

# Vorwort

In vielen technischen und nichttechnischen Teilgebieten der Wissenschaft lassen sich untersuchte Zusammenhänge und neu entdeckte Phänomene als dynamische Systeme auffassen und mathematisch beschreiben. Ein dynamisches System ist dabei prinzipiell dadurch charakterisiert, dass Eingangssignale so auf das System einwirken, dass am Systemausgang eine Reaktion erfolgt. Für das statische und dynamische Verhalten eines Systems stehen dem Anwender heute eine Vielzahl unterschiedlicher Beschreibungsformen zur Verfügung. Die Ermittlung eines mathematischen Modells für das Systemverhalten aus Messungen der Eingangs- und Ausgangsgrößen wird als experimentelle Systemidentifikation oder experimentelle Prozessanalyse bezeichnet. Das vorliegende Buch bietet dem Leser eine detaillierte Einführung in dieses Gebiet.

Die Systemidentifikation hat sich in den vergangenen fünf Jahrzehnten zu einer methodischen Systemwissenschaft entwickelt. Es existieren zahlreiche gute, weitgehend englischsprachige, Lehrbücher zu diesem Thema. Dem Anwender stehen sowohl für lineare als auch nichtlineare Systeme anspruchsvolle, aber auch sehr effektive mathematische Verfahren zur Verfügung. Basis dieser Verfahren bilden die Methoden der Signalverarbeitung, Systemtheorie, Regelungstechnik und der statistischen Schätztheorie. Ein Anwender, der eine spezielle Modellierungs- und Identifikationsaufgabe zu lösen hat, besitzt oftmals nicht den Überblick, welche Methode zur Lösung seines Problems die zweckmäßigste ist. Zur Auswahl einer Methode und zur Durchführung der Identifikation sind vergleichsweise umfangreiches Grundlagenwissen und ein Verständnis der verschiedenen Ansätze erforderlich. Neben der Vermittlung dieses Wissens möchte das vorliegende Buch auch dazu beitragen, den Anwender in die Lage zu versetzen, entscheiden zu können, welche Identifikationsverfahren beziehungsweise welche Modelle für eine konkrete Aufgabenstellung der Systemidentifikation zum Einsatz kommen können und, falls erforderlich, tiefer in dieses Gebiet einzusteigen.

Der Stoff dieses Buches umfasst neun Kapitel und sieben Anhänge. Kapitel 1 stellt eine kurze Einführung in die experimentelle Systemidentifikation dar, wobei die verschiedenen Formen der Modellbildung und deren Realisierung sowie die prinzipielle Vorgehensweise bei der Systemidentifikation diskutiert werden. Im Kapitel 2 wird die klassische Systemidentifikation für Eingrößensysteme mittels nichtparametrischer Modelle im Zeit- und Frequenzbereich vorgestellt. Dabei wird gezeigt, wie Modelle durch Auswertung gemessener Sprungantworten oder Frequenzgänge gewonnen werden können. Weiterhin wird ersichtlich, dass die Korrelationsanalyse mittels binärer und ternärer Eingangstestsignale ein leistungsfähiges Verfahren zur Identifikation linearer dynamischer Systeme darstellt. Kapitel 3 befasst sich eingehend mit den wichtigsten Parameterschätzverfahren für lineare Eingrößensysteme. Obwohl die Mehrzahl der realen Systeme eine zeitkontinuierliche Dynamik aufweist, eignet sich für ihre Darstellung und Weiterverarbeitung zunächst eine zeitdiskrete Systembeschreibung meist besser. Die Identifikation der Parameter des zeitdiskreten Modells aus Messwerten erfolgt über die Lösung eines numerischen Optimierungsproblems. Die wichtigsten direkten und rekursiven Lösungsverfahren werden in Kapitel 3 im Detail vorgestellt.

In Kapitel 4 werden Strukturprüfverfahren behandelt, die es ermöglichen, die Modellordnung abzuschätzen. Auf die Identifikation linearer Mehrgrößensysteme wird in Kapitel 5 eingegangen, wobei verschiedene Ansätze behandelt werden. Ausführlich werden die Modellansätze mittels Übertragungsfunktionen, der Zustandsraumdarstellung, Übertragungsmatrizen und Polynommatrizen diskutiert. Kapitel 6 zeigt verschiedene Möglichkeiten zur Identifikation zeitkontinuierlicher linearer Modelle auf.

Die Kapitel 7 und 8 widmen sich der Identifikation nichtlinearer Modelle. Während für lineare Systeme eine Reihe von allgemeingültigen Modellbeschreibungen existieren, die (bei endlichdimensionalen Systemen) prinzipiell alle ineinander überführbar sind, existiert für nichtlineare Systeme eine Vielzahl von unterschiedlichen allgemeinen und speziellen Modellen. In Kapitel 7 wird daher eine Einteilung dynamischer Modelle vorgenommen. Unterschieden wird hier zwischen Eingangs-Ausgangs-Beschreibungen und Zustandsraummodellen, zeitkontinuierlichen und zeitdiskreten Modellen, *Black-Box*-, *Gray-Box*- und *White-Box*-Modellen, parametrischen und nichtparametrischen sowie linear und nichtlinear parameterabhängigen Modellen. Anschließend werden als Eingangs-Ausgangs-Modelle die Volterra- und die Wiener-Reihe, Differentialgleichungs- und Modulationsfunktionsmodelle, Differenzgleichungen und NARMAX-Modelle, das Kolmogorov-Gabor-Polynom, das bilineare Eingangs-Ausgangs-Modell, blockorientierte Modelle, künstliche neuronale Netze sowie Fuzzy-Modelle behandelt. Neben der allgemeinen Betrachtung des Zustandsraummodells werden als Spezialfälle das steuerungslineare, das zustandslineare und das bilineare Zustandsraummodelle sowie Zustandsraumdarstellungen für blockorientierte Modelle vorgestellt.

In Kapitel 8 werden verschiedenen Verfahren zur Identifikation nichtlinearer Systeme behandelt. Auch hier erfolgt zunächst eine grundlegenden Einteilung von Identifikationsverfahren und anschließend werden ausgewählte Verfahren detaillierter betrachtet. Als explizite Verfahren werden die Bestimmung von Kernen für Volterra- und Wiener-Reihen sowie die direkte auf der Minimierung der Summe der Fehlerquadrate (*Least-Squares*) basierende Parameterschätzung für eine Reihe von linear parameterabhängigen Modellen diskutiert. Als implizite Verfahren werden die rekursive *Least-Squares*-Schätzung, die Parameterschätzung für neuronale Netze mittels des Backpropagationsverfahrens und die Parameter- und Zustandsschätzung für nichtlineare Zustandsraummodelle behandelt. Weiterhin werden verschiedenen Ansätze zur Strukturprüfung für nichtlineare Systeme vorgestellt.

Beim Bearbeiten einer Identifikationsaufgabe sind zahlreiche praktische Aspekte zu berücksichtigen, von denen die wichtigsten im neunten Kapitel diskutiert werden. Hierunter fallen theoretische und simulative Voruntersuchungen, der experimentelle Aufbau, die Auswahl von Abtastzeit und Messdauer, die Auswahl und Erzeugung von Eingangssignalen, die Sichtung und Bearbeitung der Messdaten, die Wahl einer Modellstruktur, die eigentliche Durchführung der Identifikation (inklusive der Auswahl eines Verfahrens) sowie abschließend die Bewertung der Ergebnisse und das Erstellen einer Dokumentation.

Es war das Anliegen der Autoren, den sehr umfangreichen Stoff in möglichst anschaulicher und übersichtlicher Form systematisch darzustellen. Dazu wurden die für das Verständnis notwendigen mathematischen Grundlagen weitgehend aus dem laufenden Text herausgenommen und in den Anhängen A bis G dargestellt. In Anhang A werden die Grundlagen der statistischen Behandlung linearer Systeme betrachtet. In Anhang B wird gezeigt,

wie die in Anhang A vorgestellten Zusammenhänge zur Bestimmung der Eigenschaften linearer Systeme genutzt werden können. Grundlagen der Fourier-Transformation bilden den Inhalt des Anhangs C. In Anhang D werden die in Kapitel 4 betrachteten rekursiven gewichteten Parameterschätzverfahren hergeleitet. Die für die Parameterschätzung bei Mehrgrößensystemen in Kapitel 5 verwendete kanonische Beobachtbarkeitsnormalform wird in Anhang E vorgestellt. Anhang F widmet sich der in Zusammenhang mit dem Modulationsfunktionsverfahren zur Identifikation zeitkontinuierlicher Modelle in Kapitel 6 auftretenden Hartley-Transformation. In Anhang G werden die Grundlagen der Matrix-Differentialrechnung behandelt, die hauptsächlich bei der Formulierung der Algorithmen für die Zustands- und Parameterschätzung bei nichtlinearen Zustandsraummodellen in Kapitel 8 benötigt werden.

Für den Verständnis des Buches sind Grundlagenkenntnisse zur mathematischen Behandlung von Signalen und Systemen erforderlich, wie Sie in einführenden Vorlesungen zu Messtechnik, Signalen und Systemen, Nachrichtentechnik oder Regelungstechnik an Fachhochschulen und Universitäten vermittelt werden. Als Stichworte seien hier die Behandlung linearer Systeme im Zeit- und Frequenzbereich genannt sowie die damit verbundenen Integraltransformationen (Fourier-Transformation, Laplace-Transformation,  $z$ -Transformation). Es sollte allerdings möglich sein, diese Grundkenntnisse parallel zum Studium des vorliegenden Buches zu erarbeiten oder aufzufrischen.

Durch den Aufbau des Buches ergeben sich für den Leser mehrere Einstiegsmöglichkeiten in die Thematik der Systemidentifikation. Prinzipiell ist es zweckmäßig, zunächst die Identifikationsverfahren für lineare Systeme mit einer Eingangs- und einer Ausgangsgröße (Eingrößensysteme) zu verstehen, bevor eine Beschäftigung mit der Identifikation nichtlinearer Systeme erfolgt. Hierzu bietet sich eine Lektüre der Kapitel 1 bis 4 an, wobei Kapitel 2 (nichtparametrische Identifikation) und Kapitel 3 (Parameterschätzverfahren) weitgehend unabhängig voneinander sind. Anschließend kann eine weiterführende Beschäftigung mit Parameterschätzverfahren für lineare Systeme mit mehreren Eingangs- und Ausgangsgrößen erfolgen (Kapitel 5) sowie mit der Identifikation linearer Systeme mit zeitkontinuierlichen Modellen (Kapitel 6). Darauf aufbauend kann die Lektüre mit den Kapiteln 7 und 8 zur Identifikation nichtlinearer Systeme und Kapitel 9 zu praktischen Aspekten der Identifikation fortgesetzt werden.

Es ist aber auch ein direkter Einstieg in die Identifikation nichtlinearer Systeme möglich. Dazu kann direkt mit der Lektüre von Kapitel 7 (Modelle für nichtlineare Systeme) und Kapitel 8 (Identifikation nichtlinearer Systeme) begonnen werden, wobei zur allgemeinen Einführung ggf. vorab noch Kapitel 1 gelesen werden sollte. Um auch diese Einstiegsmöglichkeit zu schaffen, werden in den hinteren Kapiteln einige Grundlagen der Systemidentifikation nochmals, z.T. aus einem etwas allgemeineren Blickwinkel, dargestellt.

Ein Verständnis der Theorie sowie der grundlegenden Verfahren ist eine unabdingbare Voraussetzung für die Durchführung einer Systemidentifikation. Eine Beschäftigung mit den in Kapitel 9 betrachteten praktischen Aspekten der Identifikation bietet sich daher im Anschluss an das Studium der Verfahren zur Identifikation linearer Systeme (Kapitel 2 bis 6) bzw. nichtlinearer Systeme (Kapitel 7 und 8) an. Allerdings kann ein Leser, der primär an den praktischen Aspekten interessiert ist, sich auch zunächst durch die Lektüre von Kapitel 9 (ggf. nach der allgemeinen Einführung in Kapitel 1) einen Überblick verschaffen und später tiefer in die Identifikationsverfahren einsteigen.

Die Autoren möchten den zahlreichen Personen danken, die sie bei der Entstehung dieses Buches unterstützt haben. Frau Daniela Trompeter und den Herren Andreas Haupt und Roland Dorrenbusch sei für die Hilfe beim Setzen des Manuskriptes gedankt. Bei der Erstellung der Abbildungen hat Frau Andrea Marschall maßgeblich mitgewirkt. Zahlreiche kritische Hinweise und Verbesserungsvorschläge kamen von den ehemaligen und jetzigen wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des ersten Autors. Dem Springer Vieweg Verlag sei für die gute Zusammenarbeit gedankt. Abschließend danken die Autoren auch ihren Familien für das Verständnis, welches diese ihnen für die Arbeit an diesem Buch entgegengebracht haben.

Hinweise und konstruktive Kritik zur Verbesserung des Buches werden die Autoren von den zukünftigen Lesern gern entgegennehmen.

Hannover und Bochum, November 2016

*Christian Bohn und Heinz Unbehauen*

Identifikation dynamischer Systeme  
Methoden zur experimentellen Modellbildung aus  
Messdaten

Bohn, C.; Unbehauen, H.

2016, XX, 698 S. 149 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-8348-1755-6