

# 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

ISBN 3-540-19464-9 Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York  
ISBN 0-387-19464-9 Springer-Verlag New York, Heidelberg, Berlin

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<i>Einleitung</i>	1
<b>2</b>	<i>Anwendung von Simulationstechniken</i>	3
<b>3</b>	<i>Schwingungssimulation - 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
<b>4</b>	<i>Vorgehensweise bei der Modellgenerierung 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
<b>5</b>	<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

<b>6</b>	<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
<b>7</b>	<i>Übertragungselemente</i>	161
7.1	Spielbehaftetes Antriebselement	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	Kardangeln	223
	7.9.1 Eigenschaften des Kardangelns	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
<b>8</b>	<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 der Schadenakkumulationsrechnung	309

## X Inhaltsverzeichnis

<b>9</b>	<i>Schwingungsanalyse im Frequenzbereich</i>	313
9.1	Spektral- und Signaturanalyse mit Hilfe der FOURIER-Transformation	313
9.2	Cepstrumanalyse	317
<b>10</b>	<i>Inverse Schwingungssimulation</i>	319
<b>11</b>	<i>Erweiterung des Torsionschwingungsmodells auf ein Torsions-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
<b>12</b>	<i>Struktur der Software für die Schwingungssimulation</i>	345
<b>13</b>	<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
<b>14</b>	<i>Zusammenfassung</i>	383
	Anhang: Katalog von Erregermomenten für verschiedene Kolbenmotoren	385
	Literaturverzeichnis	413
	Stichwortverzeichnis	429