

---

# 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
2.1.3	Beispiel: Antrieb eines Mechanismus . . . . .	25
2.2	Bewertung von Modellgleichungen . . . . .	27
2.2.1	Regeln zur Verifikation von Modellgleichungen . . . . .	27
2.2.2	Normierung der Parameter und der Variablen . . . . .	30
2.2.3	Berechnungsmodelle von Schubkurbelgetrieben . . . . .	32
2.2.4	Beispiele für mehrere Modellstufen . . . . .	47
2.3	Induktive Modellbildung . . . . .	57
2.3.1	Allgemeines . . . . .	57
2.3.2	Parametererregte Schwingungen einer Buchschneidemaschine . . . . .	61
2.3.3	Selbsterregte Schwingungen eines Wicklers . . . . .	64
2.3.4	Instationäre Bewegungen bei Kranen . . . . .	70
2.3.5	Diskrete Schwinger statt Kontinua (Balken- und Stabmodelle) . . . . .	91
2.4	Deduktive Modellbildung . . . . .	100
2.4.1	Allgemeines . . . . .	100
2.4.2	Grundfrequenz von Schleifspindeln . . . . .	101
2.4.3	Von 23 zu 5 Parametern (Fahrbewegung eines Brückenkrans) . . . . .	106
2.4.4	Von räumlichen zu eindimensionalen Balken- und Stabmodellen . . . . .	111
2.4.5	Schwenkbewegung eines Auslegerarms . . . . .	132
2.4.6	Modellreduktion mit der Mittelungsmethode . . . . .	139
2.4.7	Reibungseinflüsse . . . . .	141
2.5	Ermittlung von Parametern des Gesamtsystems . . . . .	149
2.5.1	Sensitivitätsanalyse . . . . .	149
2.5.2	Parameterermittlung aus gemessenen Eigenfrequenzen und Eigenformen . . . . .	154
2.5.3	Identifikation eines Systems mit zwei Freiheitsgraden . . . . .	158

2.6	Freiheitsgradreduktion und Modellanpassung . . . . .	161
2.6.1	Grundlagen der Freiheitsgradreduktion . . . . .	161
2.6.2	Statische und dynamische Kondensation (Guyan, Röhrlé) . . . . .	163
2.6.3	Reduktion nach Rivin und Di . . . . .	166
2.6.4	Modale Reduktion und Eigenformapproximation . . . . .	168
2.6.5	Vergleich der Reduktionsmethoden an einem Beispiel . . . . .	170
2.6.6	Modale Synthese . . . . .	174
2.6.7	Kopplung von zwei Schwingerketten . . . . .	177
2.7	Freie Schwingungen nichtlinearer Schwinger mit einem Freiheitsgrad . . . . .	183
2.7.1	Allgemeine Zusammenhänge . . . . .	183
2.7.2	Begründung der Formeln für Fall 5 . . . . .	190
<b>3</b>	<b>Parameterwerte von Maschinenelementen und Baugruppen . . . . .</b>	<b>195</b>
3.1	Erreger- und Übertragungselemente von Torsionsschwingern . . . . .	195
3.2	Parameterwerte einzelner Elemente . . . . .	200
3.2.1	Zylinder- und Kegelelemente . . . . .	200
3.2.2	Zusatzlängen und Nachgiebigkeitsfaktoren . . . . .	203
3.2.3	Drehsteifigkeiten von Kurbelwellen . . . . .	206
3.2.4	Dämpfungswerte von Torsionsschwingern . . . . .	209
3.3	Wälzlager und Fugen . . . . .	211
3.3.1	Allgemeine Zusammenhänge . . . . .	211
3.3.2	Kugel- und Rollenlager . . . . .	212
3.3.3	Fugen, Kontaktstellen, Gleit- und Wälzfürungen . . . . .	216
3.4	Getriebe, Kupplungen, Motoren . . . . .	218
3.4.1	Zahnradgetriebe . . . . .	218
3.4.2	Berechnungsmodelle für nachgiebige Kupplungen . . . . .	222
3.4.3	Asynchronmotor . . . . .	230
3.5	Dämpfungskennwerte . . . . .	234
<b>4</b>	<b>Beispiele zur dynamischen Analyse von Antriebssystemen . . . . .</b>	<b>241</b>
4.1	Anlaufvorgang eines Antriebs mit Asynchronmotor . . . . .	241
4.2	Fahrzeug-Antriebsstrang . . . . .	243
4.3	Kupplungen im Antriebsstrang . . . . .	250
4.3.1	Allgemeine Problemstellung . . . . .	250
4.3.2	Lüfterantrieb . . . . .	251
4.3.3	Druckmaschine . . . . .	255
4.4	Ungleichmäßig übersetzende Mechanismen . . . . .	258
4.4.1	Schwingungsursachen . . . . .	258
4.4.2	Schwingungen am Abtriebsglied . . . . .	263
4.4.3	Schwingungen infolge elastischer Antriebsglieder . . . . .	268
4.5	Selbsthemmende Getriebe . . . . .	273
4.5.1	Schwingungsursachen . . . . .	273

4.5.2	Keilschubgetriebe . . . . .	274
4.5.3	Schneckengetriebe . . . . .	278
4.6	Schwingungen von Zugmittelgetrieben . . . . .	286
4.6.1	Schwingungsursachen . . . . .	286
4.6.2	Eigenfrequenzen des Zweischeiben-Riemengetriebes . . . . .	288
4.6.3	Erzwungene und parametererregte Schwingungen . . . . .	292
4.6.4	Kettengetriebe . . . . .	294
4.6.5	Zahnriemengetriebe . . . . .	302
4.7	Planetengetriebe . . . . .	304
4.7.1	Allgemeine Problemstellung . . . . .	304
4.7.2	Bewegungsgleichungen eines einfachen Berechnungsmodells . . . . .	305
4.7.3	Beispiel: Getriebe mit drei Planeten . . . . .	308
4.7.4	Vergleich von drei Fällen unterschiedlicher Zahneingriffe . . . . .	310
4.8	Fahrbewegung eines Regalbediengerätes . . . . .	313
4.8.1	Modellbildung . . . . .	313
4.8.2	Herleitung der Bewegungsgleichungen . . . . .	315
4.8.3	Lösung der Bewegungsgleichungen . . . . .	318
4.8.4	Zahlenbeispiel . . . . .	320
4.9	Irreguläre Belastungen . . . . .	323
4.9.1	Querstoß an Führungsbahn . . . . .	323
4.9.2	Nachlauf nach dem Abschalten (Überlastsicherung) . . . . .	327
4.9.3	Grenzwerte extremer Kraft- und Bewegungsgrößen . . . . .	330
4.9.4	Beispiel: Torsionsschwinger mit 4 Freiheitsgraden . . . . .	337
<b>5</b>	<b>Zur Synthese von Antriebssystemen . . . . .</b>	<b>343</b>
5.1	Regeln zur dynamischen Synthese . . . . .	343
5.1.1	Zur Struktursynthese . . . . .	343
5.1.2	Modellstufe „Starrkörpersystem“ . . . . .	349
5.1.3	Modellstufe „Lineares Schwingungssystem“ . . . . .	354
5.1.4	Modellstufe „Nichtlineares Schwingungssystem“ . . . . .	357
5.2	Modale Anregbarkeit . . . . .	358
5.2.1	Allgemeine Zusammenhänge . . . . .	358
5.2.2	Beispiel: Torsionsschwingerkette . . . . .	360
5.3	Optimale Auslegung von Baugruppen . . . . .	364
5.3.1	Konturen von Unwuchtmassen . . . . .	364
5.3.2	Kompensatoren für ungleichmäßig übersetzende Getriebe . . . . .	366
5.3.3	Übersetzungsverhältnisse bei minimalem Trägheitsmoment . . . . .	367
5.3.4	Stabprofile für extreme Eigenfrequenzen . . . . .	369
5.4	Optimale Bewegungsabläufe . . . . .	372
5.4.1	Instationäre Starrkörperbewegung . . . . .	372
5.4.2	Eigenbewegung von Mechanismen . . . . .	376
5.4.3	Anlaufen und Bremsen eines linearen Schwingers . . . . .	379

5.4.4	Rechtecksprünge und Restschwingungen	388
5.4.5	Stöße und deren Kompensation	394
5.4.6	Resonanzdurchlauf	407
5.4.7	Linear veränderliche Erregerfrequenz	414
5.5	Zum Entwurf schwingungsarmer Mechanismen	417
5.5.1	Gestellschwingungen und Massenausgleich	417
5.5.2	Torsionsschwingungen und Leistungsausgleich	420
5.5.3	HS-Profile bei Kurvengetrieben	422
5.5.4	Erregerspektrum mehrgliedriger Koppelgetriebe	436
5.6	Optimale Stützenabstände angetriebener Balken	438
5.6.1	Aufgabenstellung	438
5.6.2	Gekoppelte Biege- und Torsionsschwinger	439
5.6.3	Balken auf mehreren Stützen	442
5.7	Antriebe von Vibrationsmaschinen	449
5.7.1	Aufgabenstellung	449
5.7.2	Schubkurbelgetriebe als Schwingungserreger	450
5.7.3	Unwuchterreger und Selbstsynchronisation	456
5.7.4	Vibrationshammer	467
6	Torsionsschwingungen im KFZ-Antriebstrang	473
6.1	Einleitung	473
6.2	Simulationsmodelle für einzelne Komponenten des Antriebstrangs	474
6.2.1	Modellierung eines Verbrennungsmotors	475
6.2.2	Modellierung eines Getriebes	478
6.2.3	Modellierung eines Zweimassenschwungrades	480
6.2.4	Die Kennlinie der Bogenfeder	483
6.2.5	Modellierung der Bogenfeder bzw. der in Reihe geschalteten Federn	490
6.2.6	Modellierung einer torsionsgedämpften Kupplungsscheibe	492
6.2.7	Modellierung eines Fliehkraftpendels	493
6.2.8	Modellierung einer Gelenkwelle	496
6.2.9	Modellierung eines Planetengetriebes	497
6.2.10	Modellierung der Räder	500
6.3	Fahrmanöver und Bewertungskriterien	501
6.3.1	Start	501
6.3.2	Beschleunigungsfahrt	504
6.3.3	Lastwechsel	511
6.3.4	Leerlauf	512
6.3.5	Schub	518
6.3.6	Stopp	520
6.3.7	Anfahren	521
6.3.8	Gangwechsel	523

6.4	Auslegung von Komponenten eines KFZ-Antriebstrangs mit Hilfe der Optimierung . . . . .	525
6.4.1	Prinzipielle Vorgehensweise . . . . .	525
6.4.2	Ein Beispiel der Optimierung eines Zweimassenschwungrades . . . . .	529
<b>7</b>	<b>Reibungserregte Schwingungen . . . . .</b>	<b>533</b>
7.1	Einleitung . . . . .	533
7.2	Selbsterregung durch negativen Reibwertgradient . . . . .	535
7.2.1	Der klassische Reibschwinger . . . . .	535
7.2.2	Reibwertrupfen in KFZ-Antriebsträngen . . . . .	537
7.3	Kopplung axialer und rotatorischer Freiheitsgrade an Schrägverzahnungen . . . . .	542
7.3.1	Einleitung . . . . .	542
7.3.2	Prinzipieller Selbsterregungsmechanismus . . . . .	542
7.3.3	Einfluss der Torsionssteifigkeit der Welle . . . . .	544
7.3.4	Einfluss von beidseitigen Kontakten (Anpressplatte) . . . . .	546
7.3.5	Ein einfaches Modell einer Doppelkupplung . . . . .	548
7.3.6	Einfluss der Torsionssteifigkeiten der Wellen . . . . .	549
7.3.7	Einfluss beidseitiger Kontakte . . . . .	552
7.3.8	Einfluss der abtriebsseitigen Kopplung . . . . .	553
7.3.9	Abschließende Bemerkungen . . . . .	554
7.4	Instabilität infolge Taumelns der Kupplungsscheibe . . . . .	555
7.5	Selbstzentrierung der rotierenden Komponenten beim Reibkontakt . . . . .	560
7.5.1	Einführung . . . . .	560
7.5.2	Zentrierung eines Pins auf einer sich drehenden Reibunterlage . . . . .	561
7.5.3	Zentrierung einer Scheibe auf einer sich drehenden Reibunterlage . . . . .	564
7.5.4	Ausblick . . . . .	568
<b>8</b>	<b>Vibrationsförderung . . . . .</b>	<b>569</b>
8.1	Allgemeine Zusammenhänge . . . . .	569
8.1.1	Fördertechnische Aspekte . . . . .	569
8.1.2	Grundgleichungen . . . . .	571
8.2	Förderung nach dem Gleitprinzip . . . . .	575
8.2.1	Harmonische Erregung . . . . .	575
8.2.2	Horizontale Erregung durch Beschleunigungssprünge . . . . .	579
8.2.3	Schräge Erregung durch Beschleunigungssprünge auf geneigter Ebene . . . . .	590
8.2.4	Periodische Erregung . . . . .	592
8.2.5	Gesteuerte Erregung parallel und senkrecht zur Gleitebene . . . . .	594
8.2.6	Zusammenfassung . . . . .	595
8.3	Förderung nach dem Wurfprinzip . . . . .	598
8.3.1	Harmonische eindimensionale Erregung . . . . .	598

---

8.3.2 Elliptische Bahnkurve . . . . .	601
8.4 Gleitender Körper auf ebener Oberfläche . . . . .	602
<b>Häufig benutzte Formelzeichen . . . . .</b>	<b>607</b>
<b>Literatur . . . . .</b>	<b>611</b>
<b>Sachverzeichnis . . . . .</b>	<b>635</b>