

Dynamische Simulation von Wälzlagern im Mehrkörpersystem eines Kurbeltriebs als Grundlage motorakustischer Analysen

**Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines**

DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN

genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Sebastian Sonnen

**Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. (USA) Stefan Pischinger
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter W. Gold**

Tag der mündlichen Prüfung: 23.10.2012

Inhalt

1 Einleitung und Aufgabenstellung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Wälzgelagerte Kurbeltriebe	3
2.1.1 Potenzial zur Reibungsreduktion	3
2.1.2 Konstruktive Konzepte	5
2.1.3 Akustik	7
2.2 Dynamische Simulation wälzgelagerter Kurbeltriebe	9
2.2.1 Simulation der Kurbeltriebsdynamik.....	10
2.2.2 Simulation der Wälzlagerdynamik	11
3 Theoretische Grundlagen	13
3.1 Grundlagen der Wälzlagerberechnung	13
3.1.1 Geometrische und kinematische Verhältnisse.....	13
3.1.2 Elastische Verformung im Wälzkontakt	15
3.1.3 Reibung und Schmierung	17
3.1.4 Dämpfung	20
3.2 Grundlagen der Geräuscentstehung.....	21
3.2.1 Anregungs- und Übertragungsverhalten des Wälzlagers	21
3.2.2 Geräuscentstehung im Verbrennungsmotor	24
3.3 Grundlagen der dynamischen Simulation	29
3.3.1 Dynamik von Mehrkörpersystemen.....	29
3.3.2 Berücksichtigung der Strukturdynamik.....	32
4 Experimentelle Untersuchungen	38
4.1 Spezifikation des Versuchsträgers	38
4.1.1 Spezifikation des Verbrennungsmotors	38
4.1.2 Spezifikation der Kurbelwellenhauptlager	39
4.2 Messaufbau	40
4.2.1 Aufbau des Versuchsträgers.....	40
4.2.2 Messgrößen und Betriebszustände.....	41
4.3 Akustische Basismessungen.....	41
4.3.1 Luftschallmessungen	42
4.3.2 Körperschallmessungen	44
4.4 Akustische Variantenmessungen	46
4.4.1 Einfluss des Lagerkonzeptes.....	46
4.4.2 Einfluss des Lagerspiels	48
4.4.3 Einfluss des Wälzlagertyps	50
5 Entwicklung des Wälzlagermodells	53
5.1 Modellansatz zur Wälzlagersimulation	53
5.1.1 Dynamische Wälzlagersimulation	53
5.1.2 Gewählter Modellansatz	55
5.2 Modellbildung des Wälzkontakts.....	56
5.2.1 Randschichtmodell	56
5.2.2 Kontaktgeometrien und Kollisionserkennung.....	58
5.2.3 Berechnung der Kontaktkräfte	59
5.3 Modellbildung der Lagerkomponenten	62
5.3.1 Lagerringe und Wälzkörper	62

5.3.2 Lagerkäfig	63
5.4 Modellfunktionalitäten	64
5.4.1 Makrobasierter parametrischer Modellaufbau	64
5.4.2 Kommunikatorik zur Einbindung in das Kurbeltriebsmodell	64
6 Modellbildung des Kurbeltriebs	65
6.1 Definition der Systemgrenzen.....	65
6.2 Aufbau und Eigenschaften der FE-Strukturmodelle	66
6.2.1 Aufbau der Modellkomponenten.....	66
6.2.2 Validierung mit Hilfe der Modalanalyse.....	69
6.3 Aufbau und Eigenschaften des MKS-Kurbeltriebsmodells	71
6.3.1 Gehäuse- und Kurbeltriebskomponenten.....	71
6.3.2 Lagerungen.....	72
6.3.3 Peripherie	73
6.4 Äußere Anregungen	74
7 Simulation und Validierung.....	75
7.1 Dynamik des Wälzlagers.....	75
7.1.1 Statisches Lagerverhalten	75
7.1.2 Dynamisches Lagerverhalten	77
7.2 Globale Dynamik des Kurbeltriebs.....	80
7.2.1 Drehungleichförmigkeit.....	81
7.2.2 Schwingungen des Systems Kurbelwelle/Schwungrad	81
7.3 Lokale Dynamik – Hauptlagerreaktionen.....	83
7.3.1 Hauptlagerreaktionskräfte und Verlagerungsbahnen	83
7.3.2 Hauptlagerbeschleunigungen	86
7.4 Schwingungsverhalten der Motorstruktur.....	89
8 Variantenrechnungen	92
8.1 Variation der Kurbelwellenlagerung	92
8.1.1 Reine Gleitlagerung der Kurbelwelle	92
8.1.2 Variation des Wälzlagerspiels.....	94
8.1.3 Variation des Wälzlagerwerkstoffs	96
8.2 Variation der Kurbelwelle	98
8.2.1 Variation der Kurbelwellensteifigkeit.....	98
9 Zusammenfassung	100
10 Anhang.....	103
10.1 Formelzeichen und Abkürzungen.....	103
10.2 Ergänzungen zu „Stand der Technik“	108
10.3 Ergänzungen zu „Theoretische Grundlagen“	109
10.4 Ergänzungen zu „Experimentelle Untersuchungen“	118
10.5 Ergänzungen zu „Entwicklung des Wälzlagermodells“	121
10.6 Ergänzungen zu „Simulation und Validierung“	122
11 Literatur	123