

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 5: Autonome Schwingungen nicht linearer Gebilde

5.1	Übersicht	1
5.11	Gegensatz linear – nichtlinear; Benennungen; Klassifikationen der Systeme	1
5.12	Dimensionslose Veränderliche	10
5.13	Hinweise	14
5.2	Bewegungsraum und Phasenebene	15
5.20	Zustandsgrößen; Differentialgleichung zweiter Ordnung; System von Differentialgleichungen erster Ordnung	15
5.21	Bewegungsraum, Phasenebene, Phasenzyylinder; reguläre und singuläre Punkte	19
5.22	Klassifikation der singulären Punkte	29
5.23	Geschlossene Phasenkurven; Grenzzykel; Poincaréscher Index	43
5.3	Stabilität	56
5.30	Sprachgebrauch, Benennungen	56
5.31	Definitionen der Stabilität	57
5.32	Bemerkungen zur Untersuchung auf Stabilität	64
5.4	Periodische Schwingungen konservativer und aktiver Gebilde; ihr Zeitverlauf	65
5.40	Die Differentialgleichungen konservativer Schwinger . . .	65
5.41	Schwinger vom Grundtyp $x'' + f(x) = 0$	68
5.42	Grundtyp; ungerade Funktionen $f(x)$	76
5.43	Grundtyp; stückweise lineare Kennlinien	94
5.44	Grundtyp; Zusammenhang zwischen Periodendauer und Kennlinie, isochrone Schwingungen nichtlinearer Schwinger . .	103
5.45	Konservative Schwinger, die nicht zum Grundtyp gehören .	111
5.46	Aktive Schwinger mit Grenzzykeln oder Scharen von Lösungen	118

5.5	Schwinger mit "Schaltern"; Differentialgleichungen mit Unstetigkeitsstellen	124
5.50	Begriffe: Echte und unechte Schalter	124
5.51	Behandlung in der Phasenebene	126
5.52	Abschnittsweise lineare Differentialgleichungen	132
5.53	Differentialgleichungen mit Gliedern vom Typ $\text{sign}(\dot{x})\dot{x}^2$	155
5.54	Der Schwinger mit quadratischer Dämpfungskraft	159
5.55	Die "modifizierten van der Polschen" Differentialgleichungen	163
5.56	Reibschwinger	165
5.6	Näherungen für Phasenkurven	170
5.60	Vorbemerkungen	170
5.61	Die Methode der Isoklinen	173
5.62	Eigentlich graphische Verfahren; δ -Methode, Liénardsche Verfahren	175
5.63	Entwickeln in Potenzreihen	189
5.64	Lösungsansätze mit noch freien Parametern	192
5.65	Entwickeln nach einem kleinen Parameter	195
5.66	Iterationsverfahren	200
5.7	Näherungen für die Zeitfunktionen bei Differentialgleichungen mit nicht kleinen Parametern	209
5.70	Vorbemerkungen	209
5.71	Differentialgleichungen und Variationsprobleme; das Verfahren von W. Ritz	212
5.72	Das Verfahren von Galerkin; Fourier-Abgleich	215
5.73	Schwinger vom Grundtyp $x'' + \text{sign}(x) x ^n = 0$, strenge Lösung und Näherungslösungen	218
5.74	Weitere parabolische Näherungen	228
5.75	Bewegungsgleichungen vom Typ $x'' + \text{sign}(x) \sum a_k x ^k = 0$; Sonderfälle	234
5.76	Schwinger vom Grundtyp mit nicht ungerader Rückstellfunktion	237
5.77	Beispiele zum Fourier-Abgleich	240
5.78	Hinweise auf weitere Beispiele	251

5.8	Näherungen für die Zeitfunktionen bei Differentialgleichungen mit einem kleinen Parameter	252
5.80	Übersicht	252
5.81	Die Störungsrechnung; das Verfahren von Lindstedt	255
5.82	Die Lindstedtsche Idee im Zusammenhang mit einem Iterationsverfahren	272
5.83	Das Verfahren von Krylov-Bogoliubov (das Verfahren "K-B I"); die primäre Näherung	276
5.84	Die primäre Näherung: Harmonische und energetische Balance; Stabilität	283
5.85	Die primäre Näherung: \mathcal{A} -Transformationen; äquivalente Linearisierung (das Verfahren "K-B II")	289
5.86	Beispiele zur primären Näherung: Das Abklingverhalten von Schwingungen bei verschiedenen Dämpfungsgesetzen	305
5.87	Beispiele zur primären Näherung: Selbsterregte Schwinger, ihr periodisches und ihr transientes Verhalten	313
5.88	Verbesserungen der primären Näherung: Echte Näherungen erster Ordnung, Hinweise für Näherungen zweiter Ordnung; Beispiele	322
5.89	Schwinger mit Totzeiten; Differenzen-Differentialgleichungen	334

Kapitel 6: Nicht-autonome Schwingungen nicht-linearer Gebilde

6.1	Vorbemerkungen; Inhalt, Einteilung	343
6.11	Die dimensionslosen Größen Zeit, Periodendauer, Frequenz	343
6.12	Differentialgleichungen und Erregerkräfte; starke und schwache Nichtlinearitäten	345
6.2	Passive Gebilde, schwach nichtlineare Differentialgleichungen: Harmonische Erregerfunktion (Störfunktion); die Grundharmonische der Lösung als Näherungslösung; Responsekurven	348
6.21	Ungerade Kennlinien; allgemeiner Fall, Näherungslösungen durch Galerkin-Verfahren (Fourier-Abgleich)	348
6.22	Diskussion der Amplituden-Responsekurven für den ungedämpften Schwinger	353
6.23	Diskussion der Responsekurven für den gedämpften Schwinger; Sprungphänomene	369
6.24	Harmonische Näherungslösungen mit Hilfe des Verfahrens "K-B I"	378

6.25	Stabilitätsbetrachtungen	383
6.26	Nicht-ungerade Kennlinien	390
6.3	Schwach nicht-lineare Dämpfungskräfte	391
6.31	Einer Potenz der Geschwindigkeit proportionale Dämpfungskräfte	391
6.32	Werkstoffdämpfung; Element- und Bauteildämpfung	397
6.33	Werkstoffdämpfung: Das "ersetzende lineare Dämpfungsmaß"	417
6.4	Schwach nicht-lineare Differentialgleichungen; Periodische Erregerfunktionen; periodische Lösungen; Störungsrechnung	422
6.41	Störungsrechnung bei nicht-autonomen Differentialgleichungen	422
6.42	Der Nicht-Resonanzfall	423
6.42	Der Resonanzfall	427
6.43	Weitere Verfahren und Hinweise	437
6.44	Kombinationsschwingungen	440
6.5	Stark nicht-lineare Differentialgleichungen; pseudo-autonome Systeme	443
6.51	Die Erregerfunktion $M_i(\sigma)$ und $S_i(\sigma)$	443
6.52	Punktkörper auf zwei schiefen Ebenen; Behandlung im Zeitbereich	446
6.53	Schwinger vom "Grundtyp" mit Störfunktionen $M_i(\sigma)$ und $S_i(\sigma)$; Behandlung in der Phasenebene	454
6.54	Lineare Schwinger vom "Grundtyp"	456
6.55	Nicht lineare Schwinger vom "Grundtyp"	465
6.56	Schwinger mit Dämpfung; Störfunktion $M_i(\sigma)$	477
6.6	Stark nichtlineare Differentialgleichungen; stückweise lineare Systeme	482
6.61	Beispiel I: Ball hüpfte auf schwingender Platte	482
6.62	Stabilitätsuntersuchung zum Beispiel I	488
6.63	Beispiel II: Stoß-Schwingungsdämpfer (Bericht)	493
6.64	Schwinger mit Reibkräften	495
6.65	Schwinger mit Reibkräften und sinusförmiger Erregerkraft	503
6.66	Schwinger mit Reibkräften und linearen Dämpfungskräften ("kombinierte Dämpfung") bei sinusförmiger Erregerkraft	515

6.67 Schwinger mit kombinierter Dämpfung bei periodischer Erregerkraft 519

6.68 Andere stark nichtlineare Differentialgleichungen . . . 526

6.7 Aktive Systeme; Mitnahme 527

6.70 Beispiele, Definition 527

6.71 Mitnahme bei einer nicht-linearen Differentialgleichung, die abschnittsweise linear ist 534

6.72 Mitnahme bei der van der Polschen Differentialgleichung 549

Literaturverzeichnis 567

Sachverzeichnis 573

Inhalt von Teil A

Kapitel 1: Allgemeine (phänomenologische) Schwingungslehre

1.1 Schwingungen; periodische Schwingungen

1.11 Einleitung

1.12 Periodische Schwingungen

1.13 Die Phasenebene

1.2 Harmonische Schwingungen

1.21 Definition und Bestimmungsstücke

1.22 Die erzeugende Kreisbewegung

1.23 Komplexe Schreibweise, Drehzeiger; Phasenverschiebung

1.24 Zusammensetzen harmonischer Schwingungen

1.25 Produkte harmonisch schwingender Größen

1.3 Sinusverwandte Schwingungen

1.31 Modulierte Schwingungen

1.32 Schwebungen

1.4 Fourier-Reihen; Fourier-Transformation; Spektraldarstellung von Schwingungen

1.41 Fourier-Summen, Fourier-Reihen

1.42 Fourier-Analyse

1.43 Komplexe Darstellung der Fourier-Reihe

1.44 Fourier-Transformation; Spektraldichte

1.45 Laplace-Transformation

Kapitel 2: Bewegungsgleichungen

2.1 Vorbetrachtungen

2.11 Reales Gebilde und mechanisches Modell; Zustandsgrößen; Phasenraum und Bewegungsraum

- 2.12 Beispiele für Bewegungsgleichungen von mechanischen Gebilden und in elektrischen Schaltkreisen
- 2.2 Das systematische Aufstellen von Bewegungsgleichungen; die Prinzipie der Mechanik
 - 2.20 Vorbemerkungen und Kinematik
 - 2.21 Das Newtonsche Prinzip
 - 2.22 Gleichgewichtsbetrachtung mit d'Alembertschen Kräften; das d'Alembertsche Prinzip
 - 2.23 Das Prinzip der virtuellen Arbeiten (mit d'Alembertschen Kräften)
 - 2.24 Die Lagrangesche Vorschrift
 - 2.25 Das Hamiltonsche Prinzip
 - 2.26 Herleitung der Bewegungsgleichung aus dem Energiesatz
- 2.3 Erörterungen über die Bewegungsdifferentialgleichungen
 - 2.31 Einteilung und Benennungen
 - 2.32 Linearisieren
 - 2.33 Dimensionslose Schreibweise

Kapitel 3: Freie Schwingungen linearer Systeme

- 3.1 Freie ungedämpfte Schwingungen
 - 3.10 Lösung der Bewegungsgleichung; Einteilung der Schwinger
 - 3.11 Punktkörperpendel im Schwerfeld; Kreispendedel (mathematisches Pendel), Zykloidenpendel
 - 3.12 Punktkörperpendel am Umfang einer rotierenden Scheibe (Welle)
 - 3.13 Starrkörperpendel (physikalisches Pendel)
 - 3.14 Weitere Arten von Pendeln: Translatorisches Pendel, Mehrfadendrehpendel, Rollpendel
 - 3.15 Schwingungen in und von Flüssigkeiten: Tauchschwingungen, Schwingungen einer Flüssigkeitssäule
 - 3.16 Reduzierte Pendellängen
 - 3.17 Elastische Schwinger
 - 3.18 Federsteifigkeiten verschiedener Anordnungen
- 3.2 Freie gedämpfte Schwingungen

- 3.20 Bewegungsgleichungen und ihre Lösungen
- 3.21 Starke Dämpfung; kriechendes Abklingen
- 3.22 Schwache Dämpfung; schwingendes Abklingen
- 3.23 Drehzeiger und Phasendiagramm
- 3.24 Dämpfung durch Coulombsche Reibkräfte
- 3.25 Quadratische und andere Dämpfungskräfte; Hinweise .
- 3.3 Freie Schwingungen kontinuierlicher Gebilde
 - 3.30 Übersicht, Einteilung
 - 3.31 Der homogene längsschwingende (ungedämpfte) Stab und seine Analoga; Ränder fest oder frei
 - 3.32 Der homogene längsschwingende Stab mit anderen Randbedingungen
 - 3.33 Der längsschwingende Stab mit ortsabhängigen Parametern
 - 3.34 Der querschwingende Balken
 - 3.35 Balkenschwingungen; Beispiele für verschiedene Randbedingungen
 - 3.36 Angenäherte Berechnung der niedrigsten Eigenfrequenz

Kapitel 4: Fremderregte Schwingungen linearer Gebilde

- 4.1 Vorbetrachtungen
 - 4.11 Benennungen; Einteilung der Einwirkungen
 - 4.12 Störfunktionen ohne spezifizierten Verlauf; Duhamel-Integral; Faltungsintegral
 - 4.13 Beispielschwinger
- 4.2 Periodische Einwirkungen über Störfunktionen
 - 4.20 Die erzwungene Schwingung; Dauerschwingung und Einschwingvorgang
 - 4.21 Die erzwungene harmonische Schwingung in komplexer Schreibweise; zwei Tripel von Vergrößerungsfaktoren \underline{V}_k
 - 4.22 Darstellung und Diskussion der Vergrößerungsfaktoren \underline{V}_k : Ortskurven, Beträge und Winkel, Resonanzbereich, Winkelresonanz und Halbwertsbreite
 - 4.23 Die logarithmische Darstellung der Vergrößerungsfaktoren; die "Schwingungstapete"

- 4.24 Einfluß der Systemparameter auf die Schwingungsamplituden
- 4.25 Vergrößerungsfunktionen in der Meß- und Registriertechnik; Fehlerbetrachtungen
- 4.26 Das Abschirmen von Schwingungen; die Übertragungsfunktion V_T ; Aktiv- und Passiv-Isolierung
- 4.27 Allgemein periodische Anregungen: Fourier-Komponenten der einwirkenden und der resultierenden Funktion
- 4.28 Erzwungene Schwingungen von Gebilden mit verteilter Masse und verteilten Erregerkräften
- 4.3 Periodische Einwirkungen auf Systemparameter; parametererregte Schwingungen
 - 4.31 Einführendes Beispiel; Bewegungsgleichungen mit zeitabhängigen Koeffizienten
 - 4.32 Lösungen der homogenen Differentialgleichung mit periodischen Koeffizienten; Theorem von Floquet, Stabilitätsbetrachtungen
 - 4.33 Hillsche Differentialgleichungen; charakteristische Multiplikatoren, Stabilitätskarten
 - 4.34 Lösungen der inhomogenen Differentialgleichung mit periodischen Koeffizienten
 - 4.35 Hinweise zur Berechnung der Lösungen
 - 4.36 Beispiele für Schwinger mit rheolinearen Bewegungsgleichungen
- 4.4 Nicht-periodische (aber schwingende) Einwirkungen durch Störkräfte; Anlaufen, Auslaufen, Resonanzdurchgang
 - 4.41 Die Gebilde, ihre Bewegungsgleichungen und deren Integrale
 - 4.42 Erregerkraft mit konstanter Amplitude
 - 4.43 Unwuchterregung
- 4.5 Nicht-periodische, stoßartige Einwirkungen
 - 4.50 Übersicht
 - 4.51 Die Bewegungsgleichung und ihre Lösungsansätze; Faltungsintegral, Fourier-Integral
 - 4.52 Stoßartige Vorgänge sowie ihre Beschreibung durch Zeitfunktionen und Spektralfunktionen
 - 4.53 Das Schocknetz und das Schockpolygon; Klassifizierung von Schockeinwirkungen
 - 4.54 Umformungen der Lösungsgleichungen

- 4.55 Die Lösungen bei Einwirkungen von unendlich kurzer Dauer (Einschaltfunktionen)
- 4.56 Näherungen für die Maximalwerte der Systemantwort bei stoßartigen Einwirkungen von kurzer ("mäßiger") Dauer; eine anschauliche Deutung des Faltungsintegrals
- 4.57 Stoßartige Einwirkungen von nicht eingeschränkter Dauer; "exakte" Lösungen
- 4.58 Die Systemantwort; das bewertete Schockpolygon (Schockantwortpolygon)
- 4.59 Die Schockverträglichkeitsgrenzen eines Systems; das Schockverträglichkeitspolygon