

# Fachberichte Simulation

Herausgegeben von D. Möller und B. Schmidt  
Band 9

Andreas Laschet

## Simulation von Antriebssystemen

Modellbildung der Schwingungssysteme  
und Beispiele aus der Antriebstechnik

Springer-Verlag  
Berlin Heidelberg New York  
London Paris Tokyo 1988

**Wissenschaftlicher Beirat:**

M. Birkle, J. Biethahn, P. Schmitz, H. W. Schüßler, A. Storr, M. Thoma

---

**Herausgeber der Reihe**

Dr. D. Möller  
Physiologisches Institut  
Universität Mainz  
Saarstraße 21  
6500 Mainz

Prof. Dr. B. Schmidt  
Informatik IV  
Universität Erlangen-Nürnberg  
Martensstraße 3  
8520 Erlangen

**Autor**

Dr.-Ing. Andreas Laschet  
Von-der-Horst-Straße 17  
5180 Eschweiler

D 82 (Diss. T.H. Aachen): Entwicklung eines Verfahrens zur rechnerunterstützten Simulation von Torsionsschwingungen in Antriebssystemen.

ISBN-13: 978-3-540-19464-4

e-ISBN-13: 978-3-642-83531-5

DOI: 10.1007/978-3-642-83531-5

**CIP-Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek**

Laschet, Andreas:

Simulation von Antriebssystemen: Modellbildung d. Schwingungssysteme u. Beispiele aus d. Antriebstechnik/Andreas Laschet. Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokyo: Springer, 1988 (Fachberichte Simulation ; Bd. 9)

Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss. u. d. T.: Laschet, Andreas: Entwicklung eines Verfahrens zur rechnerunterstützten Simulation von Torsionsschwingungen in Antriebssystemen

**NE: GT**

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funkübertragung, 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. September 1965 in der Fassung vom 24. Juni 1985 zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1988

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 aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Satz: Konvertiert und formatiert von WordStar-Disketten in PC-TEX auf einer Workstation der GESYCOM GmbH Aachen; Formeleingabe manuell. Ausgabe der Druckvorlage auf GESYCOM-Laserdrucker GPP-8.

Druck: Color-Druck, G. Baucke, Berlin; Bindearbeiten: Lüderitz & Bauer, Berlin  
2160/3020-543210 – Gedruckt auf säurefreiem Papier.

## Vorwort

Antriebs-elemente spielen hinsichtlich ihres Schwingungsverhaltens sowohl im Maschinen- und Anlagenbau als auch in der Fahrzeugtechnik eine bedeutende Rolle. Da in einem Antriebsstrang immer mehrere Maschinenkomponenten gleichzeitig wirken (z.B. Motoren, Kupplungen, Getriebe usw.), sind auch die dynamischen Effekte in ihrer Gesamtheit als ein typisches Systemproblem zu betrachten.

In der vorliegenden Arbeit, die während meiner Tätigkeit als Stipendiat und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen entstand, wird ein Simulationsverfahren vorgestellt, mit dem dynamisch beanspruchte Antriebs-elemente berechnet werden können. Es handelt sich hierbei um eine Schwingungssimulation im Zeitbereich, wobei der Schwerpunkt auf Torsionsschwingungen liegt. Die Einbeziehung von nichtlinearen Systemeigenschaften (beispielsweise von Kupplungen und Getrieben) in die Modellbildung ist in diesem Zusammenhang von größter Bedeutung. Zusätzlich müssen noch die Einflüsse aufgrund instationärer Betriebszustände beachtet werden.

Das zu entwickelnde Simulationsverfahren mußte im Hinblick auf eine praxisgerechte Anwendung so konzipiert werden, daß das reale Verhalten von Antriebssystemen möglichst genau mit Hilfe der Simulationssoftware abgebildet werden kann. Hierzu war es erforderlich, im ersten Schritt die Charakteristiken dynamisch beanspruchter Antriebs-elemente systematisch zusammenzustellen und geeignete mathematische Modelle aufzustellen.

Ich möchte an dieser Stelle besonders betonen, daß die in diesem Buch vorgestellten rechnerischen Ansätze und Ergebnisse anhand zahlreicher Messungen verifiziert werden konnten. Es ist mir deshalb ein besonderes Anliegen, auf die praxisnahe Anwendung der Schwingungssimulation und die damit verbundene industrielle Bedeutung hinzuweisen. Hierzu sollen auch die ausführlichen Beispiele in den jeweiligen Kapiteln und Abschnitten beitragen.

Zum Schluß möchte ich noch einige Worte des Dankes hinzufügen. Der Studienstiftung des deutschen Volkes, Bonn — Bad Godesberg bin ich für die wohlwollende Promotionsförderung und die gewährte ideelle und finanzielle Hilfe zu außerordentlichem Dank verpflichtet.

Herrn Professor Dr.-Ing. Ch. Troeder, Oberingenieur und Akademischer Oberat am Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung, danke ich für die intensive Betreuung, die zahlreichen Fachgespräche und die tatkräftige Unterstützung, die zum Erfolg und zur Bereicherung dieser Arbeit führten. In

## VI Vorwort

gleicher Weise danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. H. Peeken, dem Leiter des Institutes, für die Anregung zu dieser Arbeit und seinen persönlichen Einsatz.

Für das Interesse und die kritische Durchsicht danke ich den Herren Professor Dr.-Ing. M. Weck und Professor Dr.-Ing. R. Koller ganz besonders.

Durch ihre wertvollen Ratschläge haben die Herren Dr.-Ing. G. Diekhans, Dipl.-Ing. G. Kaufhold, Dr.-Ing. B. van den Heuvel und cand. inform. M. Kraß zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Schließlich gilt mein Dank Herrn Professor Dr. B. Schmidt, Mitherausgeber der Reihe „Fachberichte Simulation“, sowie dem Springer-Verlag für die Übernahme der Veröffentlichung und für die angenehme Zusammenarbeit.

Ich hoffe, daß durch diese Arbeit das umfassende Gebiet der digitalen Schwingungssimulation im Schwerpunktbereich der Antriebstechnik transparenter geworden ist.

Eschweiler, im Juli 1988

*Andreas Laschet*

# Inhaltsverzeichnis

1	<i>Einleitung</i> .....	1
2	<i>Anwendung von Simulationstechniken</i> .....	3
3	<i>Schwingungssimulation</i> — <i>Übersicht, Anforderungen, Einsatzmöglichkeiten</i> .....	7
3.1	Allgemeine Übersicht über vorhandene Simulationssoftware .....	7
3.2	Spezielle Anforderungen und Zielsetzungen .....	11
3.3	Einsatzmöglichkeiten der Schwingungssimulation .....	15
4	<i>Vorgehensweise bei der Modellgenerierung</i> <i>für die Simulation von Torsionsschwingungen</i> .....	19
4.1	Aufbau von Torsionsschwingungsmodellen .....	20
4.1.1	Grundaufbau des Modells .....	20
4.1.2	Aufbau von geraden Schwingungssystemen .....	22
4.1.3	Aufbau von verzweigten und vermaschten Schwingungssystemen .....	25
4.2	Parameter-Ermittlung .....	30
4.2.1	Bestimmung der Massenträgheitsmomente und Steifigkeiten .....	31
4.2.2	Berechnung der Eigenfrequenzen und Schwingungsformen des ungedämpften Systems .....	40
4.2.3	Bestimmung der Dämpfungen .....	47
4.2.4	Berechnung der Eigenfrequenzen und Schwingungsformen des gedämpften Systems .....	51
4.3	Strategie zur Diskretisierung von Schwingungssystemen im Hinblick auf eine praxisgerechte Modellabstimmung .....	54
4.4	Reduktion des Schwingungssystems auf ein Minimalmodell .....	59
5	<i>Lösungsverfahren für die Bewegungsdifferentialgleichungen</i> .....	65
5.1	Analytische Lösungsverfahren .....	65
5.1.1	Lineare Differentialgleichungen .....	65
5.1.2	Näherungsverfahren für Differentialgleichungen nichtlinearer und parametererregter Systeme .....	67
5.2	Numerische Lösungsverfahren .....	68
5.3	Einfluß des Schwingungsmodells und der Anfangsbedingungen auf die Güte der Simulation .....	72
5.3.1	Instationäre Vorgänge .....	72
5.3.2	Stationäre Vorgänge .....	74

## VIII Inhaltsverzeichnis

6	<i>Erregerelemente</i> .....	77
6.1	Diskretes Erregermoment und Gewichtungsfunktion .....	80
6.2	Belastungsmoment .....	85
6.3	Asynchronmotor .....	88
6.3.1	Eigenschaften des Asynchronmotors .....	88
6.3.2	Anfahrvorgang eines Asynchronmotors .....	89
6.3.3	Beispiel: Kesselspeisepumpenanlage .....	93
6.3.4	Zeitabhängige Schaltvorgänge beim Asynchronmotor ...	98
6.3.5	Beispiel: Turboverdichteranlage .....	99
6.4	Synchronmotor .....	102
6.4.1	Eigenschaften des Synchronmotors .....	102
6.4.2	Beispiel: Resonanzverhalten einer Turboverdichteranlage	105
6.5	Regelndes Erregermoment (Gleichstrommotor) .....	109
6.5.1	Nebenschlußverhalten .....	109
6.5.2	Reihenschlußverhalten .....	116
6.6	Periodisches Erregermoment (Kolbenmaschine) .....	118
6.6.1	Eigenschaften des periodischen Erregermoments .....	118
6.6.2	Modelle zur Abbildung der Kolbenmaschine .....	122
6.6.3	Perioden und Phasenbeziehungen .....	124
6.6.4	Harmonische Tangentialdrücke .....	126
6.6.5	Zeit- oder drehzahlabhängige Gewichtung .....	126
6.6.6	Ungleichförmigkeitsgrad und Drehzahlschwankung .....	127
6.6.7	Übertragung von Standard-Daten auf verschiedene Motorkonzepte .....	128
6.6.8	Erregermomente für verschiedene Motorkonzepte .....	129
6.6.9	Beispiel: Schiffsantriebsanlage .....	129
6.6.10	Zeitabhängige Erregerfrequenz (Gleitsinus) .....	144
6.6.11	Einfluß des periodischen Massenträgheitsmoments .....	147
6.7	Stochastisches Erregermoment .....	153
6.7.1	Eigenschaften des stochastischen Erregermoments .....	153
6.7.2	Beispiel: Einfluß der Zufallsanregung .....	155
7	<i>Übertragungselemente</i> .....	161
7.1	Spielbehaftetes Antriebsselement .....	163
7.1.1	Beschreibung der Eigenschaften .....	163
7.1.2	Einfluß auf das Torsionsschwingungsverhalten .....	166
7.1.3	Beispiel: Resonanzverhalten einer Turboverdichteranlage	170
7.2	Zahnradgetriebe .....	174
7.2.1	Bestimmung des Zahnsteifigkeitsverlaufs .....	174
7.2.2	Eigenschaften der Parameter-Erregung .....	178
7.2.3	Beispiel: Resonanzverhalten eines Pumpenantriebs .....	181

7.3	Elastische Kupplung .....	184
7.3.1	Eigenschaften der elastischen Kupplung .....	184
7.3.2	Beschreibung des Resonanzverhaltens .....	187
7.4	Mehrstufige Kupplung .....	193
7.5	Reibungsbehaftetes Antriebselement .....	195
7.5.1	Dämpfung durch COULOMBSche Reibung .....	195
7.5.2	Degressives Dämpfungsverhalten durch Reibung .....	198
7.6	Rutschkupplung .....	201
7.6.1	Eigenschaften der Rutschkupplung .....	201
7.6.2	Beispiel: Kupplung mit und ohne Schaltvorgang .....	207
7.6.3	Beispiel: selbsterregte Schwingungen .....	212
7.7	Freilauf .....	214
7.8	Flachriemengetriebe .....	217
7.8.1	Eigenschaften des Flachriemengetriebes .....	217
7.8.2	Beispiel: Anlaufbeanspruchung bei Antrieben mit Asynchronmotor .....	222
7.9	Kardangelenke .....	223
7.9.1	Eigenschaften des Kardangelenkes .....	223
7.9.2	Homokinematische und nichthomokinematische Anordnung von Gelenkwellen .....	228
7.9.3	Einfluß des Knickwinkels .....	234
7.9.4	Spiel in der Gelenkwelle .....	238
7.9.5	Zeitabhängige Knickwinkel .....	242
7.9.6	Periodische translatorische Störgrößen .....	246
7.10	Hydrodynamisches Getriebe .....	250
7.10.1	Eigenschaften des hydrodynamischen Getriebes .....	250
7.10.2	Tiefpaß-Verhalten .....	257
7.10.3	Beispiel: hydrodynamische Kupplung .....	260
7.10.4	Beispiel: hydrodynamischer Wandler .....	263
7.11	Planetengetriebe .....	268
7.11.1	Eigenschaften des Planetengetriebes .....	268
7.11.2	Beispiel: Zementmühlengantrieb .....	275
7.11.3	Beispiel: Differentialgetriebe .....	283
7.11.4	Beispiel: Getriebestütze .....	291
8	<i>Ermittlung von Belastungskollektiven und Abschätzung der Lebensdauer</i> .....	295
8.1	Beschreibung der WÖHLER-Linie und Darstellung der Einflußgrößen .....	297
8.2	Ermittlung von Belastungskollektiven durch Klassierung der Belastungshäufigkeiten .....	299
8.2.1	Statistische Grundbegriffe .....	299
8.2.2	Einparametrische Klassierung .....	302
8.2.3	Zweiparametrische Klassierung .....	307
8.3	Lebensdauerabschätzung mit Hilfe einer Schadensakkumulationsrechnung .....	309

## X Inhaltsverzeichnis

9	<i>Schwingungsanalyse im Frequenzbereich</i> .....	313
9.1	Spektral- und Signaturanalyse mit Hilfe der FOURIER-Transformation .....	313
9.2	Cepstrumanalyse .....	317
10	<i>Inverse Schwingungssimulation</i> .....	319
11	<i>Erweiterung des Torsionsschwingungsmodells auf ein Torsion-Biegeschwingungsmodell</i> .....	323
11.1	Bestimmung der Schnittgrößen .....	323
11.2	Aufbau des Differentialgleichungssystems .....	329
11.3	Systemkopplung aufgrund von Verzahnungen .....	334
11.4	Berechnung gekoppelter Torsion-Biegesysteme .....	339
12	<i>Struktur der Software für die Schwingungssimulation</i> .....	345
13	<i>Beispiele für Schwingungssimulationen mit Überlagerung mehrerer Erreger- und Übertragungselemente</i> .....	351
13.1	Automatisches Schaltgetriebe .....	351
13.1.1	Eigenschaften des Automatikgetriebes .....	351
13.1.2	Simulationsmodell und Eigenfrequenzanalyse .....	355
13.1.3	Simulationsergebnisse .....	358
13.2	Pumpenantrieb .....	362
13.2.1	Simulationsmodell und Eigenfrequenzanalyse .....	362
13.2.2	Erregermomente von Motor und Pumpe .....	364
13.2.3	Simulationsergebnisse .....	367
13.3	Kompressorantrieb .....	372
13.3.1	Simulationsmodell und Eigenfrequenzanalyse .....	372
13.3.2	Erregermomente von Motor und Kompressor .....	375
13.3.3	Simulationsergebnisse und Vergleich zwischen Rechnung und Messung .....	377
14	<i>Zusammenfassung</i> .....	383
	Anhang: Katalog von Erregermomenten für verschiedene Kolbenmotoren	385
	Literaturverzeichnis .....	413
	Stichwortverzeichnis .....	429