

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	Kardangelenk	223
7.9.1	Eigenschaften des Kardangelenks	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: Zementmühlenantrieb	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