

Rolf Isermann

Identifikation dynamischer Systeme

Band I

Frequenzgangmessung, Fourieranalyse,
Korrelationsanalyse.

Einführung in die Parameterschätzung



Springer-Verlag

Rolf Isermann

Identifikation dynamischer Systeme

Band I:

Frequenzgangmessung, Fourieranalyse,
Korrelationsanalyse,
Einführung in die Parameterschätzung

Mit 85 Abbildungen

1. Dynamical systems.

Professor Dr.-Ing. Rolf Isermann

Institut für Regelungstechnik
Fachgebiet Regelsystemtechnik
TH Darmstadt
Schloßgraben 1
6100 Darmstadt

ISBN 3-540-12635-X Springer-Verlag Berlin Heidelberg NewYork

ISBN 0-387-12635-X Springer-Verlag NewYork Heidelberg Berlin

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Isermann, Rolf:

Identifikation dynamischer Systeme / Rolf Isermann.

Berlin ; Heidelberg ; NewYork ; London ; Paris ; Tokyo : Springer

Bd. I. Frequenzgangmessung, Fourieranalyse, Korrelationsanalyse,
Einführung in die Parameterschätzung. -

1988

ISBN 3-540-12635-X (Berlin ...)

ISBN 0-387-12635-X (NewYork ...)

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk-sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. Sep-tember 1965 in der Fassung vom 24. Juli 1985 zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwi-derhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin, Heidelberg 1988

Printed in Germany

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder auf eine derartige Bestimmung hingewiesen werden, so versteht sich, daß der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernimmt. Es ist den Autoren vorbehalten, sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hin-zuziehen.

Druck: Mercedes-Druck, Berlin; Bindearbeiten: Lüderitz
2160/3020-543210

Vorwort

Für viele Aufgabenstellungen beim Entwurf, beim Betrieb und bei der Automatisierung technischer Systeme werden in zunehmendem Maße genaue mathematische Modelle für das dynamische Verhalten benötigt. Auch im Bereich der Naturwissenschaften, besonders Physik, Chemie, Biologie und Medizin und in den Wirtschaftswissenschaften hat das Interesse an dynamischen Modellen stark zugenommen. Das grundsätzliche dynamische Verhalten kann dabei auf dem Wege einer theoretischen Modellbildung ermittelt werden, wenn die das System beschreibenden Gesetzmäßigkeiten in analytischer Form vorliegen. Wenn man diese Gesetze jedoch nicht oder nur teilweise kennt, oder wenn einige wesentliche Parameter nicht genau bekannt sind, dann muß man eine experimentelle Modellbildung, Identifikation genannt, durchführen. Hierbei verwendet man gemessene Signale und ermittelt das zeitliche Verhalten innerhalb einer gewählten Klasse von mathematischen Modellen.

Die Systemidentifikation (oder Prozeßidentifikation) ist eine noch relativ junge Disziplin, die sich vor allem in Rahmen der Regelungstechnik seit etwa 1960 entwickelt hat. Sie verwendet Grundlagen und Methoden der Systemtheorie, Signaltheorie, Regelungstheorie und Schätztheorie, und wurde wesentlich geprägt durch die moderne Meßtechnik und digitale Rechentechnik.

In zwei Bänden werden die bekanntesten Methoden der Identifikation dynamischer Systeme behandelt. Dabei wird sowohl auf die Theorie als auch Anwendung eingegangen. Das Werk ist eine Fortsetzung der vom Verfasser im Jahr 1971 im Bibliographischen Institut und im Jahr 1974 im Springer-Verlag erschienenen Bändchen. Der Umfang ist jedoch durch die weitere Entwicklung des Gebietes erheblich angestiegen, so daß die Aufteilung in zwei Bände zweckmäßig war.

Die Behandlung von grundlegenden Methoden der Identifikation dynamischer Systeme erfolgt in Band I. In Kapitel 1 wird zunächst das prinzipielle Vorgehen bei der Identifikation beschrieben. Die einzelnen Methoden werden nach typischen Merkmalen geordnet und es wird eine Übersicht der verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten gegeben.

Dann folgt im Kapitel 2 eine kurze Zusammenstellung der mathematischen Modelle linearer dynamischer Systeme für zeitkontinuierliche und zeitdiskrete Signale. Die weiteren Kapitel sind in Teilen zusammengefaßt.

Im Teil A wird zunächst die Identifikation mit nichtparametrischen Modellen für zeitkontinuierliche Signale betrachtet. Dabei wird die Fourieranalyse mit nichtperiodischen Testsignalen, die Frequenzgangmessung mit periodischen Testsignalen und die Korrelationsanalyse mit stochastischen Signalen beschrieben. Dann erfolgt im Teil B die Identifikation mit nichtparametrischen Modellen, aber zeitdiskreten Signalen in Form der Korrelationsanalyse.

Der Teil C widmet sich der Identifikation mit parametrischen Modellen für zeitdiskrete Signale. Der Fall zeitdiskreter Signale wird hier zuerst besprochen, da die zugehörigen Methoden einfacher zu behandeln und weiter entwickelt sind als für zeitkontinuierliche Signale. Es wird zunächst die Parameterschätzung für statische Systeme und dann für dynamische Systeme beschrieben. Die Methode der kleinsten Quadrate in der ursprünglichen, nichtrekursiven Form wird abgeleitet. Dann werden die zugehörigen rekursiven Parameterschätzgleichungen angegeben. Es folgen die Methoden der gewichteten kleinsten Quadrate, mehrere Modifikationen der Methode der kleinsten Quadrate, die Methode der Hilfsvariablen und die stochastische Approximation.

Im Anhang werden verschiedene Grundlagen, Grundbegriffe und Ableitungen zusammengefaßt, die den Stoff einiger Kapitel ergänzen.

Der Band II setzt den Teil C mit einer vertiefenden Behandlung der Parameterschätzmethoden fort. Zunächst werden die Maximum-Likelihood-Methode und die Bayes-Methode beschrieben, die von einer statistischen Betrachtungsweise ausgehen. Dann folgt eine Parameterschätzmethode mit nichtparametrischem Zwischenmodell. In besonderen Kapiteln wird auf die rekursiven Parameterschätzmethoden und damit verbunden, auf die Parameterschätzung zeitvarianter Prozesse eingegangen. Weitere Kapitel über numerisch verbesserte Schätzmethoden, ein Vergleich verschiedener Parameterschätzmethoden, die Parameterschätzung im geschlossenen Regelkreis und verschiedene Probleme (Wahl der Abtastzeit, Ermittlung der Modellordnung, integrale Prozesse, usw.) schließen den Teil C ab.

Zur Identifikation mit parametrischen Modellen, aber zeitkontinuierlichen Signalen in Teil D werden zunächst verschiedene Verfahren zur Parameterbestimmung aus Übergangsfunktionen, die sog. Kennwertermittlung, beschrieben. Dann folgen die Parametereinstellmethoden mit Modellabgleich, die im Zusammenhang mit der Analogrechentechnik entstan-

den sind, Parameterschätzmethoden für Differentialgleichungen und für gemessene Frequenzgänge.

Der Teil E ist der Identifikation von Mehrgrößensystemen gewidmet. Es werden zunächst die verschiedenen Modellstrukturen und dann geeignete Identifikationsmethoden mittels Korrelation und Parameterschätzung betrachtet.

Einige Möglichkeiten zur Identifikation nichtlinearer Systeme werden in Teil F beschrieben. Hierbei steht die Parameterschätzung von dynamischen Systemen mit stetig und nichtstetig differenzierbaren Nichtlinearitäten im Vordergrund.

Schließlich wird im Teil G auf die praktische Durchführung der Identifikation eingegangen. Es werden zunächst einige Angaben zu praktischen Aspekten, wie besondere Geräte, die Elimination besonderer Störsignale, die Verifikation der erhaltenen Modelle und die Identifikation mit Digitalrechnern gemacht. Dann erfolgen Anwendungsbeispiele für mehrere technische Prozesse. Diese Beispiele zeigen exemplarisch, daß die meisten der behandelten Identifikationsmethoden in verschiedenen Einsatzfällen auch praktisch erprobt wurden.

Das Werk richtet sich an Studenten, Ingenieure in der Forschung und Praxis und an Wissenschaftler aus dem Bereich der Naturwissenschaften, die an einer Einführung und vertieften Behandlung der Identifikation dynamischer Systeme interessiert sind. Dabei werden lediglich Grundkenntnisse der Behandlung linearer, dynamischer Systeme vorausgesetzt. Der erste Band entspricht weitgehend einer Vorlesung (2 Stunden Vorlesung, 1 Stunde Übung) an der Technischen Hochschule Darmstadt ab dem sechsten Semester. Dabei wird der Stoff in der Reihenfolge der Kapitel 1, A1, A2, 2, 3, 4, 5, A3, 6, 7, 8, 9, 10 behandelt.

Viele der Methoden, Untersuchungen und Ergebnisse wurden in zahlreichen Studien- und Diplomarbeiten seit 1966 und in besonderen Forschungsarbeiten seit 1972 erarbeitet. Hierzu möchte ich sowohl den damaligen Studenten als auch den Institutionen zur Forschungsförderung, besonders der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und dem Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) sehr danken.

Der Verfasser dankt ganz besonders seinen Mitarbeitern, die in mehrjähriger Zusammenarbeit an der Untersuchung und Entwicklung von Identifikationsmethoden, der Erstellung von Programmpaketen, Simulationen auf Digitalrechnern, Anwendungen mit Prozeßrechnern und Mikrorechnern und schließlich durch das Korrekturlesen wesentlich am Entstehen die-

ses Buches beteiligt waren. Hierbei danke ich besonders den Herren Dr.-Ing. U. Baur, Dr.-Ing. W. Bamberger, Dr.-Ing. S. Bergmann, Dr.-Ing. P. Blessing, Dr.-Ing. W. Goedecke, Dr.-Ing. H. Hensel, Dipl.-Ing. R. Kofahl, Dr.-Ing. H. Kurz, Dr.-Ing. K.-H. Lachmann, Dr.-Ing. W. Mann, Dipl.-Ing. K.H. Peter, Dr.-Ing. R. Schumann und Dr.-Ing. F. Radke. Mein Dank gilt ferner dem Springer-Verlag für die Herausgabe des Buches. Schließlich möchte ich mich noch sehr bei Frau M. Widulle für die sorgfältige Gestaltung des gesamten Textes mit der Schreibmaschine bedanken.

Darmstadt, April 1987

Rolf Isermann

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen	XIV
1 Einführung	1
1.1 Theoretische und experimentelle Systemanalyse	2
1.2 Aufgaben und Probleme der Identifikation dynamischer Systeme	8
1.3 Klassifikation von Identifikationsmethoden	17
1.4 Identifikationsmethoden	20
1.5 Testsignale	23
1.6 Besondere Einsatzfälle	27
1.7 Anwendungsmöglichkeiten	29
1.8 Literatur	32
2 Mathematische Modelle linearer dynamischer Prozesse und stochastischer Signale	34
2.1 Mathematische Modelle dynamischer Prozesse für zeitkontinuierliche Signale	34
2.1.1 Nichtparametrische Modelle, deterministische Signale	34
2.1.2 Parametrische Modelle, deterministische Signale	38
2.1.3 Modelle für zeitkontinuierliche stochastische Signale	43
2.2 Mathematische Modelle dynamischer Prozesse für zeitdiskrete Signale	58
2.2.1 Nichtparametrische Modelle, deterministische Signale	59
2.2.2 Parametrische Modelle, deterministische Signale	63
2.2.3 Modelle für zeitdiskrete stochastische Signale	66
A Identifikation mit nichtparametrischen Modellen - zeitkontinuierliche Signale	76
3 Fourier-Analyse mit nichtperiodischen Testsignalen	77
3.1 Grundgleichungen	77
3.2 Fourier-Transformierte nichtperiodischer Testsignale	80
3.2.1 Einfache Impulse	80
3.2.2 Doppelimpulse	85
3.2.3 Sprung- und Rampenfunktion	87

3.3	Numerische Berechnung der Fourier-Transformierten und des Frequenzganges	90
3.3.1	Diskrete Fourier-Transformation	90
3.3.2	Die schnelle Fourier-Transformation	92
3.3.3	Spezielle numerische Verfahren	93
3.4	Einfluß von Störsignalen	97
3.4.1	Fehler durch den gestörten transienten Verlauf	99
3.4.2	Fehler durch falschen Bezugs- und Endwert	101
3.4.3	Verkleinerung der Fehler durch Wiederholung der Messungen	103
3.4.4	Günstige Testsignale für die Fourieranalyse	110
3.5	Zusammenfassung	111
4	Frequenzgangmessung mit periodischen Testsignalen	113
4.1	Frequenzgangmessung mit sinusförmigen Testsignalen	114
4.1.1	Direkte Auswertung der registrierten Ein- und Ausgangsschwingungen	114
4.1.2	Auswertung durch Kompensationsgerät	116
4.1.3	Auswertung mittels Abtastgerät	116
4.2	Frequenzgangmessung mit rechteck- und trapezförmigen Testsignalen	117
4.3	Frequenzgangmessung mit Mehrfrequenz-Testsignalen	121
4.4	Frequenzgangmessung mit Korrelationsverfahren	125
4.4.1	Messung der Korrelationsfunktionen	126
4.4.2	Messung mit orthogonaler Korrelation	128
4.5	Zusammenfassung	137
5	Korrelationsanalyse mit zeitkontinuierlichen stochastischen Testsignalen	139
5.1	Schätzung von Korrelationsfunktionen	140
5.1.1	Kreuzkorrelationsfunktion	140
5.1.2	Autokorrelationsfunktion	144
5.2	Korrelationsanalyse dynamischer Prozesse mit stationären stochastischen Signalen	146
5.2.1	Bestimmung der Gewichtsfunktion durch Entfaltung	146
5.2.2	Weißes Rauschen als Eingangssignal	149
5.2.3	Natürliches Rauschen als Testsignal	153
5.3	Korrelationsanalyse dynamischer Prozesse mit binären stochastischen Signalen	154
5.4	Korrelationsanalyse am geschlossenen Regelkreis	165
5.5	Spektralanalyse mit stochastischen Signalen	166
5.6	Zusammenfassung	167

B	Identifikation mit nichtparametrischen Modellen - zeitdiskrete Signale	169
6	Korrelationsanalyse mit zeitdiskreten Signalen	170
6.1	Schätzung der Korrelationsfunktionen	170
6.1.1	Autokorrelationsfunktionen	170
6.1.2	Kreuzkorrelationsfunktionen	173
6.1.3	Rekursive Korrelation	176
6.2	Korrelationsanalyse linearer dynamischer Prozesse	177
6.2.1	Bestimmung der Gewichtsfunktion durch Entfaltung	177
6.2.2	Einfluß stochastischer Störsignale	180
6.3	Binäre Testsignale	186
6.4	Zusammenfassung	192
C	Identifikation mit parametrischen Modellen - zeitdiskrete Signale	193
7	Methode der kleinsten Quadrate für statische Prozesse	195
7.1	Lineare statische Prozesse	196
7.2	Nichtlineare statische Prozesse	202
7.3	Zusammenfassung	208
8	Methode der kleinsten Quadrate für dynamische Prozesse	209
8.1	Nichtrekursive Methode der kleinsten Quadrate (LS)	209
8.1.1	Grundgleichungen	209
8.1.2	Konvergenz	217
8.1.3	Parameter-Identifizierbarkeit	228
8.1.4	Unbekannte Gleichwerte	238
8.1.5	Numerische Probleme	240
8.2	Rekursive Methode der kleinsten Quadrate	246
8.2.1	Grundgleichungen	247
8.2.2	Rekursive Parameterschätzung für stochastische Signale	259
8.2.3	Unbekannte Gleichwerte	261
8.3	Methode der gewichteten kleinsten Quadrate	261
8.3.1	Markov-Schätzung	261
8.3.2	Rekursive Methode der kleinsten Quadrate mit exponentiell nachlassendem Gedächtnis	264
8.4	Zusammenfassung	267
9	Modifikationen der Methode der kleinsten Quadrate	268
9.1	Methode der verallgemeinerten kleinsten Quadrate	268
9.1.1	Nichtrekursive Methode der verallgemeinerten kleinsten Quadrate (GLS)	268

9.1.2 Rekursive Methode der verallgemeinerten kleinsten Quadrate (RGLS)	271
9.2 Methode der erweiterten kleinsten Quadrate (ELS)	272
9.3 Methode der Biaskorrektur (CLS)	274
9.4 Methode der totalen kleinsten Quadrate (TLS)	275
9.5 Zusammenfassung	276
10 Methode der Hilfsvariablen (Instrumental variables)	278
10.1 Nichtrekursive Methode der Hilfsvariablen (IV)	278
10.2 Rekursive Methode der Hilfsvariablen (RIV)	281
10.3 Zusammenfassung	283
11 Methode der stochastischen Approximation (STA)	284
11.1 Der Robbins-Monro-Algorithmus	284
11.2 Der Kiefer-Wolfowitz-Algorithmus	286
11.3 Zusammenfassung	289
Anhang	290
A1 Fourier- und Laplace-Transformation	290
A1.1 Fourier-Transformation	290
A1.2 Laplace-Transformation	294
A2 Modellstrukturen durch theoretische Modellbildung	297
A2.1 Theoretische Modellbildung und elementare Modellstruktur .	297
A2.2 Beispiel für verschiedene Modellstrukturen	301
A3 Einige Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitstheorie	305
A4 Grundbegriffe der Schätztheorie	309
A4.1 Konvergenzbegriffe für stochastische Variable	309
A4.2 Eigenschaften von Parameterschätzverfahren	311
A5 Zur Ableitung von Vektoren und Matrizen	315
A6 Satz zur Matrizeninversion	317
A7 Positiv reelle Übertragungsfunktionen	319
A7.1 Kontinuierliche Signale	319
A7.2 Zeitdiskrete Signale	321
Literaturverzeichnis	322
Sachverzeichnis	341

1 Einführung

Das zeitliche Verhalten von Systemen, wie z.B. technischen Systemen aus den Bereichen der Elektrotechnik, Maschinenwesen und Verfahrenstechnik oder nichttechnischen Systemen aus den Bereichen Biologie, Medizin, Chemie, Physik, Ökonomie kann mit Hilfe der Systemtheorie nach einheitlichen mathematischen Methoden beschrieben werden. Hierzu müssen jedoch mathematische Modelle für das statische und dynamische Verhalten der Systeme bzw. seiner Elemente bekannt sein.

Nach DIN 66201 wird unter einem *System* eine abgegrenzte Anordnung von aufeinander einwirkenden Gebilden verstanden. Mit *Prozeß* bezeichnet man die Umformung und/oder den Transport von Materie, Energie und/oder Information. Hierbei ist es zweckmäßig, zwischen Teilprozessen und Gesamtprozessen zu unterscheiden. Teilprozesse sind z.B. die Erzeugung von elektrischer aus mechanischer Energie, die spanabhebende Werkstückbearbeitung, die Wärmeübertragung durch eine Wand oder die chemische Reaktion. Zusammen mit anderen Teilprozessen bilden sie die Gesamtprozesse elektrischer Generator, Werkzeugmaschine, Wärmeaustauscher, chemischer Reaktor. Versteht man nun unter Gesamtprozeß ein "Gebilde", dann ergeben mehrere Gesamtprozesse ein System, also z.B. ein Kraftwerk, eine Fertigungsanlage, eine Heizanlage, eine Kunststoffproduktion. Das Verhalten eines Systems ergibt sich somit aus dem Verhalten seiner Prozesse.

Die Gewinnung der mathematischen Modelle von Prozessen und Systemen und die Darstellung des zeitlichen Verhaltens aufgrund gemessener Signale bezeichnet man auch als *Prozeßanalyse* und *Systemanalyse*. Demzufolge kann man bei der in diesem Buch behandelten experimentellen Analyse von *Prozeßidentifikation* und *Systemidentifikation* sprechen, je nachdem ob man einen Prozeß oder ein System untersucht.

Hinzu kommt bei stochastischen Anregungen noch die *Signalanalyse*, auch *Signalidentifikation* genannt. Durch die Bezeichnung *Identifikation dynamischer Systeme* oder einfach *Identifikation* sollen alle Arten der Identifikation zusammengefaßt werden.

1.1 Theoretische und experimentelle Systemanalyse

Beim Aufstellen von mathematischen Modellen dynamischer Systeme unterscheidet man bekanntlich zwei verschiedene Wege, die *theoretische* und die *experimentelle Systemanalyse*. Im folgenden wird das prinzipielle Vorgehen beider Wege kurz betrachtet. Dabei sind Systeme mit konzentrierten Parametern und Systeme mit verteilten Parametern zu unterscheiden. Die Zustandsgrößen von Systemen mit örtlich verteilten Parametern sind sowohl von der Zeit als auch vom Ort abhängig und werden deshalb durch partielle Differentialgleichungen beschrieben. Einfacher zu untersuchen sind Systeme mit konzentrierten Parametern, bei denen man zur mathematischen Behandlung die Speicher und Zustandsgrößen als in einem Punkt konzentriert betrachten darf. Sie werden durch gewöhnliche Differentialgleichungen beschrieben.

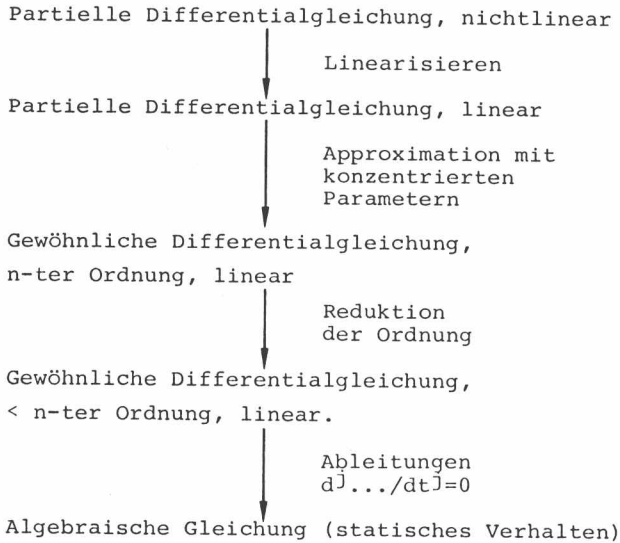
Bei der *theoretischen Analyse*, auch theoretische Modellbildung genannt, wird das Modell berechnet. Man beginnt mit vereinfachenden Annahmen über den Prozeß bzw. das System, die die Berechnung erleichtern oder überhaupt erst mit erheblichem Aufwand ermöglichen. Dabei geht man wie folgt vor, vgl. Bild 1.1:

- (1) Aufstellen der *Bilanzgleichungen* für die gespeicherten Massen, Energien und Impulse. Bei Systemen mit örtlich verteilten Parametern betrachtet man hierzu ein infinitesimal kleines Element, bei Systemen mit konzentrierten Parametern das ganze System.
- (2) Aufstellen der *physikalisch-chemischen Zustandsgleichungen*.
- (3) Aufstellen der *phänomenologischen Gleichung*, wenn irreversible Vorgänge (Ausgleichsprozesse) stattfinden (z.B. Gleichungen für Wärmeleitung, Diffusion oder chemische Reaktion).
- (4) Eventuell Aufstellen von *Entropiebilanzgleichungen*, wenn mehrere irreversible Vorgänge stattfinden.

Dies ist ausführlicher in Anhang A2 beschrieben.

Man erhält somit ein System gewöhnlicher und/oder partieller Differentialgleichungen, das auf ein theoretisches Modell mit bestimmter Struktur und bestimmten Parametern führt, wenn es sich explizit lösen läßt. Vielfach ist dieses Modell umfangreich und kompliziert, so daß es für weitere Anwendungen vereinfacht werden muß.

Die Vereinfachung erfolgt dabei bei zeitinvarianten Systemen in folgenden Schritten:



Die ersten Schritte dieser Vereinfachungen können auch bereits durch vereinfachende Annahmen bei der Aufstellung der Grundgleichungen gemacht werden.

Aber auch dann, wenn das Gleichungssystem nicht explizit gelöst werden kann, liefern die einzelnen Gleichungen wichtige Hinweise über die Modellstruktur. So sind z.B. Bilanzgleichungen stets linear und einige phänomenologische Gleichungen in weiten Bereichen linear. Die physikalisch-chemischen Zustandsgleichungen führen oft nichtlineare Beziehungen ein.

Bei der *experimentellen Analyse*, die *Identifikation* genannt wird, erhält man das mathematische Modell aus Messungen. Man geht hierbei stets von A-priori-Kenntnissen aus, die z.B. aus der theoretischen Analyse oder aus vorausgegangenen Messungen gewonnen wurden, vgl. Bild 1.1. Dann werden Ein- und Ausgangssignale gemessen und mittels einer Identifikationsmethode so ausgewertet, daß der Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangssignal in einem mathematischen Modell ausgedrückt wird. Die Eingangssignale können die natürlichen im System auftretenden Betriebssignale oder künstlich eingeführte Testsignale sein. Je nach Anwendungszweck kann man Identifikationsmethoden für parametrische oder nichtparametrische Modelle verwenden, siehe Abschnitt 1.2. Das Ergebnis der Identifikation ist dann ein experimentelles Modell.

Das theoretische und das experimentelle Modell können, sofern sich beide Analysen durchführen lassen, verglichen werden. Stimmen beide Modelle nicht überein, dann kann man aus der Art und Größe der Dif-

SYSTEM - ANALYSE

THEORETISCHE ANALYSE

EXPERIMENTELLE ANALYSE

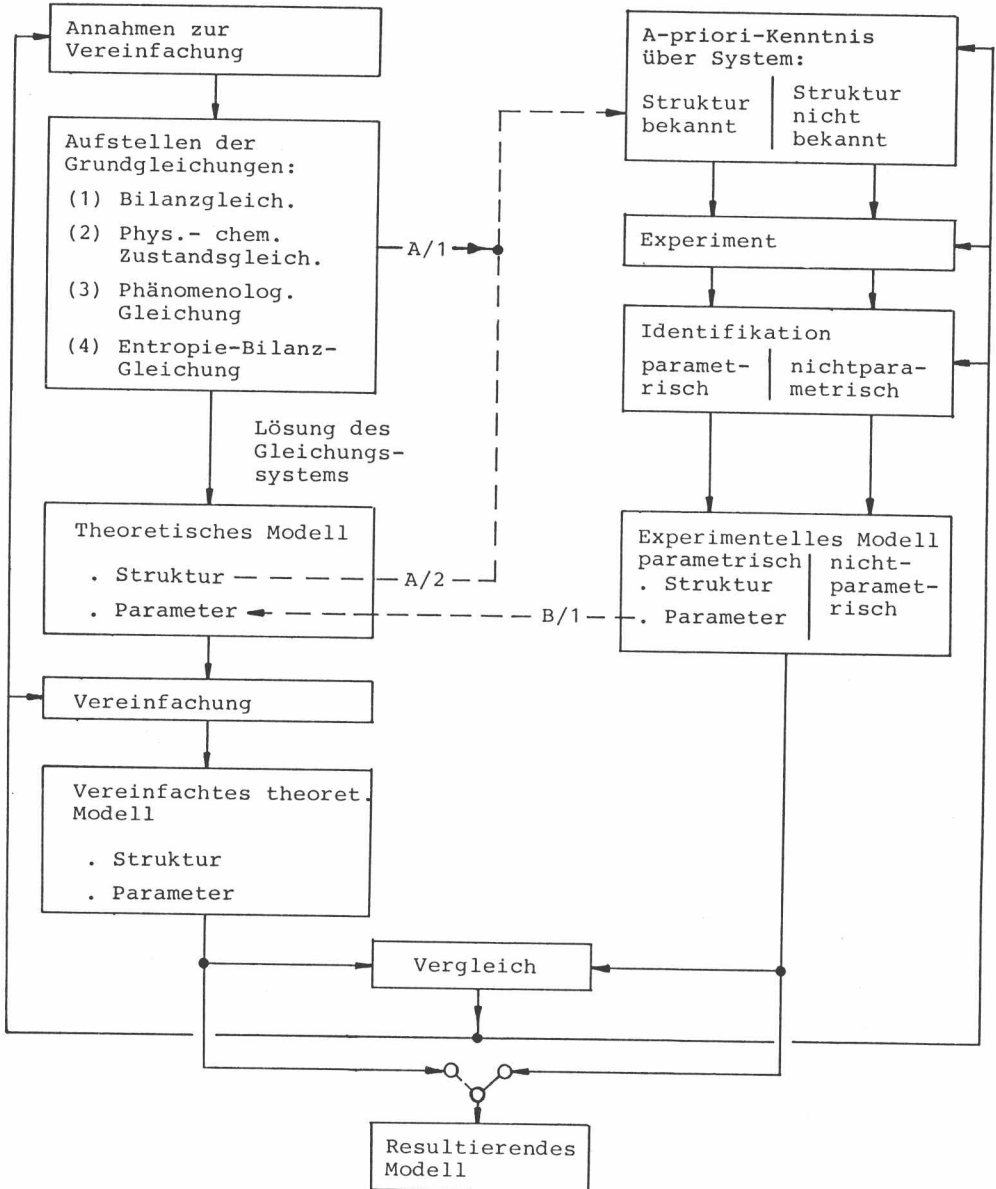


Bild 1.1 Prinzipielles Vorgehen bei der Systemanalyse

ferenzen schließen, welche einzelnen Schritte der theoretischen oder der experimentellen Analyse zu korrigieren sind, siehe Bild 1.1.

Theoretische und experimentelle Analyse ergänzen sich also gegenseitig. Durch den Vergleich der Modelle entsteht eine erste Rückführung im Ablauf der Analyse. Die Systemanalyse ist im allgemeinen ein iterativer Vorgang. Wenn man nicht gleichzeitig an beiden Modellen interessiert ist, dann kann als resultierendes Modell das experimentelle Modell (Fall A) oder das theoretische Modell (Fall B) gewählt werden. Diese Wahl hängt wesentlich vom Anwendungszweck ab.

Das theoretische Modell enthält den funktionalen Zusammenhang zwischen den physikalischen Daten des Systems und seinen Parametern. Man wird dieses Modell deshalb z.B. dann verwenden, wenn das System schon beim Entwurf bezüglich seines dynamischen Verhaltens günstig ausgelegt oder sein Verhalten simuliert werden soll.

Das experimentelle Modell dagegen enthält als Parameter nur Zahlenwerte, deren funktionaler Zusammenhang mit den physikalischen Daten des Systems unbekannt bleibt. Es kann aber meistens das momentane dynamische Verhalten genauer beschreiben oder es kann mit geringerem Aufwand zu ermitteln sein, was z.B. für die Anpassung einer Regelung oder zur Vorhersage von Signalverläufen besser ist.

Im Fall B liegt der Schwerpunkt auf der theoretischen Analyse. Man verwendet dann die experimentelle Analyse meist nur zur eventuell einmaligen Nachprüfung der Genauigkeit des theoretischen Modells oder zur Ermittlung von Parametern, die anders nicht genau genug zu erhalten sind. Dies ist in Bild 1.1 mit Signalfluß B/1 gekennzeichnet.

Im Fall A liegt der Schwerpunkt dagegen auf der experimentellen Analyse. Man ist dann interessiert, möglichst viel A-priori-Kennntnis aus der theoretischen Analyse zu verwenden, da das die Genauigkeit des experimentellen Modells erhöhen kann. Am günstigsten ist es, wenn die Struktur des Modells aus der theoretischen Analyse bereits bekannt ist (Signalfluß A/2 in Bild 1.1). Wenn sich die Grundgleichungen des Systems jedoch nicht explizit lösen lassen, zu kompliziert sind oder nicht vollständig bekannt sind, dann kann man aus diesen Gleichungen Informationen über die mögliche Modellstruktur erhalten (Signalfluß A/1).

Aus dieser Aufstellung ist zu erkennen, daß die Systemanalyse im allgemeinen weder rein theoretisch noch rein experimentell durchgeführt wird. Systemanalyse ist vielmehr eine geeignete Kombination theoretischer und experimenteller Methoden, deren einzelne Schritte durch den Anwendungszweck des Modells und durch das System selbst vorgegeben werden.

Der Anwendungszweck des resultierenden Modells bestimmt die erforderliche Genauigkeit des Modells und damit den Aufwand, den man bei der Analyse treiben muß. Dadurch bildet sich in bezug auf Bild 1.1 eine zweite Rückführung vom resultierenden Modell zu den einzelnen Schritten der Analyse aus, also eine zweite Iterationsschleife.

Obwohl die theoretische Analyse prinzipiell mehr Information über ein System liefern kann, sofern die Vorgänge im System bekannt und mathematisch beschreibbar sind, hat die experimentelle Analyse in den letzten 20 Jahren viel Beachtung gefunden. Die Gründe sind hauptsächlich darin zu finden, daß die theoretische Analyse schon bei relativ einfachen Systemen sehr aufwendig werden kann, daß trotz bekanntem theoretischen Modell manche Koeffizienten zu ungenau sind, daß nicht alle Vorgänge des Systems bekannt oder mathematisch beschreibbar sind oder daß manche Systeme zu komplex sind, so daß eine theoretische Analyse zu kostspielig wird.

Die experimentelle Analyse ermöglicht dagegen die Bildung von mathematischen Modellen durch Messung der Ein- und Ausgangssignale für Systeme, die beliebig aufgebaut sein können. Ein großer Vorteil besteht darin, daß dieselben experimentellen Analysemethoden auf die verschiedensten, beliebig komplizierten Systeme anwendbar sind. Durch die Messung von Ein- und Ausgangssignalen kann man jedoch nur Modelle für das Ein- und Ausgangs-Verhalten der Systeme erhalten, also keine Modelle, die die wirkliche innere Struktur beschreiben. Diese Ein/Ausgangs-Modelle reichen jedoch für viele Anwendungszwecke aus. Falls das System die Messung innerer Zustandsgrößen zuläßt, kann natürlich auch Information über die innere Struktur erhalten werden.

Besonders im Zusammenhang mit der Auswertung der gemessenen Ein- und Ausgangssignale durch Digitalrechner sind ab etwa 1965 leistungsfähige Identifikationsmethoden entwickelt worden.

Die verschiedenen Eigenschaften der theoretischen Modellbildung und der Identifikation sind in Tabelle 1.1 zusammengefaßt.

Um die Anwendungsbereiche beider Wege aufzuzeigen, sollen erreichbare Modellgenauigkeit und erforderlicher Aufwand etwas näher betrachtet werden.