

**Die\ferbrennuiigs\*  
kraftmaschine**

**Herausgegeben von**

**Hans List und Anton Pischinger**

**Neue Folge**

**Band 3**

# Theorie der Triebwerksschwingungen der<sup>^</sup>ferbrennungs\* kraftmaschine

**K\* E. Hafner/H. Maass**

**Springer Aferlag**  
Wien NewYark



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Schwingungsprobleme des Motortriebwerks . . . . .	1
1.2	Schwingungserregung des Hubkolbenmotors. . . . .	2
1.3	Resonanz. . . . .	4
1.4	Erzwungene Torsionsschwingungen . . . . .	5
1.5	Aufgaben der Triebwerksberechnung . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Berechnungsmodelle der Schwingungstechnik</b>	<b>6</b>
	<b>Harmonische Schwingungen</b>	<b>12</b>
3.1	Definition harmonischer Schwingungen. . . . .	13
3.2	Phasenverschiebung harmonischer Schwingungen. . . . .	16
3.3	Addition harmonischer Schwingungen. . . . .	17
3.4	Differentiation und Integration harmonischer Schwingungen. . . . .	18
3.5	Multiplikation harmonischer Schwingungen . . . . .	19
3.6	Multiplikation und Division komplexer Amplituden. . . . .	20
3.7	Analytische Darstellung rotierender Zeiger. . . . .	22
	<b>Periodische Schwingungen</b>	<b>23</b>
4.1	Definition periodischer Schwingungen. . . . .	23
4.2	Addition harmonischer Schwingungen verschiedener Frequenzen. . . . .	24
4.3	FOURIER-Reihen und FOURIER-Polynome. . . . .	26
4.4	Harmonische Analyse. . . . .	31
4.5	Harmonische Synthese. . . . .	39
4.6	Phasenverschiebung periodischer Funktionen. . . . .	44
4.7	Multiplikation trigonometrischer Polynome. . . . .	48
	<b>Freie Schwingungen</b>	<b>50</b>
5.1	Eigenschwingungen von ungedämpften Systemen mit einem Freiheitsgrad . . . . .	51
5.1.1	Physikalisches Pendel. . . . .	51
5.1.2	Rotierendes Pendel. . . . .	52
5.1.3	Feder-Masse-System . . . . .	53
5.2	Eigenschwingungen von gedämpften Systemen mit einem Freiheitsgrad . . . . .	58

5.3	Ungedämpfte Eigenschwingungen einfacher Torsionsschwingungssysteme . . . . .	62
5.3.1	Eigenschwingungen von Kettensystemen . . . . .	62
5.3.2	Eigenfrequenzen von 3-Massen-Systemen . . . . .	64
5.3.3	Eigenschwingungsformen . . . . .	70

## **Erzwungene harmonische Schwingungen** 76

6.1	Grundlagen . . . . .	77
6.1.1	Einschwingvorgänge . . . . .	77
6.1.2	Vergrößerungsfunktionen . . . . .	80
6.1.3	Anwachsen der Schwingungsamplituden in Resonanz . . . . .	81
6.1.4	Resonanz kurven . . . . .	82
6.1.5	Halbwertsbreite . . . . .	84
6.1.6	Phasenverschiebungswinkel . . . . .	85
6.1.7	Ortskurven . . . . .	87
6.2	Einfluß von Erregung und Dämpfung auf die erzwungenen Schwingungen einfacher Systeme . . . . .	88
6.2.1	Definition weiterer Vergrößerungsfunktionen . . . . .	88
6.2.2	Frequenzunabhängiger Dämpfungskoeffizient . . . . .	90
6.2.3	Werkstoff dämpfung . . . . .	91
6.2.4	Propellerdämpfung . . . . .	93
6.2.5	Vergrößerungsfunktionen und Ortskurven der Wegamplitude . . . . .	93
6.2.6	Vergrößerungsfunktionen und Ortskurven der Kraftamplituden . . . . .	97
6.3	Berechnung der erzwungenen Schwingungen von Schwingungsketten . . . . .	99
6.3.1	Bewegungsgleichungen und Lösungsansatz . . . . .	100
6.3.2	Verfahren von HOLZER . . . . .	102
6.4	Scheinresonanz und Ungleichförmigkeitsgrad bei Torsionsschwingungssystemen . . . . .	105
6.5	Begrenzung erzwungener Schwingungen durch Schwingungsdämpfer . . . . .	109
6.5.1	Parameter zur Auslegung von Schwingungsdämpfern . . . . .	110
6.5.2	Verlagerungseffekt des elastisch gekoppelten Schwingungsdämpfers . . . . .	111
6.5.3	Einfluß von Dämpfungskoeffizient und Dämpfergröße . . . . .	112
6.5.4	Optimaler Abstimmfaktor bei elastischer Koppelung des Dämpfers . . . . .	114
6.5.5	Beanspruchung des Torsionsschwingungsdämpfers . . . . .	118
6.5.6	Reine Dämpfungskoppelung . . . . .	121

## **Erzwungene periodische Schwingungen** 124

7.1	Methode der harmonischen Analyse und Synthese . . . . .	124
7.2	Beispiel einer periodischen erzwungenen Schwingung . . . . .	125

## **8 Erzwungene nichtperiodische Schwingungen** 130

8.1	Einmaliger Drehmomentenstoß . . . . .	130
8.2	Durchfahren von kritischen Drehzahlen . . . . .	131
8.3	Kurzschluß bei Drehstromaggregaten . . . . .	135

## **9 Biegeschwingungen des Motortriebwerks 100**

9.1	Vorbemerkungen . . . . .	
9.2	Starr gelagerter LAVAL-Läufer unter Unwuchterregung . . . . .	
9.2.1	Bewegungsablauf im raumfesten Koordinatensystem . . . . .	.142
9.2.2	Verwendung der komplexen Zahlenebene . . . . .	.146
9.3	Darstellung und Auswirkung einer harmonischen Krafterregung mit raumfester Richtung . . . . .	.151
9.3.1	Darstellung der Kolbenmotorenerregung mit Hilfe komplexer Zahlen . . . . .	.151
9.3.2	Auswirkung der Kolbenmotorenerregung auf eine rotierende Welle mit punktförmiger Masse . . . . .	.155
9.3.3	Harmonische der Biegeschwingungserregung von Kolbenmotoren . . . . .	.159
9.4	Einfluß der Kreiselwirkung des Rotors . . . . .	.164
9.4.1	Trägheitswirkung des Rotors . . . . .	.164
9.4.2	Bewegungsgleichungen der einfach besetzten Welle . . . . .	.167
9.4.3	Eigenfrequenzen der rotierenden Welle . . . . .	.169
9.4.4	Erzwungene ungedämpfte Biegeschwingungen und Resonanzdrehzahlen des Gleich- und Gegenlaufs . . . . .	.171
9.5	Bemerkungen zu den Biegeschwingungen der Kurbelwellen . . . . .	.181
9.5.1	Berechnungsmodelle . . . . .	.181
9.5.2	Ersatzerregerkraft . . . . .	.183
9.5.3	Anisotrope Biegesteifigkeit der Kurbelwelle . . . . .	.185

## **10 Torsionsschwingungsmodelle des Motortriebwerks 193**

10.1	Vorbemerkungen . . . . .	.193
10.2	Modelle der Kurbelkröpfung . . . . .	.195
10.3	Kurbelwelle mit Kurbelgetrieben . . . . .	.197
10.4	Hilfsantriebe . . . . .	.199
10.5	Analyse der System Strukturen . . . . .	.200
10.6	Aufstellung der Bewegungsgleichungen der Massen . . . . .	.203

## **11 Verzeichnis der FORTRAIM-Programmlisten 210**

## **12 Literaturverzeichnis 211**

## **13 Sachverzeichnis 213**