regler zum Anschluß an elektromotorische und hydromotorische Stellantriebe mit konstanter Stellgeschwindigkeit. Eine bleibende Regelabweichung tritt nicht auf, da der Regler zusammen mit dem Stellantrieb ein integralähnliches Verhalten zeigt. Die Bemessung ist sehr einfach und beschränkt sich auf die Festlegung der Stellgeschwindigkeit V_M des Antriebs und der Ansprechschwelle X_a .

Nachteile: Die Ansprechempfindlichkeit und die Stellgeschwindigkeit sind gegenläufig voneinander abhängig. Das dynamische Verhalten eines Kreises

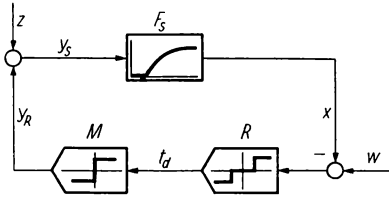


Bild 34. Regelkreis mit Dreipunktregler¹⁾

Regler R gekennzeichnet durch die Ansprechempfindlichkeit X_a ;

Stellglied M gekennzeichnet durch die konstante Stellgeschwindigkeit V_M ;

Strecke F_S gekennzeichnet durch die Parameter K_S , T_S und T_t

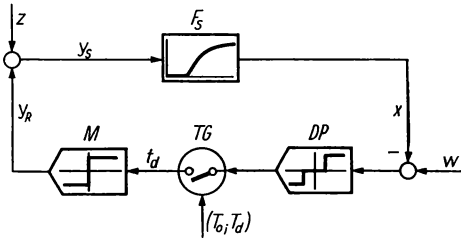


Bild 35. Regelkreis mit getastetem Dreipunktregler

Taktgeber TG gekennzeichnet durch Taktperiode T_0 und Tastdauer T_d ;

sonstige Geräte wie Bild 34

mit Dreipunktregler ist ungünstig. Nur wenn sich die Störgrößen, gemessen an der Stellgeschwindigkeit, langsam verändern, ist der Einsatz sinnvoll. Integrale Strecken können mit Dreipunktreglern nicht betrieben werden, da der Kreis dann prinzipiell instabil ist.

Getasteter Dreipunktregler

Vorteile: Dieser Reglertyp, wie er z. B. als Fallbühelregler bekannt ist, besitzt zunächst einmal die gleichen Vorteile wie der Dreipunktregler. Es tritt jedoch als wesentlich günstigere Eigenschaft die bessere Anpaßbarkeit des Gerätes an die Strecke und den Stellantrieb hinzu. Mit Hilfe der Taktperiode T_0 und der Impulsdauer T_d besteht ein weiterer Spielraum zur Anpassung an die konkreten Verhältnisse.

Nachteile: Wenn nicht wie beim Fallbühelregler die Impulsabbeeinrichtung im Regler eingebaut ist, muß ein Taktgeber mit einstellbarer Impulsfunktion mit einem Dreipunktregler kombiniert werden. Wie die Optimie-

¹⁾ Die Kennlinie im Übertragungsglied M der Bilder 34 bis 37 symbolisiert die drei Betriebszustände des Motorgetriebes: Linkslauf, Rechtslauf und Stillstand mit den beiden Geschwindigkeiten $y_R = \pm V_M$.

rungsrichtlinien in Tafel 7 zeigen, ist die Bemessung nicht einfach, weil vier voneinander abhängige Parameter, nämlich V_M , X_a , T_d und T_0 , sinnvoll festzulegen sind. Das dynamische Verhalten ist auch hier ungünstig, da die Stör-Amplitude vom Regler nicht bewertet wird.

Getasteter P-Impulsregler

Vorteile: Gegenüber den Reglertypen mit Dreipunktverhalten hat diese Ausführung den weiteren Vorteil einer durch die Regelabweichung bewerteten Impulsdauer. Damit wird das Gesamtverhalten trotz unstetiger Arbeitsweise einem stetigen I -Regler ähnlich. Die Ansprechempfindlichkeit kann klein gehalten werden, da diese Größe in den Optimierungsbedingungen nur noch von untergeordneter Bedeutung ist. Für P -Strecken mit überwiegender Totzeit liefert dieser Reglertyp die besten Ergebnisse. Bei

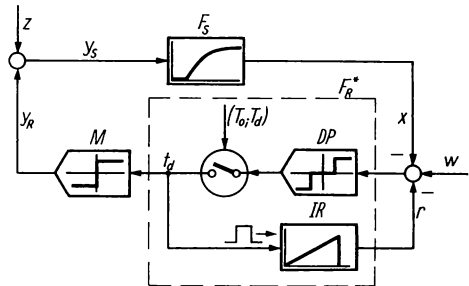


Bild 36. Getasteter P -Impulsregler mit der Übertragungsfunktion

$$F_R^* \approx \frac{t_d}{x} = K_R^*$$

DP Dreipunkt-Schaltglied;

IR Impulsrückführung;

M Zweilauf-Stelleinrichtung (Stellgeschwindigkeit V_M)

Strecken mit variabler Totzeit ist über T_0 eine Parametersteuerung möglich, wenn der Regelstrecke eine Hilfsgröße entnommen werden kann, die der Totzeit proportional ist.

Nachteile: Die dynamischen Eigenschaften sind mit Ausnahme der PT_1 -Strecke im allgemeinen nicht besser als bei einem I -Regler. Für I -Strecken ist auch dieser Reglertyp nicht einsetzbar. Die Bemessung ist relativ schwierig, weil auch hier vier voneinander abhängige Parameter sinnvoll festzulegen sind, nämlich V_M , T_0 , X_a und K_R^* .

Die mit K_R^* bezeichnete Größe ist der Übertragungsfaktor des Reglers, der nach der Gleichung

$$t_d = x K_R^*$$

den Proportionalitätsfaktor zwischen Impulsdauer und Regelgröße darstellt. Die Dimension dieses Übertragungsfaktors ergibt sich in „Sekunden je Dimension der Reglereingangsgröße“, z. B. $\left[\frac{s}{mA} \right]$.

PI-Impulsregler

Vorteile: Dieser erst in den letzten Jahren bekannt gewordene Reglertyp besitzt dem stetigen *PI*-Regler ähnliche Eigenschaften. Er ermöglicht den Einsatz einfacher leistungsstarker Stellantriebe mit konstanter Stellgeschwindigkeit und gestattet so, aufwendige Leistungsverstärker, teure stetig steuerbare Stellmotoren und Stellungsgeber zu vermeiden.

Auf Grund der Wirkungsweise der inneren Impulsrückführung entsteht ein progressives Übertragungsverhalten des Reglers, das bei richtiger Bemessung zu kleineren Regelflächen führt, als es stetige *PI*-Regler erreichen.

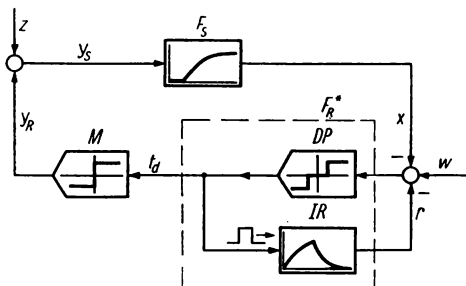


Bild 37. *PI*-Impulsregler mit der Übertragungsfunktion

$$F_R^* \approx \frac{t_d}{s} = K_R^* + \frac{1}{j\omega} K_{IR}^*$$

DP Dreipunkt-Schaltglied (Ansprechschwelle x_a);

IR Impulsrückführung;

M Zwellauf-Stelleinrichtung (Stellgeschwindigkeit v_M)

Nachteile: Das nichtlineare Verhalten der Reglerparameter K_R^* und K_{IR}^* als Funktion der Regelabweichung macht die richtige Anpassung und Einstellung des Gerätes schwierig. Die Einstellung ist abhängig von dem in Ansatz gebrachten Amplitudenwert der Störgröße. Für Projektierungszwecke genügt es, mit den Bemessungsvorschriften für stetige *PI*-Regler zu arbeiten. Die Umsetzung der so gefundenen K_R - und K_{IR} -Werte in die Einstellgrößen des Gerätes selbst ist nur über vom Hersteller zu liefernde Kurvenblätter oder durch Versuch möglich. Die durch den kürzesten Impuls $T_{d\min}$ bestimmte Positioniergenauigkeit des Stellgliedes in Verbindung mit dem Einfluß der Stellgeschwindigkeit v_M gestattet es bei den üblichen Anwendungen nicht, Stellantriebe zu verwenden, die den Stellbereich schneller als in 40 s durchlaufen. Zur Vermeidung von Nachlauferscheinungen des Stellantriebs nach jedem Impuls sind teilweise mechanische Bremsanordnungen oder Bremsschaltungen erforderlich.

Wie für die stetigen Regler wird in Tafel 7 eine Übersicht der Bemessungsbedingungen für den annähernd schwingungsfreien Einlauf der Regelgröße in die Unempfindlichkeitszone gegeben.

Zur besseren Übersicht sind die Funktionen ϱ , γ und η im Bild 38 in ihrem Verlauf dargestellt. Es ist damit einfacher festzustellen, mit welcher Wirkung ein wählbarer Parameter in die Optimierungsbedingung eingeht.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die Auswahlgesichtspunkte für den geeigneten Regler vom Streckenverhalten, von den Störgrößen, von der

Tafel 7. Die Relation zwischen den Parametern unstetiger Regler an $PT_S T_t$ -, PT_t - und IT_t -Strecken zur Erzielung einer annähernd aperiodischen Übergangsfunktion kürzester Dauer der Regelgröße bei Sprungstörungen

Reglertyp	$PT_S T_t$ -Strecke ($T_S/T_t > 1$)	PT_t -Strecke	IT_t -Strecke
Zweipunkt-regler	$Q = \frac{2W_0}{K_S}$	$Q = \frac{2W_0}{K_S}$	$Q = 2Z$
Dreipunkt-regler	$V_M = \frac{2X_a}{K_S(T_t + T_S)}$	$V_M = \frac{2X_a}{K_S \cdot T_t}$	—
Getasteter Dreipunkt-regler	$V_M = \frac{2X_a}{K_S \cdot T_d \cdot \varrho}$	$V_M = \frac{2X_a}{K_S \cdot T_d \cdot \eta}$	—
Getasteter P-Impuls-regler	$V_M = \frac{1}{K_S \cdot K_R^* \cdot \gamma}$ $V_M \leq \frac{2X_a}{K_S \cdot T_{d\min}}$	$V_M = \frac{1}{K_S \cdot K_R^*}$ $V_M \leq \frac{2X_a}{K_S \cdot T_{d\min}}$ $T_0 = T_t + T_{d\max}$	—
PI-Impuls-regler	$V_M \cdot K_R^* = \frac{0,35 \cdot T_S}{K_S \cdot T_t}$ $V_M \cdot K_{IR}^* = \frac{0,29}{K_S \cdot T_t}$ $V_M \leq \frac{2X_a}{K_S \cdot T_{d\min}}$	$V_M \cdot K_R^* = \frac{0,3}{K_S}$ $V_M \cdot K_{IR}^* = \frac{0,7}{K_S \cdot T_t}$ $V_M \leq \frac{2X_a}{K_S \cdot T_{d\min}}$	$V_M \cdot K_R^* = \frac{0,6}{K_{IS} \cdot T_t}$ $V_M \cdot K_{IR}^* = \frac{0,15}{K_{IS} \cdot T_t^2}$

Die Formelzeichen ϱ , η und γ sind Kurzzeichen für die Funktionen

$$\varrho = \frac{T_S + T_t}{T_0} + \left(1 - \frac{T_d}{T_0}\right) \cdot e^{-\frac{T_S + T_t}{2T_0}}$$

$$\eta = 1 \text{ für } \frac{T_t}{T_0} < 1$$

$$\eta = \frac{T_t}{T_0} = 1; 2; 3; \dots; n$$

$$\gamma = \frac{\frac{T_t - T_0}{2T_S}}{1 - e^{-\frac{T_0}{T_S}}}$$

Stelleinrichtung und der notwendigen Regelgüte bestimmt werden. In der Tafel 8 sind für alle behandelten Reglertypen die wesentlichen Eigenschaften noch einmal zusammengefaßt dargestellt, in der Art, wie unter normalen Bedingungen die Auswahl erfolgen kann.

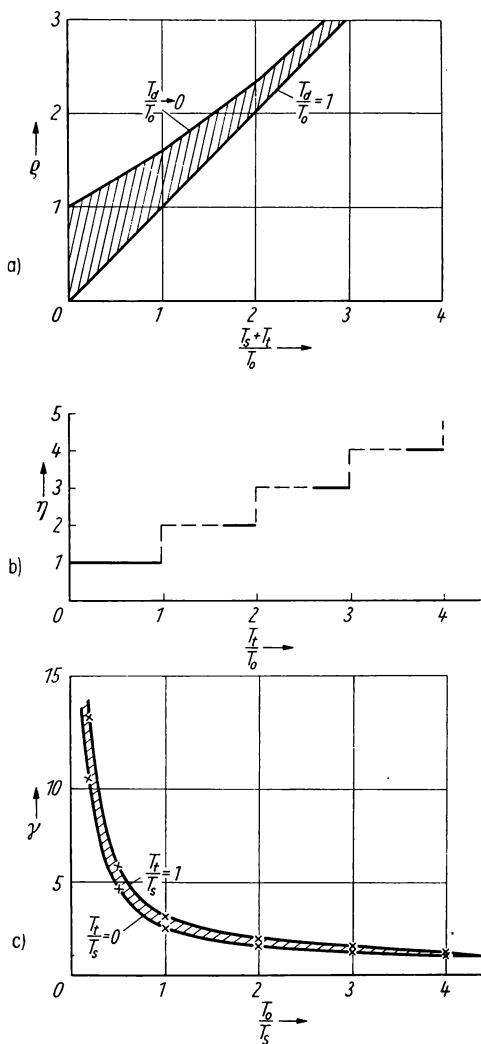


Bild 38. Darstellung der Hilfsfunktionen ϱ , γ und η zur Optimierung unstetiger Regler (Tafel 7)

$$\varrho = \frac{T_S + T_t}{T_0} + \left(1 - \frac{T_d}{T_0}\right) \cdot e^{-\left(\frac{T_S + T_t}{2 T_0}\right)}$$

$$\gamma = \frac{1 + e^{\left(\frac{T_t - T_0}{2 T_S}\right)}}{1 - e^{\left(\frac{T_0}{T_S}\right)}} \quad \left| \quad \begin{array}{l} \eta = 1 \text{ f\"ur } \frac{T_t}{T_0} < 1 \\ \eta = \frac{T_t}{T_0} \text{ f\"ur } \frac{T_t}{T_0} = 1; 2; 3; \dots; n \end{array} \right.$$

Tafel 8. Eignung verschiedener Reglertypen bei verschiedenen Bedingungen und Anforderungen

Reglertyp	P-Strecke			I-Strecke	P-Fehler unzu- lässig	Schnelle Regelung not- wendig	Stellzeit ist größer als 50 s	Preis- relationen, bezogen auf <i>PI</i> - Regler
	$T_t/T_S \ll 1$	$T_t/T_S < 1$	$T_t/T_S > 1$					
<i>I</i> -Regler	+	—	—	—	+	—	—	85%
<i>P</i> -Regler	+	—	—	+	—	+	(+)	85%
<i>PI</i> -Regler	+	+	(+)	(+)	+	(+)	(+)	100%
<i>PD</i> -Regler	(+)	—	—	+	—	+	—	100%
<i>PID</i> -Regler	(+)	+	—	—	+	+	—	120%
Zweipunktregler	+	—	—	+	—	+	—	30%
Dreipunktregler	+	—	—	—	+	—	+	40%
Getasteter Dreipunktregler	+	—	+	—	+	—	+	50%
Getasteter <i>I</i> -Impulsregler	+	+	+	—	+	(+)	+	60%
<i>PI</i> -Impulsregler	+	+	—	(+)	+	(+)	+	75%

Tafelzeichen: + geeignet; (+) bedingt geeignet; — ungeeignet

Zu der Spalte „Preisrelationen“ der Tafel 8 sei noch bemerkt, daß diese Verhältnisse auf elektrische Regler bezogen sind, wobei die Meß- und Stellanrichtung in den Vergleich mit einbezogen ist. Diese Prozentzahlen können natürlich nur als mittlere Orientierungswerte unter ähnlichen Voraussetzungen gesehen werden. Im Rahmen der Projektierung ist ein genauer Preisvergleich immer dann nötig, wenn vom technischen Standpunkt aus zwei oder mehrere Lösungswege in Betracht kommen. Es sollte jedoch dabei beachtet werden, daß es unökonomisch ist, wenn geringere Investitionskosten zu Lasten der Betriebssicherheit oder des Wartungsaufwandes gehen.

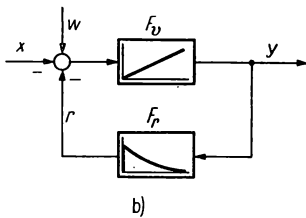
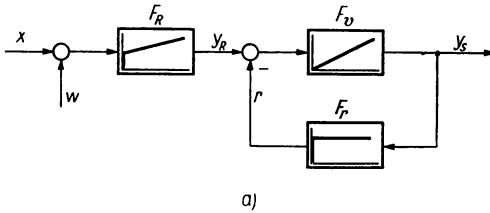


Bild 39. a) Regler mit nachgeschalteter proportional wirkender Stellanrichtung
 b) Als PI-wirkender Regler geschaltete Stellanrichtung
 F_v Stellantrieb; F_r Rückführung; F_R Regler

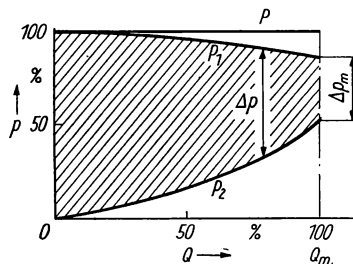
3.4. Bemessung der Stellanrichtung

Das Reglerausgangssignal ist in der Stellanrichtung so weit zu verstärken, daß der in die Strecke eintretende Massen- oder Energiestrom eindeutig und sicher gesteuert werden kann. Von untergeordneten Fällen abgesehen ist dafür eine Verstärkeranordnung mit Rückführung der Stellgröße oder des Stellstromes üblich, wie sie durch den Positioner bei pneumatischen Membranantrieben, durch die Stellungsrückführung bei stetigen elektromotorischen Stellgetrieben und durch das Rückführgestänge bei hydraulischen Antrieben ausgeführt wird. Der Stellantrieb wird auf diese Weise zum proportional wirkenden Übertragungsglied mit einer gewissen Verzögerungszeitkonstante, die jedoch meist zu vernachlässigen ist. Besitzt der Stellantrieb integrales Verhalten, so kann die Rückführung über ein Zeitfunktionsglied geführt werden und damit gleichsam in einer Einrichtung die Reglerfunktion und die Funktion des Leistungsverstärkers erfüllt werden.

In modernen Regelungssystemen wird die erstgenannte Variante mit P -Stellantrieb wegen der universelleren Verwendbarkeit fast ausschließlich benutzt. Von besonderer Problematik ist die Bemessung des Stellgliedes, wenn es sich um Ventile und Klappen handelt. Unabhängig davon, ob der Übertragungsfaktor des Stellgliedes zur Strecke oder zum Regler gerechnet wird, wird für die Einhaltung der Optimierungsbedingung vorausgesetzt, daß das Stellglied wie die Strecke als lineare Glieder mit konstantem Übertragungsfaktor anzusehen sind. Diese Voraussetzung ist jedoch gerade bei Ventilen nur schwer erreichbar. Um über den gesamten Stellbereich hinweg die notwendige Mengenänderung des Stellstromes bei annähernd konstantem Übertragungsfaktor zu erreichen, sind spezielle Ventilkennlinien notwendig. Vom Projektanten müssen dazu dem Ventilhersteller möglichst genaue Angaben geliefert werden.

Bild 40. Druckverläufe an einem Regelventil bei Steuerung des Durchflusses

p_1 Druck vor dem Ventil;
 p_2 Druck nach dem Ventil;
 Δp Differenzdruck am Ventil;
 P Gesamtdruck



Eine Unsicherheit liegt dabei darin begründet, daß die Arbeitsbedingungen des Ventils, speziell die Druckverhältnisse, im Projektstadium häufig nicht zu übersehen sind. Für eine befriedigende Ventilauslegung sind jedoch gerade die Druckwerte als Funktion des Durchflusses von entscheidender Bedeutung. Wenn von den Technologen der Produktionsanlage darüber keine sicheren Angaben zu erhalten sind und auch Analogieschlüsse zu bereits ausgeführten ähnlichen Anlagen nicht möglich sind, sollte in kritischen Fällen unbedingt für eine Messung der Druckverläufe gesorgt werden, indem ein überschläglich bemessenes Ventil probeweise eingebaut wird. Je größer das Verhältnis des Druckabfalls Δp_m am Ventil zum konstanten Gesamtdruck P (Bild 40) und je größer das Verhältnis von Hub zum Sitzdurchmesser ist, um so einfacher ist eine brauchbare Ventilkennlinie herzustellen. Ein Verhältnis von $\Delta p_m/P = 0,3$ ist in diesem Zusammenhang als Grenze des Anwendungsbereiches von linearen und gleichprozentigen Kennlinien anzusehen. Diese beiden Grundtypen von Kennlinien sind durch die Beziehungen zwischen Hub y und Öffnungsquerschnitt F gekennzeichnet.

Lineare Kennlinie: $F = k \cdot y$ oder $\frac{dF(y)}{dy} = k$.

Gleichprozentige Kennlinie: $F = F_0 \cdot e^{n \cdot y}$ oder $\frac{dF(y)}{dy \cdot F(y)} = n$.

Es ist zu beachten, daß die gleichprozentige Kennlinie aus der Schließstellung heraus mit großer Steilheit auf den Anfangsquerschnitt F_0 übergeht, bevor der eigentliche exponentielle Kurvenverlauf beginnen kann.

Mit $\Delta p_m/P$ als Parameter sind im Bild 41 und 42 die typischen Verläufe des Durchflusses der beiden Grundformen von Ventilkennlinien dargestellt. Es handelt sich dabei um eine idealisierte Darstellung in normierten Größen für jeweils konstanten Druckabfall über dem Ventil. Es ist zu erkennen, daß man der Zielsetzung $dQ/dy = \text{konst.}$ nahekommt, wenn für kleine Werte von $\Delta p_m/P \approx 0,1 \dots 0,3$ eine gleichprozentige Kennlinie und für große Werte von $\Delta p_m/P \approx 0,3 \dots 1,0$ eine lineare Kennlinie verwendet wird. Leider können diese idealisierten Verhältnisse oft nicht vorausgesetzt

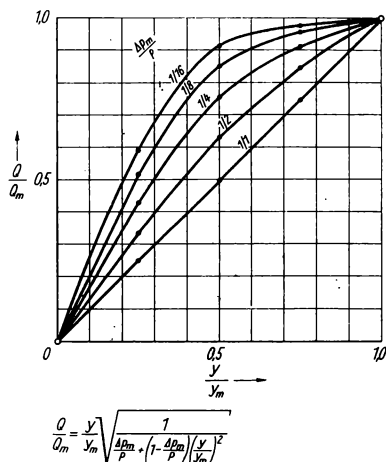


Bild 41. Durchfluß Q/Q_m eines „linearen“ Regelventils als Funktion des Hubes y/y_m bei verschiedenem Druckgefälle $\Delta p_m/P$ am Ventil

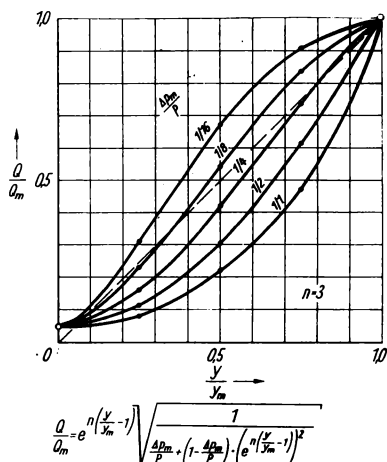


Bild 42. Durchfluß Q/Q_m eines „gleichprozentigen“ Regelventils als Funktion des Hubes y/y_m bei verschiedenem Druckgefälle $\Delta p_m/P$ am Ventil

werden, weil $\Delta p/P$ nicht immer konstant ist, sondern wegen des Druckabfalls in der Anlage vor und hinter dem Ventil eine Funktion des Durchflusses ist. Namhafte Ventilhersteller sind deshalb dazu übergegangen, für ihre Typenreihen von Regelventilen Kennkurven herauszugeben. Diese Kennkurven sind auf der Definitionsgleichung

$$Q = k_v(y) \sqrt{\frac{\Delta p / \Delta p_0}{\gamma / \gamma_0}}$$

für den Volumendurchfluß von Wasser aufgebaut mit $\Delta p_0 = 1 \text{ kp/cm}^2$ und $\gamma_0 = 1000 \text{ kp/m}^3$. Die k_v -Werte kennzeichnen als Funktion des Hubes y in einem Kurvenblatt die Eigenschaften jedes Ventils des verfügbaren Sortiments. Berechnet man für den zu behandelnden Fall, z. B. mit Hilfe der von K. F. Fröh in dem Beitrag „Bemessung von Regelventilen“ [7] angegebenen Durchflußformeln für Flüssigkeiten, Gase, Dämpfe oder Satteldampf, die k_v -Werte für zusammengehörige Wertepaare von Durchfluß und Druck, so kann das den gestellten Bedingungen am besten entsprechende Regelventil an Hand von Nomogrammen der Hersteller ausgewählt werden.

Wenn die Regelstrecke keinen konstanten Übertragungsfaktor innerhalb des benötigten Arbeitsbereiches hat, so kann diese Nichtlinearität mit der Ventilkennlinie kompensiert werden, indem sie so bemessen wird, daß das Produkt der differentiellen Übertragungsfaktoren von Stellglied und Strecke konstant bleibt. Sofern ein Kurbeltrieb zwischen Stellantrieb und Ventil vorhanden ist, bietet sich die Möglichkeit, nachträglich noch gewisse Korrekturen anzubringen, ohne den Ventilkegel zu ändern. Auch mittels der Rückführung des Stellantriebs lassen sich im Ventil noch verbliebene Nichtlinearitäten kompensieren, wenn in den Rückführzweig beispielsweise eine Kurvenscheibe eingefügt wird. Wird anstelle der Stellungsrückführung eine Rückführung der Durchflußmenge vorgesehen, so wird die im Ventil verbliebene Nichtlinearität in ihrer Auswirkung auf den Übertragungsfaktor der Stelleinrichtung völlig beseitigt, weil damit ein Folgeregelkreis gebildet wird, der die Proportionalität zwischen Reglersignal und Durchflußmenge sicherstellt. Die Grenzen dieser Methode sind durch die Ansprechempfindlichkeit der Stelleinrichtung und durch die dynamische Stabilität des Folgeregelkreises bestimmt.‡

Neben den Problemen der Ventilkennlinie sind natürlich auch die mechanischen Fragen des Stellantriebs zu untersuchen.

Dazu gehören:

Feststellung der notwendigen Verstellkraft unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors,

Auswahl der in Frage kommenden Ventilbauform, wie Ein- oder Doppelsitzventil sowie Eck- oder Durchgangsventil,

Festlegung des Verhaltens der Stelleinrichtung bei Ausfall der Hilfsenergie — Aufrechterhaltung der jeweiligen Stellung oder Einlauf in eine definierte Endlage (Verhalten des Antriebs in Endlage),

Überprüfung der Stellzeit in Zusammenhang mit dem Regler, der Strecke, den Störgrößen sowie der angestrebten dynamischen Regengenauigkeit.

4. Der vollständige Projektinhalt

Das gesamte Projekt gliedert sich chronologisch in die drei Bearbeitungsstufen

Aufgabenstellung, Projekt und Ausführungsunterlagen¹⁾.

Die Grenzen zwischen diesen Projektteilen sind je nach der Aufgabe, der Technologie und dem Wert des Vorhabens von Fall zu Fall etwas verschieden. Unabhängig davon sind jedoch dem Inhalt nach immer die gleichen Unterlagen, jedoch mit unterschiedlichem Umfang zu erarbeiten. Wesentliche Einsparungen an Projektierungsarbeiten sind möglich, wenn für gleiche oder ähnliche Anwendungsfälle auf bereits ausgeführte Projekte zurückgegriffen werden kann. Die Projektierung kann sich in diesen Fällen auf eine Überarbeitung des Typenprojektes beschränken und sich darauf konzentrieren, daß neue Erkenntnisse und mit bestehenden Anlagen gesammelte Erfahrungen eingearbeitet werden.

¹⁾ Gesetzliche Bestimmungen s. [31] und [32].

4.1. Die Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung im Sinne der Verordnung vom 10. 8. 1962 soll die volkswirtschaftliche Bedeutung des Vorhabens klar herausstellen, eine Vorstellung über den technischen Umfang und seine prinzipielle Realisierungsmöglichkeit sowie den dazu notwendigen finanziellen Aufwand vermitteln und somit eine ökonomische Aussage ermöglichen.

Auf der Grundlage eines stark vereinfachten technologischen Schemas erfolgt einerseits die Beschreibung des Produktionsprozesses und andererseits die Beschreibung des Umfangs und der Hauptfunktionen des BMSR-Anteils. Dazu gehören Ausführungen über den Schwierigkeitsgrad des Prozesses, seine Gefahrenquellen, die notwendigen Sicherheitsmaßnahmen und das Signal- und Alarmsystem. In Zusammenhang mit dem Arbeitskräftebedarf und dem Stand der Technik ist der vorzusehende Automatisierungsgrad der Anlage zu begründen. Ein weiterer Aufgabenkomplex behandelt Fragen der räumlichen Unterbringung der BMSR-Geräte, der Bedienungsstände und der Warte. Auch über die gerätetechnische Konzeption müssen in diesem Projektstadium Vorstellungen entwickelt werden, weil sonst die finanzielle Seite des gesamten Vorhabens nicht abzuschätzen ist. Da die Geräte im einzelnen in der Vorplanung noch nicht festgelegt werden können, wird mit Durchschnittspreisen gearbeitet, die auf bisherigen Erfahrungen aufgebaut sind und als Mittelwerte für jeden Regelkreis, jede Meßstelle und jeden laufenden Meter Pult- und Anzeigetafel verwendet werden. Für die Projektierungskosten, die Montagekosten, für Reservematerial, Inbetriebsetzung und Nacharbeiten werden ebenfalls Kennziffern verwendet, um schließlich zu den voraussichtlichen Gesamtkosten zu gelangen. Durch den BMSR-Anteil notwendig werdende Anforderungen an den bautechnischen, starkstromtechnischen oder maschinen-technischen Teil des Gesamtvorhabens sollten ebenfalls in die Vorplanung eingearbeitet werden. Zur Fundamentierung der Vorplanung werden im Anhang wichtige Protokolle, Gutachten, Literaturhinweise und Erfahrungsberichte von Studienreisen und die Bestätigung der Aufgabenstellung zusammengefaßt.

4.2. Das Projekt

Die Basis des Projektes ist die mit dem künftigen Betreiber abgestimmte technische Aufgabenstellung. Dazu gehören Lage- und Raumaufteilungspläne, das Fließschema mit Angabe der Medien, Angabe der Nennweiten, Mengen, Temperaturen, Drücke und sonstiger für die BMSR-Projektierung wichtiger Informationen über die Technologie der Anlage.

Das Fließschema wird zu einem Verfahrensschema umgearbeitet, das so gestaltet ist, daß in übersichtlicher Anordnung die notwendigen Meßstellen, Regelkreise und Steuerstellen symbolisch eingetragen werden können. Eine übersichtliche Positionierung ist anzubringen, um in den später aufzustellenden Geräte-Stücklisten die Zuordnung noch eindeutig zu erkennen. Die Gerätesymbolik (nach TGL 14091) braucht im Verfahrensschema noch keine speziellen Einzelheiten zum Ausdruck zu bringen, sondern soll nur die Wirkungszusammenhänge erkennen lassen und einen Überblick der vorgesehenen Instrumentierung geben. Dagegen sollen die Regelkreis- und Steuerschaltungsübersichten möglichst viele prinzipielle Einzelheiten er-

kennen lassen. Die nicht in Regelungs- oder Steuerungsaufgaben direkt einbezogenen Meßgrößen werden dabei zweckmäßigerweise zusammen mit den Anlageteilen dargestellt, denen sie funktionell oder räumlich zugeordnet werden können.

Die Kennzeichen und Symbole nach TGL 14091 sind so gestaltet, daß praktisch alle für die Projektierung wichtigen Aussagen möglich sind. Dazu gehören im besonderen Kennzeichnungen für die Meßfühler, die Meßverfahren, die Meßwertumformer, die Reglertypen, die Anzeige- und Registriergeräte, die Leitgeräte sowie die speziellen Eigenschaften der Stelleinrichtungen. Außerdem sind Symbole für die benötigte Hilfsenergie, die Art der Übertragungssignale mit Spezifizierung des analogen oder digitalen Meßwertes sowie die Meßwertverarbeitung selbst vorgesehen, so daß in einer derartigen symbolischen Darstellung alle für das Verständnis wichtigen Informationen unterzubringen sind.

Den Beschreibungen der Regelkreisübersichten sollten unbedingt die der Reglerauswahl und Optimierung zugrunde gelegten Übergangsfunktionen, Berechnungen und Einstellparameter beigegeben werden, um die Inbetriebnahme zu erleichtern und bei späteren Änderungen und Auswechslungen von Geräten eine Unterlage zur Verfügung zu haben.

Die Darstellung der Meßwerte, die Anordnung der Steuerschalter und Leitgeräte, die Zuordnung der Betriebs- und Alarmsignale in einem sinnvollen übersichtlichen Fließbild oder auf dem Steuerpult setzt ein gutes Einfühlungsvermögen in den späteren Betriebsablauf voraus. Die Werte muß bezüglich Zweckmäßigkeit, Erweiterungsfähigkeit, Beleuchtung, Klimatisierung und sonstiger Ausgestaltung in erster Linie den praktisch-technischen Anforderungen genügen. Nur wenn die architektonische Gestaltung mit diesen Notwendigkeiten in Einklang steht, kann von einer harmonischen Lösung gesprochen werden.

In den Geräte- und Ausrüstungslisten werden, geordnet nach Positionsnummern, die Geräte so weit in ihren Eigenschaften gekennzeichnet, daß danach eine eindeutige Bestellung möglich ist. Zu den technischen Bestelldaten gehören neben der Typennummer von Fall zu Fall Festlegungen über den Meßbereich, die Genauigkeitsklasse, das Funktionsprinzip, die Leistungsfähigkeit, die Schutzart und das notwendige Zubehör sowie Ersatzteile. Für die Kostenzusammenstellung werden bei jeder Position die zur Zeit verbindlichen Preise ausgewiesen.

Außer dem Verfahrensschema und den Einzelübersichten von in sich abgeschlossenen BMSR-Funktionsgruppen, die den Charakter von Signalflußbildern in Blockdarstellung haben, sind als weitere Projektunterlage Stromlaufpläne notwendig. Diese Zeichnungen stellen unabhängig von der späteren räumlichen Anordnung die Verbindungsleitungen und die Klemmenbelegungen aller Einzelgeräte dar, die zur Verwirklichung der beabsichtigten Gesamtfunktionen notwendig sind. Dabei sind pneumatische und hydraulische Verbindungsleitungen und Anschlüsse genauso zu berücksichtigen wie die elektrischen Anschlüsse. Diese Stromlaufpläne sind für die Inbetriebsetzung und für die Fehlersuche eine unentbehrliche Unterlage. Soweit in der Aufgabenstellung noch nicht geschehen, sind weiterhin Abgrenzungen zu den Projektanten des starkstromtechnischen und fernmeldetechnischen Teiles vorzunehmen und die Übergabeklemmen

zu vereinbaren, um die gegenseitige Signalbereitstellung, soweit notwendig, zu gewährleisten. Die Energieversorgung der BMSR-Anlagen mit Druckluft, Wechsel- und Gleichstrom ist leistungsmäßig festzulegen, und die Notversorgung im Störfall, Umschaltung auf einen anderen Netzteil oder Notstromdiesellaggregat bzw. Druckluftspeicher ist auszuweisen. Als Anlagen zum Projekt gehören weiterhin Gutachten über Sicherheits-, Arbeits- und Brandschutzfragen, Festlegungen über die Mitwirkung der Projektanten bei der Inbetriebsetzung, Terminfestlegungen sowie Umfang und Inhalt von Garantieleistungen und die Begutachtung und Bestätigung des Projektes.

4.3. Die Ausführungsunterlagen

Nach Aufnahme in den Investitionsplan werden im Rahmen der Ausführungsunterlagen alle die für eine ordnungsgemäße Montage noch fehlenden Angaben gemacht, Zeichnungen angefertigt und Materialien ausgewiesen. Dazu gehören im einzelnen Rohrleitungs- und Kabelpläne, Trassenpläne, Einbauzeichnungen sowie Pult-, Schrank- und Gestellzeichnungen. Es sollte selbstverständlich sein, daß bei diesen Arbeiten nach Möglichkeit auf Normschränke, Tafeln, Pulte und sonstiges vereinheitlichtes Material zurückgegriffen wird, um den Aufwand zu verringern.

An Hand der Trassen- und Leitungspläne ist der Bedarf an Leitungen und Montagekleinmaterial zu bestimmen und in Bestelllisten auszuweisen.

Zur Klarstellung der Verantwortlichkeit ist es ferner zweckmäßig, möglichst eindeutig die Aufgaben und Garantien zwischen dem Projektanten und seinen Nachbeauftragten über Montage, Ablauftermine und Inbetriebsetzung bzw. Teil-Inbetriebsetzungstermine festzulegen und Mittel für Inbetriebsetzung sowie notwendige Änderungen vorzusehen. Es ist ferner darauf zu achten, daß der Betreiber nicht nur eine betriebsfähige Anlage erhält, sondern daß auch für einen angemessenen Zeitraum nach der Übergabe Ersatzgeräte, Wartungsmittel, Verschleißmaterialien, Prüfmittel und Spezialwerkzeuge zur Verfügung stehen.

Mit den Festlegungen über die anzuwendende Montagetechnologie und dem Prüfbericht der Gütekontrolle werden die Ausführungsunterlagen abgeschlossen.

5. Tendenzen der Weiterentwicklung

Zur Verringerung des Projektierungsaufwandes sollten ausgeführte und erprobte Projekte zum Standard erklärt werden, wenn viele gleichartige Anlagen errichtet werden müssen und die technische Entwicklung in diesem Produktionszweig einen gewissen Abschluß gefunden hat.

Die Gerätetechnik wird sich nach Schließung der Sortimentslücken mit der Verbilligung, Erhöhung der Betriebssicherheit und der Lebensdauer der BMSR-Geräte befassen müssen. Eine konsequente Vereinheitlichung der elektrischen Übertragungssignale ist notwendig, um die Kombinierbarkeit der Geräte auf einfache Weise zu gewährleisten. Durch Schaffung von Bausteinen für häufig wiederkehrende Funktionen läßt sich die Geräteentwicklung und die Geräteproduktion rationeller gestalten.

Für die Projektierung eröffnet ein ausgereiftes Bausteinsortiment die Möglichkeit, spezielle Schaltungen aus Bausteinen zu entwerfen oder für Großanlagen die gesamte Signalverarbeitungseinrichtung in Einschubbauweise in einem Gestell oder Schrank zusammenzufassen.

Für kleine und mittlere Anlagen bis zu zehn Regelkreisen werden nach dem heutigen Stand besser Einzelgeräte verwendet. Dafür sind kompakte stetige und unstetige Regler als Schalttafelgeräte mit angebautem Leitgerät zweckmäßig.

Die zur Zeit noch vorhandene Trennung zwischen analoger und digitaler Technik wird in Zukunft immer mehr verschwinden. Neue Möglichkeiten bieten sich bei einer Kombination beider Zweige für die Automatisierungstechnik. Zur Prozeßoptimierung werden digitale Rechner die Führungsgrößen der Regelkreise bestimmen, Reserveaggregate in Betrieb setzen, bei Gefahren die programmierten Gegenmaßnahmen einleiten, Wirkungsgrade ausrechnen und für die Überwachung und Statistik benötigte Werte ausschreiben oder speichern.

Derartige Aufgaben sind selbst mit hochqualifizierten Kräften nur noch in Projektierungsgruppen zu lösen, die aus je einem Regelungstechniker, Digitaltechniker, Mathematiker und Prozeßtechnologen zu besetzen wären. Als technische Hilfsmittel müssen für diese Aufgaben den Projektierungsgruppen ein Analog- und ein Digitalrechner zur Verfügung stehen.

Literaturverzeichnis

- [1] *Allenhein, H. J.*: Ausgleichswert und Zeitkonstante einer Gasdruckregelstrecke. *Regelungstechnik* 10 (1962) 11, S. 496.
- [2] *Bopp, K.*: Die Ermittlung der dynamischen Kennwerte eines Regelkreises aus Übergangsfunktion und Frequenzgang. *Regelungstechnik* 5 (1957) 9, S. 298—302.
- [3] *Bogenstätter, G.*, u. *Hengst, K.*: Regelung von Destillationskolonnen. *Chemie-Ing.-Technik* 31 (1959) 7, S. 425—431.
- [4] *Hengst, K.*: Vergleichende Betrachtungen zwischen Elektronik und Pneumatik bei der Regelung im einfachen Regelkreis. *Regelungstechnik* 10 (1962) 9, S. 386.
- [5] *Gehm, K. G.*, *Nabert, K.*, u. *Schön, G.*: Probleme des Explosionsschutzes. *Chemie-Ing.-Technik* 34 (1962) 10, S. 674—681.
- [6] *Ferner, V.*: Die graphische Ermittlung des Übergangsverhaltens von Regelstrecken. *Feingerätetechnik* 4 (1955) 5, S. 195—200.
- [7] *Früh, K. F.*: Bemessung von Regelventilen. *Regelungstechnische Praxis* (1959) 2, S. 37—39.
- [8] Dampferzeuger Regelungen. *BWK* 12 (1960) 10, S. 431—442.
- [9] *Eifert, G.*: Über die Auswahl von Regelgeräten an Hand der Übergangsfunktion. *Zmsr* 2 (1959) 4, S. 173—180.
- [10] *Hochrainer, H.*: Stabilisierungselemente in Regelkreisen. *Regelungstechnik* 5 (1957) 11, S. 429—434.
- [11] *Hupe, H.*: Über die Regelung kontinuierlich arbeitender Destillationskolonnen. *Dechema-Monographien* 37 (1960) S. 79—169.
- [12] *Jeschke, N.*: Kennlinien von Stellventilen. *Regelungstechnik* 9 (1961) 3, S. 104—109.
- [13] *Müller, R.*: Regelstrecken im Kraftwerk. *Energietechnik* 12 (1962) 4, S. 147 bis 150.
- [14] *Oppelt, W.*: Kleines Handbuch technischer Regelvorgänge. Weinheim und Berlin: Verlag Chemie und VEB Verlag Technik 1963.
- [15] *Profos, P.*: Die Regelung von Dampfanlagen. Berlin/Heidelberg/Göttingen: Springer-Verlag 1962.
- [16] *Reinisch, K.*: Verwendung eines Modellregelkreises zur Gewinnung einfacher Bemessungsregeln für lineare Regelkreise und zur Ermittlung der Kennwerte von Regelstrecken. *Zmsr* 5 (1962) 6, S. 245—251.
- [17] *Reinisch, K.*: Untersuchung günstiger Einstellregeln mit dem Modellregelkreis MD 1. *Zmsr* 4 (1961) 12, S. 495—500.
- [18] *Schwarze, G.*: Bestimmung der regelungstechnischen Kennwerte von *P*-Gliedern aus der Übergangsfunktion ohne Wendetangentenkonstruktion. *Zmsr* 5 (1962) 10, S. 447—449.
- [19] *Schwarze, G.*: Bestimmung der Zeitkonstanten und statischen Kennwerte stetiger linearer Glieder aus empirischen Kennwerten, die der Übergangsfunktion entnommen werden. *Zmsr* 5 (1962) 6, S. 243—245.
- [20] *Stepan, J.*: Der Einfluß von Konstruktionsparametern auf die dynamischen Eigenschaften von Überhitzern. *BWK* 14 (1962) 12, S. 580—584.

- [21] *Strejc, V.*: Approximation aperiodischer Übergangscharakteristiken. Zmsr 3 (1960) 3, S. 115—124.
- [22] *Strejc, V.*: Auswertung der dynamischen Eigenschaften von Regelstrecken bei gemessenen Eingangs- und Ausgangssignalen allgemeiner Art. Zmsr 3 (1960) 1, S. 7—11.
- [23] *Takahashi, Y.*: Regelung von Gleich- und Gegenstrom-Wärmeaustauschern. Regelungstechnik 1 (1953) 0, S. 32.
- [24] *Takahashi, Y.*: Transfer Functions Analysis of heat exchange processes. Automatic and Manual Control, Butterworths Scient. Public (1952) S. 235.
- [25] *Trapesnikow, W. A.*: Kybernetik und automatische Steuerung. Zmsr 5 (1962) 12, S. 529—535.
- [26] TGL 14091 „Kennzeichen und Symbole der Regelungs- und Steuerungstechnik“ (Entwurf).
- [27] *Weller, W.*: Die Verfahren zur Bestimmung der regelungstechnischen Kennwerte aus der gemessenen Übergangsfunktion. Zmsr 5 (1962) 8, S. 355—363.
- [28] *Ziegler, H.*: Stromwaage und Thermowaage in Reglern für Sonderaufgaben. Conti-Elektro-Berichte 6 (1960) 4, S. 226—231.
- [29] TGL 14591 „Bezeichnungen und Benennungen der Regelungs- und Steuerungstechnik“ (Entwurf).
- [30] *Müller, R.*: Darstellung des Arbeitsbereiches von Stellventilen. Zmsr 6 (1963) 10, S. 420—426.
- [31] Verordnung über die Planung, Vorbereitung und Durchführung der Investitionen. Gesetzblatt d. DDR, Teil II, Nr. 56 vom 10. 8. 1962.
- [32] Beschluß zur Verordnung über die Planung, Vorbereitung und Durchführung der Investitionen — Übergangsbestimmungen. Gesetzblatt d. DDR, Teil II, Nr. 69 vom 20. 9. 1962.

Sachwörterverzeichnis

Analogieschluß 24

Aufgabenstellung 7, 10, 66

Ausführungsunterlagen 66

Bewertung (technisch-ökonomisch) 37

Dreipunktregler 56

Ersatzzeitkonstanten 19, 24

Frequenzkennlinie 27

Gerätesystem 36

Getastete Regler 56, 57

Hilfsenergien 27, 37

Hilfsgrößenaufschaltung 38, 40, 48

Hilfsregelgröße 44

Hilfsstellgröße 47

Impulsrückführung 57

Kaskadenschaltung 45

Modellregelstrecke 46

Optimierung 51, 54

Prinziplösung 38

Produktionsbedingungen 11

Projekt 66

Rampenfunktion 14

Regelabweichung 28

Regelgrößen 12

Regelstrecken 17

Reglerparameter 51

Stellantriebe 37, 62

Stellgrößen 13, 14

Steuerung 38

Störgrößen 13, 26

Störgrößenaufschaltung 41, 42

Störverhalten 26

Übergangsfunktionen (grafische Konstruktion) 28, 29, 34, 35

Übergangsfunktion 14, 18, 19

Übertragungsfaktor 20, 22, 23

Unstetige Regler 53, 54, 59

Ventilkennlinie 63, 64

Zweipunktregler 55

Zeitverhalten von Reglern 52, 53

