

**„Reibungsreduzierung durch gradierte diamantähnliche Kohlenstoffschichten  
a-C:H:Zr und a-C:H:Ti in EHD-Kontakten des Automobilantriebsstrangs“**

**„Friction Reduction Through Graded Diamond-like Carbon Coatings a-C:H:Zr and  
a-C:H:Ti in EHD-Contacts of the Automobile Powertrain“**

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

vorgelegt von

Tobias Brögelmann

Berichter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Maier

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Februar 2017



Schriftenreihe Oberflächentechnik

Band 48

**Tobias Brögelmann**

**Reibungsreduzierung durch gradierte diamant-  
ähnliche Kohlenstoffschichten a-C:H:Zr und a-C:H:Ti  
in EHD-Kontakten des Automobylantriebsstrangs**

Friction Reduction Through Graded Diamond-like  
Carbon Coatings a-C:H:Zr and a-C:H:Ti in EHD-Contacts  
of the Automobile Powertrain

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2017)

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5158-2

ISSN 1864-0796

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen  
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Oberflächentechnik (IOT) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen. Wesentliche Teile der Arbeit basieren auf den von der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) e.V. und der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) e.V. initiierten und von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) finanzierten Teilprojekten „Grundlagen zur Reibungsminderung in geschmierten Kontakten“ (FVA 585 I) und „Gleitlagerung im Kurbeltrieb“ (FVV 975) des Forschungsclusters „Low Friction Powertrain“ und dem Forschungsvorhaben „Wirkung von Oberflächenbeschichtungen in geschmierten Kontakten“ (FVA 585 II). Die IGF-Forschungsvorhaben 15785 N, 15794 N und 18490 N wurden im Rahmen des Programms zur industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Für die finanzielle Unterstützung sei an dieser Stelle gedankt.

Mein besonderer Dank gilt Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kirsten Bobzin für ihre Unterstützung meiner Arbeit und die Möglichkeit zur Promotion. Besonders bedanke ich mich für das entgegengebrachte Vertrauen bei der Übernahme der Positionen des Gruppenleiters und des Oberingenieurs, die mir eine fachliche und persönliche Weiterentwicklung ermöglichten. Darüber hinaus möchte ich Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans Jürgen Maier für die Übernahme des Zweitgutachtens und Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Jacobs für die Übernahme des Vorsitzes des Promotionsausschusses danken.

Mein großer Dank gilt Dr.-Ing. Nazlim Bagcivan. Als Oberingenieur begleitete er mit enormer Übersicht und großer Erfahrung meine Arbeiten und stand mir jederzeit mit Rat zur Seite. Nicht nur im Beruf, sondern auch im Privaten wird er mir stets ein Vorbild sein.

Für die konstruktive Zusammenarbeit, die fachlichen Gespräche und die Durchführung zahlreicher tribologischer Versuche danke in den ehemaligen und aktuellen Projektpartnern an der Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau (FZG) der TU München, Dr.-Ing. Michael Hinterstoßer, Dr.-Ing. Josef Mayer, Dr.-Ing. Johann-Paul Stemplinger, M.Sc. Martin Ebner, M.Sc. Thomas Lohner und Dipl.-Ing. Alexander Weigl, am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (vka) der RWTH Aachen University, Dr.-Ing. Mirko Plettenberg und

---

Dr.-Ing. Felix Ring, Mein Dank gilt Dr. rer. nat. René Heller für die Durchführung der RBS- und NRA-Analysen am Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf in Dresden und Dipl.-Ing. Joachim Roes für die Durchführung der XPS-Analysen am DWI Leibniz-Institut für Interaktive Materialien e.V. in Aachen.

Für die fachlichen Diskussionen zum industriellen Großserieneinsatz von DLC-Schichten und Weitergabe der Marktdaten bedanke ich mich bei Dr. rer. nat. Ulrich May von der ROBERT BOSCH GMBH, Dr. Ir. Gerrit-Jan van der Kolk von IONBOND NETHERLANDS B.V. und bei Ir. Michiel Eerden und Ir. Roel Tietema von HAUZER TECHNOCOATING B.V..

Für ihre wertvolle fachliche Unterstützung, ihre Hilfsbereitschaft und sehr gute Zusammenarbeit danke ich allen ehemaligen und aktuellen Kollegen am Institut für Oberflächentechnik. Mein besonderer Dank für die konstruktiven Ratschläge und fachlichen Diskussionen geht an Dr.-Ing. Sebastian Theiß, M.Sc. Matthias Thiex, Dr.-Ing. Thomas Warda, Dr.-Ing. Raphael Weiß und Dr.-Ing. Baycan Yildirim. Besonders hervorheben möchte ich meine ehemaligen und aktuellen Gruppenleiter, Dipl.-Wirt.-Ing. Serhan Bastürk, Dr.-Ing. Ricardo H. Brugnara, Dipl.-Ing. Christian Kalscheuer und Dipl.-Ing. Nathan C. Kruppe für ihre große Unterstützung. Für die technische und administrative Unterstützung danke ich Wulf Brökel, Anne Feck, Dirk Grünhagen, Thomas Offermann, Lore Stalpers, Uwe Werner, Ilona Wolf und Jutta Ziemes. Mein besonderer Dank gilt Anke Lück für ihr stets offenes Ohr und die enorme Hilfsbereitschaft. Bei meinen ehemaligen und aktuellen studentischen Hilfskräften, M.Sc. Soner Gökdeniz, B.Sc. Dennis C. Hoffmann, Dipl.-Ing. Tim D. Königstein, M.Sc. und M.Sc. Matthias Thiex bedanke ich für die zahlreichen Recherchen und experimentelle Arbeiten.

Meiner Familie, besonders meinen Eltern, Dagmar und Jürgen Brögelmann, und meinen Großeltern, Ilse und Günter Brögelmann, möchte ich meinen Dank aussprechen, dass sie mich für das Studium motiviert und meinen beruflichen Werdegang ermöglicht haben sowie immer an mich geglaubt haben. Insbesondere bei meinen Schwiegereltern, Nasrin Elmi und Ghavamoddin Rafiee-Tari, bedanke ich mich für die unbegrenzte Unterstützung in allen Lebenslagen. Mein größter Dank gilt meiner großen Liebe und Ehefrau Zoya. Bereits seit dem Studium bringt sie mir unermüdliche Unterstützung, unbegrenztes Vertrauen und enorme Geduld entgegen und gibt mir stets Motivation und Ansporn. Worte können meine Dankbarkeit und Liebe nicht beschreiben.

**Abstract**

The application of diamond-like carbon (DLC) coatings on components of the automobile powertrain is state-of-the-art in contemporary automotive development aiming at improving efficiency, reducing fuel consumption and lowering greenhouse gas and pollutants emissions. Besides reducing frictional losses, DLC coatings contribute to enhance the wear resistance and the load-bearing capacity in lubricated tribological systems. The performance of DLC coatings strongly depends on the environment and the lubricating medium aside from the kinematics and the load spectrum in the tribological contact. Particular attention of research was given to the investigation and the understanding of the tribological performance of DLC coatings under boundary and mixed friction conditions. However, both, highly loaded, lubricated conformal contacts, i.e. in hydrodynamic plain bearings and contraformal contacts, i.e. in tothing or rolling bearings are at least partly operating in fluid friction under elastohydrodynamic (EHD) conditions. Despite the separation of the functional surfaces by the load-carrying lubricating film under EHD conditions, it is conceivable that DLC coatings have an impact on the frictional behavior. With regard to the main bearings of the automobile crankshaft drive and to tothing of an automobile manual gearbox, the present thesis deals with investigations on frictional losses in fluid friction. Two approaches contributing to the reduction of frictional losses in fluid friction are pursued. Thermophysical properties of DLC coatings influencing the rheological properties of the lubricant by a thermal insulation effect and the wetting behavior of DLC coatings affecting the wall adhesion are investigated using practical test-rigs. Due to the promising performance in various tribological applications under lubrication with different oil types and in dry-running, the hydrogen and metal containing DLC coating graded zirconium carbide  $ZrC_g$  (a-C:H:Zr) and derived discrete coatings  $Zr_xC_{1-x}$  (a-C:H:Zr) deposited at constant reactive gas flux as well as the DLC coating graded titanium carbide  $TiC_g$  (a-C:H:Ti) are considered in thermal analysis to determine the thermal conductivity, thermal diffusivity and specific heat capacity. Comprehensive Raman analyses indicate correlations between the carbon bonding states in terms of the  $sp^3 / sp^2 + sp^3$  ratio and the thermal diffusivity. Physical interactions between the zirconium based coatings and different types of gear oils from contact angle measurements are correlated to the frictional behavior observed in the test-rigs. A clear correlation between wetting and frictional behavior due to a wall slip effect cannot be demonstrated. Thus, this thesis provides new scientific insights into novel application possibilities of DLC component coatings on highly loaded contacts in fluid friction under EHD conditions.

**Inhaltsverzeichnis**

**1 Einleitung ..... 1**

**2 Stand der Technik ..... 4**

2.1 Großserieneinsatz von diamantähnlichen Kohlenstoffschichten ..... 5

2.1.1 Gesetzgebung als Triebkraft für technologische Innovationen ..... 5

2.1.2 Erfüllung gesetzlicher Vorgaben durch moderne Dieseleinspritztechnik ..... 8

2.1.3 Internationale Forschungs- und Entwicklungsarbeit in der Dieseleinspritztechnik... 8

2.1.4 Nationale Forschungs- und Entwicklungsarbeit in der Dieseleinspritztechnik..... 11

2.2 Wirtschaftliche Betrachtung des Großserieneinsatzes von diamantähnlichen Kohlenstoffschichten..... 12

**3 Stand der Forschung ..... 16**

3.1 Sonderforschungsbereich 442 ..... 19

3.1.1 Beanspruchungskollektive in den Anwendungen des SFB 442 und Ableitung des Anforderungskatalogs..... 20

3.1.2 Schichtkonzept des diamantähnliches Kohlenstoffschichtsystems ..... 23

3.1.3 Auswahl eines geeigneten Karbidbildners ..... 25

3.1.4 Binäre Phasendiagramme Kohlenstoff - Hafnium und Kohlenstoff - Zirkonium..... 27

3.2 Abscheidung diskreter Schichten  $Zr_xC_{1-x}$  (a-C:H:Zr) im binären System C - Zr..... 31

3.2.1 Bestimmung der chemischen Elementzusammensetzung..... 31

3.2.2 Analyse der Schichtmorphologie ..... 32

3.2.3 Bestimmung der mechanischen Eigenschaften..... 34

3.2.4 Analyse der Schichtstruktur ..... 35

3.3 Abscheidung gradierter Schichten  $ZrC_g$  (a-C:H:Zr) im binären System C - Zr..... 38

3.4 Werkstoff- und prozessseitige Entwicklung des gradierten Schichtsystems  $ZrC_g$  (a-C:H:Zr) ..... 40

3.4.1 Entwicklung der Gradierung im Schichtsystem  $ZrC_g$  (a-C:H:Zr) ..... 41

3.4.2 Modifikationen des gradierten Schichtsystems a-C:H:Zr $C_g$  (a-C:H:Zr)..... 46

**4 Zielsetzung und Lösungsweg ..... 53**

**5 Schichtabscheidung und Analysemethoden ..... 54**

5.1 Schichtabscheidung mittels industrieller Beschichtungsanlage..... 54

5.2 Schichtcharakterisierung..... 57

5.2.1 Analyse der Schichtmorphologie und -architektur und Ermittlung der Schichtdicke mittels Rasterelektronenmikroskopie..... 57

5.2.2	Analyse der Oberflächentopographie und Bestimmung der Oberflächenrauheit mittels konfokaler Laserscanningmikroskopie .....	57
5.2.3	Ermittlung der mechanischen Eigenschaften mittels Nanoindentation .....	58
5.2.4	Ermittlung der thermophysikalischen Eigenschaften .....	58
5.2.5	Ermittlung der chemischen Zusammensetzung mittels Raman-Spektroskopie, Rutherford-Rückstreu-Spektrometrie und nuklearer Reaktionsanalyse .....	61
5.3	Systemcharakterisierung .....	63
5.3.1	Geschleppter Motorenprüfstand am vka der RWTH Aachen University .....	63
5.3.2	Zweischeiben-Prüfstand an der FZG der TU München .....	65
5.3.3	Stirnradwirkungsgrad-Prüfstand an der FZG der TU München .....	68
5.3.4	Analyse des Benetzungsverhaltens mittels Kontaktwinkelmessungen .....	69
<b>6</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>74</b>
6.1	Erprobung des Schichtsystems $ZrC_9$ unter einer gleitenden Beanspruchung und Vollschmierung – Leitanwendung Kurbelwellenlagerung .....	74
6.1.1	Geschleppter Motorenprüfstand – Einsatz des Schichtsystems $ZrC_9$ auf Prototypengleitlagerschalen .....	76
6.1.2	Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Erprobung unter gleitender Beanspruchung in der Anwendung Kurbelwellenlagerung und Zwischenfazit .....	82
6.2	Erprobung des Schichtsystems $ZrC_9$ unter einer wälzenden Beanspruchung und Vollschmierung – Leitanwendung Zahnrad .....	83
6.2.1	Zweischeiben-Prüfstand – maximale Pressung $p_H = 1.200 \text{ N/mm}^2$ und Öleinspritztemperatur $T_{ÖlE} = 40 \text{ °C}$ .....	85
6.2.2	Zweischeiben-Prüfstand – maximale Pressung $p_H = 1.200 \text{ N/mm}^2$ und Öleinspritztemperatur $T_{ÖlE} = 100 \text{ °C}$ .....	88
6.2.3	Stirnradwirkungsgrad-Prüfstand – maximale Pressung $p_C = 1.343 \text{ N/mm}^2$ bei Kraftstufe $KS 7$ und Ölsumpftemperatur $T_{ÖlS} = 40 \text{ °C}$ .....	93
6.2.4	Stirnradwirkungsgrad-Prüfstand – maximale Pressung $p_C = 1.723 \text{ N/mm}^2$ bei Kraftstufe $KS 9$ und Ölsumpftemperatur $T_{ÖlS} = 90 \text{ °C}$ .....	94
6.2.5	Zusammenfassung der Ergebnisse aus der Erprobung unter wälzender Beanspruchung in der Anwendung Zahnrad und Zwischenfazit .....	95
6.3	Nachweis des Einflusses diamantähnlicher Kohlenstoffschichten auf das Reibungsverhalten in der Fluidreibung unter EHD-Bedingungen .....	97
6.4	Benetzungsverhalten diamantähnlicher Kohlenstoffschichten gegenüber Schmierstoffen als Erklärungsansatz .....	102
6.5	Thermophysikalische Eigenschaften diamantähnlicher Kohlenstoffschichten als Erklärungsansatz .....	113

## Inhaltsverzeichnis

---

6.5.1	Auslegung und Abscheidung diskreter Schichtvarianten $Zr_xC_{1-x}$ (a-C:H:Zr).....	115
6.5.2	Auslegung und Abscheidung des gradierten Schichtsystems $TiC_g$ (a-C:H:Ti).....	129
6.5.3	Tribologische Erprobung im Zweischeiben-Prüfstand .....	131
6.5.4	Berechnung des Temperaturfeldes im Zweischeiben-Kontakt über ein thermoelastohydrodynamisches (TEHD) Berechnungsmodell .....	136
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>138</b>
<b>8</b>	<b>Ausblick .....</b>	<b>140</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>141</b>
<b>10</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>172</b>

**Abbildungsverzeichnis**

Abbildung 1.1:	Zeitliche Entwicklung der im Markt befindlichen Pkw (a) und der produzierten Pkw (b) nach Wirtschaftsräumen (Daten entnommen aus [NN16b, NN16c]).....	1
Abbildung 1.2:	Konventionelle Stribeck-Kurve nach [Czi15, JP15, SB05] und Modifikation durch Einsatz von diamantähnlichen Kohlenstoffschichten in Anlehnung an [Pod08] .....	3
Abbildung 2.1:	Triebkräfte der werkstoff- und prozesseitigen Schichtentwicklung .....	4
Abbildung 2.2:	CO <sub>2</sub> -Emissionen im Flottendurchschnitt bis 2014 und gesetzlich festgelegte Grenzwerte ab 2015 in NEFZ-Äquivalenten für Pkw (Daten entnommen aus [NN15a, NN15b, NN15c, NN15d, NN15e, NN15f]).....	6
Abbildung 2.3:	Emissionsgrenzwerte für CO, HC + NO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> und PM durch Abgasnormen EURO 1 bis EURO 6 in den Jahren 1992 bis 2014 (Daten entnommen aus [NN12a, NN11a, NN09b, NN08, NN07b, NN98, NN94, NN91]).....	7
Abbildung 2.4:	Zeitachse von der Schichtentwicklung bis zum Großserieneinsatz [KM14].	10
Abbildung 2.5:	Geschätztes Marktvolumen von Schichten für den Einsatz im Automobilbereich im Zeitraum von 1990 bis 2016 sortiert nach Beschichtungstechnologie [G.J. van der Kolk, ICMCTF 2016].....	13
Abbildung 2.6:	Geschätztes Marktvolumen von Schichten für den Einsatz im Automobilbereich im Zeitraum von 1990 bis 2006 sortiert nach Schichtvarianten [IONBOND NETHERLANDS B.V.] .....	14
Abbildung 2.7:	Geschätztes Marktvolumen von diamantähnlichen Kohlenstoffschichten (DLC) im Zeitraum von 1990 bis 2016 [G.J. van der Kolk, ICMCTF 2016] .	15
Abbildung 3.1:	Klassifizierung diamantähnlicher Kohlenstoffschichten nach [Rob02].....	16
Abbildung 3.2:	Anforderungskatalog an die werkstoff- und prozesseitige Schichtentwicklung im SFB 442 nach [BBE+10, Bug09, Hur04, Kuh06, Loo01, MS06, MS05, MS04, Plo12, Sch14, vBe03].....	21
Abbildung 3.3:	Grundgedanke zur Schichtentwicklung und Schichtkonzept .....	24
Abbildung 3.4:	Einfluss des Katalysators auf die Oxidationsstabilität der synthetischen Ester [LBB+01, LM99].....	27
Abbildung 3.5:	Binäre Phasendiagramme Kohlenstoff - Hafnium (C - Hf) (a) und Kohlenstoff - Zirkonium (C - Zr) (b) [NN15g].....	28

Abbildung 3.6: Chemische Elementzusammensetzung der diskreten Schichtvarianten  $Zr_xC_{1-x}$  (a-C:H:Zr) in Anteilen  $x(Zr)$  und  $x(C)$  und Abscheiderate  $R$  als Funktion des Reaktivgasanteils  $x(C_2H_2)$  im Rezipienten ..... 32

Abbildung 3.7: REM-Aufnahmen der Querbruchflächen der diskreten Schichtvarianten  $Zr_xC_{1-x}$  (a-C:H:Zr) als Funktion des Reaktivgasanteils  $x(C_2H_2)$  im Rezipienten ..... 33

Abbildung 3.8: Mechanische Eigenschaften Eindringmodul  $E_{IT}$  und Universalhärte  $HU$  der diskreten Schichtvarianten  $Zr_xC_{1-x}$  (a-C:H:Zr) als Funktion des Reaktivgasanteils  $x(C_2H_2)$  im Rezipienten [BBE+10] ..... 35

Abbildung 3.9: Beugungsbild (a) und Diffraktogramm (b) der diskreten Schichtvariante  $Zr_{36}C_{64}$  (a-C:H:Zr) abgeschieden bei einem Reaktivgasanteil  $x(C_2H_2) = 4\%$ . 36

Abbildung 3.10: Beugungsbild (a) und Diffraktogramm (b) der diskreten Schichtvariante  $Zr_{19}C_{81}$  (a-C:H:Zr) abgeschieden bei einem Reaktivgasanteil  $x(C_2H_2) = 6\%$ . 37

Abbildung 3.11: Hochauflösende HRTEM-Aufnahmen der diskreten Schichtvarianten  $Zr_{36}C_{64}$  (a) und  $Zr_{19}C_{81}$  (b)..... 38

Abbildung 3.12: Aufbau und Morphologie der wasserstoff- und metallhaltigen, amorphen Kohlenstoffschicht  $ZrC_g$  (a-C:H:Zr) mit gradiertem Eigenschaftsprofil..... 39

Abbildung 3.13: Konzepte zur Gradierung des Schichtsystems  $ZrC_g$  (a-C:H:Zr)..... 41

Abbildung 3.14: Reaktivgasanteil  $x(C_2H_2)$  als Funktion der Beschichtungszeit  $t$  für die Abscheidung der Schichtvarianten  $ZrC_g-L$  und  $ZrC_g-S$  (a-C:H:Zr) [LKB+02] ..... 42

Abbildung 3.15: REM-Aufnahmen der Querbruchflächen der Schichtvarianten  $ZrC_g-L/S$  (a) und  $ZrC_g-S/S$  (a-C:H:Zr) (b) [LKB+02]..... 43

Abbildung 3.16: Chemische Elementzusammensetzung der Schichtvarianten  $ZrC_g-L/R$  (a) und  $ZrC_g-S/R$  (a-C:H:Zr) (b) als Funktion des Abstands zur Probenoberfläche  $\Delta d$  [LBM+02] ..... 44

Abbildung 3.17: Wälzkörperverschleiß  $m_{WK}$  als Funktion der Versuchslaufzeit  $t_{FE8}$  im FE8-Prüfstand für die Schichtvarianten  $ZrC_g-L/S$  und  $ZrC_g-S/S$  (a-C:H:Zr), DLC-REF 1 und DLC-REF 2 (a-C:H:W) auf Lagerscheiben [GJL+10, Kuh06] ..... 46

Abbildung 3.18: Modifikation des Schichtsystems  $ZrC_g-L/S$  (a-C:H:Zr) mit linearer Gradierung durch zusätzliche Abscheidung einer reinen Kohlenstoffdeckschicht mit Schichtdicken A (a) und B (b) ..... 47

Abbildung 3.19: Wälzkörperverschleiß $m_{WK}$ als Funktion der Versuchslaufzeit $t_{FE8}$ im FE8-Prüfstand für die Schichtvarianten $ZrC_g+C\_L/A$ , $ZrC_g+C\_L/B$ , $ZrC_g-L/S$ und $ZrC_g-S/S$ (a-C:H:Zr) auf Lagerscheiben [Kuh06] .....	47
Abbildung 3.20: Konzepte zur Modifizierung des gradierten Schichtsystems $ZrC_g$ (a-C:H:Zr) .....	49
Abbildung 3.21: Wälzkörperverschleiß $m_{WK}$ als Funktion der Versuchslaufzeit $t_{FE8}$ im FE8-Prüfstand für die Schichtvarianten $ZrC_g-L/S+R_{opt}$ , $ZrC_g-L/S$ und $ZrC_g-S/S$ , $ZrC_g+C\_L/A$ und $ZrC_g+C\_L/B$ (a-C:H:Zr) auf Lagerscheiben [GJL+10].....	51
Abbildung 5.1: Übersicht industriennahe Beschichtungsanlage des Typs CC800/9 „Carbon“ der CEMECON AG .....	55
Abbildung 5.2: Grafische Darstellung des Beschichtungsprozesses zur Herstellung des gradierten Schichtsystems $ZrC_g$ (a-C:H:Zr).....	56
Abbildung 5.3: Übersicht Laserflash (a) und Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit $\lambda(T)$ über den Gesamtwärmewiderstand $R$ (b) .....	59
Abbildung 5.4: Übersicht geschleppter Motorenprüfstand am vka (a) und hydrodynamische Gleitlager in Serienausführung und in Prototypenausführung (b) im eingebauten Zustand bei Raumtemperatur [BB16, PNP+13] .....	64
Abbildung 5.5: Übersicht Zweischeiben-Prüfstand nach FZG-Bauart an der FZG (a) und Geometrie der Prüfscheiben (b) [FZG, TU München] .....	65
Abbildung 5.6: Übersicht Stirnradwirkungsgrad-Prüfstand an der FZG (a) und Geometrie der Verzahnung C-PT (b) [FZG, TU München] .....	68
Abbildung 6.1: Aufteilung der Reibungsverluste als Funktion der Motordrehzahl in einem Ottomotor [KG96] .....	75
Abbildung 6.2: Reibmitteldruck $p_{mr}$ als Funktion der Motordrehzahl $n$ an den Betriebspunkten $T_{Ol} = T_{KM} = 35 \text{ °C}$ (a) und $T_{Ol} = T_{KM} = 90 \text{ °C}$ (b) im geschleppten Motorenprüfstand [BB16, BBK+14, BSM+15, PNP+13, Rin14] .....	77
Abbildung 6.3: Relativer Reibmitteldruck $\Delta p_{mr}$ als Funktion der Motordrehzahl $n$ an den Betriebspunkten $T_{Ol} = T_{KM} = 35 \text{ °C}$ (a) und $T_{Ol} = T_{KM} = 90 \text{ °C}$ (b) im geschleppten Motorenprüfstand .....	78
Abbildung 6.4: Ölvolumenstrom $V_{Ol}$ durch die fünf Hauptlager als Funktion der Motordrehzahl $n$ an den Betriebspunkten $T_{Ol} = T_{KM} = 35 \text{ °C}$ (a) und $T_{Ol} = T_{KM} = 90 \text{ °C}$ (b) im geschleppten Motorenprüfstand [BB16, PNP+13].	79

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 6.5:	Relative Reibleistung $\Delta P_R$ als Funktion des relativen Lagerspiels $\Psi$ bei Motordrehzahlen $n = 2.000 \text{ min}^{-1}$ und $n = 6.000 \text{ min}^{-1}$ am Betriebspunkt $T_{Ol} = T_{KM} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ im geschleppten Motorenprüfstand [BB16, PNP+13].....	80
Abbildung 6.6:	Gemittelte Hauptlagerrückentemperatur $T_{HL}$ als Funktion der Motordrehzahl $n$ am Betriebspunkt $T_{Ol} = T_{KM} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ im geschleppten Motorenprüfstand [BB16, PNP+13].....	81
Abbildung 6.7:	Einteilung der Reibungsbereiche auf Zahnflanken als Funktion der Umfangsgeschwindigkeit $v_t$ (a) nach [NBL07] und Verlustverhalten eines Getriebes (b) [Hin14, SMM+13c] .....	83
Abbildung 6.8:	Mittlerer Reibungskoeffizient $\mu$ und relative Schmierfilmdicke $\lambda$ als Funktion des Schlupf $s$ im Zweischeiben-Prüfstand [BBB+14c, BBS+15a, BBS+15b, BBK+14, May14, SMM+13b].....	86
Abbildung 6.9:	Massentemperatur $T_M$ (a) und relative Schmierfilmdicke $\lambda$ (b) als Funktion des Schlupf $s$ im Zweischeiben-Prüfstand (Daten entnommen aus [May14, SMM+13b]) .....	87
Abbildung 6.10:	Mittlerer Reibungskoeffizient $\mu$ und relative Schmierfilmdicke $\lambda$ als Funktion des Schlupf $s$ im Zweischeiben-Prüfstand [BBS+15b, May14, SMM+13b] ...	89
Abbildung 6.11:	Massentemperatur $T_M$ (a) und relative Schmierfilmdicke $\lambda$ (b) als Funktion des Schlupf $s$ im Zweischeiben-Prüfstand (Daten entnommen aus [May14, SMM+13b]) .....	90
Abbildung 6.12:	REM-Aufnahmen der funktionalen Oberfläche und der Querbruchflächen ungelauener Scheiben (a) und nach den tribologischen Versuchen im Zweischeiben-Prüfstand an Position 1 (b) und an Position 2 (c) .....	91
Abbildung 6.13:	Raman-Übersichtspektrum auf der funktionalen Oberfläche von $\text{ZrC}_g$ vor und nach den tribologischen Untersuchungen im Zweischeiben-Prüfstand	92
Abbildung 6.14:	Mittlerer Reibungskoeffizient $\mu$ im Zahneingriff und relative Schmierfilmdicke $\lambda$ als Funktion der Umfangsgeschwindigkeit $v_t$ im Stirnradwirkungsgrad-Prüfstand [Hin14, SMM+13c] .....	93
Abbildung 6.15:	Mittlerer Reibungskoeffizient $\mu$ im Zahneingriff und relative Schmierfilmdicke $\lambda$ als Funktion der Umfangsgeschwindigkeit $v_t$ im Stirnradwirkungsgrad-Prüfstand [BBB+14c, BBS+15a, BBS+15b, BBK+14, BSM+15, Hin14, SMM+13c].....	95

Abbildung 6.16: Mittlerer Reibungskoeffizient $\mu$ und relative Schmierfilmdicke $\lambda$ als Funktion des Schlupf $s$ im Zweischeiben-Prüfstand [BBS+15a, BBS+15b, BBK+14, May14, SMM+13b] .....	97
Abbildung 6.17: Prozentuale Reduzierung des Reibungskoeffizienten $\Delta\mu$ und relative Schmierfilmdicke $\lambda$ als Funktion des Schlupf $s$ im Zweischeiben-Prüfstand (Daten entnommen aus [May14]) .....	98
Abbildung 6.18: Mittlerer Reibungskoeffizient $\mu$ als Funktion der Umfangsgeschwindigkeit $v_t$ im Stirnradwirkungsgrad-Prüfstand [Hin14] .....	99
Abbildung 6.19: Mittlerer Reibungskoeffizient $\mu$ im Zahnengriff als Funktion der Umfangsgeschwindigkeit $v_t$ im Stirnradwirkungsgrad-Prüfstand (Daten entnommen aus [Hin14]) .....	101
Abbildung 6.20: Schematische Darstellung der vollständigen Wandhaftung (a) und des Wandgleitens (b) (entnommen aus [KVV09] und modifiziert) .....	103
Abbildung 6.21: Wetting Envelope abgeleitet aus der Oberflächenenergie der Festkörper $\sigma_s$ und der Oberflächenspannung der Schmierstoffe $\sigma_f$ .....	104
Abbildung 6.22: Korrelationsanalyse zwischen Reibungskoeffizient $\mu$ aus BoD-Modellprüfstand und Grenzflächenspannung $\sigma_{sl}$ aus Kontaktwinkelmessungen für 16MnCr5E (a) und ZrC <sub>g</sub> (b) [BBS+15b] .....	105
Abbildung 6.23: Korrelationsanalyse zwischen Reibungskoeffizient $\mu$ aus BoD-Modellprüfstand und Adhäsionsenergie $W_{Ad}$ aus Kontaktwinkelmessungen für 16MnCr5E (a) und ZrC <sub>g</sub> (b) [BBS+15b] .....	106
Abbildung 6.24: Korrelationsanalyse zwischen Reibungskoeffizient $\mu$ aus BoD-Modellprüfstand und Spreitungskoeffizient $S$ aus Kontaktwinkelmessungen für 16MnCr5E (a) und ZrC <sub>g</sub> (b) .....	106
Abbildung 6.25: Korrelationsanalyse zwischen Reibungskoeffizient $\mu$ aus Stirnradwirkungsgrad-Prüfstand bei $p_c(KS\ 7) = 1.343\ \text{N/mm}^2$ und $T_{Ol,S} = 40\ \text{°C}$ und Grenzflächenspannung $\sigma_{sl}$ (a), Adhäsionsenergie $W_{Ad}$ (b) und Spreitungskoeffizient $S$ (c) aus Kontaktwinkelmessungen (Daten entnommen aus [Hin14]) .....	109

Abbildung 6.26: Korrelationsanalyse zwischen Reibungskoeffizient  $\mu$  aus Stirnradwirkungsgrad-Prüfstand bei  $p_c(KS\ 9) = 1.723\ \text{N/mm}^2$  und  $T_{01s} = 90\ \text{°C}$  und Grenzflächenspannung  $\sigma_{sl}$  (a), Adhäsionsenergie  $W_{Ad}$  (b) und Spreitungskoeffizient  $S$  (c) aus Kontaktwinkelmessungen (Daten entnommen aus [Hin14])..... 111

Abbildung 6.27: Modellvorstellung zum Einfluss thermophysikalischer Eigenschaften auf das Reibungsverhalten im Wälzkontakt: Eindimensionales Temperaturprofil (a) und eindimensionale, instationäre Wärmeleitung nach Fourier (b)..... 113

Abbildung 6.28: Schematischer Überblick über das Konzept diskreter Schichtvarianten  $Zr_xC_{1-x}$  (a-C:H:Zr) aus erster Entwicklungsphase ..... 115

Abbildung 6.29: REM- Aufnahmen der Querbruchflächen der diskreten Schichtvarianten  $Zr_xC_{1-x}$  (a-C:H:Zr) als Funktion des Reaktivgasflusses  $F(C_2H_2)$  aus erster Entwicklungsphase..... 117

Abbildung 6.30: Schematischer Überblick über das Konzept diskreter Schichtvarianten  $Zr_xC_{1-x}$  (a-C:H:Zr) aus zweiter Entwicklungsphase..... 118

Abbildung 6.31: Grafische Darstellung der Beschichtungsprozesse zur Herstellung der diskreten Schichtvarianten  $Zr_xC_{1-x}$  (a-C:H:Zr) mit Schichtdicke  $d_l = 3,0\ \mu\text{m}$  ..... 119

Abbildung 6.32: Chemische Elementzusammensetzung der diskreten Schichtvarianten  $Zr_xC_{1-x}$  und  $ZrC_g$  (a-C:H:Zr) in Anteilen  $x(\text{Zr})$  und  $x(\text{C})$  als Funktion des Reaktivgasflusses  $F(C_2H_2)$ ..... 119

Abbildung 6.33: Wasserstoffgehalte  $x_o(\text{H})$  und  $x_s(\text{H})$  der diskreten Schichtvarianten  $Zr_xC_{1-x}$  und  $ZrC_g$  (a-C:H:Zr) als Funktion des Reaktivgasflusses  $F(C_2H_2)$  ..... 120

Abbildung 6.34: Tiefenaufgelöste Ermittlung des Wasserstoffgehalts  $x(\text{H})$  ausgewählter diskreter Schichtvarianten  $Zr_xC_{1-x}$  und  $ZrC_g$  (a-C:H:Zr) ..... 121

Abbildung 6.35: Position des G-Peaks  $\nu(\text{G})$  und Quotient  $I(\text{D}) / I(\text{G})$  als Funktion des Kohlenstoffgehalts  $x(\text{C})$  in den Schichtvarianten..... 122

Abbildung 6.36: REM- Aufnahmen der Querbruchflächen der diskreten Schichtvarianten  $Zr_xC_{1-x}$  (a-C:H:Zr) als Funktion des Reaktivgasflusses  $F(C_2H_2)$  aus zweiter Entwicklungsphase..... 123

Abbildung 6.37: Temperaturleitfähigkeit  $\alpha(T)$  als Funktion des Kohlenstoffgehalts  $x(\text{C})$  (a) und des Wasserstoffgehalts  $x_s(\text{H})$  (b) bei Schichtdicke  $d_l = 3,0\ \mu\text{m}$  ..... 124

Abbildung 6.38: Temperaturleitfähigkeit $\alpha(T)$ als Funktion des Kohlenstoffgehalts $x(C)$ (a) und des Wasserstoffgehalts $x_S(H)$ (b) bei $d_s = 0,5 \mu\text{m}$ .....	125
Abbildung 6.39: Spezifische Wärmekapazität $c_p(T)$ als Funktion des Kohlenstoffgehalts $x(C)$ (a) und des Wasserstoffgehalts $x_S(H)$ (b) bei $d_l = 3,0 \mu\text{m}$ .....	126
Abbildung 6.40: Schichtdickenunabhängige Wärmeleitfähigkeit $\lambda(T)$ als Funktion des Kohlenstoffgehalts $x(C)$ (a) und des Wasserstoffgehalts $x_S(H)$ (b).....	128
Abbildung 6.41: Schichtdickenunabhängige Temperaturleitfähigkeit $\alpha(T)$ als Funktion des Kohlenstoffgehalts $x(C)$ (a) und des Wasserstoffgehalts $x_S(H)$ (b).....	129
Abbildung 6.42: Grafische Darstellung des Beschichtungsprozesses zur Herstellung des gradierten Schichtsystems $\text{TiC}_g$ (a-C:H:Ti) .....	130
Abbildung 6.43: Wärmeleitfähigkeit $\lambda(T)$ (a) und Temperaturleitfähigkeit $\alpha(T)$ (b) als Funktion des Verhältnisses Metall : Kohlenstoff für $\text{ZrC}_g$ (a-C:H:Zr) und $\text{TiC}_g$ (a-C:H:Ti).....	131
Abbildung 6.44: Mittlerer Reibungskoeffizient $\mu$ als Funktion des Schlupf $s$ im Zweischeiben-Prüfstand .....	132
Abbildung 6.45: Massentemperatur $T_M$ als Funktion des Schlupf $s$ im Zweischeiben-Prüfstand (a) und Adhäsionsenergie $W_{Ad}$ und Spreitungskoeffizient $S$ zwischen den Prüfscheiben und dem Getriebeöl MIN100 (b) .....	134
Abbildung 6.46: Berechnetes Temperaturfeld im TEHD-Kontakt des Zweischeiben-Prüfstands bei Einsatz unbeschichteter Prüfscheiben 16MnCr5E (a) und mit $\text{ZrC}_g$ (a-C:H:Zr) beschichteter Prüfscheiben (b) nach Lohner et al. [LZS+16] .....	137
Abbildung 8.1: REM-Aufnahmen der Querbruchflächen der Schichtvarianten a-C:Zr <sub>x</sub> C <sub>1-x</sub> als Funktion der Kathodenleistung $P$ im dcMS- und HPPMS-Modus.....	140

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 2.1: Zeitliche Entwicklung des Großserieneinsatzes von Schichten in der Hochdruckpumpe von Dieseleinspritzsystemen [KM14, vdK08] ..... 9

Tabelle 3.1: Nomenklatur und Klassifizierung diamantähnlicher Kohlenstoffschichten nach VDI-Richtlinie 2840 [NN12b]..... 17

Tabelle 3.2: Substratwerkstoffe, deren Anlasstemperatur und Oberflächenhärte in den Anwendungen des SFB 442 [BBE+10]..... 22

Tabelle 3.3: Übersicht zu den synthetischen Estern und deren physikalischen Daten ..... 26

Tabelle 3.4: Reaktivgasrampe für die Abscheidung der gradierten Schicht  $ZrC_g$  (a-C:H:Zr) mittels dcMS..... 39

Tabelle 3.5: Schichtdicke  $d$  und mechanische Eigenschaften Eindringmodul  $E_{IT}$  und Universalhärte  $HU$  der Schichtvarianten  $ZrC_{g-t_{on}/t_{off}}$  (a-C:H:Zr) [BBL+05] . 50

Tabelle 5.1: Praxisnahe Betriebsbedingungen im Zweiseiben-Prüfstand ..... 66

Tabelle 5.2: Praxisnahe Betriebsbedingungen im Stirnradwirkungsgrad-Prüfstand ..... 69

**Abkürzungen**

a-C:H	Wasserstoffhaltige, diamantähnliche Kohlenstoffschicht
a-C:H:Hf (HfC <sub>g</sub> )	Wasserstoff- und hafniumhaltige, diamantähnliche Kohlenstoffschicht mit gradiertem Eigenschaftsprofil
a-C:H:Me	Wasserstoff- und metallhaltige, diamantähnliche Kohlenstoffschicht
a-C:H:Ti (TiC <sub>g</sub> )	Wasserstoff- und titanhaltige, diamantähnliche Kohlenstoffschicht mit gradiertem Eigenschaftsprofil
a-C:H:W	Wasserstoff- und wolframhaltige, diamantähnliche Kohlenstoffschicht
a-C:H:X	Wasserstoff- und elementhaltige, diamantähnliche Kohlenstoffschicht
a-C:H:Zr (ZrC <sub>g</sub> )	Wasserstoff- und zirkoniumhaltige, diamantähnliche Kohlenstoffschicht mit gradiertem Eigenschaftsprofil
a-C:H:Zr (Zr <sub>x</sub> C <sub>1-x</sub> )	Diskrete wasserstoff- und zirkoniumhaltige, diamantähnliche Kohlenstoffschicht
AiF	Arbeitsgemeinschaft industrielle Forschungsvereinigungen e.V.
AlSn	Binäres Schichtsystem Aluminium-Zinn
Ar	Chemisches Elementsymbol Argon
ASTM	Internationale Standardisierungsorganisation (engl.: American Society for Testing and Materials)
AW	Verschleißinhibitor, Additiv (engl.: Anti Wear)
B <sub>4</sub> C	Binäres Schichtsystem Borkarbid
bcc	Kubisch raumzentriertes Kristallgitter (engl.: Body Centered Cubic)
BMWi	Bundeswirtschaftsministerium
C	Chemisches Elementsymbol Kohlenstoff
CI	Korrosionsinhibitor, Additiv (engl.: Corrosion Inhibitor)
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chemisches Elementsymbol Chrom
CrN, Cr <sub>x</sub> N	Binäres Schichtsystem Chromnitrid
(Cr,Al)N	Ternäres Schichtsystem Chromaluminiumnitrid
CRS	Common Rail System in der Dieseldirekteinspritzung
Cu	Chemisches Elementsymbol Kupfer
dcMS	Gleichstrom Magnetron Sputtering (engl.: Direct Current Magnetron Sputtering)

## Abkürzungen, Formelzeichen und Einheiten

---

DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
d.h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DLC	Diamantähnliche Kohlenstoffschicht (engl.: Diamond-like Carbon)
DLC-REF	Unter industriellen Bedingungen hergestellte diamantähnliche Kohlenstoffschicht
DSC	Dynamische Differenzkalorimetrie (engl.: Differential Scanning Calorimetry)
EG	Europäische Gemeinschaft
EHD	Elastohydrodynamik
EN	Europäische Norm
EP	Verschleißinhibitor, Additiv (engl.: Extreme Pressure)
EU	Europäische Union
F	Chemisches Elementsymbol Fluor
fcc	Kubisch-flächenzentriertes Kristallgitter (engl.: Face Centered Cubic)
Fe	Chemisches Elementsymbol Eisen
FIB	Fokussierter Ionenstrahl (engl.: Focused Ion Beam, Präparationsmethode)
FM	Reibwertverbesserer, Additiv (engl.: Friction Modifier)
FVA	Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V.
FVV	Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V.
FZG	Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau, Technische Universität München
GDOES	Optische Emissionsspektroskopie in der Glimmentladung (engl.: Glow Discharge Optical Emission Spectroskopie)
GID	Streifender Einfall in der Röntgendiffraktometrie (engl.: Grating Incidence Diffraction)
GMO	Glycerolmonooleat (FM-Additiv)
H	Chemisches Elementsymbol Wasserstoff
HC	Kohlenwasserstoffe
hcp	Hexagonal dichteste Kugelpackung (engl.: Hexagonal Closest-Packed)
Hf	Chemisches Elementsymbol Hafnium
HPPMS	Hochleistungspuls-Magnetron Sputtering (engl.: High Power Pulse Magnetron Sputtering)

HRC	Härteskala nach Rockwell C
HRTEM	Hochauflösende Transmissionselektronenmikroskopie
HV	Härteskala nach Vickers
HZDR	Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf
IFAS	Institut für fluidtechnische Antriebe und Steuerungen, RWTH Aachen University
IGF	Industrielle Gemeinschaftsforschung
IKV	Institut für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk, RWTH Aachen University
IME	Institut für Maschinenelemente und Maschinengestaltung, RWTH Aachen University
InSb	Indiumantimonid
IOT	Institut für Oberflächentechnik, RWTH Aachen University
ISO	Internationale Normungsorganisation (engl.: International Organization for Standardization)
ISO VG	Internationale Viskositätsklassen für Schmierstoffe
JCPDS	Joint Committee on Powder Diffraction Standards
KS	Kraftstufe im Zahnradwirkungsgrad-Prüfstand
MD	Metalldeaktivator, Additiv (engl.: Metal Deactivator)
Me	Metall
mfMS	Mittelfrequenz Magnetron Sputtering (engl.: Middle Frequency Magnetron Sputtering)
MIN	Mineralöl
Mo	Chemisches Elementsymbol Molybdän
MoDTC	Molybdändithiocarbamat (FM-Additiv)
MoS <sub>2</sub>	Molybdändisulfid
MS	Magnetron Sputtering
Nd:YAG	Neodym dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
Nkw	Leichter Nutzkraftwagen
NO <sub>x</sub>	Stickstoffoxide
NRA	Nukleare Reaktionsanalyse (engl.: Nuclear Reaction Analysis)
O <sub>2</sub>	Sauerstoff

## Abkürzungen, Formelzeichen und Einheiten

---

PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PAO	Polyalphaolefin
PCAE	Gepulste Lichtbogenverdampfung (engl.: Pulsed Cathodic Arc Evaporation)
PE	Polyether
PECVD	Plasmaunterstützte chemische Gasphasenabscheidung (engl.: Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition)
PG	Polyglykol
Pkw	Personenkraftwagen
PM	(Fein-)staubpartikel
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVD	Physikalische Gasphasenabscheidung (engl.: Physical Vapour Deposition)
RBS	Rutherford-Rückstreu-Spektrometrie (engl.: Rutherford Backscattering Spectrometry)
REM	Rasterelektronenmikroskopie
REACH	Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung von Chemikalien (engl.: Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals)
RF	Radiofrequenz (engl.: Radio Frequency)
SCR	Selektive katalytische Reduktion (engl.: Selective Catalytic Reduction)
SE	Sekundärelektronen
SFB	Sonderforschungsbereich der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG)
Si	Chemisches Elementsymbol Silizium
ta-C	Tetraedrisch amorphe, diamantähnliche Kohlenstoffschicht
ta-C:H	wasserstoffhaltige, tetraedrisch amorphe, diamantähnliche Kohlenstoffschicht
TEHD	Thermo-Elastohydrodynamik
Ti	Chemisches Elementsymbol Titan
TiN	Binäres Schichtsystem Titannitrid
TMP	Trimethylpropanester
USA	Vereinigte Staaten von Amerika (engl. United States of America)
VBA	Verband der Automobilindustrie e.V.
XVIII	

VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
vka	Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen, RWTH Aachen University
W	Chemisches Elementsymbol Wolfram
WK	Wälzkörper
WS <sub>2</sub>	Wolframdisulfid
WW	Lehr- und Forschungsgebiet Werkstoffwissenschaften, RWTH Aachen University
WZL	Werkzeugmaschinenlabor, RWTH Aachen University
XRD	Röntgendiffraktometrie (engl.: X-Ray Diffractometry)
z.B.	zum Beispiel
ZnDTP	Zinkdithiophosphat (AW/EP-Additiv)
Zr	Chemisches Elementsymbol Zirkonium
ZrC	Zirkoniumkarbid
ZrC <sub>g</sub>	Gradiertes Zirkoniumkarbid
ZrC <sub>g</sub> +C <sub>L</sub> /A	Gradiertes Zirkoniumkarbid mit linearer Gradierung und reiner Kohlenstoffdeckschicht der Schichtdicke A
ZrC <sub>g</sub> +C <sub>L</sub> /B	Gradiertes Zirkoniumkarbid mit linearer Gradierung und reiner Kohlenstoffdeckschicht der Schichtdicke B
ZrC <sub>g</sub> -L	Gradiertes Zirkoniumkarbid mit linearer Gradierung
ZrC <sub>g</sub> -L/R	Gradiertes Zirkoniumkarbid mit linearer Gradierung ohne Substratrotation
ZrC <sub>g</sub> -L/S	Gradiertes Zirkoniumkarbid mit linearer Gradierung mit Substratrotation
ZrC <sub>g</sub> -L/S+R	Gradiertes Zirkoniumkarbid mit linearer Gradierung und Einbau rein metallischer Relaxationsschichten
ZrC <sub>g</sub> -S	Gradiertes Zirkoniumkarbid mit S-förmiger Gradierung
ZrC <sub>g</sub> -S/R	Gradiertes Zirkoniumkarbid mit S-förmiger Gradierung ohne Substratrotation
ZrC <sub>g</sub> -S/S	Gradiertes Zirkoniumkarbid mit S-förmiger Gradierung mit Substratrotation

**Formelzeichen / Einheit**

$a$	nm	Atomabstand
$a$	mm	Achsabstand im Zweischeiben- und Stirnradwirkungsgrad-Prüfstand
$c_p(T)$	J/kgK	spezifische Wärmekapazität
$d$	$\mu\text{m}$	Schichtdicke
$d_K$	nm	Korngröße in Nanokompositen
$\Delta d$	nm	Eindringtiefe
$f$	Hz	Frequenz
$h_{0,th}$	$\mu\text{m}$	Schmierfilmdicke im Parallelspalt des Wälzkontakts, thermisch korrigiert
$h_{min,th}$	$\mu\text{m}$	Minimale Schmierfilmdicke an der Einschnürung, thermisch korrigiert
$l_{eff}$	mm	effektive Laufflächenbreite der Prüfscheiben
$m$	kg	Masse
$m$	-	Richtungskonstante nach Ubbelohde-Walther
$m_V$	mg	Gravimetrische Verschleißmasse
$m_{WK}$	mg	Verschleißmasse der Wälzkörper (WK)
$n$	$\text{min}^{-1}$	Drehzahl der Kurbel- oder Nockenwelle
$p$	Pa	Druck
$p_C$	$\text{N/mm}^2$	Hertz'sche Kontaktpressung am Wälzpunkt C
$p_H$	$\text{N/mm}^2$	Hertz'sche Kontaktpressung
$p_{max}$	MPa	Maximaler Systemdruck im Common Rail System (CRS)
$p_{mr}$	MPa	Reibmitteldruck im geschleppten Motorenprüfstand
$\Delta p_{mr}$	%	Prozentualer Reibmitteldruck im geschleppten Motorenprüfstand
$p_{Ol}$	MPa	Öldruck im Verbrennungsmotor
$s$	%	Schlupf
$t$	min	Standzeit in der Oxidationsprüfung
$t$	s	Prozessdauer bei der Schichtabscheidung
$t_{FE8}$	h	Prüfdauer im FE8-Prüfstand
$t_{off}$	$\mu\text{s}$	Pulsauszeit
$t_{on}$	$\mu\text{s}$	Pulsanzzeit
$t_{pulse}$	$\mu\text{s}$	Pulslänge $t_{pulse} = t_{on} + t_{off}$
$v_g$	m/s	Gleitgeschwindigkeit der Prüfscheiben
$v_\Sigma$	m/s	Summengeschwindigkeit der Prüfscheiben
$v_{rel}$	m/s	Relativgeschwindigkeit von Grund- und Gegenkörper

$v_t$	m/s	Umfangsgeschwindigkeit der Prüfzahnräder
$x$	g/km	Schadstoffemissionen CO <sub>2</sub>
$x$	At.-%	Elementgehalt / At.-%
$x_o(H)$	At.-%	Wasserstoffgehalt im oberflächennahen Bereich ( $20 \text{ nm} \leq \Delta d \leq 30 \text{ nm}$ )
$x_R$	s	Position der Relaxationsschicht
$x_s(H)$	At.-%	Wasserstoffgehalt in der Schicht ( $\Delta d = 300 \text{ nm}$ )
$x(C_2H_2)$	%	Reaktivgasanteil im Rezipienten
$\Delta x$	g/km	Überschreitung des gesetzlich festgelegten CO <sub>2</sub> -Grenzwerts
$\Delta x(C_2H_2)$	min <sup>-1</sup>	Zeitliche Änderung des Reaktivgasanteils / min <sup>-1</sup>
$B$	mm	Breite der hydrodynamischen Gleitlagerschalen
$D_1$	mm	Horizontaler Durchmesser der hydrodynamischen Gleitlagerschalen
$D_2$	mm	Vertikaler Durchmesser der hydrodynamischen Gleitlagerschalen
$E$	eV	Energie
$E$	keV	Einschussenergie der Ionenstrahlung
$\Delta E$	eV	Spektrale Auflösung
$EHT$	mm	Einsatzhärtungs-Härtetiefe bei Prüfscheiben und -zahnradern
$E_{IT}$	GPa	Eindringmodul
$F(Ar)$	sccm	Prozessgasfluss Argon (Ar)
$F(C_2H_2)$	sccm	Reaktivgasfluss Acetylen (C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )
$F_N$	N	Normalkraft (Last)
$H$	mm	Hub des Verbrennungsmotors
$H$	HRC	Härte
$HU$	GPa	Universalhärte
$I$	-	Intensität
$M_{HL}$	Nm	Reibmoment der Hauptlagerung im Kurbeltrieb
$M_{Max}$	Nm	maximales Drehmoment
$\Delta M$	%	Relatives Reibmoment
$N_R$	-	Anzahl der Relaxationsschichten
$P$	W	Kathodenleistung im Beschichtungsprozess
$P_{Ätz}$	W	Ätzleistung im Beschichtungsprozess
$P_H$	W	Heizleistung im Beschichtungsprozess
$P_{Nenn}$	kW	Nennleistung des Verbrennungsmotors

## Abkürzungen, Formelzeichen und Einheiten

---

$\Delta P_R$	%	Prozentuale Reibleistungsreduzierung
$R$	$\mu\text{m}/\text{min}$	Abscheiderate bei der Schichtabscheidung
$R$	nm	Atomradius
$\Delta R$	nm	Abstand der Relaxationsschichten
$R_a$	$\mu\text{m}$	Arithmetischer Mittenrauwert (linienbezogen)
$R_q$	$\mu\text{m}$	Quadratische Rauheit (linienbezogen)
$R_z$	$\mu\text{m}$	Gemittelte Rautiefe (linienbezogen)
$R^2$	-	Bestimmtheitsmaß in Regressionsanalyse
$S$	€	Strafzahlung bei Überschreitung gesetzlicher Grenzwerte
$S$	mN/m	Spreitungskoeffizient
$S_a$	$\mu\text{m}$	Arithmetischer Mittenrauwert (flächenbezogen)
$S_z$	$\mu\text{m}$	Maximale Rauheitshöhe (flächenbezogen)
$T$	°C	Temperatur
$T_{Atz}$	°C	Ätztemperatur im Beschichtungsprozess
$T_{Fla}$	°C	Blitztemperatur nach Blok
$\Delta T_{Fla}$	K	Temperaturerhöhung infolge der Blitztemperatur nach Blok
$T_H$	°C	Heiztemperatur im Beschichtungsprozess
$T_{HL}$	°C	Hauptlagerrückentemperatur der hydrodynamischen Gleitlagerschalen
$T_{KM}$	°C	Kühlmitteltemperatur im geschleppten Motorenprüfstand
$T_M$	°C	Massentemperatur $(T_{M1} + T_{M2}) / 2$ der Prüfscheiben 1 und 2
$T_{Ol}$	°C	Öltemperatur im geschleppten Motorenprüfstand
$T_{Ol,E}$	°C	Öleinspritztemperatur
$T_{Ol,S}$	°C	Ölsumpftemperatur
$U$	V	elektrische Spannung
$U_{Bias}$	V	Biasspannung am Substrattisch
$V_h$	$\text{cm}^3$	Hubvolumen des Verbrennungsmotors
$VI$	-	Viskositätsindex
$\dot{V}_{Ol}$	l/min	Ölvolumenstrom im geschleppten Motorenprüfstand
$W_{Ad}$	mN/m	Adhäsionsenergie
$W_{Ko}$	mN/m	Kohäsionsenergie
$\alpha$	°	Verkipfungswinkel im REM
$\alpha(T)$	$\text{mm}^2/\text{s}$	Temperaturleitfähigkeit

$\dot{\gamma}$	$s^{-1}$	Schergeschwindigkeit
$\varepsilon$	-	Verdichtungsverhältnis des Verbrennungsmotors
$\zeta$	%	Gesamtverlustgrad des Getriebes
$\eta$	%	Gesamtwirkungsgrad des Getriebes
$\eta$	Pa · s	dynamische Viskosität
$\theta$	°	Kontaktwinkel
$\theta$	°	Beugungswinkel
$\lambda$	-	relative Schmierfilmdicke
$\lambda$	nm	Wellenlänge
$\lambda(T)$	W/mK	Wärmeleitfähigkeit
$\mu$	-	Reibungskoeffizient
$\Delta\mu$	%	Prozentuale Reibungsreduzierung
$\nu$	-	Querkontraktionszahl
$\nu_{40}$	mm <sup>2</sup> /s	kinematische Viskosität bei $T = 40$ °C
$\nu_{100}$	mm <sup>2</sup> /s	kinematische Viskosität bei $T = 100$ °C
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\sigma^d$	mN/m	dispersiver Anteil an der Oberflächenspannung
$\sigma_E$	GPa	Eigenspannung
$\sigma^p$	mN/m	polarer Anteil an der Oberflächenspannung
$\sigma_l$	mN/m	Oberflächenspannung des Fluids (l)
$\sigma_{lv}$	mN/m	Grenzflächenspannung in der Grenzfläche flüssig (l) / gasförmig (v)
$\sigma_s$	mN/m	Oberflächenenergie des Festkörpers (s)
$\sigma_{sl}$	mN/m	Grenzflächenspannung in der Grenzfläche fest (s) / flüssig (l)
$\sigma_{sv}$	mN/m	Grenzflächenspannung in der Grenzfläche fest (s) / gasförmig (v)
$\tau$	%	Tastgrad $\tau = t_{on} / (t_{on} + t_{off})$
$\tau$	N/mm <sup>2</sup>	Schubspannung
$\nu$	cm <sup>-1</sup>	Wellenzahl
$\Psi$	‰	Relatives Lagerspiel der hydrodynamischen Gleitlagerschalen
$\omega$	°	Einfallswinkel
$\emptyset$	mm	Bohrung des Verbrennungsmotors

**(SI-)Einheiten**

At.-%	Atomprozent
°C	Grad Celcius
€	Euro
eV	Elektronenvolt
J	Joule
K	Kelvin
Hz	Hertz
l	Liter
t	Tonne
kg	Kilogramm
h	Stunde
N	Newton
Nm	Newtonmeter
m	Meter
min	Minute
s	Sekunde
sccm	Standardkubikzentimeter pro Minute (engl.: Standard Cubic Centimeters per Minute)
Pa	Pascal
sccm	Standardkubikzentimeter pro Minute
V	Volt
W	Watt

**Prefixe**

n	10 <sup>-9</sup>	Nano
μ	10 <sup>-6</sup>	Mikro
m	10 <sup>-3</sup>	Milli
c	10 <sup>2</sup>	Centi
k	10 <sup>3</sup>	Kilo
M	10 <sup>6</sup>	Mega
G	10 <sup>9</sup>	Giga