

Die\ferbrennungs- kraftmaschine

**Herausgegeben von
Hans List und Anton Pischinger**

**Neue Folge
Band 2**

Kräfte« Momente und deren Ausgleich in der Verbrennungs- kraftmaschine

H. Maass/H. Klier

Spring Verlag
Wien New York



Inhaltsverzeichnis

1 Einführung

1.1 Das Triebwerk des Hubkolbenmotors	3
1.1.1 Die Gaskräfte	7
1.1.2 Die oszillierenden Massenkräfte	9
1.1.3 Die rotierenden Massenkräfte	11
1.1.4 Sondertriebwerke	13
1.2 Das Maß- und Einheitensystem	16
1.3 Definitionen und Begriffe	19

2 Die Kinematik und Dynamik des Kurbeltriebes 19

2.1 Die Kinematik des Schubkurbelgetriebes	20
2.1.1 Normaler Kurbeltrieb	21
2.1.1.1 Der Kolbenweg	21
2.1.1.2 Die Kolbengeschwindigkeit	22
2.1.1.3 Die Kolbenbeschleunigung	24
2.1.2 Der geschränkte Kurbeltrieb	26
2.1.2.1 Der Kolbenweg	28
2.1.2.2 Die Kolbengeschwindigkeit	29
2.1.2.3 Kolbenbeschleunigung	30
2.1.3 Der Kurbeltrieb mit Anlenkpleuel	32
2.1.3.1 Der Kolbenweg	33
2.1.3.2 Die Kolbengeschwindigkeit	36
2.1.3.3 Die Kolbenbeschleunigung	38
2.2 Die Kraftzerlegung am Schubkurbelgetriebe	42
2.2.1 Normaler Kurbeltrieb	42
2.2.2 Geschränkter Kurbeltrieb	47
2.2.3 Kurbeltrieb mit Anlenkpleuel	52

3 Die Gaskräfte 56

3.1 Gasdruckverlauf	57
3.1.1 Messung des Gasdruckverlaufes	59
3.2 Thermodynamische Kreisprozeßrechnung	61

3.3 Einfache Vergleichsprozesse	62
3.4 Maximaler Verbrennungsdruck	70
3.5 Streuungen der Verbrennungsdrücke	73
3.6 Ladedruck	76
3.7 Mitteldruck, Leistung, Reibungsverluste	79

4 Die Massenwirkungen der Verbrennungs- kraftmaschine **85**

4.1 Massenkräfte und Massenmomente	87
4.1.1 Masse, Schwerpunkt und Massenträgheitsmoment	93
4.1.2 Die Reduktion der Massen	96
4.1.3 Einfluß der Übersetzungen	97
4.2 Die Massenverteilung des Einzeltriebwerkes	98
4.2.1 Die rotierenden Massen	99
4.2.2 Die oszillierenden Massen	100
4.2.3 Die Massenaufteilung und Massenwirkung der Pleuelstange	102
4.2.3.1 Die Massenkraft der Pleuelstange	104
4.2.3.2 Das Massendrehmoment der Pleuelstange	105
4.2.3.3 Auswirkung der Aufteilung der Pleuelmasse	108
4.2.3.4 Einfluß der Drehungleichförmigkeit der Kurbelwelle	110
4.3 Die Massenwirkungen des Einhubtriebwerkes	113
4.3.1 Kurbeltrieb mit einfachem Stangenanpriff	113
4.3.1.1 Normaler Kurbeltrieb	114
4.3.1.2 Geschränkter Kurbeltrieb	114
4.3.2 Einhub-Kurbeltrieb mit mehrfachem Stangenangriff	115
4.3.2.1 Die zentrische oder unmittelbare Pleuelanlenkung	115
4.3.2.2 Die exzentrische Anlenkung mehrerer Schubstangen	117
4.3.2.3 Vergleich der Massenwirkung von Schubkurbel- getrieben mit zentrischer und exzentrischer Pleuelanlenkung	119
4.4 Das Massendrehmoment bzw. der Massentangentendruck des einzelnen Kurbeltriebes	121
4.4.1 Normaler Kurbeltrieb	122
4.4.2 Geschränkter Kurbeltrieb	123
4.5 Tabellen für verschiedene Motorenausführungen und Erläuterun- gen zum Gebrauch dieser Tabellen	124
4.5.1 Auswahl von Bauvarianten	130
4.5.2 Massenkräfte und Massenmomente	130
4.5.3 Innere Biegemomente	131
4.5.4 Wechsel drehmomente und Zündfolgen	131

5 Der Massenausgleich der Verbrennungskraftmaschine 132

5.1 Der Ausgleich von Massenkräften	134
5.1.1 Der Massenkraftausgleich des Einhubtriebwerkes	135
5.1.2 Massenkraftausgleich bei mehrfach gekröpften Kurbelwellen	141
5.2 Massenmomente und deren Ausgleich	145
5.3 Innere Biegemomente	152
5.4 Einfluß rotierender Ausgleichsmassen auf das Querkippmoment	155
5.4.1 Wechseldrehmoment durch rotierende Ausgleichsmassen	156
5.4.2 Ausgleich des Gas- und Massen-Wechseldrehmomentes	157
5.4.2.1 Einzylindermotor	158
5.4.2.2 Vierzylinder-Reihenmotor	160

Das Drehkraftdiagramm der Verbrennungskraftmaschine 164

6.1 Das Tangentialdruckdiagramm	164
6.1.1 Der Tangentialdruck des Einzelzylinders	165
6.1.2 Der Tangentialdruck bei Mehrzylindermotoren	167
6.2 Mitteldruck, Drehmoment und Leistung	170
6.3 Darstellung des Tangentialdruckes durch Harmonische	171
6.3.1 Überlagerung der harmonischen Wirkungen bei Mehrzylindermotoren	173
6.3.2 Überlagerung zweier an einer Kröpfung arbeitender Zylinder	178
6.3.3 Einflußparameter und näherungsweise Ermittlung der harmonischen Tangentialdrücke	181
6.3.4 Abweichungen der Praxis von den idealen Zusammenhängen	182

Der Drehmomenten- und Wuchtausgleich 188

7.1 Das Schwungrad als Energiespeicher	190
7.1.1 Das Verfahren nach Radinger (1892)	191
7.1.1.1 Aufzuspeichernde Arbeit	193
7.1.1.2 Ungleichförmigkeitsgrad	196
7.1.1.3 Schwungmasse und Schwungmoment	197
7.1.2 Die näherungsweise Berechnung des erforderlichen Schwungmomentes ohne Aufzeichnung der Drehkraftkurve	198
7.1.3 Das Verfahren nach Witfenbauer	203
7.1.3.1 Wucht eines Kurbeltriebes	204
7.1.3.2 Wucht bei Mehrzylindermaschinen	210
7.1.3.3 Arbeitsdiagramm	211
7.1.3.4 Trägheits-Energie-Diagramm	214
7.1.3.5 Ungleichförmigkeitsgrad	218

7.1.3.6	Zusatz-Schwungmasse (Schwungrad)	219
7.1.3.7	Vergleich der verschiedenen Zylinderzahlen	220
7.1.4	Einfluß der Schwankung des Massenträgheitsmomentes und der Parameter-Erregung auf den Ungleichförmigkeitsgrad	224
7.2	Anforderungen an den Gleichlauf	227
7.2.1	Allgemeine Angaben zum erforderlichen Ungleichförmigkeitsgrad	228
7.2.2	Abweichungen vom Gleichlauf	228
7.2.2.1	Geschwindigkeitsverlauf	228
7.2.2.2	Beschleunigungsverlauf	229
7.2.2.3	Pendelwinkel	230
7.3	Der Wuchtausgleich in der Verbrennungsmaschinenanlage	231
7.3.1	Der Generatorbetrieb	231
7.3.1.1	Periodische Spannungsschwankungen in Lichtnetzen	234
7.3.1.2	Parallelbetrieb von Synchronmaschinen	235
7.3.1.3	Speicherradaggregate	236
7.3.1.4	Schwungmoment und Regelung bei Diesel-Maschinen	237
7.3.2	Der Schiffshauptmotor	238
7.3.2.1	Drehmoment- und Drehzahlschwankungen beim Zusammenwirken von Motor und Propeller	238
7.3.2.2	Das Anlassen und Umsteuern der Verbrennungskraftmaschine	239
7.3.2.3	Niedrige Betriebsdrehzahlen	241

8 Folgerscheinungen der freien Gas- und Massenwirkungen und deren Auswirkungen auf die Aufstellung und das Betriebsverhalten des Motors 242

8.1	Nicht ausgeglichene Kräfte und Momente und Motoraufstellung	242
8.2	Linearer Ein-Massen-Schwinger mit einem Freiheitsgrad	245
8.3	Linearer Zwei-Massen-Schwinger mit einem Freiheitsgrad	252
8.3.1	Erregung an der äußeren Masse m_1	252
8.3.2	Erregung an der inneren Masse m_2	255
8.4	Schwinger mit mehreren Freiheitsgraden	258
8.5	Schlußfolgerungen und Hinweise zur Lagerung eines Hubkolbenmotors	264
8.5.1	Starre Lagerung	264
8.5.2	Elastische Lagerung	265
8.6	Auswuchten	267
8.6.1	Allgemeine Hinweise	267
8.6.2	Dynamik des Wuchtkörpers, Begriffe, Richtlinien	270
8.6.3	Auswuchtfragen bei Hubkolbenmotoren	274

9 Die Festigkeitsrechnung eines Schwungrades 277

9.1 Berechnung unter vereinfachten Annahmen	277
9.2 Festigkeit des Scheibenschwungrades	279
9.2.1 Umlaufende, volle Scheibe gleicher Wandstärke	280
9.2.2 Scheibe gleicher Stärke mit Bohrung in der Mitte	283
9.2.3 Berechnung der Spannungen in Scheibenschwungrädern	285
9.3 Berechnung von Tangential- und Radialspannungen beliebig geformter Scheiben	291
9.4 Berechnung beliebig geformter Schwungscheiben mit Hilfe der FE-Methode mit zweidimensionalem Rechenansatz	301
9.5 FE-Methode, dreidimensional	303
9.6 Integralgleichungsmethode	307
9.7 Zusatzbeanspruchungen am Schwungrad im praktischen Einsatz	308
9.7.1 Biegebeanspruchungen durch dynamische Zusatzkräfte	308
9.7.2 Thermische Beanspruchungen	308
9.7.3 Der Festsitz eines Schwungrades	309
9.8 Festigkeit der Schwungradwerkstoffe	309
9.9 Ergebnisse am Schleuderprüfstand	311
9.10 Die Reibungsleistung von Schwungrädern	312

10 Zusatzkräfte an Triebwerk, Kurbelgehäuse und Fundament 313

10.1 Das Ausrichten von Anlagen mit Verbrennungskraftmaschinen	313
10.1.1 Grundlagen der Maschinenausrichtung	314
10.1.2 Das Ausrichten einer Anlage mit Hubkolbenmotor	315
10.1.3 Motoren mit Außenlagern	316
10.1.4 Ausrichten eines Motors zu einem vorgegebenem Außenlager	317
10.1.5 Ausrichten von Schiffsmotoren mit außenliegendem Drucklager	318
10.1.6 Ausrichten von Motoren mit freifliegenden Schwungrädern	319
10.1.7 Ausrichten von Motoren mit Abstützung des Schwungrades über eine elastische Kupplung	320
10.1.8 Ausrichten von Motoren mit hydraulischer Kupplung	321
10.1.9 Ausrichten von Einlagergeneratoren	323
10.1.10 Ausrichten von Arbeitsmaschinen mit zwei Lagern	324
10.1.11 Grundsätzliches zum Ausrichten von Maschinen	326
10.2 Einfluß der Kurbelschenkelatmung auf die Gesamtbeanspruchung der Kurbelwelle	328
10.2.1 Kurbelschenkelatmung	329
10.2.2 Kurbelschenkelatmung und Kurbelwellenbeanspruchung	329

10.2.3	Änderung des Beanspruchungsverlaufes durch Biegeverformung	330
10.2.4	Kurbelschenkelatmung in horizontaler Kröpfungs-lage	332
10.2.5	Einfluß der Kurbelschenkelatmung auf die Gesamtbeanspruchung der Kurbelwelle	332
10.2.6	Einfluß der Kurbelschenkelatmung auf die Lagerbelastung	333
10.2.7	Biegeelastizität der Kurbelwelle in Abhängigkeit von den Kurbelwellenabmessungen	334
10.3	Zusatzbelastungen durch Fertigungsabweichungen, Verschleiß, Kurbelgehäusedeformationen und unzureichende Fundamentierung	337
10.3.1	Kurbelwellenschlag	337
10.3.2	Die nicht fluchtende Lagergasse	338
10.3.3	Der Grundlagerschaden	339
10.3.4	Die Erwärmung der Kurbelgehäuse	340
10.3.5	Fundamentverformungen	343
10.3.6	Fundamentalschwingungen	346
10.3.7	Fundamentverschraubungen	348
10.4	Schwingungen des Triebwerkes	349
10.4.1	Schwingungen	349
10.4.2	Torsionsschwingungen	356
10.4.3	Biegeschwingungen	367
10.4.4	Längsschwingungen	378
10.4.5	Gehäuseschwingungen	381

11 Nachtrag

Mathematische und technische Hilfsmittel 386

11.1	Theoria und numerische Durchführung der harmonischen Analyse	386
11.2	Formeln zur Ermittlung von Flächen, Massen, Schwerpunkt und Massenträgheitsmoment	397
11.3	Verfahren mittels Zylinderschnitten	402
11.3.1	Verfahren mittels Parallelschnitten	403
11.4	Mechanische Geräte zur Bestimmung von Fläche (Masse) und Trägheitsmoment	404
11.4.1	Die Flächenbestimmung mittels Planimeter	404
11.4.2	Kurvengesteuerter Integrator	405
11.4.3	Der harmonische Analysator zur Bestimmung der FOURIERSchen Reihe	406
11.5	Versuchstechnische Ermittlung von Masse, Massenträgheitsmoment und Schwerpunkt	406
11.5.1	Pendelversuch in der horizontalen Ebene um die lotrechte Schwerachse	407
11.5.2	Pendelversuch in der vertikalen Ebene um eine zur Schwerachse parallele Achse	409
11.5.3	Bestimmung des Massenträgheitsmomentes aus der Schwingfrequenz eines Ein-Massen-Schwingers	412
11.5.4	Bestimmung des Schwerpunktes der Pleuelstange durch Auswiegen	413

12 Literaturverzeichnis 414

13 Sachverzeichnis 417

14 Nachwort 421