

---

# Maschinendynamik

---

Hans Dresig · Franz Holzweißig

# Maschinendynamik

12. aktualisierte Auflage

Unter Mitarbeit von L. Rockhausen

 Springer

Hans Dresig  
Auerswalde, Deutschland  
<http://www.dresig.de>

Franz Holzweißig  
Dresden, Deutschland

Die international verbreitete Software SimulationX, die bei der Lösung konkreter Aufgaben angewendet wird, steht jetzt samt erweiterter Beispielsammlung auf der Springer Homepage unter <http://www.springer.com/de/book/9783662527122> zur Verfügung.

Mit freundlicher Unterstützung von ESI ITI GmbH, Dresden.

ISBN 978-3-662-52712-2  
DOI 10.1007/978-3-662-52713-9

ISBN 978-3-662-52713-9 (eBook)

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1980, 1983, 2003, 2004, 2006, 2007, 2009, 2011, 2012, 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier.

Springer ist Teil von Springer Nature  
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Berlin Heidelberg

## **Vorwort zur 12. Auflage**

Die vorliegende 12. Auflage ist eine wenig veränderte 11. Auflage, deren Konzept sich bewährt hat. Sie wurde auf vielen Seiten von kleinen Fehlern befreit sowie durch einige Bilder, Abschätzungen, geltende Richtlinien und Sachworte ergänzt. Das überarbeitete Lehrbuch bietet eine aktualisierte Anleitung, um die Aufgaben und Beispiele der Maschinendynamik im neuen Übungsbuch [35] zu interpretieren und zu lösen.

Auerswalde, Sommer 2016

Hans Dresig

# Vorwort zur 11. Auflage

Dieses Lehrbuch behandelt solche Fachgebiete, die in anderen Ländern getrennt innerhalb der Vorlesungen „Theorie der Mechanismen und Maschinen“ (TMM) und „Schwingungslehre“ oder „Theorie der Schwingungen“ vorgetragen werden. Das Grundkonzept von Kollegen Holzweißig sah die Vereinigung dieser Fachgebiete in einer „Maschinendynamik“ vor. Wir arbeiteten dieses Konzept in den ersten drei Auflagen gemeinsam aus, wobei wir uns auch auf Erfahrungen in der Zusammenarbeit mit Ingenieuren der sächsischen Industrie stützten. Nach seiner Emeritierung im Jahr 1993 habe ich seit der 4. Auflage das Buch ständig aktualisiert und um weitere Aufgaben und Abschnitte vervollständigt.

Das vorliegende Lehrbuch baut auf der viersemestrigen Vorlesungsreihe „Technische Mechanik“ auf und stellt für die Studenten eine unmittelbare Konfrontation mit dynamischen Problemen ihres Fachgebietes dar. Dabei wird die Maschinendynamik sowohl als ein typisches Gebiet für die mathematische Modellierung technischer Prozesse aufgefasst als auch als ein Teilgebiet des Maschinenbaus, welches dynamische Probleme des Energiemaschinenbaus (Kolbenmaschinen und Turbomaschinen), des Verarbeitungsmaschinenbaus (Druckmaschinen, Textilmaschinen, Verpackungsmaschinen), der Fördergeräte, Landmaschinen und Fahrzeuge sowie des Anlagenbaus anspricht.

Die vorliegende 11. Auflage aktualisiert das bewährte Konzept. Erweiterungen und Überarbeitungen betreffen die periodisch erregten erzwungenen Schwingungen, die Schwingungsdämpfung, einige dynamische Effekte, nichtlineare Schwingungen und Beispiele. Die in der Praxis international verbreitete Software SimulationX, die bei der Lösung konkreter Aufgaben des Buches angewendet wird, steht dem Leser jetzt in der neuesten Version mit erweiterter Beispielsammlung auf der Springer-Homepage zum Download zur Verfügung.

Das Buch hat relativ selbstständige Kapitel, die typische Inhalte der Maschinendynamik vom Standpunkt des Maschinenbauers behandeln. Kapitel 6 enthält eine allgemeine Darstellung der linearen Schwinger und umfasst dabei Methoden der Kap. 3, 4 und 5. Einige Überschneidungen und Wiederholungen wurden bewusst in Kauf genommen, wobei vielfach auf Querverbindungen zwischen den Abschnitten verwiesen wird. Kapitel 7 behandelt nichtlineare und selbsterregte Schwinger, deren Berechenbarkeit zunehmend praktische Bedeutung erlangt. Kapitel 8 enthält nach wie vor keine Formeln, aber die darin zusammengestellten Regeln sind bedeutungsvoll für die Ingenieurpraxis. Kapitel 9 (Beziehungen zur Systemdynamik und Mechatronik) bereitet darauf vor, maschinendynamische Probleme auch durch die Einbeziehung von Sensoren und Aktoren zu lösen.

Die im Buch enthaltenen 60 Übungsaufgaben mit Lösungen dienen der Erarbeitung und Festigung des vermittelten Stoffes. Sie erläutern nicht nur theoretische Aussagen,

sondern lösen auch praxisnahe Fragestellungen, wobei der Wert darauf gelegt wurde, dass mit realen Parameterwerten gerechnet wird.

Das Buch ist nicht nur für Studenten, sondern auch für den Ingenieur der Praxis geschrieben. Die Beispiele aus vielen Gebieten des Maschinenbaus sowie die Angabe von Parameterwerten und Verweise auf Richtlinien und Vorschriften unterstreichen dies. Der Denkweise des Ingenieurs wird insofern entgegengekommen, als Methoden der Abschätzung, Überschlagsrechnungen und Minimalmodelle behandelt und viele lehrreiche dynamische Effekte (Kreiselwirkung, Resonanzdurchlauf, Tilgung, Selbstsynchronisation, . . .) erläutert werden, die für die Konstruktion dynamisch hochbelasteter Maschinen bedeutsam sind. Die schnelle Entwicklung der Hardware und Software brachte es mit sich, dass heutzutage für fast jedes maschinendynamische Problem Software vorliegt. Computer liefern immer irgendwelche Zahlen oder Bilder, der Ingenieur muss aber die Ergebnisse verantworten. Die Aufgabe des Ingenieurs bleibt, die entsprechenden Berechnungsmodelle bereitzustellen, den Geltungsbereich der Software zu bewerten, das Simulationsergebnis zu kontrollieren und bereits vor Beginn der Rechnung eine Vorstellung vom erwarteten Ergebnis zu haben.

Da die moderne Entwicklung zur verfeinerten Modellbildung tendiert, wurden drei Aspekte weiterhin hervorgehoben: Die Schulung des physikalischen Verständnisses, die Nutzung der Modalanalyse einschließlich der Empfindlichkeitsanalyse und die Anwendung computergestützter Methoden. Es wird betont, dass das Ziel der Berechnungen nicht nur die Zahlenangabe ist, sondern ein verbessertes Verständnis für das dynamische Verhalten der realen Objekte und die Fähigkeit, physikalisch begründete konstruktive Maßnahmen zu treffen.

Vielen Fachleuten bin ich für ihre Anregung und Hinweise dankbar, besonders Herrn Dr.-Ing. Ludwig Rockhausen von meiner ehemaligen Professur Maschinendynamik der TU Chemnitz und Herrn Dipl.-Ing. Uwe Schreiber sowie den Fachkollegen der ITI GmbH Dresden, die mich auch bei der Überarbeitung dieser 11. Auflage unterstützten.

# Inhaltsverzeichnis

<b>0</b>	<b>Aufgaben und Gliederung der Maschinendynamik</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Modellbildung und Kennwertermittlung</b>	<b>7</b>
1.1	Einteilung der Berechnungsmodelle	7
1.1.1	Allgemeine Grundsätze	7
1.1.2	Beispiele	12
1.2	Bestimmung von Massenkennwerten	16
1.2.1	Übersicht	16
1.2.2	Masse und Schwerpunktlage	17
1.2.3	Trägheitsmoment bezüglich einer Achse	19
1.2.4	Trägheitstensor	24
1.3	Federkennwerte	28
1.3.1	Allgemeine Zusammenhänge	28
1.3.2	Maschinenelemente, Baugruppen	32
1.3.3	Gummifedern	38
1.3.4	Aufgaben A1.1 bis A1.3	41
1.3.5	Lösungen L1.1 bis L1.3	42
1.4	Dämpfungskennwerte	44
1.4.1	Allgemeine Zusammenhänge	44
1.4.2	Bestimmungsmethoden für Dämpfungskennwerte	50
1.4.3	Erfahrungswerte zur Dämpfung	54
1.5	Erregerkennwerte	58
1.5.1	Periodische Erregung	58
1.5.2	Instationäre Erregung	62
1.5.3	Aufgaben A1.4 bis A1.6	65
1.5.4	Lösungen L1.4 bis L1.6	66
<b>2</b>	<b>Dynamik der starren Maschine</b>	<b>71</b>
2.1	Einleitung	71
2.2	Zur Kinematik eines starren Körpers	72
2.2.1	Koordinatentransformationen	72
2.2.2	Bewegungsgrößen	77
2.2.3	Kinematik des kardanisch gelagerten Kreisel	79
2.2.4	Aufgaben A2.1 und A2.2	80
2.2.5	Lösungen L2.1 und L2.2	81
2.3	Zur Kinetik des starren Körpers	85
2.3.1	Kinetische Energie und Trägheitstensor	85
2.3.2	Kräftegesetz und Momentensatz	90

2.3.3	Zur Kinetik des Kollergangs .....	94
2.3.4	Aufgaben A2.3 und A2.4 .....	97
2.3.5	Lösungen L2.3 und L2.4 .....	99
2.4	Zur Kinetik der Mehrkörpersysteme .....	104
2.4.1	Mechanismen mit mehreren Antrieben .....	104
2.4.1.1	Zu räumlichen Starrkörper-Mechanismen .....	104
2.4.1.2	Bewegungsgleichungen eines Planetengetriebes .....	110
2.4.1.3	Kardanisch gelagerter Rotor .....	113
2.4.2	Ebene Mechanismen .....	116
2.4.2.1	Allgemeine Zusammenhänge .....	116
2.4.2.2	Hubwerksgetriebe .....	120
2.4.2.3	Viergelenkgetriebe .....	121
2.4.2.4	Großpresse .....	125
2.4.3	Bewegungszustände der starren Maschine .....	126
2.4.4	Lösung der Bewegungsgleichungen .....	128
2.4.5	Beispiel: Pressenantrieb .....	133
2.4.6	Aufgaben A2.5 bis A2.8 .....	137
2.4.7	Lösungen L2.5 bis L2.8 .....	140
2.5	Gelenkkräfte und Fundamentbelastung .....	145
2.5.1	Allgemeine Zusammenhänge .....	145
2.5.2	Berechnung der Gelenkkräfte .....	146
2.5.3	Berechnung der auf das Gestell wirkenden Kraftgrößen .....	149
2.5.4	Gelenkkräfte im Koppelgetriebe einer Verarbeitungsmaschine .....	152
2.5.5	Aufgaben A2.9 und A2.10 .....	154
2.5.6	Lösungen L2.9 und L2.10 .....	155
2.6	Methoden des Massenausgleichs .....	157
2.6.1	Aufgabenstellung .....	157
2.6.2	Auswuchten starrer Rotoren .....	157
2.6.3	Massenausgleich von ebenen Mechanismen .....	164
2.6.3.1	Vollständiger und harmonischer Ausgleich .....	164
2.6.3.2	Massenausgleich beim Schubkurbelgetriebe .....	167
2.6.3.3	Harmonischer Ausgleich bei Mehrzylindermaschinen .....	169
2.6.4	Aufgaben A2.11 bis A2.14 .....	171
2.6.5	Lösungen L2.11 bis L2.14 .....	174
<b>3</b>	<b>Fundamentierung und Schwingungsisolierung .....</b>	<b>181</b>
3.1	Vorbemerkungen .....	181
3.2	Fundamentbelastung bei periodischer Erregung .....	189
3.2.1	Minimalmodelle mit einem Freiheitsgrad .....	189
3.2.1.1	Modellbeschreibung .....	189
3.2.1.2	Harmonische Erregung .....	192
3.2.1.3	Periodische Erregung/Fourierreihe .....	196
3.2.2	Blockfundamente .....	199
3.2.2.1	Eigenfrequenzen und Eigenformen .....	199
3.2.2.2	Modellzerlegung bei Symmetrie .....	201
3.2.2.3	Ausführungsformen der Blockfundamente .....	204



3.2.3	Fundament mit zwei Freiheitsgraden – Schwingungstilgung	208
3.2.4	Beispiel: Schwingungen eines Motor-Generator-Aggregates	211
3.2.5	Aufgaben A3.1 bis A3.3	214
3.2.6	Lösungen der Aufgaben L3.1 bis L3.3	216
3.3	Fundamente unter Stoßbelastung	219
3.3.1	Zur Modellbildung von Schmiedehämmern	219
3.3.2	Berechnungsmodell mit zwei Freiheitsgraden	221
3.3.3	Aufgaben A3.4 bis A3.6	225
3.3.4	Lösungen L3.4 bis L3.6	226
<b>4</b>	<b>Torsionsschwinger und Längsschwinger</b>	<b>233</b>
4.1	Einleitung	233
4.2	Freie Schwingungen der Torsionsschwinger	238
4.2.1	Modelle mit zwei Freiheitsgraden	238
4.2.1.1	Lineare Torsionsschwinger mit zwei Freiheitsgraden	238
4.2.1.2	Antriebssystem mit Spiel	240
4.2.2	Schwingerkette mit mehreren Freiheitsgraden	244
4.2.3	Zur Bewertung von Eigenfrequenzen und Eigenformen	248
4.2.4	Beispiele	252
4.2.4.1	Vierzylindermotor	252
4.2.4.2	Torsionsschwingungen einer Druckmaschine	254
4.2.4.3	Fahrzeug-Antriebsstrang	257
4.2.5	Aufgaben A4.1 bis A4.3	260
4.2.6	Lösungen L4.1 bis L4.3	262
4.3	Erzwungene Schwingungen diskreter Torsionsschwinger	269
4.3.1	Periodische Erregung	269
4.3.2	Beispiele	273
4.3.2.1	Motorradmotor	273
4.3.2.2	Fahrzeugantrieb mit Zweimassenschwungrad	276
4.3.2.3	Schrittgetriebe mit HS-Kurvenprofil	278
4.3.3	Transiente Erregung	283
4.3.3.1	Sprungfunktion, Rechteckstoß	283
4.3.3.2	Anlauffunktionen	286
4.3.4	Aufgaben A4.4 bis A4.6	288
4.3.5	Lösungen L4.4 bis L4.6	290
4.4	Tilger und Dämpfer in Antriebssystemen	294
4.4.1	Einleitung	294
4.4.2	Auslegung eines gedämpften Tilgers	295
4.4.3	Auslegung eines federlosen Dämpfers	300
4.4.4	Bemerkungen zur aktiven Schwingungsisolierung	302
4.4.5	Beispiele	302
4.4.5.1	Besonderheiten des Viskositäts-Drehschwingungsdämpfers	302
4.4.5.2	Zum Tilgerpendel	304
4.5	Parametererregte Schwingungen	307
4.5.1	Allgemeine Problemstellungen	307

4.5.2	Typische Beispiele parametererregter Schwinger	309
4.5.3	Anfachung in einem Zeitintervall	310
4.5.4	Folgerungen aus der Mathieuschen Differenzialgleichung	313
4.5.5	Analyse von Beispielen	315
4.5.5.1	Transfer-Manipulator	315
4.5.5.2	Veränderliche Zahnsteifigkeit als Schwingungserregung	318
4.5.6	Aufgaben A4.7 und A4.8	322
4.5.7	Lösungen L4.7 und L4.8	323
<b>5</b>	<b>Biegeschwinger</b>	<b>327</b>
5.1	Zur Entwicklung der Problemstellungen	327
5.2	Grundlegende Zusammenhänge	328
5.2.1	Selbstzentrierung beim symmetrischen Rotor	328
5.2.2	Durchfahren der Resonanzstelle	331
5.2.3	Rotierende Welle mit Scheibe (Kreiselwirkung)	332
5.2.4	Biegeschwinger mit endlich vielen Freiheitsgraden	341
5.2.5	Beispiele	346
5.2.5.1	Eigenfrequenzen einer Milchzentrifuge	346
5.2.5.2	Aufprallen eines bewegten Balkens	351
5.2.6	Aufgaben A5.1 bis A5.3	352
5.2.7	Lösungen L5.1 bis L5.3	354
5.3	Massebelegter Balken	355
5.3.1	Allgemeine Zusammenhänge	355
5.3.2	Gerader Balken auf zwei Stützen	358
5.3.3	Abschätzungen für die Grundfrequenz	359
5.4	Zur Modellbildung bei Rotoren	362
5.4.1	Allgemeine Bemerkungen	362
5.4.2	Beispiel: Schleifspindel	365
5.5	Aufgaben A5.4 bis A5.7	365
5.6	Lösungen L5.4 bis L5.7	366
<b>6</b>	<b>Lineare Schwinger mit mehreren Freiheitsgraden</b>	<b>371</b>
6.1	Einleitung	371
6.2	Bewegungsgleichungen	374
6.2.1	Massen-, Feder- und Nachgiebigkeitsmatrix	374
6.2.2	Beispiele	380
6.2.2.1	Gestell/Kraftgrößenmethode	380
6.2.2.2	Balkenelement/Deformationsmethode	382
6.2.2.3	Fahrzeug/Energiemethode	384
6.2.2.4	Tragwerk, bestehend aus Substrukturen	385
6.2.3	Aufgaben A6.1 bis A6.3	389
6.2.4	Lösungen L6.1 bis L6.3	390
6.3	Freie ungedämpfte Schwingungen	392
6.3.1	Eigenfrequenzen, Eigenformen, Eigenkräfte	392
6.3.2	Orthogonalität und modale Koordinaten	395
6.3.3	Anfangsbedingungen, Anfangsenergie, Abschätzungen	397

6.3.4	Beispiele . . . . .	401
6.3.4.1	Zur Modalanalyse von Maschinen . . . . .	401
6.3.4.2	Stoß auf ein Gestell . . . . .	406
6.3.4.3	Eigenschwingungen eines Tragwerkes . . . . .	411
6.3.5	Aufgaben A6.4 bis A6.6 . . . . .	413
6.3.6	Lösung L6.4 bis L6.6 . . . . .	414
6.4	Struktur- und Parameteränderungen . . . . .	418
6.4.1	Rayleigh-Quotient . . . . .	418
6.4.2	Sensitivität von Eigenfrequenzen und Eigenformen . . . . .	419
6.4.3	Reduktion von Freiheitsgraden . . . . .	424
6.4.4	Einfluss von Zwangsbedingungen auf Eigenfrequenzen und Eigenformen . . . . .	426
6.4.5	Beispiele zur Reduktion von Freiheitsgraden . . . . .	430
6.4.5.1	Einfaches Gestell (von vier zu zwei) . . . . .	430
6.4.5.2	Textilspindel (zur Sensitivität) . . . . .	431
6.4.5.3	Tragwerk (Reduktion von zehn auf fünf) . . . . .	435
6.4.6	Aufgaben A6.7 bis A6.9 . . . . .	438
6.4.7	Lösungen L6.7 bis L6.9 . . . . .	439
6.5	Erzwungene ungedämpfte Schwingungen . . . . .	445
6.5.1	Allgemeine Lösung . . . . .	445
6.5.2	Harmonische Erregung (Resonanz, Tilgung) . . . . .	446
6.5.3	Instationäre Erregung (Rechteckstoß) . . . . .	451
6.5.4	Beispiele . . . . .	455
6.5.4.1	Gestell . . . . .	455
6.5.4.2	Schwingförderer . . . . .	457
6.5.5	Aufgaben A6.10 bis A6.12 . . . . .	458
6.5.6	Lösungen L6.10 bis L6.12 . . . . .	459
6.6	Gedämpfte Schwingungen . . . . .	462
6.6.1	Zur Erfassung der Dämpfung . . . . .	462
6.6.2	Modal gedämpfte freie Schwingungen . . . . .	464
6.6.3	Erzwungene Schwingungen bei harmonischer Erregung . . . . .	466
6.6.3.1	Plötzlicher Start beim modal gedämpften Schwinger . . . . .	466
6.6.3.2	Stationäre Lösung beim viskos gedämpften Schwinger . . . . .	469
6.6.4	Stationäre Lösung bei periodischer Erregung . . . . .	474
6.6.5	Beispiele . . . . .	477
6.6.5.1	Textilspindel . . . . .	477
6.6.5.2	Riemengetriebe . . . . .	479
6.6.6	Aufgaben A6.13 bis A6.16 . . . . .	482
6.6.7	Lösungen L6.13 bis L6.16 . . . . .	484
<b>7</b>	<b>Einfache nichtlineare und selbsterregte Schwinger . . . . .</b>	<b>489</b>
7.1	Einführung . . . . .	489
7.2	Nichtlineare Schwinger . . . . .	493
7.2.1	Ungedämpfte freie nichtlineare Schwinger . . . . .	493
7.2.2	Innere Resonanz . . . . .	496

7.2.3	Erzwungene Schwingungen . . . . .	498
7.2.3.1	Qualitative Besonderheiten nichtlinearer Schwinger . . . . .	498
7.2.3.2	Erste Harmonische bei nichtlinearer Federung . . . . .	499
7.2.4	Beispiele . . . . .	502
7.2.4.1	Harmonisch erregter viskos gedämpfter Reibschwinger . . . . .	502
7.2.4.2	Schwingförderer mit gestuften Federn . . . . .	503
7.2.4.3	Selbstsynchronisation von Unwuchterregern . . . . .	508
7.2.5	Aufgaben A7.1 und A7.2 . . . . .	512
7.2.6	Lösungen L7.1 und L7.2 . . . . .	513
7.3	Selbsterregte Schwinger . . . . .	518
7.3.1	Allgemeine Zusammenhänge . . . . .	518
7.3.2	Beispiele . . . . .	519
7.3.2.1	Stick-Slip-Schwingungen . . . . .	519
7.3.2.2	Flatterschwingungen einer angeströmten Platte . . . . .	523
7.3.2.3	Rattern von Werkzeugmaschinen bei der Zerspanung . . . . .	525
7.3.3	Aufgaben A7.3 und A7.4 . . . . .	528
7.3.4	Lösungen L7.3 und L7.4 . . . . .	530
<b>8</b>	<b>Regeln für dynamisch günstige Konstruktionen . . . . .</b>	<b>533</b>
<b>9</b>	<b>Beziehungen zur Systemdynamik und Mechatronik . . . . .</b>	<b>539</b>
9.1	Einführung . . . . .	539
9.2	Geregelte Systeme . . . . .	541
9.2.1	Allgemeine Zusammenhänge . . . . .	541
9.2.2	Beispiel: Beeinflussung von Gestellschwingungen durch einen Regler . . . . .	544
9.2.2.1	Analytische Zusammenhänge . . . . .	544
9.2.2.2	Numerisches Beispiel . . . . .	547
	<b>Formelzeichen . . . . .</b>	<b>553</b>
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>557</b>
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>559</b>