

Hans Dresig · Alexander Fidlin

Schwingungen mechanischer Antriebssysteme

**Modellbildung, Berechnung, Analyse,
Synthese**

3., überarbeitete und erweiterte Auflage

Springer Vieweg

| | | |
|----------|---|----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Modellbildung mechanischer Antriebssysteme | 5 |
| 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 |
| | Parameterwerte von Maschinenelementen und Baugruppen | 195 |
| 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 Wälzführungen | 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 |
| | Beispiele zur dynamischen Analyse von Antriebssystemen | 241 |
| 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 | Planetengertriebe | 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 |
| 5 | Zur Synthese von Antriebssystemen | 343 |
| 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 |
| 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 |
| 7 | Reibungserregte Schwingungen | 533 |
| 7.1 | Einleitung | 533 |
| 7.2 | Selbsterregung durch negativen Reibwertgradient | 535 |
| 7.2.1 | Der klassische Reibschwinger | 535 |
| 7.2.2 | Reibwerttruppen 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 Taumeins 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 |
| 8 | Vibrationsförderung | 569 |
| 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 |