

Hans Dresig

# Schwingungen mechanischer Antriebssysteme

Modellbildung, Berechnung, Analyse, Synthese

Zweite, aktualisierte und ergänzte Auflage

Mit 192 Abbildungen und 46 Tabellen

4y Springer

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Modellbildung mechanischer Antriebssysteme</b>	<b>5</b>
2.1	Einführung in die Modellbildung	5
2.1.1	Ziele der Modellbildung	5
2.1.2	Typen der Berechnungsmodelle	11
2.1.2.1	Allgemeines	11
2.1.2.2	Einteilung der Berechnungsmodelle	14
2.1.2.3	Zur Vermeidung „steifer“ Systeme	22
2.1.3	Beispiel: Antrieb eines Mechanismus	24
2.2	Bewertung von Modellgleichungen	26
2.2.1	Regeln zur Verifikation von Modellgleichungen	26
2.2.2	Normierung der Parameter und der Variablen	29
2.2.3	Berechnungsmodelle von Schubkurbelgetrieben	31
2.2.3.1	Modellgleichungen	31
2.2.3.2	Elastisches Abtriebsglied mit Spiel	33
2.2.3.3	Spiel im Kurbelgelenk	41
2.2.3.4	Zur Kolbensekundärbewegung	43
2.2.4	Beispiele für mehrere Modellstufen	45
2.2.4.1	Modellgleichungen von Rotoren mit Unwucht	45
2.2.4.2	Schadensfall an einer Pumpenwelle	48
2.2.4.3	Versuchsstand mit Unwuchterreger	52
2.3	Induktive Modellbildung	55
2.3.1	Allgemeines	55
2.3.2	Parametererregte Schwingungen einer Buchschneidemaschine	58
2.3.3	Selbsterregte Schwingungen eines Wicklers	61
2.3.4	Instationäre Bewegungen bei Kranen	67
2.3.4.1	Anheben der Last vom Boden	67
2.3.4.2	Heben und Senken (Modell mit $n = 2$ )	71
2.3.4.3	Heben und Senken (Modell mit $n = 4$ )	79
2.3.4.4	Antriebsmoment bei Wippkranen	83
2.3.5	Diskrete Schwinger statt Kontinua (Balken- und Stabmodelle)	86
2.4	Deduktive Modellbildung	94
2.4.1	Allgemeines	94
2.4.2	Grundfrequenz von Schleifspindeln	96
2.4.3	Von 23 zu 5 Parametern (Fahrbewegung eines Brückenkrans)	101
2.4.4	Von räumlichen zu eindimensionalen Balken- und Stabmodellen	105
2.4.4.1	Allgemeine Zusammenhänge	105

2.4.4.2	Biegeschwingungen . . . . .	113
2.4.4.3	Längs- und Torsionsschwingungen . . . . .	119
2.4.4.4	Modellierung einer Getriebewelle . . . . .	121
2.4.5	Schwenkbewegung eines Auslegerarms . . . . .	124
2.4.6	Modellreduktion mit der Mittelungsmethode . . . . .	131
2.4.7	Reibungseinflüsse . . . . .	132
2.4.7.1	Zur Modellierung der Reibung . . . . .	132
2.4.7.2	Einfluß der Schwingungen auf die Reibungszahl . . . . .	134
2.5	Ermittlung von Parametern des Gesamtsystems . . . . .	139
2.5.1	Sensitivitätsanalyse . . . . .	139
2.5.1.1	Allgemeine Zusammenhänge . . . . .	139
2.5.1.2	Beispiel: Torsionsschwingerkette . . . . .	142
2.5.2	Parameterermittlung aus gemessenen Eigenfrequenzen und Eigenformen . . . . .	146
2.5.3	Identifikation eines Systems mit zwei Freiheitsgraden . . . . .	150
2.6	Freiheitsgradreduktion und Modellanpassung . . . . .	153
2.6.1	Grundlagen der Freiheitsgradreduktion . . . . .	153
2.6.2	Statische und dynamische Kondensation (GUYAN, RÖHRLE) . . . . .	155
2.6.3	Reduktion nach RIVIN und Di . . . . .	157
2.6.4	Modale Reduktion und Eigenformapproximation . . . . .	159
2.6.5	Vergleich der Reduktionsmethoden an einem Beispiel . . . . .	160
2.6.6	Modale Synthese . . . . .	164
2.6.7	Kopplung von zwei Schwingerketten . . . . .	167
<b>3</b>	<b>Parameterwerte von Maschinenelementen und Baugruppen</b> . . . . .	<b>173</b>
3.1	Erreger- und Übertragungselemente von Torsionsschwingern . . . . .	173
3.2	Parameterwerte einzelner Elemente . . . . .	178
3.2.1	Zylinder- und Kegelelemente . . . . .	178
3.2.2	Zusatzlängen und Nachgiebigkeitsfaktoren . . . . .	181
3.2.3	Drehsteifigkeiten von Kurbelwellen . . . . .	184
3.2.4	Dämpfungswerte von Torsionsschwingern . . . . .	186
3.3	Wälzlager und Fugen . . . . .	189
3.3.1	Allgemeine Zusammenhänge . . . . .	189
3.3.2	Kugel- und Rollenlager . . . . .	190
3.3.3	Fugen, Kontaktstellen, Gleit- und Wälzfürungen . . . . .	194
3.4	Getriebe, Kupplungen, Motoren . . . . .	195
3.4.1	Zahnradgetriebe . . . . .	195
3.4.2	Berechnungsmodelle für nachgiebige Kupplungen . . . . .	199
3.4.2.1	Allgemeine Zusammenhänge . . . . .	199
3.4.2.2	Berechnungsmodell für Elastomerkupplungen . . . . .	201
3.4.2.3	Nichtlineare Effekte bei biharmonischer Erregung . . . . .	204
3.4.3	Asynchronmotor . . . . .	208
3.5	Dämpfungskennwerte . . . . .	211
<b>4</b>	<b>Beispiele zur dynamischen Analyse von Antriebssystemen</b> . . . . .	<b>219</b>
4.1	Anlaufvorgang eines Antriebs mit Asynchronmotor . . . . .	219
4.2	Fahrzeug-Antriebsstrang . . . . .	221

4.3	Kupplungen im Antriebsstrang . . . . .	228
4.3.1	Allgemeine Problemstellung . . . . .	228
4.3.2	Lüfterantrieb . . . . .	229
4.3.3	Druckmaschine . . . . .	233
4.4	Ungleichmäßig übersetzende Mechanismen . . . . .	236
4.4.1	Schwingungsursachen . . . . .	236
4.4.2	Schwingungen am Abtriebsglied . . . . .	241
4.4.3	Schwingungen infolge elastischer Antriebsglieder . . . . .	246
4.5	Selbsthemmende Getriebe . . . . .	250
4.5.1	Schwingungsursachen . . . . .	250
4.5.2	Keilschubgetriebe . . . . .	251
4.5.3	Schneckengetriebe . . . . .	254
4.6	Schwingungen von Zugmittelgetrieben . . . . .	262
4.6.1	Schwingungsursachen . . . . .	262
4.6.2	Eigenfrequenzen des Zweischeiben-Riemengetriebes . . . . .	264
4.6.3	Erzwungene und parametererregte Schwingungen . . . . .	268
4.6.4	Kettengetriebe . . . . .	270
4.6.5	Zahnriemengetriebe . . . . .	277
4.7	Planetengetriebe . . . . .	279
4.7.1	Allgemeine Problemstellung . . . . .	279
4.7.2	Bewegungsgleichungen eines einfachen Berechnungsmodells . . . . .	280
4.7.3	Beispiel: Getriebe mit drei Planeten . . . . .	283
4.7.4	Vergleich von drei Fällen unterschiedlicher Zahneingriffe . . . . .	286
4.8	Fahrbewegung eines Regalbediengerätes . . . . .	288
4.8.1	Modellbildung . . . . .	288
4.8.2	Herleitung der Bewegungsgleichungen . . . . .	290
4.8.3	Lösung der Bewegungsgleichungen . . . . .	293
4.8.4	Zahlenbeispiel . . . . .	295
4.9	Irreguläre Belastungen . . . . .	298
4.9.1	Querstoßan Führungsbahn . . . . .	298
4.9.2	Nachlauf nach dem Abschalten (Überlastsicherung) . . . . .	301
<b>5</b>	<b>Zur Synthese von Antriebssystemen . . . . .</b>	<b>305</b>
5.1	Regeln zur dynamischen Synthese . . . . .	305
5.1.1	Zur Struktursynthese . . . . .	305
5.1.2	Modellstufe „Starrkörpersystem“ . . . . .	311
5.1.2.1	Bewegung eines einzelnen Starrkörpers . . . . .	311
5.1.2.2	Bewegung von Starrkörpersystemen . . . . .	312
5.1.3	Modellstufe „Lineares Schwingungssystem“ . . . . .	315
5.1.4	Modellstufe „Nichtlineares Schwingungssystem“ . . . . .	318
5.2	Modale Anregbarkeit . . . . .	318
5.2.1	Allgemeine Zusammenhänge . . . . .	318
5.2.2	Beispiel: Torsionsschwingerkette . . . . .	321
5.3	Optimale Auslegung von Baugruppen . . . . .	324
5.3.1	Konturen von Unwuchtmassen . . . . .	324
5.3.2	Kompensatoren für ungleichmäßig übersetzende Getriebe . . . . .	326

5.3.3	Übersetzungsverhältnisse bei minimalem Trägheitsmoment . . .	327
5.3.4	Stabprofile für extreme Eigenfrequenzen . . . . .	329
5.4	Optimale Bewegungsabläufe . . . . .	332
5.4.1	Instationäre Starrkörperbewegung . . . . .	332
5.4.2	Eigenbewegung von Mechanismen . . . . .	336
5.4.3	Anlaufen und Bremsen eines linearen Schwingers . . . . .	339
5.4.3.1	Vergleich von Anlauffunktionen . . . . .	339
5.4.3.2	Optimaler Antriebskraftverlauf . . . . .	344
5.4.4	Rechtecksprünge und Restschwingungen . . . . .	347
5.4.5	Stöße und deren Kompensation . . . . .	354
5.4.5.1	Einzelstoß . . . . .	354
5.4.5.2	Mehrere Stöße . . . . .	354
5.4.5.3	Endlose Stoßfolge . . . . .	358
5.4.5.4	Beispiel . . . . .	360
5.4.6	Resonanzdurchlauf . . . . .	366
5.5	Zum Entwurf schwingungsarmer Mechanismen . . . . .	372
5.5.1	Gestellschwingungen und Massenausgleich . . . . .	372
5.5.2	Torsionsschwingungen und Leistungsausgleich . . . . .	375
5.5.3	HS-Profile bei Kurvengetrieben . . . . .	378
5.5.3.1	Theoretische Grundlagen . . . . .	378
5.5.3.2	Rastgetriebe . . . . .	382
5.5.3.3	Schrittgetriebe . . . . .	384
5.5.4	Beeinflussung des Erregerspektrums mehrgliedriger Koppel- getriebe . . . . .	391
5.6	Optimale Stützenabstände angetriebener Balken . . . . .	393
5.6.1	Aufgabenstellung . . . . .	393
5.6.2	Gekoppelte Biege- und Torsionsschwinger . . . . .	394
5.6.3	Balken auf mehreren Stützen . . . . .	397
5.7	Antriebe von Vibrationsmaschinen . . . . .	404
5.7.1	Aufgabenstellung . . . . .	404
5.7.2	Schubkurbelgetriebe als Schwingungserreger . . . . .	405
5.7.3	Unwuchterreger und Selbstsynchronisation . . . . .	410
5.7.3.1	Zur historischen Entwicklung dieser Antriebsart . . . . .	410
5.7.3.2	Bedingungen für stabile Betriebszustände von Unwuchttrotoren . . . . .	412
5.7.3.3	Beispiele für Vibrationsantriebe mit Selbstsynchroni- sation . . . . .	416
5.7.4	Vibrationshammer . . . . .	421
5.7.4.1	Minimale konstante Handkraft . . . . .	421
5.7.4.2	Dynamisch ausgeglichener pneumatischer Schlag- hammer . . . . .	423
	<b>Häufig benutzte Formelzeichen . . . . .</b>	<b>427</b>
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>431</b>
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>449</b>