



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen

**Hochgenaue experimentelle Ermittlung der Reibungsverluste
der Kolbengruppe eines gefeuerten Motors**

Sebastian Reinhold Wolfgang Kunkel

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Veit Stefan Senner
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Wachtmeister
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Ulbrich

Die Dissertation wurde am 13.09.2011 bei der Technischen Universität München ein-
gereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 09.12.2011 angenommen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III	
Tabellenverzeichnis	V	
Gleichungsverzeichnis	VI	
Abkürzungsverzeichnis	VII	
1	Einleitung	1
2	Grundlagen Kolbengruppe	4
2.1	Allgemeine Aspekte.....	4
2.2	Grundlagen zur Tribologie.....	7
3	Bekannte Verfahren zur Messung der Kolbengruppenreibung	12
3.1	Übersicht bekannte Verfahren	12
3.2	Strip-Methode.....	13
3.3	IMEP-Methode	14
3.4	Floating-Liner Methode	17
3.4.1	Kraftaufnahmen.....	19
3.4.2	Radiale Lagerungen.....	21
3.4.3	Gaskraftkompensationen	22
4	Entwicklung des Messsystems	27
4.1	Anforderungen an das Messsystem.....	27
4.2	Verwendetes Messprinzip	29
4.3	Generation 1.....	33
4.3.1	Konstruktion	33
4.3.2	Voruntersuchungen.....	36
4.3.3	Erste Inbetriebnahme.....	44
4.3.4	Durchgeführte Verbesserungen	48
4.3.5	Reproduzierbarkeit.....	53
4.3.6	konstruktive Erkenntnisse	54
4.4	Inbetriebnahmemethodik.....	55
4.5	Generation 2.....	60
4.5.1	Konstruktion	61
4.5.2	Inbetriebnahme drucklos.....	64
4.5.3	Reproduzierbarkeit drucklos	70
4.5.4	Inbetriebnahme mit Druck – mechanisches Optimum.....	74
4.5.5	Inbetriebnahme mit Druck – Störeinflussbehebung und Plausibilisierung	78
4.5.6	Reproduzierbarkeit im realisierten Messbereich.....	87

5	Grundmotor, Motorsteuerung und Messtechnik	91
5.1	Grundmotor	91
5.1.1	Kurbelgehäuse	92
5.1.2	Kurbelwelle.....	92
5.1.3	Schwungrad	93
5.1.4	Massenausgleich	94
5.1.5	Lagerung.....	96
5.1.6	Zylinderkopf.....	98
5.1.7	Luftpfad	99
5.1.8	Prüfstandsperipherie.....	101
5.2	Motorsteuerung	101
5.3	Messtechnik.....	105
6	Eignung des Messsystems für tribologische Untersuchungen	110
6.1	Charakteristika eines Reibkraftverlaufs.....	110
6.2	Physikalische Erklärungsansätze zur Beschreibung der Tribologie der Kolbengruppe	113
6.2.1	Übertragbarkeit der Stribeck Kurve auf die Tribologie der Kolbengruppe	114
6.2.2	Mischreibung.....	116
6.2.3	Reibung im Bereich der hydrodynamischen Schmierung.....	117
6.3	Variation der Betriebsparameter	121
6.3.1	Drehzahl.....	123
6.3.2	Last	126
6.3.3	Betriebstemperatur	128
6.3.4	Ausarbeitung der wesentlichen Einflussgrößen.....	131
6.3.5	Betriebsstrategien zur Reibungsminimierung	135
6.4	Bauteiluntersuchungen.....	139
6.4.1	Variation des Ölabstreifringes.....	139
6.4.2	Kolbenvariation	146
6.4.3	Zusammenfassung der Bauteiluntersuchungen	148
7	Zusammenfassung und Ausblick	150
8	Literaturverzeichnis	155
9	Anhang	161