

Tribologische Untersuchungen
an Zahnwellenverbindungen in Lamellenkupplungen

von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von: Frank Kohlmann
aus: Mexiko-Stadt

eingereicht am: 06.05.2015
mündliche Prüfung am: 12.11.2015

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. G.-P. Ostermeyer
Prof. Dr.-Ing. K. Dröder
Dr.-Ing. K. Sittig

Schriftenreihe Institut für Dynamik und Schwingungen
TU Braunschweig

Frank Kohlmann

**Tribologische Untersuchungen an Zahnwellen-
verbindungen in Lamellenkupplungen**

Shaker Verlag
Aachen 2016

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2016

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4752-3

ISSN 1865-9101

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Promotionszeit bei der Volkswagen AG Werk Kassel in der Entwicklung Geschäftsfeld Getriebe. Betreut wurde sie vom Institut für Dynamik und Schwingungen der Technischen Universität Braunschweig.

An dieser Stelle gilt mein ganz herzlicher Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. G.-P. Ostermeyer, Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Dröder und Frau Dr.-Ing. K. Sittig für die Betreuung der Dissertation und die Prüfung meiner Arbeit.

Mein Dank gilt ebenfalls allen Mitarbeitern des Instituts für Dynamik und Schwingungen. Insbesondere bedanke ich mich bei Herrn Dr.-Ing. M. Müller und Herrn Dr.-Ing. F. Schiefer für die fachliche Unterstützung.

Unternehmensseitig möchte ich mich bei Herrn K. Heber und Herrn Dr.-Ing. A. Schmidt bedanken. Bei Herrn M. Hey möchte ich mich für die vielen anregenden Diskussionen bedanken.

Zusätzlich möchte ich mich bei meiner Familie und Freunde für die bedingungslose Unterstützung bedanken.

DISCLAIMER

Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.

The results, opinions or conclusions of this dissertation are not necessarily those of the Volkswagen AG.

ABSTRACT – DEUTSCH

Diese Arbeit befasst sich mit tribologischen Schwingungsverschleißuntersuchungen der Lamellen und Lamellenträger einer nasslaufenden Lamellenkupplung. Zwischen den Bauteilen wird das Drehmoment form-schlüssig über einer Zahnwellenverbindung übertragen. Bei der Kupp-lungsbetätigung entsteht eine axiale Relativbewegung, die Reibung und Verschleiß verursacht. Die resultierende Axialkraft an der Lamellenführung führt zu einem Verlust der Normalkraft auf der Reibfläche zwischen Stahl- und Reiblamellen. Dieser Verlust kann ebenfalls als Reibungsenergie dar-gestellt werden.

Diese Systemeigenschaften werden mittels einer neuartigen biaxialen Prüfvorrichtung auf Komponentenebene analysiert. Dabei werden ver-schiedene Fertigungsverfahren der Stahllamellen, die einerseits für die Her-stellung von Prototypen-Lamellen und andererseits für den Serieneinsatz ge-eignet sind berücksichtigt. Die Funktionsflächen werden unterschiedlichen Belastungen ausgesetzt.

Der Fokus der Untersuchungen liegt auf dem Masseverlust des La-mellenträgers, der Oberflächentopografie der Zahnflanken, der Härte, der Flankenkontur und der Reibungsenergie. Ziel ist das Verschleißverhalten des Tribosystems näher zu beschreiben und Auslegungsparameter für neue Entwicklungen zu identifizieren.

ABSTRACT – ENGLISH

This work analyses oscillating wear in a wet multi-disc clutch between the discs and the disc carrier. These parts transmit the clutch torque due to a form-locking. The discs move relatively to the disc carrier in axial direction while engaging the clutch, producing unwanted friction and wear. The resulting axial force causes a loss of normal force at the friction surface between discs and friction plates. These losses can be described as friction energy.

A new biaxial testing method to analyze these system characteristics is presented. Different manufacturing processes for the discs are considered. Some are suitable for manufacturing prototypes, others are suitable for the mass production. The friction surfaces are exposed to different load levels.

The focus of the examinations lies on the disc carrier wear, the surface roughness at the contact area, the hardness, the tooth outline and the friction energy. The aim is to describe the wear behavior of the tribological system and to identify important design parameters for future developments.

SYMBOLVERZEICHNIS

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
<u>lat. Buchstaben</u>		
d	Durchmesser	mm
e	Verschleißenergiedichte	J/mm ³
E	Energie	J
F	Kraft	N
h	Höhe	mm
l	Länge	mm
n	Anzahl	-
N	Zyklusanzahl	-
p	Flächenpressung	N/mm ²
r	Radius	mm
R	Profilbezogener Rauheitskennwert	μm
s	Weg	mm
S	Flächenbezogener Rauheitskennwert	μm
t	Zeit	s
T	Drehmoment	Nm
v	Geschwindigkeit	m/s
W	Verschleißbetrag (engl. Wear)	g

iv

z Anzahl Reibflächen -

gr. Buchstaben

λ Wellenlänge nm

μ Reibwert -

τ Schubspannung N/mm²

Indizes Bedeutung

lat. Buchstaben

a Axial

A Außen

Bet Betätigung

e Einzel

F Führung

H Haften

I Innen

kum Kumuliert

l Längenbezogen

L Laser

m Mittlere

M Massebezogen

n Nominell

N Normal

neu Neuzustand

q	Flächenbezogen
R	Reibungsbezogen
t	Teilkreisbezogen
T	Tangential
tr	Tragende
v	Volumenbezogen
z	Zahn
zul	Zulässig

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

Abkürzung	Bedeutung
AB	Analyseblock
AES	Auger-Elektronenmikroskopie
ATF	Getriebeöl (engl. Automatic Transmission Fluid)
DK	Doppelkupplung
DKG	Doppelkupplungsgetriebe
EHD	Elastohydrodynamik
ER	Erodierte Stahllamelle
FS	Feingeschnittene Stahllamelle
HV	Härte nach Vickers
LA	Laserstrahlgeschnittene Stahllamelle
LT	Lamellenträger
LW	Lastwechsel
OT	Oberer Totpunkt
REM	Raster-Elektronen-Mikroskop
SL	Stahllamelle
UT	Unterer Totpunkt
VB	Verschleißblock
WS	Wasserstrahlgeschnittene Stahllamelle

INHALTSVERZEICHNIS

Abstract – Deutsch	i
Abstract – English	ii
Symbolverzeichnis	iii
Abkürzungsverzeichnis	vi
1. Einleitung	1
1.1 Motivation, Inhalt und Ziel der Arbeit	2
2. Stand der Technik	3
2.1 Tribologische Eigenschaften technischer Oberflächen	3
2.1.1 Tribologische Systeme	3
2.1.2 Technische Oberflächen	7
2.1.3 Reibung und Verschleiß	9
2.2 Zahnwellen-Verbindungen	13
2.2.1 Funktionsprinzip und Auslegung	13
2.2.2 Zahnwellen-Verbindungen in einer Doppelkupplung	14
2.3 Verschleißuntersuchungen an Lamellen und Lamellenträger	17
2.3.1 Schwingungsverschleiß	18
2.3.2 Energetische Betrachtung des Schwingungsverschleißes	20
2.3.3 Einlaufeffekte bei Verschleißuntersuchungen	23
2.3.4 Verschleißprüfung von Lamellen und Lamellenträger einer Lamellenkupplung	25
2.4 Fertigungsverfahren der Prüflinge	26
2.4.1 Stahllamellen	26
2.4.2 Lamellenträger	29

3. Versuchsaufbau, Prüflinge und Prüfprogramm	31
3.1 Prüfstand und Prüfvorrichtung	31
3.1.1 Prüfstand	31
3.1.2 Prüfvorrichtung	32
3.2 Prüflinge	34
3.2.1 Lamellenträger	34
3.2.2 Stahllamellen	35
3.3 Prüfprogramm	36
3.3.1 Analyseblock	38
3.3.2 Verschleißblock	39
3.4 Bauteilcharakterisierung	40
3.4.1 Massenbestimmung	41
3.4.2 Taktile Rauheitsmessung der Bauteilzahnflanken	42
3.4.3 Optische Topografiemessung der Bauteilzahnflanken	43
3.4.4 Taktile Konturmessung der Stahllamellenflanken	44
3.4.5 Digital-Mikroskop	44
3.4.6 Rasterelektronenmikroskop	45
4. Ergebnisse	47
4.1 Verschleißmasse	47
4.2 Oberflächenrauheit	54
4.2.1 Oberflächenrauheit im Neuzustand	54
4.2.2 Oberflächenrauheit über Laufzeit	55
4.3 Härte der Kontaktflächen	62
4.4 Flankenkontur der Stahllamellen	64
4.5 Ölreinheit	66
4.6 Axialkraftverlauf und Reibungsenergie	69
4.6.1 Reibungsenergie im belastungsfreien Zustand	70
4.6.2 Axialkraftverlauf im Analyseblock	71
4.6.3 Reibungsenergie im Analyseblock	73
5. Diskussion der Ergebnisse	77
5.1 Drahterodierte Stahllamellen	79

5.2	Feingeschnittene Stahllamellen	81
5.3	Laserstrahlgeschnittene Stahllamellen	83
5.4	Wasserstrahlgeschnittene Stahllamellen	86
6.	Zusammenfassung und Ausblick	89
6.1	Zusammenfassung	89
6.2	Ausblick	92
Anhang		94
A.1	Mikroskopbilder Dauerlaufende	94
A.2	Axialkraftverlauf und Reibungsenergie	105
A.3	Materialanteilkurven	114
A.4	Verschleißmasse	122
A.5	REM-Aufnahmen	125
Bibliographie		143