

Physikalische Verlustmodellierung in Wälzlagern auf Basis der numerischen Strömungsmechanik

*Physical Loss Modelling in Rolling Bearings
Based on Computational Fluid Mechanics*

Von der Fakultät für Maschinenwesen der
Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der
Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Achim Kramer geb. Feldermann

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Jacobs
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hubertus Murrenhoff

Tag der mündlichen Prüfung: 20.12.2018

Inhaltsverzeichnis

I. Nomenklatur	v
II. Abkürzungen	xvii
1 Einleitung	1
1.1 Ziel der Arbeit	3
1.2 Aufbau der Arbeit	3
2 Stand des Wissens	7
2.1 Grundlagen der Wälzlager	7
2.2 Grundlagen der Elastohydrodynamik	10
2.2.1 Hydrodynamik	11
2.2.2 Elastische Deformation	11
2.2.3 Isotherme Schmierstathöhe	12
2.3 Berechnungsmodelle für das Wälzlagerreibmoment	13
2.3.1 Empirische Modelle	14
2.3.2 Physikalische Modelle	15
2.4 Berechnungsansätze auf Basis numerischer Strömungssimulationen	19
2.4.1 Gesamtlagermodelle	20
2.4.2 Kontaktberechnung	21
2.5 Fazit	23
3 Strömungsmechanische Grundlagen	27
3.1 Erhaltungsgleichungen	27
3.2 Finite-Volumen-Methode	28
3.2.1 Grundlagen der Finite-Volumen-Methode	29
3.2.2 Diskretisierung der Erhaltungsgleichung	30
3.2.3 Interpolationsverfahren	31
3.2.4 Randbedingungen	32
3.3 Lösungsverfahren	32
4 Prüfverfahren	35
4.1 Wälzlager	35
4.2 Schmierstoff	37
4.3 EHL-Tribometer	38
4.3.1 Versuchsaufbau	38
4.3.2 Versuchsdurchführung und -auswertung	39
4.4 Vier-Lager-Radiallagerprüfstand	40

4.4.1	Versuchsaufbau	40
4.4.2	Versuchsdurchführung und -auswertung	43
5	Berechnungsmodell.....	47
5.1	Thermoelastohydrodynamische Kontakte.....	48
5.1.1	Modellierung des Festkörpers	50
5.1.2	Modellierung des Fluids.....	52
5.1.3	Interpolation zwischen Festkörper und Fluid.....	56
5.1.4	Netzstudie.....	58
5.2	Gesamtlagermodell	62
5.2.1	Modellierung der Wälzlagerströmung	62
5.2.2	Bestimmung der Plansch- und Schleppverluste.....	65
5.2.3	Netzstudie.....	66
5.3	Lagerkammermodell	71
5.3.1	Modellierung der Lagerkammer	72
5.3.2	Berechnung der Lastverteilung	74
5.3.3	Netzstudie.....	78
6	Validierung des Berechnungsmodells.....	81
6.1	Thermoelastohydrodynamische Kontakte.....	81
6.1.1	Vergleich mit Lösungen der Reynoldsgleichung.....	81
6.1.2	Vergleich mit Schmierfilmdickenmessungen	87
6.1.3	Grenzen der Reynoldsgleichung: Thermische Scherbänder	88
6.2	Gesamtlagermodell	99
6.2.1	Vergleich mit Messdaten und anderen Berechnungsmodellen.....	99
6.2.2	Visualisierung der Strömungsverhältnisse.....	102
6.2.3	Ableitung einzelner Verlustanteile.....	106
6.3	Lagerkammermodell	107
6.3.1	Visualisierung der Strömungs- und Kontaktverhältnisse.....	108
6.3.2	Vergleich mit Messdaten und anderen Berechnungsmodellen.....	111
7	Ableitung eines physikalischen Verlustmodells.....	115
7.1	Dimensionsanalyse.....	115
7.1.1	Planschverluste.....	115
7.1.2	Schleppverluste	117
7.1.3	Lastabhängige Verluste	118
7.2	Näherungsgleichungen.....	118
7.2.1	Plansch- und Schleppverluste	118

7.2.2 Lastabhängige Verluste	125
7.3 Übertragbarkeit auf andere Betriebsbedingungen und Wälzlagergrößen	126
8 Zusammenfassung und Ausblick.....	131
III. Abbildungsverzeichnis.....	xix
IV. Tabellenverzeichnis.....	xxv
V. Literaturverzeichnis.....	xxvii
A Anhang	xxxvii
A.1 Numerische Einstellungen.....	xxxvii
A.1.1 Thermoelastohydrodynamische Kontakte	xxxvii
A.1.2 Gesamtlagermodell	xxxviii
A.1.3 Lagerkammer.....	xxxviii
A.2 Dimensionsanalyse	xxxix
A.2.1 Planschverluste	xxxix
A.2.2 Schleppverluste.....	xli