

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

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 Versuche 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.