

## Vorwort

### Zielsetzung und Vorgehensweise

Gegenstand des Buches sind Analyse und Entwurf nichtlinearer kontinuierlicher Regelungen. Betrachtet werden Methoden, die grundsätzlich zu einer analytischen oder semi-analytischen Lösung führen, hingegen keine rein numerischen Verfahren. Aus der Vielzahl der zur Verfügung stehenden Methoden wurden solche ausgewählt, die nach meiner Erfahrung für die Behandlung konkreter regelungstechnischer Aufgabenstellungen besonders geeignet sind. Ihre Grundzüge und wesentlichen Eigenschaften werden dargestellt, ohne daß dabei Vollständigkeit und mathematische Präzision angestrebt sind. Das Buch ist zunächst für Ingenieure geschrieben und darüber hinaus für alle Anwender, die sich für Regelungsprobleme interessieren, aber nicht für den, dem es in erster Linie um den mathematischen Aspekt der nichtlinearen Methoden geht.

Mein Anliegen ist es, die Begriffe und Verfahren der nichtlinearen Theorie dem Verständnis des Lesers nahe zu bringen, ihren Zusammenhang und ihre Motivation einsichtig zu machen und die Dinge so darzustellen, daß sich die Schlußweisen ohne große Mühe nachvollziehen lassen und soweit wie möglich anschaulich bleiben. Nicht selten läßt sich der Grundgedanke eines nichtlinearen Verfahrens, dessen mathematische Einkleidung auf den Anwender einen recht unnahbaren Eindruck macht, als einleuchtend und gar nicht fernliegend erkennen. Stets wird der allgemeine Gedankengang von Beispielen begleitet und erhellt. Um gute Lesbarkeit zu gewährleisten, ist auf genügende Ausführlichkeit und eine gewisse Breite der Darstellung geachtet. An Mathematik wird nur so viel benutzt, wie in der Tat nötig ist, nie treten mathematische Betrachtungen als Selbstzweck auf. Allerdings muß man sich darüber im klaren sein, daß die Behandlung nichtlinearer Systeme ohne eine gehörige Portion Mathematik nicht durchführbar ist.

### Gliederung und Inhalt

Das Buch ist in zwei Bände aufgeteilt. Nach der Behandlung der *Grundbegriffe nichtlinearer Systeme* im Kapitel 1 des ersten Bandes folgt im Kapitel 2 als *erste* nichtlineare Methode die *Anwendung der Zustandsebene*. Sie empfiehlt sich als Einstieg wegen ihrer Anschaulichkeit, durch die sich viele nichtlineare Phänomene und Vorgehensweisen in suggestiver Weise einführen lassen. Da sie eine Zeitbereichsmethode ist, liegt es nahe, an sie die *Direkte Methode* von *Ljapunow* an-

zuschließen, die ebenfalls im Zeitbereich arbeitet. Sie wird demgemäß im Kapitel 3 behandelt. Damit schließt der Text von Band I der „Nichtlinearen Regelungen“, in dem also zwei Zeitbereichsverfahren dargestellt sind.

Band II beginnt mit der *Harmonischen Balance* oder *Harmonischen Linearisierung* im Kapitel 4, die durch den frequenzgangähnlichen Begriff der Beschreibungsfunktion und die daraus resultierende Benutzung von Ortskurven der Denkweise des Ingenieurs sehr entgegen kommt. Im Kapitel 5 folgen auf sie *Popow- und Kreiskriterium*. Diese haben zwar keinen inneren Zusammenhang mit der Harmonischen Balance, gehören aber für den Anwender dennoch in deren Nähe, weil sie ebenfalls mit den Begriffen „Frequenzgang“ und „Ortskurve“ arbeiten. An das Popow-Kriterium schließt sich zwanglos die Hyperstabilitätstheorie von Popow an, da man den Begriff der Hyperstabilität als eine Verallgemeinerung der absoluten Stabilität ansehen kann, auf die sich Popow- und Kreiskriterium beziehen. Die *Hyperstabilität* wird deshalb im Kapitel 6 behandelt. In dieser Theorie kann man die Stabilitätskriterien sowohl im Frequenzbereich als auch im Zeitbereich formulieren, und zwar so, daß sie in beiderlei Form praktisch verwendbar sind. Im Kapitel 7, dem letzten des Buches, dominiert schließlich wieder die Zeitbereichsbetrachtung. Hier wird die *Synthese nichtlinearer Regler für nichtlineare Strecken durch Kompensation und Entkopplung* durchgeführt („globale“ oder „exakte Linearisierung“). Die Untersuchungen dieses Kapitels sind von dem Vorangegangenen recht verschieden. Während dort das Stabilitätsproblem im Vordergrund steht und Synthese weitgehend Stabilisierung, also Verbesserung des Stabilitätsverhaltens bedeutet, besteht jetzt das Ziel im Entwurf einer Regelung mit gewünschten dynamischen Eigenschaften, wobei die Methoden der linearen Zustandstheorie als Vorbild dienen.

Sowohl dem Band I als auch dem Band II sind *Übungsaufgaben mit ausführlicher Beschreibung des Lösungswegs* beigegeben, und zwar 18 je Band.

Nicht gebracht werden im vorliegenden Buch Optimierungsmethoden für Regulationssysteme, obgleich sie, auch bei der Anwendung auf lineare Systeme, im allgemeinen zu nichtlinearen Reglern führen. Lediglich der einfachste Typ zeitoptimaler Systeme wird in der Zustandsebene entworfen, da es sich hierbei um ein Paradebeispiel für die Eignung der Zustandsebene zur Regulationssynthese handelt. Diese Abtrennung der Optimierung ist nicht nur durch die Begrenzung des Buchumfangs bedingt, sondern auch dadurch motiviert, daß die Optimierung in Gestalt der Variationsrechnung eine mathematische Methodik erfordert, die von den in diesem Buch angewandten Methoden sehr verschieden ist. In dem Buch „Optimale Regelung und Steuerung“ [74] habe ich diese Methodik (Hamilton-Theorie,

Pontrjaginsches Maximumprinzip, Dynamische Programmierung) samt regelungstechnischen Anwendungen dargestellt. Dieser Band kann daher als Ergänzung der beiden hier vorliegenden Bände angesehen werden.

Wenn man nach *charakteristischen Merkmalen* fragt, die das vorliegende Buch im Vergleich mit anderen Lehrbüchern über nichtlineare Regelungssysteme kennzeichnen könnten, so lassen sich folgende Punkte anführen:

- Es behandelt ein *breites Spektrum von Verfahren*, die in Ursprung, Vorgehensweise und Zielsetzung große Unterschiede aufweisen. Man betrachte nur Harmonische Balance, Direkte Methode, Hyperstabilitätstheorie und die Synthese nichtlinearer Regelungen im Zustandsraum nebeneinander!
- Die *Betonung der Synthese*, welche für den Regelungstechniker Vorrang vor der Systemanalyse hat, ist ein wichtiges Anliegen des Buches. Das ist nicht selbstverständlich, da viele nichtlineare Verfahren nicht in der Regelungstechnik selbst entstanden sind, sondern aus der Mechanik stammen, die als naturwissenschaftliche Disziplin in erster Linie an der Untersuchung der Systemeigenschaften und nicht primär an einer gezielten Systembeeinflussung interessiert ist. Man merkt dies Methoden solcher Herkunft deutlich an.
- *Ingenieurmäßige Betrachtungen*, auch wenn sie der Anforderung mathematischer Strenge nicht immer genügen, werden *als wichtige Hilfsmittel* angesehen. Das gilt z.B. für die Betrachtungen über den Zusammenhang zwischen dem Stabilitätsverhalten von Dauerschwingungen und Ruhelagen oder für die heuristischen Untersuchungen zum nichtlinearen Beobachter. Auch der breite Raum, welcher der Harmonischen Balance, einer Ingenieurmethode par excellence, eingeräumt wird, spiegelt diese Auffassung wider. In der Regelungstechnik braucht man zwar viel Mathematik, aber deswegen ist die Regelungstechnik keineswegs eine mathematische Disziplin.
- Was die im Buch behandelten Gegenstände betrifft, so ist vor allem auf zwei Themen hinzuweisen. Die *Grundzüge der Hyperstabilitätstheorie* (Kapitel 6) wurden bislang in deutschsprachigen Regelungstechnikbüchern nicht dargestellt. Es finden sich lediglich Zusammenstellungen von Begriffen und Sätzen, mit dem Zweck, sie bei der Behandlung adaptiver Systeme zu verwenden. Die *Synthese nichtlinearer Systeme im Zustandsraum* („globale“ oder „exakte Linearisierung“) im Kapitel 7 ist *in elementarer Weise* durchgeführt, indem auf den physikalischen Kern zurückgegangen wird, der letztlich in der Kompensation von Nichtlinearitäten und der Hinzufügung gewünschter linearer Systemteile besteht.

## Voraussetzungen

Was die Mathematik angeht, so genügen die Kenntnisse, welche im üblichen Mathematikkurs für Ingenieure vermittelt werden. Weitergehende Methoden, etwa aus Differentialgeometrie oder Funktionalanalysis, werden nicht benötigt. Es sei angemerkt, daß die Elemente der Laplace-Transformation sowie der Vektor- und Matrizenrechnung häufig benutzt werden. An zwei Stellen wird das Kronecker-Produkt von Matrizen verwendet, das den erwähnten Rahmen überschreitet. Es wird an Ort und Stelle erläutert.

In regelungstechnischer Hinsicht braucht man als Basis für das Studium der nicht-linearen Systeme die übliche lineare Theorie, insbesondere die Grundbegriffe des Regelkreises, seine Darstellung im Strukturbild (Signalflußplan, Wirkplan), die linearen Stabilitätskriterien und die Frequenzgangmethoden, dazu die Elemente der Zustandstheorie, speziell Polvorgabe und Luenberger-Beobachter.

Die in diesem Buch benutzte **Terminologie** ist abgestimmt auf das von mir gemeinsam mit **F. Dörrscheidt** und **M. Klittich** verfaßte Buch „Regelungstechnik, Einführung in die Methoden und ihre Anwendung“ [73]. Hier kann der Leser auch Begriffe, Sätze und Methoden der linearen Theorie finden, die ihm möglicherweise entfallen sind.

Auf eine terminologische Einzelheit sei schon hier hingewiesen. Von Ausnahmefällen abgesehen, werden in diesem Buch *zeitinvariante* Systeme betrachtet, seien sie nun linear oder nichtlinear. Um die Ausdrucksweise zu verkürzen, wird deshalb *im folgenden ein „lineares, zeitinvariantes System“ einfach als „lineares System“ bezeichnet*. Falls nicht ausdrücklich etwas anderes bemerkt wird, ist in dieser Bezeichnung also die Zeitinvarianz einbegriffen.

## Interessentenkreis

Da das Buch keine speziellen Voraussetzungen macht, richtet es sich an alle Anwender, die sich für Regelungstechnik und Systemdynamik interessieren, ganz gleich, aus welchem Fachgebiet sie stammen, sofern nur die oben erwähnten mathematischen und regelungstechnischen Grundkenntnisse vorhanden sind. Dabei ist sowohl der schon im Beruf stehende Fachmann angesprochen als auch an Dozenten und Studenten von Universitäten und Fachhochschulen gedacht. Vor allem ist das Buch auch zum Selbststudium geeignet, wobei die Übungsaufgaben mit ausführlichem Lösungsweg eine gute Hilfe sein dürften.

### Danksagung zur 7. Auflage

Bei der Abfassung dieser Neuauflage wurde ich in vielfältiger Weise unterstützt. An erster Stelle richtet sich mein Dank an die *Deutsche Forschungsgemeinschaft*, welche die Untersuchung nichtlinearer Systeme am Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme der Universität Karlsruhe in mehreren Forschungsvorhaben gefördert hat. Deren Ergebnisse haben an verschiedenen Stellen dieses Buches ihren Niederschlag gefunden. Insbesondere ist die im Abschnitt 3.6 beschriebene Ljapunow-Synthese durch Gütemaßangleichung von *U. Sieber* innerhalb eines solchen Forschungsvorhabens entstanden.

Mein herzlicher Dank gilt sodann Frau *Ulrike Stärk* für ihre Geduld und Ausdauer beim Schreiben des umfangreichen Textes, Frau *Doris Bickel* für die Anfertigung der neuen Bilder, Herrn Dr. *Klaus Krüger*, Herrn Dr. *Ansgar Trächtler* und Herrn *Rolf Böhm* für das Lesen von Korrekturen und für wertvolle Ratschläge sowie vor allem Herrn Dr. *Udo Sieber*, der die gesamte Entstehung der Neuauflage mit Rat und Tat begleitet hat. Den Herren Professor *Lauber*, Professor *Lunze*, Dr. *Birk* und Dr. *Tibken* gilt mein Dank für die Übermittlung wertvoller Informationen. Dem *Oldenbourg-Verlag* danke ich für die angenehme Zusammenarbeit.

Zuletzt zwar, doch nicht zum wenigsten, danke ich meiner Frau *Ursula*, die auch die Arbeit an dieser Buchveröffentlichung wie schon an so mancher früheren durch ihr Verständnis und ihr Interesse gefördert hat.

Die **8. Auflage** unterscheidet sich von der 7. durch die Korrektur noch verbliebener Irrtümer sowie die Aktualisierung des Literaturverzeichnisses. Ich danke allen, die mich auf Fehler aufmerksam gemacht haben, und ganz besonders Herrn *Klaus Mößner* für seine tatkräftige Unterstützung bei Literaturrecherchen.

Herbst 1997

O. Föllinger

