

Sylvester Abanteriba, M. Sc., Hannover

Vergleich der Reibungs- verluste eines Zweitakt- Kreuzkopf- und eines Viertakt-Tauchkolbenmotors gleicher Zylinderleistung

Reihe **12**: Verkehrstechnik/
Fahrzeugtechnik

Nr. **151**

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Problemstellung und Zielsetzung	3
2.1	Allgemeines	3
2.2	Der langsamlaufende 2-Takt-Kreuzkopfmotor	6
2.2.1	Das Kreuzkopfbolzenlager	6
2.2.2	Die Kreuzkopfführung	7
2.2.3	Das System Kolben – Kolbenring – Zylinderlaufbuchse	8
2.2.4	Das System Kolbenhemd – Zylinderlaufbuchse	10
2.2.5	Pleuel- und Hauptlager	10
2.2.6	Die Kolbenstangenstopfbuchse	11
2.3	Der mittelschnelllaufende 4-Takt-Tauchkolbenmotor	12
2.3.1	Das System Kolben – Kolbenring – Zylinderlaufbuchse	12
2.3.2	Das System Kolbenhemd – Zylinderlaufbuchse	12
3	Die Mechanik des Triebwerks	14
3.1	Kinematik des Triebwerks	15
3.1.1	Die Kurbelwelle	15
3.1.2	Die Kolbengruppe	16
3.2	Sekundäre Bewegungen	19
3.2.1	Radiale Bewegung	19
3.2.2	Translatorische Geschwindigkeit	20
3.3	Kinetik des Triebwerks	20

3.3.1	Kräfte an der Tauchkolbengruppe bzw. Kolbengruppe des Kreuzkopfmotors . .	21
3.3.2	Das Kolbenbolzen- und Kreuzkopflager	24
3.4	Kräfte am Kurbeltrieb	24
3.4.1	Das Pleuellager	25
3.4.2	Das Grundlager	27
3.5	Der Kolben des Kreuzkopfmotors	29
4	Kinetik des Kolbenrings	32
4.1	Das Labyrinthmodell	32
4.1.1	Die Bestimmung der Gasdruckverteilung im Ringpaket	33
4.2	Kräfte auf den Ring	34
4.2.1	Kräfte in tangentialer Richtung	34
4.2.2	Kräfte in radialer Richtung	35
4.2.3	Kräfte in axialer Richtung	35
4.2.4	Reaktionskräfte der Ringnutflanke	37
4.2.5	Radialkräfte	38
4.2.6	Berücksichtigung der Reibkraft zwischen Ringflanke und Kolbennut	39
4.2.7	Kinematik der Kompressionsringe	41
4.2.8	Bewegung in axialer Richtung	41
4.2.9	Das Flattern des Kompressionsrings	42
4.2.10	Die Radialbewegung der Ringe	42
5	Wesen der Schmierungsarten	44
5.1	Die hydrodynamische Schmierung	44
5.1.1	Druckaufbau durch Verdrängung	44
5.1.2	Druckaufbau durch Scherströmung	45
5.2	Die hydrostatische Schmierung	47
5.3	Die hybride Schmierung	47

6 Die Reynoldssche Differentialgleichung	49
6.1 Allgemeines	49
6.2 Annahmen für die Berechnung	49
6.3 Ableitung der benutzten Gleichung	50
6.4 Kontinuität der Spaltströmung	52
6.5 Strömung in vertikaler Richtung	53
6.6 Das Gleichgewicht an einem Volumenelement	54
7 Schmierverhältnisse an Motorlagern	56
7.1 Das Kolbenring – Zylinderbuchse – System	56
7.1.1 Das Ringprofil	56
7.1.2 Die Geometrie der Zylinderbuchse	57
7.1.3 Die Schmierfilmgeometrie	57
7.2 Rechenmodelle	57
7.3 Die Lösung der Reynoldsschen Differentialgleichung für das tribologische System Kolbenring – Zylinderbuchse	59
7.3.1 Die numerische Lösung	62
7.3.2 Berechnung der Tragkraft durch Druck-Integration	64
7.3.3 Computer-Speicherplatzersparnis	67
7.3.4 Rechenzeit-Ersparnis	68
7.3.5 Das Programm RINGFRIC	69
7.4 Kolbenhemd – Zylinderbuchsen – System des 4-Takt-Tauchkolbenmotor	70
7.4.1 Modelle zur Untersuchung der Schmierverhältnisse	71
7.4.2 Die Anwendung der Reynoldsschen Differentialgleichung zur Untersuchung des Kolbenhemd – Zylinderbuchsen – Systems	71
7.4.3 Druckentwicklung im Kolbenhemd – Zylinderbuchsen – System	71
7.4.3.1 Bewegung in axialer Richtung	72
7.4.3.2 Bewegung in radialer Richtung	72
7.4.3.3 Kippbewegung um die Kolbenbolzenachse	72
7.4.4 Die Spaltgeometrie	72
7.4.5 Die numerische Lösung	74

7.5	Kolbenhemd – Zylinderbuchsen – System des 2-Takt-Kreuzkopfmotors	75
7.5.1	Das Modell	75
7.5.2	Die Schmierspaltgeometrie	76
7.6	Die Kreuzkopfführung	76
7.6.1	Einfluß der Parameter auf den Ölfilmaufbau	85
7.6.2	Einfluß des Breiten/Längen-Verhältnisses auf die Schmierfilmhöhe	86
7.7	Das Kreuzkopflager	87
7.7.1	Das konventionelle Lager	87
7.7.1.1	Hydrostatische Schmierung während der Hochdruckphase	88
7.7.2	Druckfilm zwischen Welle und Lagerschale	90
7.7.3	Hydrodynamische Schmierung des Kreuzkopflagers	93
7.8	Der Kurbeltrieb	97
7.8.1	Das theoretische Rechenmodell	98
7.8.2	Anwendung der RDGL zur Untersuchung der Tribologie des Kurbeltriebs	99
7.8.2.1	RDGL für reine Verdrängung	100
7.8.2.2	RDGL für reine Drehbewegung	100
7.8.3	Randbedingungen	101
7.8.4	Die Sommerfeldzahlen	102
7.8.4.1	Die Sommerfeldzahl für Drehung S_{oD}	102
7.8.4.2	Die Sommerfeldzahl für Verdrängung S_{oV}	102
7.8.5	Die Tragkraft	102
8	Mechanische Verluste des Motors	107
8.1	Experimentelle Arbeiten zur Bestimmung der Kolbengruppenreibverluste	108
8.1.1	Die indirekte Methode	109
8.1.1.1	Einfluß der Geometrie der Kolbengruppe	109
8.1.1.2	Einfluß der Geometrie der Kolbenhemdfläche	110
8.1.2	Betriebsparameter	111
8.1.2.1	Gasdruck im Zylinder	111
8.1.2.2	Drehzahl bzw. mittlere Kolbengeschwindigkeit	111

8.1.3	Direkte Meßmethode	111
8.2	Ermittlung der Reibverluste der Triebwerkskomponenten	114
8.2.1	Grundlagen der Reibung	114
8.2.1.1	Flüssigkeitsreibung	114
8.2.1.2	Mischreibung	114
8.2.1.3	Mangelschmierungszustand	116
8.2.1.4	Trockenreibungszustand	116
8.2.2	Reibungsverluste am Kolbenhemd	116
8.2.3	Reibungsverluste am Kolbenhemd des 2-Takt-Kreuzkopfmotors	117
8.2.4	Die Kolbenringe beider Motoren	118
8.2.5	Reibungsverluste im Kurbeltrieb und im Kolbenbolzenlager	118
8.2.6	Reibkräfte an der Kreuzkopfführung	119
8.2.7	Umsteuerbetrieb	121
8.2.8	Untersuchung der Reibungsverluste in der Kreuzkopfführung	122
8.2.9	Tribologisch minimal erreichbare Reibleistung	124
8.2.10	Ermittlung der Reibverluste im Kreuzkopflager	127
8.3	Die Kolbenstangenstopfbuchse	130
8.3.1	Der Ölring	131
9	Ergebnisse	132
9.1	Einflußparameter der Reibverluste der Motortriebwerkskomponenten	132
9.2	Drehzahleinfluß ($p_r = f(n)$)	132
9.2.1	Kolbenringe	133
9.2.2	Kolbenhemd	134
9.2.3	Kurbeltrieb	134
9.2.4	Kolbenbolzen- und Kreuzkopfbolzenlager	135
9.2.5	Kreuzkopfführung	135
9.2.6	Kolbenstangenstopfbuchse	135
9.2.7	Prozentuale Aufteilung der Triebwerksverluste	136
9.2.7.1	4-Takt-Tauchkolbenmotor	136

9.2.7.2	2-Takt-Kreuzkopfmotor	137
9.3	Lasteinfluß ($p_r = f(p_e), n = const.$)	138
9.3.1	Kolbenringe	138
9.3.2	Kolbenhemd	139
9.3.3	Kurbeltrieb	140
9.3.4	Kolbenbolzen- und Kreuzkopfbolzenlager	140
9.3.5	Kreuzkopfführung	141
9.3.6	Kolbenstangenstopfbuchse	141
9.3.7	Prozentuale Aufteilung der Triebwerksverluste	141
9.3.7.1	4-Takt-Tauchkolbenmotor	141
9.3.7.2	2-Takt-Kreuzkopfmotor	142
9.4	Propellerkennlinieneinfluß ($p_r = f(n, p_e)$)	143
9.4.1	Kolbenringe	144
9.4.2	Kolbenhemd	144
9.4.3	Kurbeltrieb	144
9.4.4	Kolbenbolzen- und Kreuzkopfbolzenlager	145
9.4.5	Kreuzkopfführung	145
9.4.6	Kolbenstangenstopfbuchse	146
9.4.7	Prozentuale Aufteilung der Triebwerksverluste	147
9.4.7.1	4-Takt-Tauchkolbenmotor	147
9.4.7.2	2-Takt-Kreuzkopfmotor	147
9.5	Temperatureinfluß	148
9.5.1	Kurbeltrieb	148
9.5.2	Kolbengruppe	150
9.6	Der Einfluß der Ölsorten	152
9.6.1	Hub/Bohrungs-Verhältnis s/D	153
9.6.2	Kolbengruppe	153
9.6.3	Der theoretische Modellmotor	153
9.6.4	Breiten- und Flächenverhältniseinfluß ($\vec{B}/L, A_1/A_2$)	154
9.6.5	Minimal erreichbarer Reibmitteldruck der Kreuzkopfführung	157

10 Vergleichbarkeit des Kreuzkopf- und des Tauchkolbenmotors	159
10.1 Konstruktive Daten	159
10.1.1 Kolbengruppe	159
10.1.2 Kurbeltrieb	160
10.2 Betriebsdaten	160
10.2.1 Kolbengruppe	160
10.2.2 Kurbeltrieb	160
10.3 Betrachtung der Reibverluste der vergleichbaren Triebwerkskomponenten des Tauchkolben- und des Kreuzkopfmotors	162
10.3.1 Drehzahleinfluß ($p_r = f(n), p_e = const.$)	162
10.3.1.1 Reibverluste der Kolbenringe	162
10.3.1.2 Kolbenhemd	163
10.3.1.3 Kreuzkopfführung mit Kreuzkopflager und Tauchkolben mit Kolbenbolzen	163
10.3.1.4 Kurbeltrieb	164
10.3.1.5 Gesamtreibverluste der beiden Motoren	165
10.3.1.6 Das theoretische Modell eines 4-Takt-Tauchkolbenmotors	166
10.3.1.7 Vergleich der mechanischen Wirkungsgrade	167
10.3.2 Lasteinfluß ($p_r = f(p_e), n = const.$)	168
10.3.2.1 Kolbenringe	168
10.3.2.2 Kolbenbolzen- und Kreuzkopflager	169
10.3.2.3 Kolbenhemd	170
10.3.2.4 Tauchkolbenhemd und Kreuzkopfführung	171
10.3.2.5 Kurbeltrieb	171
10.3.2.6 Gesamtreibverluste der beiden Motoren	172
10.3.2.7 Vergleich der mechanischen Wirkungsgrade	173
10.3.3 Propellerkennlinie ($p_r = f(n, p_e)$)	173
10.3.3.1 Kolbenringe	174
10.3.3.2 Kolbenbolzen- und Kreuzkopflager	174
10.3.3.3 Kolbenhemd	175

10.3.3.4	Kolbenhemd und Kreuzkopfführung	176
10.3.3.5	Kurbeltrieb	177
10.3.3.6	Gesamtreibverluste der beiden Motoren	177
10.3.3.7	Vergleich der mechanischen Wirkungsgrade	178

11	Zusammenfassung	179
-----------	------------------------	------------

12	Schrifttum	183
-----------	-------------------	------------