

Diss. Nr. 4275

**Entwurf und Erprobung eines Verfahrens zur
geregelten Adaptierung eines Regelkreises
mit simultanen harmonischen Prüfsignalen**

ABHANDLUNG

zur Erlangung
der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften

der

EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE
ZÜRICH

vorgelegt von

ADOLF HERMANN GLATTFELDER

dipl. Masch.-Ing. ETH
geboren am 15. Juni 1940
von Zufikon (Kt. Aargau)

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. P. Profos, Referent
Prof. Dr. M. Mansour, Korreferent

Juris Druck + Verlag Zürich
1969

**Seite Leer /
Blank leaf**

V o r w o r t

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Regelung und Dampfanlagen der ETH im Rahmen eines Forschungsprogrammes über adaptive Systeme.

Herrn Prof. Dr. Profos möchte ich für die Anregung dieser Arbeit sowie das stets wohlwollende Interesse und Entgegenkommen herzlich danken.

Gleichzeitig gilt mein Dank auch Herrn Prof. Dr. Mansour für die Uebernahme des Korreferates.

Schliesslich ist es mir ein Bedürfnis, allen jenen zu danken, die zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen haben.

Z u s a m m e n f a s s u n g

Die Theorie adaptiver Systeme hat in den letzten Jahren eine starke Entwicklung erfahren. Dagegen sind relativ wenig praktische Anwendungen bekanntgeworden, die über Versuche am Analogrechner hinausgehen. Aus diesem Grunde werden in einem Forschungsprogramm des Institutes für Regelung und Dampfanlagen an der ETH systematisch verschiedene Adaptiermethoden auf ihre Verwendbarkeit an Prozessen der Energieerzeugung und Verfahrenstechnik hin überprüft, und zwar bis und mit einer praktischen Erprobung am Prozess.

Im Rahmen dieses Programms stellte sich nun auch die Aufgabe, eine geregelte Adaptierung zu untersuchen, mit anderen Worten eine Adaptierung, bei welcher jene Grössen, die das Adaptierungsziel bestimmen, am System selbst gemessen werden und über Rückführungen auf geeignet gewählte Parameter des Systems so wirken, dass das Adaptierungsziel stets erreicht bleibt.

Bei der Lösung dieser Aufgabe wurde versucht, eine Adaptiermethode aus den Begriffen und Verfahren abzuleiten, welche dem praktisch tätigen Regelungstechniker vertraut sind, und damit auch einen kleinen Beitrag zur Zusammenführung von Regelungstheorie und -praxis zu leisten.

Im einzelnen wurden folgende Annahmen über das zu adaptierende System und die Adaptiereinrichtung getroffen:

- Beim System handle es sich um einen einschleifigen Regelkreis, dessen Streckenübertragung um die einzelnen Betriebspunkte linearisierbar und höherer

als dritter Ordnung sei. Die Regeleinrichtung sei ebenfalls linear und habe einen P-, PI- oder PID-Regler.

- Die Adaptiereinrichtung soll sich darauf beschränken, Änderungen der Uebertragungsfunktion des Systems festzustellen und über Rückführungen auf einige oder alle Einstellwerte des Reglers zu wirken. Also soll u.a. nicht berücksichtigt werden, welche Form die auf das System wirkenden Führungs- und Störsignale haben. Weiter komme das Adaptierverfahren ohne detaillierte Kenntnisse des Systems, d.h. ohne ein genaues Modell oder ausgedehnte Vorversuche, aus und sei demgemäss bei einer grossen Klasse von Regelstrecken anwendbar.

Die Aufgabe des ersten Teils der vorgelegten Arbeit bestand zunächst darin, Messgrössen für die Adaptierrückführungen zu finden. Es zeigte sich nämlich, dass die in der konventionellen Regelungstechnik so häufig verwendeten Regelflächen wegen der stets vorhandenen Störungen kaum geeignet sind. Deshalb wurde versucht, solche Messgrössen im Frequenzbereich zu finden. Man ging von dem Umstand aus, dass die Schrittantwort Information bezüglich der Uebertragungseigenschaften des Systems bei sämtlichen Frequenzen enthält. Diese Information muss zunächst vom Rauschen befreit werden, welches von den Störungen herrührt, und dies gelingt umso schneller, je höher das Signal-zu-Rausch-Verhältnis ist. Anstatt die Prüf-Schrittfunktion sehr gross zu machen, kann man auch weniger Frequenzen gleichzeitig aufgeben und damit den Rauschabstand bei diesen Frequenzen verbessern.

Die Wirkungen dieser wenigen parallel und dauernd aufgegebenen harmonischen Prüfsignale auf den Ausgang des Systems lassen sich dann in einer einfachen Messeinrichtung auftrennen. Die auf diese Weise entstehenden Punkte des Frequenzganges kann man dann weiter in geeigneter Form darstellen. - Uebrigens ist die übliche Messung des Frequenzganges ein Spezialfall dieser Methode, bei welchem mit nur je einer Frequenz, dafür aber sequentiell getestet wird.

Weiter stellte sich heraus, dass zur Adaptierung der Einstellwerte tatsächlich nur einige wenige charakteristische Punkte der Uebertragungsfunktion gemessen werden müssen. Diese Stützpunkte liegen im wesentlichen an den Stellen maximaler Empfindlichkeit der Uebertragungsfunktion auf die Reglereinstellwerte, wenn man die Phasenverschiebung zugrundelegt. Unter dieser Voraussetzung erwies sich auch das Adaptierungsziel als von sehr einfacher Form: Der Phasengang in Bode-Darstellung muss möglichst eine Gerade sein, deren Steigung $100 \dots 110^\circ$ pro Oktave betragen soll.

Im Zeitbereich ist die zugehörige Schrittantwort dann von aller kürzester Dauer mit hinreichender Dämpfung (das dritte Maximum wird dann gerade nicht mehr feststellbar) und entspricht damit ungefähr dem Verlauf, den das ITAE-Kriterium ergibt.

Schliesslich konnten die Stabilitätseigenschaften des gesamten Systems anhand einer einfachen Modellvorstellung geklärt werden, welche Prozess- und Adaptierkreise völlig voneinander trennt. Dabei ergab sich für fixe Prüffrequenzen ein Stabilitätsintervall mit einer ungefähren Breite von 1 : 3

gemessen an der dominanten Frequenz des geschlossenen Kreises im adaptierten Zustand.

Im zweiten Teil der Arbeit war zuerst ein geeignetes Messverfahren für die Stützphasen auszuwählen. Da sich die normale Kreuzkorrelation als nicht besonders geeignet erwies, musste das Ausgangssignal in Bandfiltern aufgetrennt und die Phasen dann mit einer Polaritätskorrelation gemessen werden.

Weiter war die gerätetechnische Form der Adaptiereinrichtung zu entwerfen. Da es sich nur um eine Versuchseinrichtung handelte, wurde auf die drei Tisch-Analogrechner EAI TR-10 des Institutes für Regelung und Dampfanlagen abgestellt. Diese Ausführungsart ist flexibel, hinreichend genau und in ihrer Funktion leicht zu überwachen.

Daneben wurde auch ein zweiter Prozessregler auf einem Analogrechner gesteckt, weil dieser Ersatzregler im Gegensatz zum vorhandenen Prozessregler speziell daraufhin ausgelegt werden kann, dass sich die Einstellwerte kontinuierlich und unabhängig voneinander verstellen lassen.

Der dritte Teil schliesslich umfasst die Ergebnisse von Betriebsversuchen an zwei Prozesskreisen.

Als erste Anwendung wurde die Dampfdruckregelung eines ölgefeuerten Trommelkessels gewählt. Die Vorversuche zeigten aber, dass sich das beschriebene Verfahren an diesem speziellen Kessel nicht anwenden liess, weil einige der eingangs erwähnten Voraussetzungen

nicht erfüllt waren. So traten beispielsweise starke Sekundärwirkungen in Form von Ueberhitzertemperaturschwankungen auf.

Die zweite Anwendung, die Regelung der sekundärseitigen Austrittstemperatur eines Wärmeaustauschers ergab im ganzen gute Ergebnisse. Insbesondere war die Adaptiereinrichtung im gefahrenen Betriebspunktebereich stabil und wies überall ein gutes Verhalten auf. Eine schrittförmige Störung der Prozessübertragungsfunktion wurde in 15...25 Ausregelzeiten des Prozesskreises korrigiert. Die Voraussagen betreffend die Stabilitätseigenschaften, welche im ersten Teil anhand des dort abgeleiteten Modells gemacht worden waren, erwiesen sich als recht gut.

Auf eine Beurteilung des technischen und wirtschaftlichen Gewinnes musste vorerst verzichtet werden, weil hierzu die allgemeinen Grundlagen noch weitgehend fehlen und zuerst zu erarbeiten wären. Dies würde jedoch den Rahmen der vorliegenden Arbeit überschreiten.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
Zusammenfassung	4
Inhaltsverzeichnis	9
Erster Teil: Herleitung des Verfahrens	
1.1 Einführung und Aufgabenstellung	11
1.2 Beurteilungskriterien	13
1.3 Verfahren, welche den gemessenen Gradienten der Regelfläche benutzen	15
1.3.1 Messung der Regelfläche	16
1.3.2 Bemerkungen zum Suchprogramm	18
1.3.3 Zusammenfassung	19
1.4 Sensitivity - Methoden	19
1.4.1 Betrachtung im Zeitbereich	20
1.4.2 Betrachtung im Frequenzbereich	24
1.5 Entwicklung des Verfahrens	38
1.5.1 Die Messung von G_0	39
1.5.2 Das Adaptierungsziel	41
1.5.3 Erreichbarkeit und Stabilität	50
1.5.4 Kontrolle im Zeitbereich	58
1.6 Zusammenfassung und Vergleich	63
Zweiter Teil: Entwicklung der Adaptiereinrichtung	
2.1 Aufgabe und Vorgehen	64
2.2 Der Identifikator	65
2.2.1 Der Prüfsignalgenerator	66
2.2.2 Der Korrelator	72
1. Die Bandfilter	76
2. Die Messeinrichtung	91

2.3	Der Adaptor	101
2.3.1	Bildung der Adaptierabweichungen	101
2.3.2	Die Rechner	106
2.3.3	Die Stellorgane	108
2.4	Zusammenstellung	109
Dritter Teil: Betriebsversuche		
3.1	Uebersicht	112
3.2	Erste Anwendung: Dampfdruckregelung	
3.2.1	Modelluntersuchungen	115
3.2.2	Vorhandene Regeleinrichtung, Auswahl der Verbindungselemente	118
3.2.3	Vorversuche	126
3.3	Zweite Anwendung: Vorlauf temperatur-Regelung	
3.3.1	Verhalten der Anlage	130
	1. Die grundlegenden Beziehungen im Stationärzustand	130
	2. Das dynamische Verhalten der Anlage	132
	3. Schaltung und Betriebsweise	136
3.3.2	Vorhandene Regeleinrichtung, Auswahl der Verbindungselemente	137
3.3.3	Vorversuche	136
3.3.4	Anpassung der Adaptiereinrichtung	143
3.3.5	Betriebsversuche	149
3.4	Ergebnisse, Erfahrungen und Verbesserungen	
3.4.1	Generelle Ergebnisse	175
3.4.2	Betriebserfahrungen	176
3.4.3	Verbesserungen	178
	Literaturverzeichnis	180
	Summary	184

E R S T E R T E I L

H E R L E I T U N G

D E S

V E R F A H R E N S

1.1 Einführung und Aufgabenstellung

Die Aufgabe jeder Ein-Grössen-Regelung ist bekanntlich, die zu regelnde Zustandsgrösse eines Prozesses ungeachtet aller Störungen immer möglichst gleich einem vorgegebenen Sollwert zu halten, mit anderen Worten die Regelabweichung $e(t)$ identisch gleich Null zu machen.

Diese Forderung lässt sich im allgemeinen nicht ganz erfüllen, denn sie würde infolge der stets vorhandenen Signalverzögerungen unendlich grosse Stellgeschwindigkeiten bedingen. Bei realen Regelungen, seien sie nun herkömmlicher Art mit linearen Regler-Netzwerken oder unter voller Ausnützung der vorhandenen, nicht-linearen Stellorgane entworfen (vgl. [1.1]), bleibt demnach stets ein Regelfehler $e(t)$. Deshalb stellt sich nun die Frage, wie man die Wirksamkeit der verschiedenen realen Regelungen beurteilen kann, um eine "beste" auszuwählen.

Zu ihrer Beantwortung hat man davon auszugehen, dass $e(t)$ das Ausgangssignal eines Uebertragungsgliedes ist und deshalb sowohl von den Störungen, die von aussen auf das System wirken, als auch von den Uebertragungseigenschaften des Systems abhängt.

Man muss also dafür sorgen, dass alle zu vergleichenden Systeme auf gleiche Art gestört werden und benutzt deshalb gewisse Standard-Testfunktionen, wie z.B. die Schrittstörung. Die so angeregten Systeme erzeugen nun Zeitfunktionen $e(t)$, welche sich allerdings nicht besonders gut vergleichen lassen. Aus diesem Grunde hat man verschiedene Integral-Transformationen I von $e(t)$ eingeführt, die sogenannten Regelflächen, Gütemasse oder auch Kosten (vgl. [1.2]), welche die Zeitfunktionen in leichter vergleichbare Zahlen verwandeln. Die $I\{e(t)\}$ hängen dann allein von der System-Uebertragungsfunktion, d.h. von den Uebertragungsfunktionen der Strecke G_{Str} und des Reglers G_R ab.

Zunächst wird G_{Str} in erster Näherung als invariant angenommen. Mit anderen Worten ersetzt man sämtliche vorkommenden Betriebspunkte durch einen einzigen Punkt. Für diesen Auslegungspunkt kann G_R dann so gewählt werden, dass das Gesamtübertragungsverhalten die gewünschte Form zeigt, z.B. $I\{e(t)\} = \text{minimal}$.

Nun ist die bezüglich G_{Str} getroffene Näherung nicht immer ausreichend in dem Sinne, dass infolge der Wanderung des Betriebspunktes grosse Abweichungen vom gewünschten Gesamtverhalten auftreten können. Deshalb liegt der Versuch nahe, diese Abweichung durch automatisches Nachstellen, d.h. Adaptieren der Regler-Uebertragungsfunktion G_R wegzubringen oder doch wesentlich zu reduzieren.

Dieses Problem wurde in den letzten Jahren intensiv bearbeitet und eine Reihe von Lösungen vorgeschlagen und theoretisch untersucht. Dagegen sind Berichte über praktische Anwendungen noch recht selten. Zur Schliessung dieser Lücke soll die vorliegende Arbeit beitragen.

Dabei waren zunächst die wichtigsten Konzepte auf ihre praktische Verwendbarkeit hin zu prüfen, eines auszuwählen oder gegebenenfalls zu entwickeln, es dann gerätetechnisch zu realisieren und schliesslich an einem realen Prozess " on-line" auszuprobieren.

Bevor nun die Adaptierverfahren im Hinblick auf ihre Brauchbarkeit diskutiert werden können, sind die Beurteilungskriterien oder auch Randbedingungen aufzuzählen.

1.2 Beurteilungskriterien

Eine erste Gruppe von Randbedingungen folgt aus der benötigten Leistungsfähigkeit der Adaptierung.

- Zunächst muss die Einrichtung betriebssicher sein, da sie an einem realen Prozess betrieben werden soll. Das betrifft nicht nur die Gerätetechnik, sondern auch Grundsätzliches wie das Stabilitätsgebiet, d.h. jenes Variationsintervall der Prozessübertragung, für welches die Einrichtung noch wunschgemäss arbeitet. Dieses Gebiet muss natürlich grösser sein als das erwartete Variationsintervall.
- Weiter hat die Adaptierung grundsätzlich so rasch als irgend möglich zu erfolgen.
- Die Adaptierung muss bei hohem Störpegel arbeiten. Die erforderliche Störunempfindlichkeit verlangt grosse Mittelbildungszeiten, was übrigens der Forderung nach schneller Adaptierung widerspricht.

- Die Genauigkeit der Adaptierung ist durch die bleibende Abweichung vom gegebenen Ziel, z.B. vom Minimum einer Regelfläche, vorzugeben und nicht etwa durch Fehlerschranken für die einstellbaren Grössen.
- Schliesslich darf die Methode nicht zu stark auf einen bestimmten Prozess zugeschnitten sein. Im Gegenteil soll sie sich mit möglichst geringen Änderungen und ohne langwierige Vorversuche an einer grossen Klasse von Prozessen verwenden lassen.

Eine zweite Gruppe von Randbedingungen befasst sich mehr mit der Struktur der Adaptiereinrichtung.

- Eine erste einschneidende Bedingung ist dadurch gegeben, dass man nur Verfahren mit Rückführung zulassen will. Darunter seien Methoden verstanden, bei welchen am Prozesskreis selbst nachgemessen wird, ob das Adaptierungsziel erreicht ist.
- Eine zweite Bedingung folgt aus der Natur der Prozesse, auf welche das Verfahren angewendet werden soll. Diese Prozesse werden meist durch Systeme partieller Differentialgleichungen beschrieben und lassen sich demzufolge nur relativ ungenau durch Modelle jener Art ersetzen, wie man sie leicht am Analogrechner realisieren kann.
- Schliesslich sollte sich die Adaptiermethode möglichst nahe an die Methoden und Geräte der konventionellen Regeltechnik anlehnen, vor allem um die gerätetechnischen Schwierigkeiten klein zu halten. Das heisst, dass die Regelung zunächst in herkömmlicher Art aufzubauen ist (z.B. mit PID-Regler). Die Adaptiereinrichtung befindet sich dann ausserhalb des eigentlichen Regelkreises und beeinflusst nur die drei Regler-Einstellwerte. Sie kann somit bei Defekten o.ä. abgeschaltet werden, ohne das

- Funktionieren des Regelkreises zu beeinträchtigen.
- In diesem Sinne sollte sich auch die Adaptiereinrichtung möglichst aus gebräuchlichen Komponenten zusammensetzen.

Mit diesen Bedingungen kann man sich nun der Beurteilung einzelner Adaptierverfahren zuwenden.

1.3 Verfahren, welche den gemessenen Gradienten der Regelfläche benützen.

Es liegt nahe, die in der bisherigen Praxis so häufig benutzten Regelflächen auch adaptiven Systemen zugrundezulegen. - Dann wäre das zu adaptierende System mit jenem Eingangssignal anzuregen, welches durch die gewählte Regelfläche vorgeschrieben ist, das entstehende Ausgangssignal in den erforderlichen Integranden umzuformen und aufzuintegrieren. Dieser Versuch ist anschliessend mit leicht geänderten Reglereinstellwerten zu wiederholen, wobei der Unterschied der beiden Regelflächen ein Mass für den Gradienten darstellt. Dieser Gradient wird schliesslich nach einem Suchprogramm, wie es z.B. [1.3] beschreibt, auf Null gebracht und so die Regelfläche minimalisiert.

Dieses Verfahren setzt sich also aus zwei Teilabläufen zusammen, der Messung der Regelfläche und dem darauf aufbauenden Suchprogramm. Im folgenden sei deshalb zunächst die Messaufgabe und dann die Suchaufgabe kurz beleuchtet.

1.3.1 Messung der Regelfläche

Wie bereits bemerkt, gehört zur Feststellung der meisten Regelflächen ein wohldefiniertes Eingangssignal, z.B. eine Schrittstörung. Die Schrittantwort des Systems überlagert sich nun jener Systemantwort, welche durch die stets vorhandenen Störungen hervorgerufen wird, vergrössert sie also und setzt damit eigentlich die Wirksamkeit der Regelung herab.

Aus diesem Grunde hat man versucht, allein die im Betrieb vorkommenden Störungen als Eingangssignale zu verwenden und das Gütemass darauf aufzubauen. Da die Störungen meist regellosen Charakter haben, ist die Verwendung statistischer Methoden angezeigt (vgl. [1.4]). Hier spielt der mittlere quadratische Fehler eine ausgezeichnete Rolle und deshalb wird er praktisch überall als Gütemass verwendet.

Demnach stellt sich das Problem, diesen mittleren quadratischen Fehler zu messen. Seit einiger Zeit ist bekannt, dass ein ausreichend gesichertes Resultat erst nach sehr langer Messzeit (verglichen mit den Zeitkonstanten des Systems) erreicht werden kann (vgl. z.B. [1.5]).

Einen indirekten Weg zur Bestimmung des mittleren quadratischen Fehlers scheint das Theorem von Parseval (vgl. [1.4]) zu öffnen. Man braucht dazu aber u.a. die Uebertragungsfunktion des Systems. Nun hat sich gezeigt, dass die Messung der benötigten Korrelationsfunktionen resp. Leistungsspektren ebenfalls sehr zeitraubend ist (vgl. [1.6], [1.7]) und deshalb für das vorgesehene Verfahren nicht in Frage kommen kann.

Die statistische Methode besitzt neben ihrer Langwierigkeit noch einen weiteren Nachteil. In den meisten Fällen wird nämlich das Spektrum der Störungen

nicht stationär bleiben. Die Folge davon ist, dass die Adaptierung nur für jene Frequenzbereiche erfolgen kann, welche über längere Zeit vertreten sind und auf neu erscheinende Störungen in anderen Frequenzbereichen nicht vorbereitet ist.

Aus diesem Grunde ergänzt man manchmal die Störsignale durch ein Eingangsruschen in den fehlenden Bereichen und vollzieht damit den Uebergang zum gewollten Prüfsignal. Man nimmt also die Verschlechterung durch die zusätzliche Störung in Kauf, um eine bessere Adaptierung zu erreichen, welche dann über längere Zeit betrachtet die Verluste infolge des Prüfsignals wieder wettzumachen hat.

Will man weiter auch den Messvorgang beschleunigen, dann muss man die regellosen und deshalb nur global beschreibbaren Signale ersetzen durch bis ins Detail bekannte, sogenannte deterministische Prüfsignale, beispielsweise die in der Praxis sehr häufig verwendete Heaviside-Funktion. Aus der entstehenden Schrittantwort liesse sich dann leicht eine der Regelflächen bilden. Dieses Vorgehen erscheint aber infolge der stets vorhandenen Störungen recht fragwürdig, denn die Messung einer solchen Regelfläche setzt ja voraus, dass das System vorher in Ruhe war und dass während der Dauer der Schrittantwort keine neuen Störungen auftreten. Weil diese Bedingungen nicht erfüllt sind, müssen die überlagerten Störeinflüsse eliminiert werden, indem man den gleichen Versuch mehrmals wiederholt und anschliessend mittelt. Die Anzahl möglicher Wiederholungen ist aber stark beschränkt, weil sonst die Messung zu lange dauert. Daraus folgt, dass die einzelne Schrittantwort bereits einen recht geringen prozentualen Störanteil aufweisen muss, was wiederum

bedeutet, dass die Schrittantwort viel grösser sein muss als die Störantworten. Mithin ist die zusätzliche Vergrößerung der Regelfläche durch das Prüfsignal beträchtlich und dürfte durch die Adaptierung nur schwerlich wettzumachen sein.

1.3.2 Bemerkungen zum Suchprogramm

Wie schon bemerkt, liefert die Messung der Regelfläche die Unterlage für den Suchprozess, indem für zwei bezüglich der Einstellwerte benachbarter Punkte der Unterschied der Regelflächen gemessen wird. Aus diesem Unterschied berechnet man dann anhand eines einfachen, linearen Extrapolationsgesetzes einen neuen, besseren Satz von Einstellwerten. Diese Operationen werden ständig wiederholt, und zwar auch nach Erreichen des Minimums, damit die Einstellwerte auch den laufenden Verschiebungen des Minimums folgen.

Solche Suchverfahren wurden in der Regelungstechnik schon öfters praktisch ausprobiert. Dabei zeigte sich, dass schon die Adaptierung einer Variablen i.a. recht zeitraubend ist (vgl. [1.3] oder auch [1.8]). Hier treten nun zwei oder drei Variable auf, welche zudem ziemlich stark voneinander abhängen, so dass beträchtliche Konvergenzschwierigkeiten zu erwarten sind (vgl. hierzu [1.9] oder [1.10]).

1.3.3 Zusammenfassung

Die besprochene Methode ist prinzipiell sehr einfach und gilt für eine grosse Klasse von Systemen (vgl. [1.2]). Sie braucht sehr wenig Vorkenntnisse über das zu adaptierende System und ist demzufolge mit minimalen Anpassarbeiten an einem konkreten Fall verwendbar. Der geräte-technische Aufwand bleibt erfahrungsgemäss in vertretbarem Rahmen (vgl. u.a. [1.3]).

Als gravierender Nachteil ist der ausserordentlich grosse Zeitbedarf zu werten. Dazu kommt der starke "Kosten"-Zuwachs infolge des Prüfsignals. Das Verfahren kann also für die in Aussicht genommenen Anwendungen nicht in Frage kommen.

Bei der Suche nach einer besseren Methode kann man von der einleuchtenden Feststellung ausgehen, dass die Konvergenz umso besser wird, je mehr Vorkenntnisse über das Systemverhalten in das Suchprogramm eingebaut werden. Man kann sogar soweit gehen, dass der Gradient nicht mehr gemessen werden muss und dass dadurch der Suchvorgang wegfällt. Ein solches Verfahren sei im nächsten Abschnitt kurz diskutiert.

1.4 Sensitivity-Methoden

Der für die folgenden Erläuterungen angenommene Ein-Grössen-Regelkreis besitze bei Linearisierung in einem Betriebspunkt den Frequenzgang G_0 .

1.4.1. Betrachtung im Zeitbereich

Als Gütemass I sei die quadratische Regelfläche herangezogen:

$$ISE = \int_{-\infty}^{+\infty} e^2(t) dt \stackrel{!}{=} \min$$

Nun ist ISE u.a. eine Funktion der drei Reglereinstellwerte. Die weiteren Überlegungen konzentrieren sich der Einfachheit halber auf einen dieser Einstellwerte, z.B. k_R , sind aber leicht zu erweitern. Unter der getroffenen Annahme reduziert sich das Adaptierungsziel auf:

$$\text{grad}(ISE) = 0 \quad \rightarrow \quad \frac{\partial}{\partial k_R} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} e^2(t) dt \right) = 0$$

Man beweist leicht, dass Integration und Differentiation trotz der Grenzen vertauscht werden dürfen, also gilt:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial}{\partial k_R} (e^2(t)) dt = 0 \quad \rightarrow \quad \int_{-\infty}^{+\infty} \left[e \cdot \frac{\partial e}{\partial k_R} \right] dt = 0$$

Der Faktor $\partial e / \partial k_R$ ist dabei ein Mass für die Verformung des Ausgangssignals bei Veränderungen der Reglerverstärkung. - Die weiteren Überlegungen sind im Laplace-Bereich übersichtlicher:

$$\mathcal{L} \left\{ \frac{\partial e}{\partial k_R} \right\} = \frac{\partial}{\partial k_R} (\mathcal{L}\{e\}) = \frac{\partial}{\partial k_R} (G_o \cdot X)$$

X sei dabei die Laplacetransformierte des Eingangssignals. Auch hier wurden Integration und Differentiation in ihrer Reihenfolge vertauscht. Weiter gilt:

$$\frac{\partial}{\partial k_R} (G_o \cdot X) = X \cdot \frac{\partial G_o}{\partial k_R} + G_o \cdot \frac{\partial X}{\partial k_R} = X \cdot \frac{\partial G_o}{\partial k_R}$$

weil X nicht von k_R abhängt. Somit:

$$\frac{\partial e}{\partial k_R} = \mathcal{L}^{-1} \left\{ X \cdot \frac{\partial G_o}{\partial k_R} \right\}$$

Man kann diesen Faktor also deuten als Antwort eines Systems mit der Übertragungsfunktion $\partial G_o / \partial k_R$ auf das

vorhandene Eingangssignal. Diese Uebertragungsfunktion ist unter dem Namen "Empfindlichkeitsfunktion" oder "sensitivity-function" ein Standardbegriff geworden.

Die Konstruktion eines adaptiven Systems ist auf Grund dieses Resultates einfach. Man geht davon aus, dass die Bedingung

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \left[e \cdot \frac{\partial e}{\partial k_R} \right] dt = 0$$

für beliebige Zeitfunktionen $e(t)$ sicher erfüllbar ist, wenn der Integrand in jedem Moment verschwindet. Dies erzwingt man meist mit einer Rückführung, die auf k_R wirkt. Dabei ist die "Regelgrösse" dieses Kreises das Produkt $e \cdot \frac{\partial e}{\partial k_R}$ gebildet aus den momentanen Ausgängen des zu adaptierenden Regelkreises und eines Sensitivity-Modells. Für den "Regler" wählt man meistens einen reinen Integrator, welcher dann auf einen Multiplikator als "Stellorgan" wirkt.

Grundsätzlich hat man also den Suchprozess von Abschnitt 1.3 durch eine gewöhnliche Regelung ersetzt, welche um eine bis zwei Grössenordnungen schneller arbeiten kann. Dieser Vorteil würde dadurch erkauft, dass ein Sensitivity-Modell eingeführt werden musste.

Ueber die Form dieses Modells lässt sich eine generelle Aussage machen. Dazu sei vom Störfrequenzgang G_0 des betrachteten Kreises ausgegangen. Es gelte:

$$G_0 := \frac{G_{str}}{1 + G_R G_{str}} = \frac{1}{\frac{1}{G_{str}} + G_R}$$

Die Empfindlichkeit ergibt sich dann wie folgt:

$$\frac{\partial G_0}{\partial k_R} = - G_0^2 \cdot \frac{\partial G_R}{\partial k_R}$$

und die gewünschte Ableitung erscheint als:

$$\frac{\partial e}{\partial k_R} = \mathcal{L}^{-1} \left\{ X \frac{\partial G_0}{\partial k_R} \right\} = \mathcal{L}^{-1} \left\{ (X G_0) \cdot G_0 \left(-\frac{\partial G_R}{\partial k_R} \right) \right\}$$

Dieses Resultat lässt sich umformen zu:

$$\frac{\partial e}{\partial k_R} = e(t) * \mathcal{L}^{-1} \left\{ G_o \cdot \left(- \frac{\partial G_R}{\partial k_R} \right) \right\}$$

d.h. man muss den Ausgang $e(t)$ des Prozesskreises auf eine Serieschaltung von zwei Blöcken geben, wobei der erste nochmals die Uebertragung des Prozesskreises und der zweite die stets bekannte Ableitung $\frac{\partial G_R}{\partial k_R}$ enthält (vgl. Abb. 14. 1). Es ist also im Prinzip ein genaues Modell des Prozesskreises nötig, welches den (zuerst zu messenden) Prozessänderungen nachgeführt werden müsste. Nun hat sich gezeigt, dass bei reduzierten Anforderungen an Stabilitätsgebiet und bleibende Adaptierabweichung ein konstantes Modell gewählt werden kann, das den Prozess im Auslegungspunkt einigermaßen wiedergibt. Der jetzt gemessene Gradient des ISE ist nicht der wahre, sondern ein sogenannter Pseudogradient (vgl. [1.11]).

Trotz dieser wesentlichen Vereinfachung bleibt die Tatsache bestehen, dass ein Modell gebildet werden muss, was gegen eine der Randbedingungen aus Abschnitt 1.2 verstösst. Zudem ist die erreichbare Genauigkeit nur schwer abzuschätzen, weil der Gradient nicht am Prozesskreis nachgemessen wird. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist hingegen, dass es auch ohne Prüfsignal einigermaßen funktionieren kann.

Es liegt also nahe zu versuchen, ob sich das Modell nicht umgehen oder wenigstens durch etwas einfacheres ersetzen lässt. Dazu sei in den Frequenzbereich übergegangen.

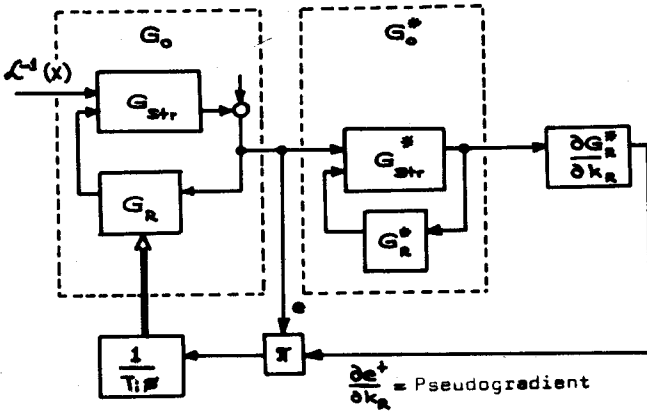


Abb. 14.1

Adaptives System, beruhend auf der vereinfachten Sensitivitätsmethode (Pseudogradient)

*: Übertragungsfunktion im Auslegungszustand, wird nicht durchgeführt.

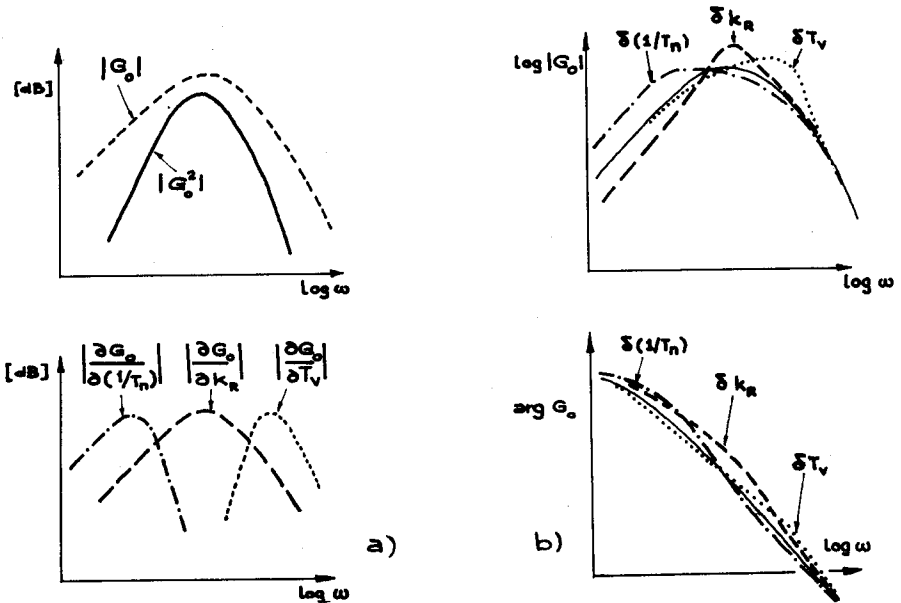


Abb. 14.2 Empfindlichkeiten und Deformationen des Störfrequenzganges in Bode-Darstellung

1.4.2. Betrachtung im Frequenzbereich

Man geht davon aus, dass sich die oben eingeführte 'Empfindlichkeit' als ein Maß für die Deformation von G_0 deuten lässt. Diese Deformation soll nun zunächst qualitativ und dann quantitativ untersucht werden.

Wenn man für den Frequenzgang des Reglers ansetzt:

$$G_R = k_R \left(1 + \frac{1}{T_n \cdot s} + T_V \cdot s \right)$$

dann gilt für die Empfindlichkeitsfunktionen unter Verwendung der eben hergeleiteten Beziehung:

$$\frac{\partial G_0}{\partial (1/T_n)} = - G_0^2 \cdot \frac{k_R}{s}$$

$$\frac{\partial G_0}{\partial k_R} = - G_0^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{T_n \cdot s} + T_V \cdot s \right)$$

$$\frac{\partial G_0}{\partial T_V} = - G_0^2 \cdot k_R \cdot s$$

Diese Ausdrücke enthalten alle den gemeinsamen Faktor G_0^2 , welcher die Form eines Bandpasses hat. Dieser Bandpass wird nun je nach dem gewählten Reglereinstellwert verschieden deformiert. So werden z.B. für $1/T_n$ durch den Faktor $1/s$ die Amplituden bei tieferen Frequenzen angehoben und bei höheren verkleinert. Abb. 14. 2a soll dies qualitativ veranschaulichen. Man erkennt, dass die Maxima der Empfindlichkeiten in voneinander verschiedene Frequenzbänder zu liegen kommen, mit anderen Worten wird also jeder Einstellwert den Frequenzgang G_0 in erster Näherung nur in einem bestimmten Frequenzbereich deformieren (vgl. Abb. 14.2b).

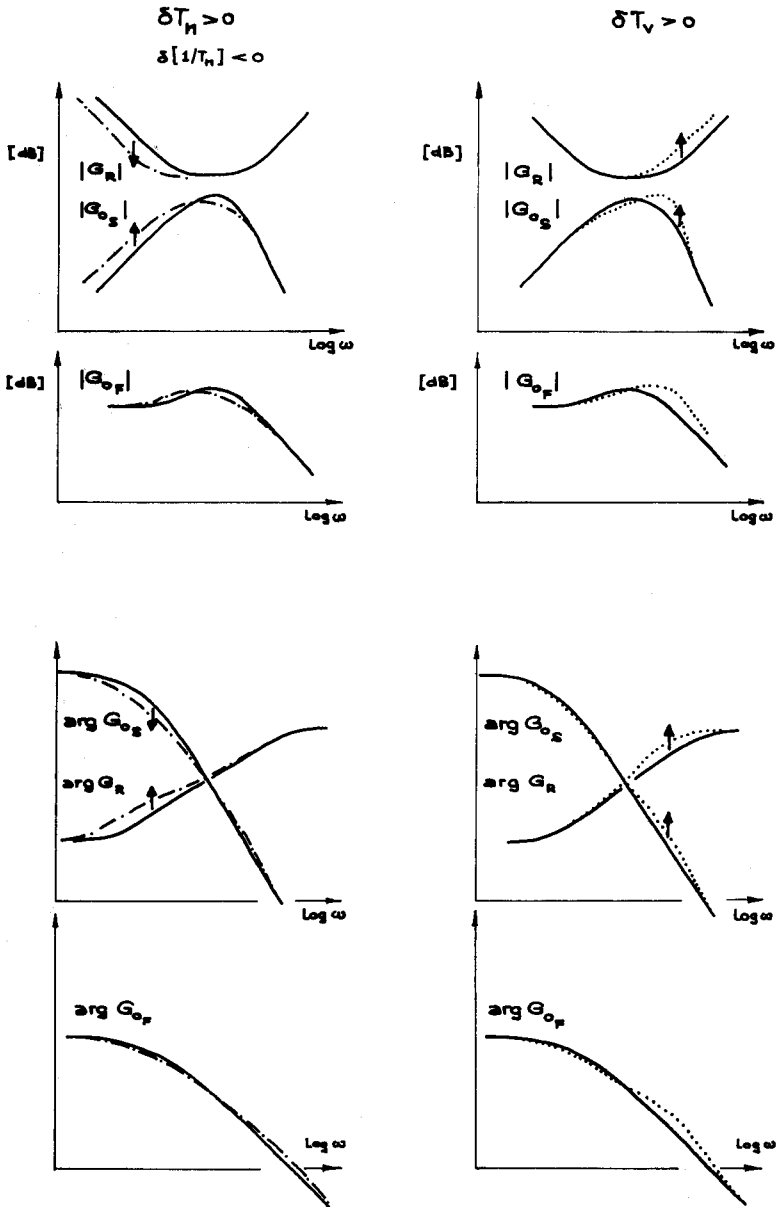


Abb. 14.3

Entstehung der Deformationen des Führungsfrequenzganges aus jenen des Störfrequenzganges

Den bisherigen Betrachtungen wurde stets der Störfrequenzgang des geschlossenen Kreises (im weiteren G_{OS}) zugrundegelegt. Deshalb erhebt sich die Frage, welche Änderungen in den gewonnenen Resultaten auftreten, wenn man vom Führungsfrequenzgang G_{OF} ausgeht.

Allgemein gilt für die beiden Frequenzgänge:

$$G_{OS} := \frac{G_{Str}}{1 + G_R \cdot G_{Str}} ; \quad G_{OF} = \frac{G_R \cdot G_{Str}}{1 + G_R \cdot G_{Str}}$$

und daraus folgt sofort:

$$G_{OF} = G_{OS} \cdot G_R$$

Diese Multiplikation lässt sich im Bode-Diagramm leicht durchführen. Der Faktor G_{OS} wurde soeben untersucht und der andere Faktor G_R folgt sofort aus seiner Definition

$$G_R = k_R \frac{1/T_n + s + T_V \cdot s^2}{s}$$

Er lässt sich als inverser Bandpass zweiter Ordnung deuten.

Die Einflüsse werden indirekt bestimmt, indem für jeden Einstellwert zwei benachbarte Werte eingesetzt werden und aus den Abweichungen der entstehenden Frequenzgänge auf die Empfindlichkeiten geschlossen wird (vgl. Abb. 14.3).

Die Abb. 14.3 bestätigt zunächst die grundsätzliche Eigenschaft der Empfindlichkeiten, dass ihre Maxima in verschiedene Frequenzbänder fallen. Im Vergleich zu Abb. 14. 2b ergibt sich weiter, dass der Einfluss des Integralanteils zurückgeht, der Einfluss des Differentialanteils dagegen zunimmt. Deshalb erscheint die Annahme plausibel, dass der Einfluss von k_R etwa derselbe bleibt.

Die in beiden Fällen im Frequenzbereich deutlich separierten Einflüsse werden nun eine einfache Kontrolle der Form von G_0 gestatten. Ob dabei Stör- oder Führungsfrequenzgang zugrundegelegt werden, hängt vor allem davon ab, auf welches Zeitverhalten man mehr Gewicht legt.

Vor der Entwicklung eines Kontrollverfahrens für G_0 sind aber die bisherigen, rein qualitativen Ueberlegungen quantitativ zu untermauern. So interessiert die genaue Form der Empfindlichkeiten bezüglich der Einstellwerte, der Abstand ihrer Maxima und die Ueberlappung der Einflüsse. Weiter ist festzustellen, welche Wirkungen durch Streckenänderungen hervorgerufen werden.

Die quantitativen Untersuchungen sind natürlich nur an einem konkreten Regelkreis möglich, d.h. man muss sich eine bestimmte Regelstrecke vorgeben. Es liegt nahe, ein hinreichend genaues Modell des ins Auge gefassten, wirklichen Prozesses zu verwenden. In diesem Falle wären die Untersuchungen für jede neue Anwendung zu wiederholen. - Bei Versuchen an verschiedenen Modellen hat sich nun gezeigt, dass die hier interessierenden Eigenschaften des geschlossenen Kreises wenig von der Struktur der Strecke abhängen. Aus diesem Grunde reicht die Untersuchung einer repräsentativen Strecke aus. Gewählt wurden:

$$G_R = k_R \left(1 + \frac{1}{T_n s} + T_v s \cdot \frac{1}{T_s + 1} \right) \quad T \ll T_i$$

$$G_{Str} = k_{Str} \frac{1}{\prod_{i=1}^5 (T_i s + 1)}$$

Die T_i wurden dabei als reell und positiv vorausgesetzt und in Oktavabständen angenommen, d.h.:

$$T_i / T_{i+1} = 2$$

Aus den beiden angeschriebenen Frequenzgängen ist nun der Frequenzgang des geschlossenen Kreises zu bestimmen. Das lässt sich einfach und übersichtlich, wenn auch etwas langwierig, durch Messung an einem Analogmodell bewerkstelligen. Zudem kann man bei diesem Vorgehen das Verhalten im Zeitbereich sehr leicht überprüfen.

So wurde der Regelkreis nach dem Schaltschema Abb. 14.4 auf einem der Analogrechner EAI-TR-10 des Instituts für Regelung und Dampfanlagen der ETH gesteckt und seine Störfrequenzgänge

- bei Variation je eines Einstellwertes (Abb. 14.5) und
- bei Aenderung der Streckenübertragungsfunktion, speziell bei Variation der Streckenverstärkung (Abb. 14.6) sowie der Zeitkonstanten (Abb.14.7-9) gemessen.

Im weiteren sollte an zwei Beispielen der Einfluss einer Strukturänderung der Strecke gezeigt werden. Zu diesem Zweck wurde der eben benutzte Streckenfrequenzgang im Zähler ergänzt zu

$$G_{str}^* = k_{str} \cdot \frac{T_z \cdot s + 1}{\prod_{i=1}^n (T_i s + 1)}$$

T_z kann alle Werte der reellen Zahlenachse annehmen, also auch Null sein. Somit sind die bisherigen Resultate in den zu erwartenden als Spezialfälle enthalten. Abb. 14.10 zeigt die Wirkung von $T_z > 0$ für verschiedene Werte T_z und Abb. 14.11 jene von $T_z < 0$. - Hier konnten übrigens die bisherigen Einstellwerte nicht beibehalten werden, weil der Kreis sonst instabil war.

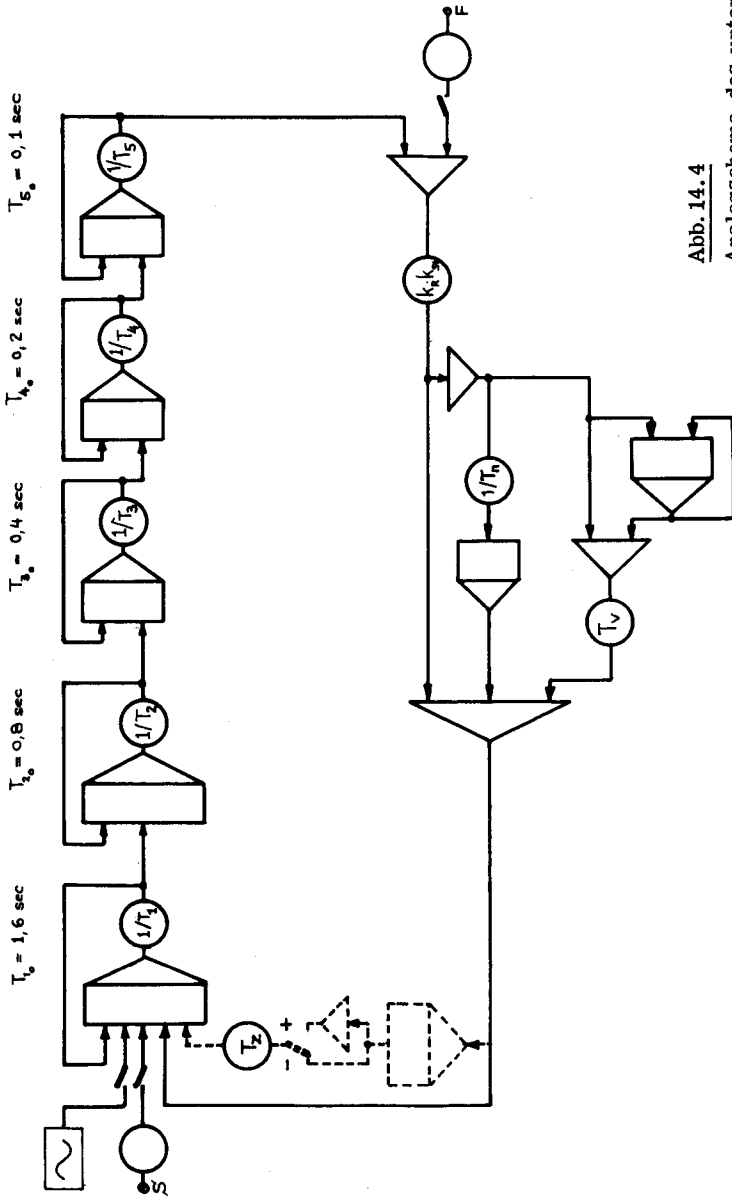


Abb. 14.4
Analogschema des unter-
suchten Modellregelkreises

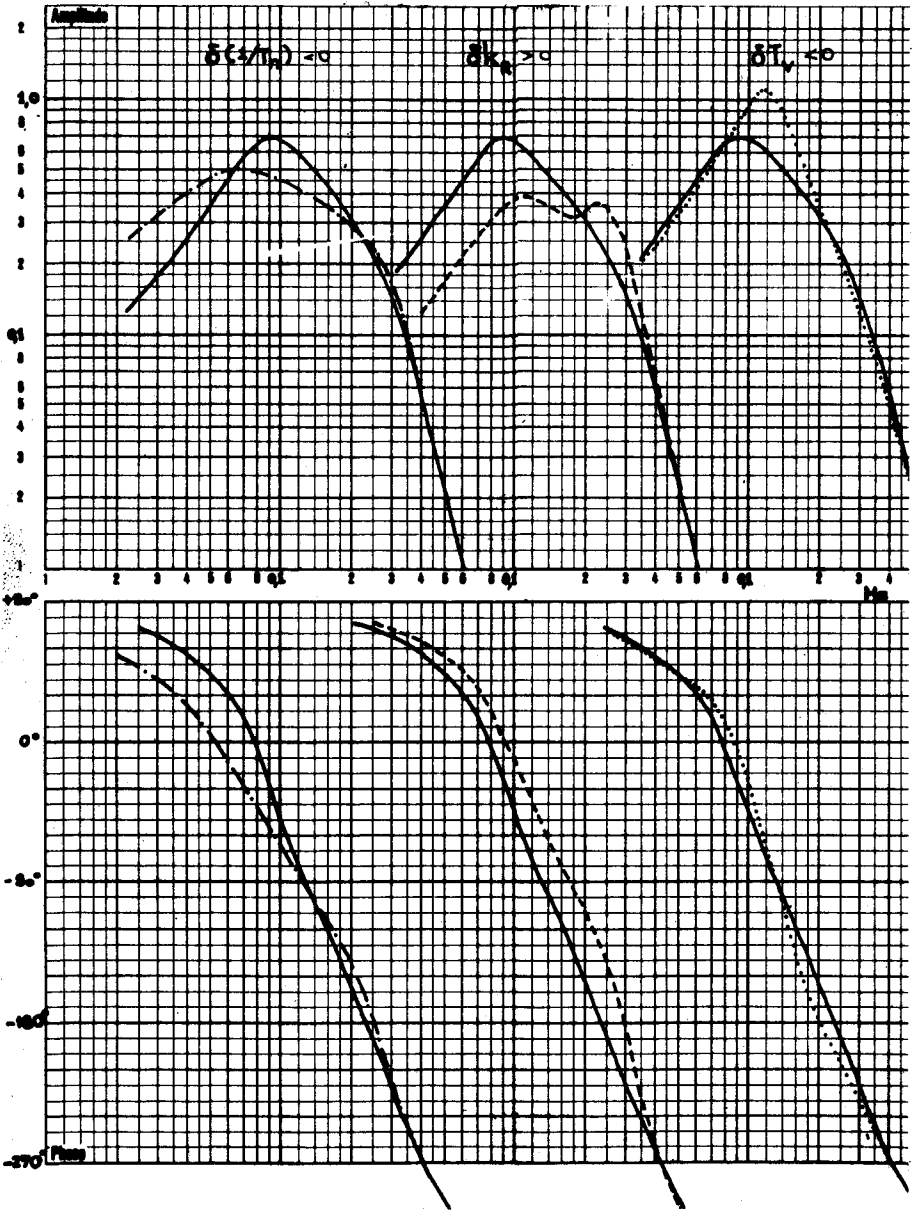


Abb.14.5

Einfluss der Regler-Einstellwerte
auf den Störfrequenzgang

$$T_n/T_{n_0} = 2$$

$$k_R/k_{R_0} = 2$$

$$T_V/T_{V_0} = 0,5$$

