



# Fortschritte in der Maschinenkonstruktion

herausgegeben von D. Bartel und K.-H. Grote

Institut für Maschinenkonstruktion  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Dipl.-Ing. Joerg Berkefeld

## **Einfluss der Topographie und Werkstoffcharakteristik des metallischen Reibgegenparts auf die Tribologie von geregelten, trockenlaufenden Kupplungssystemen in Fahrzeuganwendungen**

März 2022  
Lehrstuhl für Maschinenelemente  
und Tribologie

# **Einfluss der Topographie und Werkstoffcharakteristik des metallischen Reibgegenparts auf die Tribologie von geregelten, trockenlaufenden Kupplungssystemen in Fahrzeuganwendungen**

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. Joerg Steven Berkefeld  
geb. am 18.05.1986 in Peine

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter: apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Dirk Bartel  
Prof. Dr. rer. nat. Michael Scheffler

Promotionskolloquium am 18.01.2022

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

Fortschritte in der Maschinenkonstruktion

Band 1/2022

**Joerg Berkefeld**

**Einfluss der Topographie und Werkstoffcharakteristik  
des metallischen Reibgegenparts auf die Tribologie  
von geregelten, trockenlaufenden Kupplungs-  
systemen in Fahrzeuganwendungen**

Shaker Verlag  
Düren 2022

**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.: Magdeburg, Univ., Diss., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8512-9

ISSN 1615-7192

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 2013 bis 2016 als Industriepromotion in der Getriebeentwicklung der Volkswagen AG in Wolfsburg. Die wissenschaftliche Betreuung erfolgte durch apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Dirk Bartel, Leiter des Lehrstuhls für Maschinenelemente und Tribologie am Institut für Maschinenkonstruktion der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, sowie durch Prof. Dr. rer. nat. Michael Scheffler, Leiter des Lehrstuhls für nichtmetallische Werkstoffe am Institut für Werkstoff- und Füge-technik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Diesbezüglich gilt mein besonderer Dank Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Dirk Bartel für die fortwährende Unterstützung der Arbeit und die abschließende Übernahme des Referats. Die regelmäßigen fachlichen Diskussionen und Anregungen sowie die kritische Durchsicht des Manuskripts haben maßgeblich zu der erfolgreichen Bearbeitung des Themas beigetragen. Herrn Prof. Dr. rer. nat. Michael Scheffler danke ich ebenfalls für den konstruktiven wissenschaftlichen Austausch und darüber hinaus für die Übernahme des Korreferats. Außerdem gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Rottengruber, Leiter des Lehrstuhls Energiewandlungssysteme für mobile Anwendungen am Institut für mobile Systeme der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission.

Des Weiteren möchte ich mich für die Bereitstellung der Doktorandenstelle in der Getriebeentwicklung der Volkswagen AG in Wolfsburg bedanken. Die durchgehende Unterstützung des Promotionsvorhabens von Seiten des Unternehmens und die damit verbundene Möglichkeit zur Realisierung vielzähliger Teilprojekte im Rahmen der Arbeit haben den Grundstein für die zielführende wissenschaftliche Erschließung des Forschungsschwerpunkts gelegt.

Insgesamt soll allen beteiligten Kolleginnen und Kollegen der Volkswagen AG, insbesondere denen der damaligen Unterabteilung Tribologie in der Getriebeentwicklung sowie denen der heutigen Unterabteilungen Werkstoffentwicklung Metalle & Korrosionsschutz bzw. Werkstoffentwicklung Polymere in der Werkstofftechnik am Standort Wolfsburg gedankt sein. Ihr fachlicher Einsatz, ihre stete Diskussionsbereitschaft und die gute Zusammenarbeit haben einen wesentlichen Anteil an dem Gelingen dieser Arbeit. Dieser Dank gilt gleichermaßen auch den ehemaligen studentischen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die im Rahmen ihrer jeweiligen Abschlussarbeiten einzelne Fragestellungen der Arbeit begleitet haben.

Abschließend möchte ich mich in besonderer Form bei meiner Familie bedanken, die mich in den vergangenen Jahren über jedes Maß hinaus unterstützt hat. Ohne sie wäre der Abschluss des Promotionsvorhabens in einer sehr belasteten Lebenssituation nicht möglich gewesen.



## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem tribologischen Verhalten geregelter, trockenlaufender Kupplungssysteme auf Basis organisch gebundener Reibbeläge und metallischer Reibgegenparts. Derartige Systeme können sowohl in automatisch schaltenden Getrieben für verbrennungsmotorische als auch für elektrifizierte Fahrzeugantriebsstränge Anwendung finden. Die Regelbarkeit der Kupplungsmodule wird maßgeblich durch ihr gleitgeschwindigkeitsabhängiges Reibwertverhalten bestimmt. Im Zuge betriebsspezifischer tribologischer Beanspruchungen kann es zu dynamisch instabilen Reibwerten und zur Ausbildung negativer Reibwertgradienten, das heißt mit der Gleitgeschwindigkeit abfallenden Reibwerten, kommen, die eine degradierende Regelgüte der Kupplungen und ein ‚Rupfen‘ des Antriebsstrangs hervorrufen.

Bisher fehlen diskriminierende werkstoffliche Charakteristika, aus denen sich diese funktionsrelevanten Änderungen im tribologischen Verhalten der trockenlaufenden Kupplungen ableiten lassen. Darüber hinaus bezieht sich der Forschungsstand in der Reibsystementwicklung im Wesentlichen auf den Einfluss der organisch gebundenen Reibbeläge und ihrer Komponenten.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen die Wirkmechanismen für den Übergang der Kupplungen zu einer negativen Reibwertgradientenkennung detektiert und weitergehend untersucht werden, wie sich diese durch den metallischen Reibgegenpart beeinflussen lassen. Ziel der Arbeit ist es, das bestehende Systemverständnis für das tribologische Verhalten der geregelten, trockenlaufenden Kupplungsmodule zu erweitern und deren Komfortverhalten und Robustheit gegenüber den beschriebenen reibungsinduzierten Effekten anhand einer ganzheitlichen Entwicklung des Reibsystems zu optimieren.

Dafür wird die Topographie des metallischen Reibgegenparts in mehreren Stufen variiert und eine Korrelation zum tribologischen Verhalten für spezifische Beanspruchungen geregelter Kupplungssysteme untersucht. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen werden oberflächensensitive Analysen zu reibungsbezogenen Veränderungen der Reibpartner durchgeführt und die Kausalprozesse für das Auftreten negativer Reibwertgradienten beschrieben. Auf Basis der Ergebnisse kann ein differenter Einfluss der Werkstoffcharakteristik des metallischen Reibgegenparts auf das tribologische Verhalten nachgewiesen und plausibilisiert werden. Abschließend wird exemplarisch die qualitative Wirkung weiterer Beschaffenheiten der Reibpartner sowie bestimmter Umgebungsbedingungen evaluiert.

Anhand der Untersuchungen lässt sich aufzeigen, dass das tribologische Verhalten der geregelten, trockenlaufenden Kupplungssysteme durch die Bildung einer Reibschicht aus metallisch-oxidischen Verschleißpartikeln in den Reibbelägen definiert ist. Diese kann mit einer optimierten Topographie und Werkstoffcharakteristik des Reibgegenparts gezielt beeinflusst werden.

## Abstract

This research deals with the tribological behavior of controlled dry clutch systems based on organic matrix bound friction materials and metallic counterparts which can be used in automatic transmissions for ICE, Hybrid, and BEV automotive applications. Control of the clutch modules is essentially determined by their sliding speed-dependent coefficient of friction behavior. Operation-specific tribological loads can lead to dynamically fluctuating coefficients of friction and to the formation of negative coefficient of friction gradients, i. e. declining coefficients of friction with increasing sliding speed, which may bring about degrading control performance of the clutch units and 'juddering' in the powertrain.

Till now, there has been a lack of discriminating material characteristics for derivation of these function-relevant changes in tribological behavior of the dry clutch systems. Moreover, the current state of research in friction system development is mainly based on the impact of the organic matrix bound friction materials and their components.

This research exposes and further investigates the determining mechanisms for the transition of the clutch units into a negative coefficient of friction gradient, revealing how these mechanisms can be influenced by the characteristics of the metallic counterpart. The aim of the research is to better understand the tribological system behavior of controlled dry clutch modules and to optimize comfort and robustness relative to the described friction-induced effects by means of a holistic development of the friction system.

To do so, the topography of the metallic counterpart is varied in multiple stages and correlations with the tribological behavior are investigated under specific loads of controlled clutch systems. Building on the results, surface-sensitive analyses regarding friction-related changes are conducted for the different friction contact surfaces, and the causal processes for the occurrence of negative coefficient of friction gradients are described. Based on the results, plausible conclusions can be drawn for different metallic counterparts, concerning the influence of different metallographic constituents and components on the tribological behavior. Finally, examples of effects of other friction contact surface characteristics and specific ambient conditions are evaluated.

The investigations in this research show that the tribological behavior of the described controlled dry clutch systems is defined by the build-up of a friction layer of metallic-oxide wear particles in the organic matrix bound friction material, which can be specifically influenced by an optimized topography and material of the metallic counterpart.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>XV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Thematischer Hintergrund und Motivation . . . . .	2
1.2 Stand der Forschung . . . . .	4
1.2.1 Grundreibungsverhalten von Elastomeren . . . . .	5
1.2.2 Entstehung und Beschaffenheit reibungsinduzierter Schichten . . . . .	7
1.2.3 Wirkung reibungsinduzierter Schichten . . . . .	11
1.2.4 Einfluss der Reibpartner . . . . .	14
1.3 Forschungslücke, Zielsetzung und Lösungsweg . . . . .	17
<b>2 Grundlagen</b>	<b>19</b>
2.1 Bedeutung des Reibwertgradienten . . . . .	19
2.2 Prüfmethodik zur Reibwertgradientenbestimmung . . . . .	24
2.3 Reibsystem: Organisch gebundene Reibbeläge / metallische Reibgegenparts . . . . .	28
<b>3 Untersuchungen zum Einfluss der Topographie</b>	<b>33</b>
3.1 Versuchsmatrix . . . . .	33
3.2 Topographische Charakterisierung der untersuchten Reibgegenpartvariationen . . . . .	35
3.3 Korrelation von Topographie und tribologischem Verhalten . . . . .	36
3.3.1 Gemittelter Reibwertgradient und Reibwert . . . . .	37
3.3.2 Dynamischer Reibwertgradient und Reibwert . . . . .	45
3.3.3 Verschleiß . . . . .	49
3.4 Zusammenfassung . . . . .	50

<b>4</b>	<b>Untersuchungen zur Diskriminierung der tribologischen Wirkmechanismen</b>	<b>53</b>
4.1	Voruntersuchung . . . . .	53
4.2	Versuchsmatrix . . . . .	56
4.3	Analyse der Reibbeläge und Korrelation mit dem tribologischen Verhalten . . .	58
4.3.1	Referenzzustand . . . . .	58
4.3.2	Vergleich 1 . . . . .	60
4.3.3	Vergleich 2 . . . . .	76
4.4	Zusammenfassung . . . . .	82
<b>5</b>	<b>Untersuchungen zum Einfluss der Werkstoffcharakteristik</b>	<b>87</b>
5.1	Versuchsmatrix . . . . .	87
5.2	Werkstoffliche Charakterisierung der untersuchten Reibgegenpartvariationen .	88
5.2.1	Chemische Zusammensetzung . . . . .	88
5.2.2	Gefüge und Struktur . . . . .	89
5.2.3	Oberfläche . . . . .	94
5.2.4	Härte . . . . .	97
5.2.5	Thermophysikalische Kennwerte . . . . .	99
5.3	Korrelation von Werkstoffcharakteristik und tribologischem Verhalten . . . . .	102
5.4	Zusammenfassung . . . . .	123
<b>6</b>	<b>Untersuchungen zu weiteren Einflüssen</b>	<b>127</b>
6.1	Glasfaseranteil und struktureller Aufbau des Reibbelags . . . . .	127
6.2	Nutung der Reibfläche des Reibgegenparts . . . . .	131
6.3	Eintrag von externen Abrasivpartikeln in den Reibkontakt . . . . .	134
6.4	Zusammenfassung . . . . .	136
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung, Fazit und Ausblick</b>	<b>137</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>143</b>
	<b>Anhang</b>	<b>A1</b>
A	Analyseverfahren, Messtechnik und Prüfparameter . . . . .	A1

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Beispiele für geregelte Reibungskupplungen in automatisch schaltenden Getrieben [JPWK14], [Por19] . . . . .	1
1.2	Geregeltes, trockenlaufendes Kupplungssystem auf Basis von organisch gebundenen Reibbelägen und metallischen Reibgegenparts am Beispiel eines Doppelkupplungsgetriebes für konventionelle verbrennungsmotorische Fahrzeuganwendungen [HMS <sup>+</sup> 08] . . . . .	4
1.3	Verlauf der Reibwerte zwischen ungefülltem NBR und Glas über der Gleitgeschwindigkeit bei verschiedenen Temperaturen mit dazugehöriger Masterkurve [Gro63], zitiert nach [Sch75] . . . . .	6
1.4	Masterkurven für die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Reibwerts zwischen Acrylnitril-Gummi und poliertem Glas bzw. sauberem sowie mit Magnesium-Oxid bestaubtem Siliziumcarbid bei einer Temperatur von 20 °C [Gro63], zitiert nach [Gro74] . . . . .	7
1.5	Ausbildung von primären und sekundären Kontakt-Plateaus zwischen einem organisch gebundenen Bremsbelag und einer Bremsscheibe aus grauem Gusseisen [EJ00] . . . . .	9
1.6	Verlauf der Reibungskraft zwischen einem organisch gebundenen Bremsbelag und einem metallischen Reibgegenpart im Übergangsbereich Haften / Gleiten in Abhängigkeit von der Zeit und der Anzahl der Gleitversuche [SM95] . . . . .	12
1.7	Verlauf der Reibwerte über der Zeit für Losreiversuche zwischen einem organisch gebundenen Reibbelag und einer Scheibe aus grauem Gusseisen im Neuzustand, nach Einlauf, nach Ausbau des Reibbelags und Abblasen, Abdrehen der Scheibe und Abfräsen des Reibbelags [SHK02] . . . . .	13
1.8	Verlauf der Reibwerte für einen organisch gebundenen Referenzbremsbelag und eine modifizierte Variante über der Gleitgeschwindigkeit, jeweils in Kombination mit einem Reibgegenpart aus grauem Gusseisen [JLF01] . . . . .	14

1.9	Verlauf der Reibwertgradienten in Form der ‚Rupfneigung‘ für einen organisch gebundenen Basiskupplungsbelag und eine modifizierte Variante über der Anzahl der Lastwechsel, jeweils in Kombination mit einem metallischen Reibgegenpart [Ber02] . . . . .	15
1.10	Verlauf der Reibwerte zwischen einem organisch gebundenen Reibbelag und unterschiedlichen Reibgegenpartwerkstoffen in Abhängigkeit von der Anzahl der Reibspiele bzw. der Zeit [Loe06] . . . . .	16
1.11	Forschungslücke, Zielsetzung und Lösungsweg der vorliegenden Arbeit . . . . .	18
2.1	Verlauf des Reibwerts über der Gleitgeschwindigkeit für die qualitative Unterscheidung zwischen einem dämpfenden, neutralen und anregenden Systemverhalten in Hinblick auf selbsterregte Rupfschwingungen . . . . .	20
2.2	Ersatzmodell für selbsterregte Rupfschwingungen . . . . .	21
2.3	Exemplarischer Verlauf von Motordrehzahl, Getriebeeingangsdrehzahl und Kupplungsstellweg über der Zeit während des Auftretens selbsterregter Rupfschwingungen bei einem Anfahrvorgang . . . . .	23
2.4	Kupplungsreiarbeit und mittlere Kupplungsreibleistung verschiedener Fahrzustände am Beispiel eines Doppelkupplungsgetriebes für konventionelle verbrennungsmotorische Anwendungen in einem städtischen Fahrkollektiv . . . . .	24
2.5	Auszug aus der tribologischen Prüfkette am Beispiel einer trockenlaufenden Doppelkupplung für konventionelle verbrennungsmotorische Fahrzeuganwendungen [HMS <sup>+</sup> 08], [Vol21], basierend auf [CH10], zitiert nach [Lüt13] . . . . .	25
2.6	Komponenten-Prüfstand am Lehrstuhl für Maschinenelemente und Tribologie der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg . . . . .	26
2.7	Ablauf und Parameter des in den Untersuchungen verwendeten Prüfprogramms sowie Messbereich zur Reibwertgradientenbestimmung . . . . .	27
2.8	Beispiel eines gewickelten, organisch gebundenen Reibbelags und seiner Komponenten . . . . .	31
2.9	Verteilung von siliziumhaltigen Bestandteilen oberflächennaher Bereiche für zwei exemplarische Reibbeläge mit unterschiedlichem Glasfaseranteil und dazugehöriges 3D-Schnittbild . . . . .	32
3.1	Rauheitskennwerte für die in Kapitel 3 untersuchten Reibgegenpartvariationen in Abhängigkeit des Vorschubs und vor tribologischer Beanspruchung . . . . .	35
3.2	Verlauf der gemittelten Reibwertgradienten für die in Kapitel 3 untersuchten Variationen über der Anzahl der Prüfzyklen . . . . .	37

3.3	Topographie- und Realbildaufnahmen für die in Kapitel 3 untersuchten Reibge- gegenpartvariationen nach tribologischer Beanspruchung . . . . .	39
3.4	Topographie für die in Kapitel 3 untersuchten Reibgegegenpartvariationen vor / nach tribologischer Beanspruchung . . . . .	40
3.5	Verlauf der gemittelten Reibwertgradienten für die in Kapitel 3 untersuchten Variationen über der Anzahl der Prüfzyklen im Vergleich zwischen Messblock I und II . . . . .	42
3.6	Verlauf der Massentemperaturen für die in Kapitel 3 untersuchte Reibgege- genpartvariation 5 über der Zeit von Messblock I und II in Prüfzyklus 45 und Ver- lauf des Speichermoduls eines Referenzbelags über seiner Massentempera- tur [Lüt13] . . . . .	43
3.7	Exemplarische Darstellung für das Zusammenwirken von belagnativem, vis- koelastischem und nicht-belagnativem Reibungsanteil anhand des Verlaufs der gemittelten Reibwertgradienten und der gemittelten Reibwerte von den in Ka- pitel 3 untersuchten Variationen 1 und 5 über der Anzahl der Prüfzyklen . . . . .	45
3.8	Verlauf des Reibwerts für die in Kapitel 3 untersuchten Variationen 1 und 2 über der Zeit einzelner Prüfzyklen und Drehzahlschwingungen . . . . .	47
3.9	Summenverschleißweg für die in Kapitel 3 untersuchten Variationen über der Anzahl der Prüfzyklen . . . . .	49
3.10	Exemplarische Darstellung für die Überlagerung der belagnativen, viskoelas- tischen Reibung durch den nicht-belagnativen Reibungsanteil anhand des Ver- laufs der gemittelten Reibwertgradienten von der in Kapitel 3 untersuchten Variation 2 über der Anzahl der Prüfzyklen . . . . .	52
4.1	Verlauf der gemittelten Reibwertgradienten für den alternierenden Tausch von Reibbelag und Reibgegegenpart über der Anzahl der Prüfzyklen . . . . .	54
4.2	Verlauf der gemittelten Reibwertgradienten für einen tribologisch vorbean- spruchten und einen neuen Reibbelag über der Anzahl der Prüfzyklen . . . . .	56
4.3	Verlauf der gemittelten Reibwertgradienten für die Kapitel 4.1 in Vergleich 1 und 2 untersuchten Variationen über der Anzahl der Prüfzyklen . . . . .	57
4.4	Topographie- und Realbildaufnahmen für die in Kapitel 4.3 untersuchten Reib- beläge im Referenzzustand vor tribologischer Beanspruchung . . . . .	59
4.5	Chemische Zusammensetzung oberflächennaher Bereiche für die in Kapitel 4.3 untersuchten Reibbeläge im Referenzzustand vor tribologischer Beanspruchung	61
4.6	Topographie- und Realbildaufnahmen für die in Kapitel 4.3.2 in Vergleich 1 untersuchten Reibbeläge vor/nach tribologischer Beanspruchung . . . . .	62

4.7	Ermittlung der realen Kontaktfläche und der statischen Pressungsverteilung für den in Kapitel 4.3.2 in Vergleich 1 untersuchten Reibbelag von Variation 2 nach tribologischer Beanspruchung . . . . .	63
4.8	Faserbereiche der in Kapitel 4.3.2 in Vergleich 1 untersuchten Reibbeläge nach tribologischer Beanspruchung . . . . .	64
4.9	Oberflächennahe Schlibfbilder von Faserbereichen der in Kapitel 4.3.2 untersuchten Reibbeläge nach tribologischer Beanspruchung . . . . .	65
4.10	Chemische Zusammensetzung oberflächennaher Bereiche für die in Kapitel 4.3.2 in Vergleich 1 untersuchten Reibbeläge nach tribologischer Beanspruchung . . . . .	68
4.11	Verteilung von silizium- und eisenhaltigen Bestandteilen oberflächennaher Bereiche für die in Kapitel 4.3.2 in Vergleich 1 untersuchten Reibbeläge nach tribologischer Beanspruchung . . . . .	70
4.12	Formation von ‚compact layer‘ und ‚glaze layer‘ für die sekundären Verschleißpartikelplateaus des in Kapitel 4.3.2 in Vergleich 1 untersuchten Reibbelags von Variation 2 nach tribologischer Beanspruchung . . . . .	73
4.13	Faserbereiche der in Kapitel 4.3.2 in Vergleich 2 untersuchten Reibbeläge nach tribologischer Beanspruchung . . . . .	77
4.14	Chemische Zusammensetzung oberflächennaher Bereiche für die in Kapitel 4.3.2 in Vergleich 2 untersuchten Reibbeläge nach tribologischer Beanspruchung . . . . .	78
4.15	Verteilung von silizium- und eisenhaltigen Bestandteilen oberflächennaher Bereiche für die in Kapitel 4.3.2 in Vergleich 2 untersuchten Reibbeläge nach tribologischer Beanspruchung . . . . .	79
4.16	Topographie- und Realbildaufnahmen für die in Kapitel 4.3.2 in Vergleich 2 untersuchten Reibbeläge nach tribologischer Beanspruchung . . . . .	81
4.17	Exemplarische Darstellung qualitativer Unterschiede in der Ausprägung der sekundären Verschleißpartikelplateaus bzw. ‚glaze layer‘ sowie in der Topographie für die in Kapitel 4.3.2 untersuchten Reibbeläge und deren Auswirkung auf das Reibungsverhalten . . . . .	86
5.1	Schlibfbilder der in Kapitel 5 untersuchten Reibgegenpartvariationen 1 bis 5 . . . . .	90
5.2	Schlibfbilder und chemische Zusammensetzung unterschiedlicher Phasen für die in Kapitel 5 untersuchte Reibgegenpartvariation 6 . . . . .	92
5.3	Schlibfbilder und chemische Zusammensetzung unterschiedlicher Phasen für die in Kapitel 5 untersuchte Reibgegenpartvariation 7 . . . . .	93
5.4	Schlibfbilder und chemische Zusammensetzung unterschiedlicher Phasen für die in Kapitel 5 untersuchte Reibgegenpartvariation 8 . . . . .	95

---

5.5	Rauheitskennwerte für die in Kapitel 5 untersuchten Reibgegenpartvariationen vor tribologischer Beanspruchung . . . . .	96
5.6	Härte der in Kapitel 5 untersuchten Reibgegenpartvariationen . . . . .	97
5.7	Thermophysikalische Kennwerte für die in Kapitel 5 untersuchten Reibgegenpartvariationen . . . . .	99
5.8	Verlauf der gemittelten Reibwertgradienten für die Kapitel 5 untersuchten Variationen über der Anzahl der Prüfzyklen . . . . .	103
5.9	Rauheitskennwerte für die in Kapitel 5 untersuchten Reibgegenpartvariationen vor/nach tribologischer Beanspruchung . . . . .	104
5.10	Chemische Zusammensetzung oberflächennaher Bereiche für die Reibbeläge der in Kapitel 5 untersuchten Reibgegenpartvariationen 2 und 5 nach tribologischer Beanspruchung . . . . .	105
5.11	Verlauf der gemittelten Reibwerte und der Reibwertvarianz für die in Kapitel 5 untersuchten Variationen über der Anzahl der Prüfzyklen . . . . .	107
5.12	Verteilung von eisen- und chromhaltigen Bestandteilen oberflächennaher Bereiche für die Reibbeläge der in Kapitel 5 untersuchten Reibgegenpartvariationen 2, 5, 6 und 7 nach tribologischer Beanspruchung . . . . .	112
5.13	Chemische Zusammensetzung oberflächennaher Bereiche für die Reibbeläge der in Kapitel 5 untersuchten Reibgegenpartvariationen 6, 7 und 8 nach tribologischer Beanspruchung . . . . .	115
5.14	Chemische Zusammensetzung oberflächennaher Bereiche für die in Kapitel 5 untersuchten Reibgegenpartvariationen 2 und 5 nach tribologischer Beanspruchung . . . . .	119
5.15	Oberflächennahe Querschnitte der in Kapitel 5 untersuchten Reibgegenpartvariationen 1, 7 und 8 nach tribologischer Beanspruchung . . . . .	120
5.16	Chemische Zusammensetzung oberflächennaher Bereiche für die in Kapitel 5 untersuchten Reibgegenpartvariationen 6, 7 und 8 nach tribologischer Beanspruchung . . . . .	121
5.17	Phasenbestimmung oberflächennaher Bereiche für die in Kapitel 5 untersuchten Reibgegenpartvariationen 1 und 7 nach tribologischer Beanspruchung . . .	122
6.1	Verlauf der gemittelten Reibwertgradienten für die in Kapitel 6.1 untersuchten Variationen über der Anzahl der Prüfzyklen . . . . .	129
6.2	Verteilung von calcium- und eisenhaltigen Bestandteilen oberflächennaher Bereiche für die in Kapitel 6.1 untersuchten Reibbeläge unterschiedlichen Glasfaseranteils nach tribologischer Beanspruchung . . . . .	130

6.3	Verteilung von calcium- und eisenhaltigen Bestandteilen oberflächennaher Bereiche für die in Kapitel 6.1 untersuchten gewickelten und massegepressten Reibbeläge nach tribologischer Beanspruchung . . . . .	131
6.4	Nutdesign, Lüftungskonstruktion und Vergleich der Verschleißpartikelanhäufung für den in Kapitel 6.2 untersuchten Reibgegenpart . . . . .	132
6.5	Verlauf der gemittelten Reibwertgradienten für die in Kapitel 6.2 untersuchten Variationen über der Anzahl der Prüfzyklen und dazugehörige Verteilung von eisenhaltigen Bestandteilen oberflächennaher Bereiche nach tribologischer Beanspruchung . . . . .	133
6.6	Verlauf der gemittelten Reibwertgradienten für die in Kapitel 6.3 untersuchten Variationen über der Anzahl der Prüfzyklen und dazugehörige Verteilung von eisenhaltigen Bestandteilen oberflächennaher Bereiche nach tribologischer Beanspruchung . . . . .	135
7.1	Grafische Zusammenfassung für die Untersuchungsergebnisse der vorliegenden Arbeit . . . . .	141

# Tabellenverzeichnis

1.1	Vergleich von technischen Eigenschaften zwischen trockenlaufenden Reibschleibenkupplungen und nasslaufenden Lamellenkupplungen für geregelte Reibungskupplungen in Fahrzeuganwendungen . . . . .	2
2.1	Unterteilung der Komponenten organisch gebundener Reibbeläge nach Bestandteilen und Funktionen sowie dazugehörige Beispiele möglicher Werkstoffe, basierend auf [Ber97] u. [Lüt13] . . . . .	29
3.1	Werkstoffliche Bestandteile und chemische Zusammensetzung der in den Untersuchungen verwendeten Reibbeläge . . . . .	34
3.2	Versuchsmatrix für Kapitel 3 . . . . .	34
4.1	Versuchsmatrix für Kapitel 4 . . . . .	58
5.1	Versuchsmatrix für Kapitel 5 . . . . .	87
5.2	Übersicht der in Kapitel 5 untersuchten Reibgegenpartvariationen und deren chemische Zusammensetzung . . . . .	88
5.3	Zusammenfassung zu Kapitel 5 . . . . .	126
6.1	Chemische Zusammensetzung der in Kapitel 6.1 untersuchten Reibbeläge . . .	127
6.2	Versuchsmatrix für Kapitel 6.1 . . . . .	128
6.3	Versuchsmatrix für Kapitel 6.2 . . . . .	132
6.4	Versuchsmatrix für Kapitel 6.3 . . . . .	134
A.1	Übersicht der verwendeten Ätzmittel . . . . .	A3



# Symbolverzeichnis

## Lateinische Buchstaben

$a$	[mm <sup>2</sup> /s]	Temperaturleitfähigkeit
$a_T$	[-]	Spezifischer Verschiebungsfaktor
$c_{\text{Antrieb}}$	[N, N/m <sup>2</sup> ]	Steifigkeit Antriebsstrang
$c_p$	[W/(m · K)]	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck $p$
$d$	[mm]	Durchmesser
$D$	[s]	Zeitliche Dauer
$d_{\text{Antrieb}}$	[kg/s, (kg · m <sup>2</sup> )/s]	Dämpfung Antriebsstrang
$d_{\text{Antrieb,eff}}$	[kg/s, (kg · m <sup>2</sup> )/s]	Effektive Gesamtdämpfung Antriebsstrang
$f$	[mm/U]	Vorschub
$F$	[N]	Kraft
$F_{\text{Anpress}}$	[N]	Anpresskraft
$F_{\text{Antrieb}}$	[N]	Federkraft Antriebsstrang
$F_p$	[kp]	Prüfkraft
$F_R$	[N]	Reibungskraft
$G'$	[MPa]	Speichermodul
$HBW\ 2.5/187.5$	[-]	Härte nach Brinell, ermittelt durch eine Wolframkarbidhartmetallkugel mit einem Durchmesser $d = 2.5$ mm und einer Prüfkraft $F_p = 187.5$ kp
$HV\ 0.3$	[-]	Härte nach Vickers, ermittelt mit einer Prüfkraft $F_p = 0.3$ kp
$i$	[-]	Drehzahlschwingung
$m_{\text{Antrieb}}$	[kg]	Masse Antriebsstrang
$m_{\text{Rest}}$	[kg]	Masse restliches Fahrzeug (exkl. Antriebsstrang)
$n$	[-]	Laufvariable als Element der natürlichen Zahlen

$n$	[1/min]	Drehzahl
$n_{\text{Get,ein}}$	[1/min]	Getriebeeingangsdrehzahl
$n_{\text{Mot}}$	[1/min]	Motordrehzahl
$p$	[bar]	Druck
$P$	[W]	Leistung
$Ra$	[ $\mu\text{m}$ ]	Arithmetischer Mittenrauwert
$Rk$	[ $\mu\text{m}$ ]	Kernrautiefe
$Rz$	[ $\mu\text{m}$ ]	Gemittelte Rautiefe
$s$	[mm]	Weg
$s_{\text{Kupp}}$	[mm]	Kupplungsstellweg
$s_{\text{Ver,Sum}}$	[mm]	Summenverschleißweg
$t$	[s, h]	Zeit
$t_{\text{R}}$	[s]	Reibzeit
$T$	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	Temperatur
$T_{\text{Ende}}$	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	Endtemperatur
$T_{\text{Masse}}$	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	Massentemperatur
$T_{\text{Start}}$	[ $^{\circ}\text{C}$ ]	Starttemperatur
$v$	[cm/s]	Gleitgeschwindigkeit
$v_{\text{Antrieb}}$	[m/s]	Geschwindigkeit resultierend aus der Drehzahl des Antriebsstrangs
$v_{\text{gleit}}$	[m/s]	Gleitgeschwindigkeit
$v_{\text{Motor}}$	[m/s]	Geschwindigkeit resultierend aus der Drehzahl des Motors
$v_{n20}$	[m/s]	Resultierende Gleitgeschwindigkeit bei Drehzahl $n = 20$ 1/min
$v_{n220}$	[m/s]	Resultierende Gleitgeschwindigkeit bei Drehzahl $n = 220$ 1/min
$x$	[m]	Weg, Auslenkung
$\dot{x}$	[m/s]	Geschwindigkeit
$\ddot{x}$	[m/s <sup>2</sup> ]	Beschleunigung
$z$	[-]	Prüfzyklus
$ZR$	[-]	Reibspielfolgezahl

### Griechische Buchstaben

$\alpha$	[-]	Verdrehwinkel
----------	-----	---------------

$\Delta\mu_{n20,i1-10}$	[-]	Reibwertvarianz als Differenz der jeweiligen Reibwerte $\mu_{n20,i}$ bei Drehzahl $n = 20$ 1/min zwischen der ersten und letzten Drehzahlschwingung $i = [1, 10]$ eines Messblocks im entsprechenden Prüflauf (Gl. 3.3, S. 46)
$\theta$	[°]	Braggwinkel
$\lambda$	[W/(m · K)]	Wärmeleitfähigkeit
$\mu$	[-]	Reibwert
$\mu_m$	[-]	Mittlerer Reibwert
$\mu_{n20,i}$	[-]	Reibwert bei Drehzahl $n = 20$ 1/min für die Drehzahlschwingung $i$ eines Messblocks im entsprechenden Prüflauf (Abb. 2.7, S. 27)
$\mu_{n220,i}$	[-]	Reibwert bei Drehzahl $n = 220$ 1/min für die Drehzahlschwingung $i$ eines Messblocks im entsprechenden Prüflauf (Abb. 2.7, S. 27)
$\mu_{n20,i1-10}$	[-]	Gemittelter Reibwert als arithmetisches Mittel aus den einzelnen Drehzahlschwingungen $i = [1 - 10]$ eines Messblocks im entsprechenden Prüflauf und den jeweils dazugehörigen Reibwerten $\mu_{n20,i}$ bei einer Drehzahl $n = 20$ 1/min (Gl. 3.2, S. 41)
$\mu'$	[s/m]	Reibwertgradient
$\mu'_{n20-220,i}$	[s/m]	Reibwertgradient für die Drehzahlschwingung $i$ eines Messblocks im entsprechenden Prüflauf auf Basis der jeweils dazugehörigen Reibwerte $\mu_{n20,i}$ bzw. $\mu_{n220,i}$ und der Gleitgeschwindigkeiten $v_{n20}$ bzw. $v_{n220}$ bei den Drehzahlen $n = 20$ 1/min bzw. 220 1/min (Gl. 2.5, S. 26)
$\mu'_{n20-220,i1-10}$	[s/m]	Gemittelter Reibwertgradient als arithmetisches Mittel aus den einzelnen Drehzahlschwingungen $i = [1 - 10]$ eines Messblocks im entsprechenden Prüflauf und den jeweils dazugehörigen Reibwerten $\mu_{n20,i}$ bzw. $\mu_{n220,i}$ sowie den entsprechenden Gleitgeschwindigkeiten $v_{n20}$ bzw. $v_{n220}$ bei den Drehzahlen $n = 20$ 1/min bzw. 220 1/min (Gl. 3.1, S. 37)
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte



# Abkürzungsverzeichnis

3D	Dreidimensional
Al	Aluminium
$\alpha$ -Mischkristall	Kubisch raumzentrierte Struktur des Eisens (Ferrit)
At.-%	Atomprozent
Ba	Barium
BEV	Battery Electric Vehicle, engl. für batterieelektrisches Fahrzeug
BS	Beschichtung
C	Kohlenstoff
Ca	Calcium
Cr	Chrom
CS-Analyse	Kohlenstoff / Schwefel-Analyse
CT	Computertomographie
Cu	Kupfer
DSC	Differential Scanning Calorimetry, engl. für dynamische Differenzkalorimetrie
E-Maschine	Elektrische Maschine, Elektromotor
E-Modul	Elastizitätsmodul
EN-GJL-250	Bezeichnung für graues Gusseisen mit Lamellengraphit nach europäischer Norm mit einer maßgebenden Zugfestigkeit $R_m = 250 \text{ N/mm}^2$
EN-GJV-300	Bezeichnung für graues Gusseisen mit Vermiculargraphit nach europäischer Norm mit einer maßgebenden Zugfestigkeit $R_m = 300 \text{ N/mm}^2$
Fe	Eisen
FIB	Focused Ion Beam, engl. für fokussierter Ionenstrahl, Ionenfeinstrahlverfahren
$\gamma$ -Mischkristall	Kubisch flächenzentrierte Struktur des Eisens (Austenit)
GF	Glasfaser
GID	Grazing Incidence Diffraction, engl. für Diffraktometrie unter streifendem Einfall

GJL-Mod	Bezeichnung für ein in den Untersuchungen verwendetes, modifiziertes graues Gusseisen mit Lamellengraphit
Hz	Hertz, Einheit der Frequenz
ICE	Internal Combustion Engine, engl. für Verbrennungsmotor
K0-Kupplung	Kupplung zum An- und Abkoppeln einzelner Antriebseinheiten bei hybriden Antriebssträngen
LFA	Laser-Flash-Analyse
Ma.-%	Masseprozent
Mg	Magnesium
Mn	Mangan
NBR	Nitril-Butadien-Rubber, engl. für Nitril-Butadien-Kautschuk
Ni	Nickel
O	Sauerstoff
OES	Optische Emissionsspektrometrie
PAN	Polyacrylnitril
REM	Rasterelektronenmikroskopie
REM (BSE)	Rasterelektronenmikroskopie mittels backscattered electrons, engl. für Rückstreuelektronen
REM-EDX	Rasterelektronenmikroskopie mit energy dispersive X-ray spectroscopy, engl. für energiedispersive Röntgenspektroskopie
REM (SE)	Rasterelektronenmikroskopie mittels Sekundärelektronen
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
μRFA	Röntgenmikrofluoreszenzanalyse
S	Schwefel
S355JR	Bezeichnung für Baustahl 1.0045 nach europäischer Norm mit einer Streckgrenze $R_{eH} \geq 355 \text{ N/mm}^2$ bei kleinster Erzeugnisdicke und Gütegruppe JR
SAE J726	Bezeichnung für Prüfstaub nach entsprechender Norm der SAE International, ehemals Society of Automotive Engineers, engl. für Verband der Automobilingenieure
SBR	Styrol-Butadien-Rubber, engl. für Styrol-Butadien-Kautschuk
Si	Silizium
WLF-Funktion	Empirische Funktion n. M. L. Williams, R. F. Landel und J. D. Ferry
X12Cr13	Bezeichnung für nichtrostenden ferritisch-martensitischen Stahl 1.4006 nach europäischer Norm mit einem Kohlenstoff-Gehalt von 0.08 - 0.15 % und einem Chrom-Gehalt von 11.5 - 13.5 % (jeweils Ma.-%)