

# 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	15
2.1.2.3	Beispiel: Antrieb eines Mechanismus	22
2.2	Bewertung von Modellgleichungen	24
2.2.1	Regeln zur Verifikation von Modellgleichungen	24
2.2.2	Normierung der Parameter und der Variablen	27
2.2.3	Berechnungsmodelle von Schubkurbelgetrieben	29
2.2.3.1	Modellgleichungen	29
2.2.3.2	Elastisches Abtriebsglied mit Spiel	31
2.2.3.3	Spiel im Kurbelgelenk	39
2.2.3.4	Zur Kolbensekundärbewegung	41
2.2.4	Beispiele für mehrere Modellstufen	43
2.2.4.1	Modellgleichungen von Rotoren mit Unwucht	43
2.2.4.2	Schadensfall an einer Pumpenwelle	46
2.2.4.3	Versuchsstand mit Unwuchterreger	50
2.3	Induktive Modellbildung	53
2.3.1	Allgemeines	53
2.3.2	Parametererregte Schwingungen einer Buchschneidemaschine	56
2.3.3	Selbsterregte Schwingungen eines Wicklers	59
2.3.4	Instationäre Bewegungen bei Kranen	65
2.3.4.1	Anheben der Last vom Boden	65
2.3.4.2	Heben und Senken (Modell mit $n = 2$ )	69
2.3.4.3	Heben und Senken (Modell mit $n = 4$ )	77
2.3.4.4	Antriebsmoment bei Wippkranen	81
2.3.5	Diskrete Schwinger statt Kontinua (Balken- und Stabmodelle)	84
2.4	Deduktive Modellbildung	92
2.4.1	Allgemeines	92
2.4.2	Grundfrequenz von Schleifspindeln	94
2.4.3	Von 23 zu 5 Parametern (Fahrbewegung eines Brückenkrans)	99
2.4.4	Von räumlichen zu eindimensionalen Balken- und Stabmodellen	103
2.4.4.1	Allgemeine Zusammenhänge	103
2.4.4.2	Biegeschwingungen	111

---

2.4.4.3	Längs- und Torsionsschwingungen . . . . .	112
2.4.4.4	Modellierung einer Getriebewelle . . . . .	114
2.4.5	Modellreduktion mit der Mittelungsmethode . . . . .	117
2.4.5.1	Einführung . . . . .	117
2.4.5.2	Einfluß der Schwingungen auf die Reibungszahl . . . . .	118
2.5	Ermittlung von Parametern des Gesamtsystems . . . . .	124
2.5.1	Sensitivitätsanalyse . . . . .	124
2.5.1.1	Allgemeine Zusammenhänge . . . . .	124
2.5.1.2	Beispiel: Torsionsschwingerkette . . . . .	127
2.5.2	Parameterermittlung aus gemessenen Eigenfrequenzen und Eigenformen . . . . .	131
2.5.3	Identifikation eines Systems mit zwei Freiheitsgraden . . . . .	135
2.6	Freiheitsgradreduktion und Modellanpassung . . . . .	137
2.6.1	Grundlagen der Freiheitsgradreduktion . . . . .	137
2.6.2	Statische und dynamische Kondensation GUYAN, RÖHRLE . . . . .	140
2.6.3	Reduktion nach RIVIN und DI . . . . .	141
2.6.4	Modale Reduktion und Eigenformapproximation . . . . .	144
2.6.5	Vergleich der Reduktionsmethoden an einem Beispiel . . . . .	145
2.6.6	Modale Synthese . . . . .	149
2.6.7	Kopplung von zwei Schwingerketten . . . . .	152
<b>3</b>	<b>Parameterwerte von Maschinenelementen und Baugruppen . . . . .</b>	<b>159</b>
3.1	Erreger- und Übertragungselemente von Torsionsschwingern . . . . .	159
3.2	Parameterwerte einzelner Elemente . . . . .	164
3.2.1	Zylinder- und Kegelelemente . . . . .	164
3.2.2	Zusatzlängen und Nachgiebigkeitsfaktoren . . . . .	167
3.2.3	Drehsteifigkeiten von Kurbelwellen . . . . .	170
3.2.4	Dämpfungswerte von Torsionsschwingern . . . . .	172
3.3	Wälzlager und Fugen . . . . .	175
3.3.1	Allgemeine Zusammenhänge . . . . .	175
3.3.2	Kugel- und Rollenlager . . . . .	176
3.3.3	Fugen, Kontaktstellen, Gleit- und Wälzfürungen . . . . .	180
3.4	Getriebe, Kupplungen, Motoren . . . . .	181
3.4.1	Zahnradgetriebe . . . . .	181
3.4.2	Berechnungsmodelle für nachgiebige Kupplungen . . . . .	185
3.4.2.1	Allgemeine Zusammenhänge . . . . .	185
3.4.2.2	Berechnungsmodell für Elastomerkupplungen . . . . .	187
3.4.2.3	Nichtlineare Effekte bei biharmonischer Erregung . . . . .	190
3.4.3	Asynchronmotor . . . . .	194
3.5	Dämpfungskennwerte . . . . .	197
<b>4</b>	<b>Beispiele zur dynamischen Analyse von Antriebssystemen . . . . .</b>	<b>205</b>
4.1	Anlaufvorgang eines Antriebs mit Asynchronmotor . . . . .	205
4.2	Fahrzeug-Antriebsstrang . . . . .	207
4.3	Kupplungen im Antriebsstrang . . . . .	214
4.3.1	Allgemeine Problemstellung . . . . .	214
4.3.2	Lüfterantrieb . . . . .	215
4.3.3	Druckmaschine . . . . .	219

4.4	Ungleichmäßig übersetzende Mechanismen . . . . .	222
4.4.1	Schwingungsursachen . . . . .	222
4.4.2	Schwingungen am Abtriebsglied . . . . .	227
4.4.3	Schwingungen infolge elastischer Antriebsglieder . . . . .	232
4.5	Selbsthemmende Getriebe . . . . .	236
4.5.1	Schwingungsursachen . . . . .	236
4.5.2	Keilschubgetriebe . . . . .	237
4.5.3	Schneckengetriebe . . . . .	240
4.6	Schwingungen von Zugmittelgetrieben . . . . .	248
4.6.1	Schwingungsursachen . . . . .	248
4.6.2	Eigenfrequenzen des Zweischeiben-Riemengetriebes . . . . .	250
4.6.3	Erzwungene und parametererregte Schwingungen . . . . .	254
4.6.4	Kettengetriebe . . . . .	256
4.6.5	Zahnriemengetriebe . . . . .	263
4.7	Schwenkbewegung eines Auslegerarms . . . . .	265
4.8	Fahrbewegung eines Regalbediengerätes . . . . .	272
4.8.1	Modellbildung . . . . .	272
4.8.2	Herleitung der Bewegungsgleichungen . . . . .	274
4.8.3	Lösung der Bewegungsgleichungen . . . . .	277
4.8.4	Zahlenbeispiel . . . . .	279
4.9	Irreguläre Belastungen . . . . .	282
4.9.1	Querstoß an Führungsbahn . . . . .	282
4.9.2	Nachlauf nach den Abschalten (Überlastsicherung) . . . . .	285
<b>5</b>	<b>Zur Synthese von Antriebssystemen . . . . .</b>	<b>289</b>
5.1	Regeln zur dynamischen Synthese . . . . .	289
5.1.1	Zur Struktursynthese . . . . .	289
5.1.2	Modellstufe „Starrkörpersystem“ . . . . .	294
5.1.2.1	Bewegung eines einzelnen Starrkörpers . . . . .	294
5.1.2.2	Bewegung von Starrkörpersystemen . . . . .	296
5.1.3	Modellstufe „Lineares Schwingungssystem“ . . . . .	299
5.1.4	Modellstufe „Nichtlineares Schwingungssystem“ . . . . .	301
5.2	Modale Anregbarkeit . . . . .	302
5.2.1	Allgemeine Zusammenhänge . . . . .	302
5.2.2	Beispiel: Torsionsschwingerkette . . . . .	304
5.3	Optimale Auslegung von Baugruppen . . . . .	307
5.3.1	Konturen von Unwuchtmassen . . . . .	307
5.3.2	Kompensatoren für ungleichmäßig übersetzende Getriebe . . . . .	309
5.3.3	Übersetzungsverhältnisse bei minimalem Trägheitsmoment . . . . .	311
5.3.4	Stabprofile für extreme Eigenfrequenzen . . . . .	313
5.4	Optimale Bewegungsabläufe . . . . .	316
5.4.1	Instationäre Starrkörperbewegung . . . . .	316
5.4.2	Eigenbewegung von Mechanismen . . . . .	320
5.4.3	Anlaufen und Bremsen eines linearen Schwingers . . . . .	323
5.4.3.1	Vergleich von Anlauffunktionen . . . . .	323
5.4.3.2	Optimaler Antriebskraftverlauf . . . . .	328

5.4.4	Kompensation von Restschwingungen . . . . .	331
5.4.5	Resonanzdurchlauf . . . . .	338
5.5	Zum Entwurf schwingungsarmer Mechanismen . . . . .	344
5.5.1	Gestellschwingungen und Massenausgleich . . . . .	344
5.5.2	Torsionsschwingungen und Leistungsausgleich . . . . .	347
5.5.3	HS-Profile bei Kurvengetrieben . . . . .	350
5.5.3.1	Theoretische Grundlagen . . . . .	350
5.5.3.2	Rastgetriebe . . . . .	354
5.5.3.3	Schrittgetriebe . . . . .	356
5.5.4	Beeinflussung des Erregerspektrums mehrgliedriger Koppelgetriebe . . . . .	363
5.6	Optimale Stützenabstände angetriebener Balken . . . . .	365
5.6.1	Aufgabenstellung . . . . .	365
5.6.2	Gekoppelte Biege- und Torsionsschwinger . . . . .	366
5.6.3	Balken auf mehreren Stützen . . . . .	369
5.7	Antriebe von Vibrationsmaschinen . . . . .	376
5.7.1	Aufgabenstellung . . . . .	376
5.7.2	Schubkurbelgetriebe als Schwingungserreger . . . . .	377
5.7.3	Unwuchterreger und Selbstsynchronisation . . . . .	382
5.7.3.1	Zur historischen Entwicklung dieser Antriebsart . . . . .	382
5.7.3.2	Bedingungen für stabile Betriebszustände von Unwuchrotoren . . . . .	384
5.7.3.3	Beispiele für Vibrationsantriebe mit Selbstsynchronisation . . . . .	388
	<b>Häufig benutzte Formelzeichen . . . . .</b>	<b>395</b>
	<b>Literaturverzeichnis . . . . .</b>	<b>399</b>
	<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>415</b>