



(Projekt zur Reibungs-Optimierung von **Motoren** durch **Einsatz** von triboaktiven Hochleistungskohlenstoff- sowie **Eisenbasisschichten** und **Schmierstoffen**)

Gemeinsamer Abschlussbericht der Projektpartner

Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2019 – 30.06.2022

Berichtszeitraum gesamte Projektlaufzeit

Zuwendungsempfänger:
(mit Förderkennzeichen) Federal Mogul 03ET1609 A
AVL 03ET1609 B
BMW 03ET1609 C
FUCHS 03ET1609 D
Fraunhofer, alle 3 03ET1609 E
MAN 03ET1609 F
Rolls-Royce Solutions 03ET1609 G
Schaeffler 03ET1609 H
Steinbeis 03ET1609 I
TU Dresden 03ET1609 K
VTD 03ET1609 L

Fälligkeitsdatum: 31.12.2022

Ansprechpartner: Dr. Steffen Hoppe, Federal Mogul (Projektleitung)

Projektträger: PTJ, Jülich

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Liste der Autoren:

Organisation	Autoren
Federal Mogul (Tenneco)	Dr. Steffen Hoppe, Dr. Gregor Englberger
AVL	Dr. Dirk Jaitner, Dr. Moritz Frobenius
BMW	Dr. Franz-Josef Wetzel, Dr. Wolfram Wagener; Herbert Szamalovic
FUCHS	Jürgen Rausch, Rolf Luther, Dr. Manfred Harperscheid
Fraunhofer IWM	Prof. Matthias Scherge, Prof. Michael Moseler, Joachim Faller
Fraunhofer IWS	Dr. Frank Kaulfuß, Frederic Schell, Thomas Kuntze, Dr. Volker Weihnacht
Fraunhofer LBF	Dr. Roland Klein
MAN	Dr. Peter Scharf, Klaus Prieger
Rolls-Royce Solution GmbH (RRS)	Frank Berbig, Peter Bretzel, Stefan Göbel, Norbert Markert
Schaeffler	Dr. Edgar Schulz
Steinbeis Innovationszentrum FN [SIZ]	Benjamin Kröger, Björn Michelberger
TU Dresden, LVM	Andreas Götze
VTD	Dr. Martin Kopte

Die Verantwortung für den Bericht liegt bei den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Einführung	11
I Kurzdarstellung.....	13
1 Aufgabenstellung	13
2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	13
3 Planung und Ablauf des Vorhabens	14
4 Anknüpfung an wissenschaftlichen und technischen Stand	16
5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	19
II Eingehende Darstellung	21
1 Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	21
1.1 Tribologiemodelle und deren Validierung (TP2000)	21
1.2 Schmierstoffstrategie (TP3000)	30
1.3 Beschichtung und Oberflächenstrukturierung (TP4000)	45
1.4 Systemkomponenten (TP5000)	65
1.5 Simulation Antriebsstrang (TP6000)	79
1.6 Funktions- und Effizienznachweise (TP7000)	94
2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	130
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	131
4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans.....	131
5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	132
6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	132
7 Referenzen.....	138

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	PROMETHEUS-Projektpartner als Wertschöpfungskette	14
Abbildung 2:	Visualisierung der Vernetzung der Teilprojekte im Vorhaben PROMETHEUS	15
Abbildung 3:	Zeitstrahl der vom BMWi geförderten Projekte im Forschungsfeld Tribologie	19
Abbildung 4:	Initiales Parameterkennfeld mit Reibwert in Grün, Verschleiß in Schwarz und der linearisierten Verschleißrate in Gelb. Im unteren Diagramm werden Pressungen in Rot und Gleitgeschwindigkeiten in Blau dargestellt.	21
Abbildung 5:	Schlüsselbetriebspunktkennfeld in optimierter Anordnung.....	22
Abbildung 6:	Stribeckkurven nach Einlauf der ta-C V1 Schichten mit unterschiedlichen Rauheiten nach Endbearbeitung (a) und Auftragung der resultierenden Reibwerte im Bereich des Minimums der Stribeckkurven über die initiale Spitzenrauheit Spk (b)).....	22
Abbildung 7:	Abhängigkeit der linearisierten Verschleißraten von DLCs mit nominellen, unterschiedlichen sp ³ -Gehalten.	23
Abbildung 8:	Einlaufkennfeld der ta-C:B Schicht mit RNT. Die grünen Balken stehen für die <i>in situ</i> AFM Messungen.	23
Abbildung 9:	Topographischer Einlauf der ta-C:B Schicht. Auftragung der mittels <i>in situ</i> AFM gemessenen Spitzenrauheit in (a) und der aus der Abnahme des Spitzenvolumens berechneten Verschleißrate in (b).....	24
Abbildung 10:	Mittels nanoDMA Nanoindentation bestimmte E-Modul in einer ta-C V1 Schicht innerhalb der Reibspur (grün) und im endbearbeiteten Bereich (orange).	25
Abbildung 11:	Durch XPS und Argonclusterionensputtern aufgenommen C1s Tiefenprofile einer ta-C V1 Schicht innerhalb der Reibspur (grün) und im endbearbeiteten Bereich (orange). Zum Vergleich der nominelle sp ² -Gehalt in Blau.	25
Abbildung 12:	Fluiddynamische Berechnung einer möglichen Strukturierung des Kolbenrings. Hier wurden zwei Rillen betrachtet, die symmetrisch um die Ringmitte herum angeordnet sind. Die Graphik zeigt Vorhersagen für die optimale Lagen und Breite der Rillen.	26
Abbildung 13:	Druckverteilung auf der Grundfläche	27
Abbildung 14:	Das Gleiten einer Hämatitoberfläche gegen einen ta-C	27
Abbildung 15:	Gleiten eines mit einem Glycerolmolekül geschmierten Hämatit/ta-C-Tribokontaktes.....	28
Abbildung 16:	Scherkonfiguration der Schmierstofflösung aus PAO4 (nicht sichtbar) und Sternpolymeren.....	29
Abbildung 17:	Schnappschuss eines wandnahen Sternpolymer Moleküls mit Illustration der wirkenden Kräfte. Umgebendes Grundöl wird nicht dargestellt.....	29
Abbildung 18:	Schmierstoffmuster und deren Formulierungsansätze.....	33
Abbildung 19:	Schmierstoffkenndaten.....	33
Abbildung 20:	Tribomesszelle - Verschleißbewertung dotierte und undotierte ta-C Schichten	35
Abbildung 21:	TMZ Verschleißkalotten im Vergleich: ta-C_v1 und (t)a-C_v2	35
Abbildung 22:	Resultate Tribomesszelle der BMW Umfänge - Quadrantendarstellung ...	37

Abbildung 23:	SRV BMW Umfänge – Reibungsbewertung	37
Abbildung 24:	Resultate Tribomesszelle der MAN-Umfänge - Quadrantendarstellung	38
Abbildung 25:	Resultate Tribomesszelle der Rolls-Royce-Umfänge - Quadrantendarstellung	39
Abbildung 26:	SRV Rolls-Royce-Umfänge – Reibungsbewertung	39
Abbildung 27:	TMZ Gleitlack	40
Abbildung 28:	SRV Kolbenhemdbeschichtung	41
Abbildung 29:	Schematische Darstellung der Adsorption eines Sternpolymers an eine Oberfläche	42
Abbildung 30:	Schematische Darstellung möglicher Synthesewege zu Sternpolymeren.	42
Abbildung 31:	Molmassenverteilungen von Sternpolymeren mit unvollständiger Kopplung (a und b) sowie mit vollständiger Kopplung (c)	43
Abbildung 32:	Proben von Sternpolymeren im Schmierstoff mit ungenügender (links) und ausreichender (rechts) Löslichkeit	43
Abbildung 33:	Reaktionsapparaturen zum Upscaling der Sternpolymersynthesen (links, 1,5 L, rechts 20 L)	44
Abbildung 34:	MTM Stribeckkurve	45
Abbildung 35:	Gehonte Beschichtung: Gegenüberstellung verschiedener Beschichtungsparameter auf die Ausprägung von Poren und Lamellen [Quelle BMW].	46
Abbildung 36:	Phasendiagramm (links), Beschichtungsaufbau (Mitte) und scheibenförmige Kathoden am Bsp. C-Fe5 at% (rechts)	47
Abbildung 37:	Entladungsspur bei stehender Kathode (links) und Entladungsstromabhängigkeit der Brennfleckbreite (rechts)	47
Abbildung 38:	Beschichtungsrate und Dotierstoffkonzentration (links) und mechanische Schichteigenschaften (rechts)	48
Abbildung 39:	REM-Oberflächenaufnahmen von 1 µm dicken (oben) und 4-5 µm dicken (t)a-C(:X)-Schichten (unten)	49
Abbildung 40:	Defektbehaftete Oberfläche von (t)a-C(:X)-Schichten in Abhängigkeit der Schichtdicke (links) und in Abhängigkeit der arithmetischen Mittenrauheit Ra (rechts)	49
Abbildung 41:	TEM-Aufnahme und Beugungsbild (oben) und Kryobrüche von (t)a-C(:X)- Schichten (unten)	50
Abbildung 42:	Kalotten von je 10 µm dicken gefilterten Schichten (erste Spalte) und (a)C:X-Schichten (ab zweiter Spalte)	50
Abbildung 43:	Reibwerte aus SRV-Tribometerscreening für (t)a-C(:X)-Schichten gegen Stahl	51
Abbildung 44:	Hexagonalanordnung (links), Einzelstruktur (Mitte), Mehrpuls-Layout (rechts)	51
Abbildung 45:	Lasergenerierte Haschur auf KR-Segmenten 82mm mit 20° Anstellwinkel sowie Sinusrillenstruktur	52
Abbildung 46:	a) Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für die Strukturierung der ta-C beschichteten Kolbenringe und b) Konfokalaufnahme der finalen Textur mit zugehörigem gemitteltem Profil sowie REM Aufnahme	53

Abbildung 47:	a) Referenz-Kolbenringoberfläche und Kolbenringoberfläche mit DLIP-Linienstruktur orthogonal zur Bewegungsrichtung und b) SE-Aufnahme eines strukturierten Rings.....	54
Abbildung 48:	Änderung der Reibmitteldrücke: a-C vs. DLIP mit BMW Motorrad-Schmierstoff und BMW PKW Schmierstoff. ta-Cv2 entspricht a-C.....	54
Abbildung 49:	Oberflächenanalytik der Einzylinder DLIP-Versuche mit BMW Motorrad-Schmierstoff (5W30). a) a-C und b) a-C-DLIP.	55
Abbildung 50:	Oberflächenanalytik der Einzylinder DLIP-Versuche mit BMW PKW-Schmierstoff (0W12). a) a-C und b) a-C-DLIP.	55
Abbildung 51:	IP1: Einfluss der Glättung auf das Reib- und Verschleißverhalten undotierter ta-C Varianten auf dem BMW Tribosystem.....	56
Abbildung 52:	IP2: Einfluss der Dotierung sowie Glättung auf das Reib- und Verschleißverhalten auf dem BMW-Tribosystem.....	57
Abbildung 53:	IP2: Einfluss der Dotierung auf das Reib- und Verschleißverhalten für das MAN-Tribosystem.....	58
Abbildung 54:	IP2: Bewertung der dotierten ta-C Varianten auf Basis des Rolls-Royce-Tribosystems.....	59
Abbildung 55:	IP3: Direkt-Laser strukturierte Topringe auf Basis des BMW-Tribosystems.....	60
Abbildung 56:	Demonstratoranlage für die partikelarme taC-Beschichtungen am Standort der VTD Vakuumtechnik Dresden GmbH.	60
Abbildung 57:	Vergleich der Auswirkungen verschiedener Filteransätze auf die normierte Partikelverteilungen gemessen auf der Schichtoberfläche.....	61
Abbildung 58:	Skizzenhafte Übersicht des Messaufbaus zur Untersuchung des Kohlenstofflichtbogenplasmas mit unterschiedlichen plasmadiagnostischen Mitteln (genauere Beschreibung siehe Text)	63
Abbildung 59:	Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen vom Laserzündplasma (a), dem Bogenplasma (c) und den Mikropartikeln (d) jeweils im senkrechten Einblick sowie frontal von der Bogenentladung (b).	63
Abbildung 60:	Exemplarisches optisches Emissionsspektrum einer Kohlenstoffbogenentladung und die normierten Peakverhältnisse als Funktion des Stromstieges des Bogenpulses.	64
Abbildung 61:	Exemplarische Darstellung der vorläufig analysierten zeitaufgelöster Langmuir- (links) und Gegenfeldanalysator-Messungen (rechts).....	64
Abbildung 62:	Verschleißgegenüberstellung Rails nach Motorlauf; rechts: Aufbau 3-teiliger Ölring	66
Abbildung 63:	Designanpassung automotives Rail.....	66
Abbildung 64:	Darstellung des Rollenschlepphebl-Zylinderkopf mit den relevanten Baugruppen.....	67
Abbildung 65:	Darstellung der beschichteten Rollenschlepphebel (oben rechts). Gemessener Reibmomentverlauf für die verschiedenen Varianten.	67
Abbildung 66:	Geschleppter MAN D26 Zylinderkopf bei Schaeffler.....	68
Abbildung 67:	Kipphebelvarianten im Reibmomentvergleich.....	68
Abbildung 68:	Einlaufprozedur der verschiedenen Kipphebelvarianten	69
Abbildung 69:	Vergleich des Reibmoments der verschieden Kipphebelvarianten	69

Abbildung 70:	Simulationsergebnisse zum Reibmomentverlauf während eines Nockenhubes	70
Abbildung 71:	Schematische Darstellung und Belastungskollektiv des KST-Versuchsaufbaus.....	71
Abbildung 72:	Schematische Darstellung und Belastungskollektiv des 2ST-Versuchsaufbaus.	71
Abbildung 73:	H_{IT}^3/E_{IT}^2 Verhältnis der dotierten Schichtsysteme im Vergleich zur undotierten ta-C Referenzschicht.	72
Abbildung 74:	Arithmetischer Mittelwert des I_D/I_G -Verhältnisses verschiedener Schichtsysteme.	73
Abbildung 75:	Mittlere stationäre Reibungskoeffizienten μ_{stat} aus den Kugel-Scheibe-Tribometer Versuchen.....	73
Abbildung 76:	Verschleißraten der Grund- und Gegenkörper nach dem KST Versuch mit repräsentativen LSM Aufnahmen der Verschleißkalotte der verwendeten 100Cr6-Kugel.	74
Abbildung 77:	Mittlere Reibungskoeffizienten μ_{2ST} nach den 2ST-Versuchen am Ende der Einlaufphase mit niedrigem Schlupf.....	75
Abbildung 78:	Mittlere Reibungskoeffizienten μ_{slip} nach den 2ST-Versuchen gemittelt über die durchlaufenen Schlupfbereiche von -20% bis +20% Schlupf.	75
Abbildung 79:	Gemittelte Verschleißraten der Grund- und Gegenkörper nach dem 2ST Versuch mit repräsentativen Aufnahmen der verwendeten Probekörper. .	76
Abbildung 80:	Anwendungsumfeld TribOntology.....	77
Abbildung 81:	Datenstrecke von den Ausgangsdaten bis zu den Ergebnissen basierend auf einem Expertensystem	78
Abbildung 82:	Skalenübergreifende Simulation zur Reduktion der Reibung und des Kraftstoffverbrauchs	80
Abbildung 83:	Realhubtribometer Simulationsmodelle und Validierung.....	82
Abbildung 84:	Vorgehensweise Reibmodellkalibrierung Kolbenring-Liner-Kontakt.....	82
Abbildung 85:	Simulationsmodell des Einzylindermotors des IAD der TU Dresden.....	84
Abbildung 86:	Simulation der Schmierstoffvarianten im Vergleich.....	85
Abbildung 87:	Berechnete Reibungsreduktion durch ta-C Beschichtung am Topring ...	86
Abbildung 88:	Berechnete Reibungsreduktion der Kolbengruppe für den Betriebsbereich	86
Abbildung 89:	Simulation Einzylindermotor Topring Varianten im Vergleich (2000 rpm) .	87
Abbildung 90:	Simulation Einzylindermotor Topring ta-C V2 mit DLIP Strukturierung ggü. ta-C V2.....	88
Abbildung 91:	Berechnete relative Reibungsreduktion der Topring Varianten im Vergleich (Betriebspunkte 1)	89
Abbildung 92:	Berechnete Reibungsreduktion durch ta-C Beschichtung am Topring ...	89
Abbildung 93:	Reibungsuntersuchung in der Gesamtfahrzeugsimulation.....	90
Abbildung 94:	1D-Simulationsmodell in Cruise M.....	91
Abbildung 95:	Simulierter NEFZ Fahrzyklus.....	92
Abbildung 96:	Reibungseinfluss auf den Kraftstoffverbrauch um Gesamtfahrzeugmodell	93
Abbildung 97:	Vergleich des Kraftstoffverbrauches / Zyklus im Gesamtfahrzeugmodell..	94

Abbildung 98:	Prüfmethodik um das STZ-Realhubtribometer.....	98
Abbildung 99:	Abgleich der Prüfmethoden hinsichtlich Funktionalität und Energetik.....	99
Abbildung 100:	Elementkonzentration der honoptimierten LDS Zylinderlaufbahn	100
Abbildung 101:	Vielversprechendste RHT-Ergebnisse der a) Pkw- und b) Motorrad-Versuchsreihe mit Schmierstoffvariation, DLIP-Strukturierungsvarianten und Beschichtungsvarianten (Dotierung).....	101
Abbildung 102:	Reibvorteile der ta-C Kompressionsringe im befeuerten Motorbetrieb	104
Abbildung 103:	Vermessene Kolbenhemdvarianten inkl. strukturierter Ausführungen.....	105
Abbildung 104:	Vielversprechendste Varianten für MAN, gemessen auf dem RHT	107
Abbildung 105:	Reib- und Verschleißverhalten von HD-01 und HD-07 mit unterschiedlichen Schichtvarianten.....	108
Abbildung 106:	Quadrantendarstellung der für MAN untersuchten Tribosysteme mit HD-07 Öl	108
Abbildung 107:	Vielversprechendste Varianten für Rolls-Royce, gemessen auf dem RHT.....	110
Abbildung 108:	Quadrantendarstellung der für Rolls-Royce auf dem Plint-Tribometer untersuchten Tribosysteme	111
Abbildung 109:	Vergleich des Reibmitteldrucks im Kennfeld auf verschiedene Quereinflüsse	112
Abbildung 110:	Reibmitteldrücke in charakteristischen Kennfeldpunkten der getesteten PROMETHEUS-Varianten.....	113
Abbildung 111:	Mittleres Reibmoment der getesteten PROMETHEUS-Varianten im WLTC.....	113
Abbildung 112:	Daten 9I D1556	115
Abbildung 113:	Motorbetriebspunkte für Verbrauchs- und Reibungsuntersuchungen	115
Abbildung 114:	Messprogramm D15 in den Jahren 2021 und 2022	116
Abbildung 115:	Schleppkurven D15 Vollmotor	117
Abbildung 116:	relativer Verbrauch und Reibmitteldruck der verschiedenen Konfigurationen	117
Abbildung 117:	Daten 12I D2676	118
Abbildung 118:	Messprogramm D26 Öluntersuchungen	118
Abbildung 119:	Messprogramm D26 Öluntersuchungen	118
Abbildung 120:	Verbrauchsvorteil PROM-HD-07 gegenüber Referenzöl.....	119
Abbildung 121:	Messprogramm D15 Einzylinder.....	120
Abbildung 122:	Reibmitteldruckverlauf während der ersten 50 h Dauerlauf am D15 Einzylinder.....	120
Abbildung 123:	Übersicht Verschleißmessungen aus Dauerlauf D15 Einzylinder	121
Abbildung 124:	Liner und Topringverschleiß nach 200 h Dauerlauf	121
Abbildung 125:	Im Konstantlastversuch ermitteltes Reibverhalten in den Prüfabschnitten 2 - 5 h und 5 - 20 h	123
Abbildung 126:	Im Ölabstellversuch ermittelte Versuchsdauer bis zum Versagen	124
Abbildung 127:	Reibleistung während des Einlaufprogrammes.....	126
Abbildung 128:	Gefahrene Lastpunkte im Kennfeld, links: Leistung/Drehzahl, rechts: zugehöriger Spitzendruck/mittlere Kolbengeschwindigkeit	126

Abbildung 129: Darstellung PMR-Vorteil [%] im Vergleich zur Referenz für Teillast und Nennlast..... 127

Abbildung 130: Schafftrag nach Motorlauf, links: AV19, rechts: AV21 mit Linienstrukturierung..... 127

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Laser- und geometrische Parameter der hergestellten Strukturen..... 53

Tabelle 2: Arithmetische Mittelwerte und Standardabweichungen der mechanischen und topographischen Eigenschaften..... 72

Tabelle 3: BMW Versuchsumfang im Gesamtprojektzeitraum..... 103

Tabelle 4: Versuchsumfang am BMW B48 Vollmotor bei Tenneco 112

Tabelle 5: Ermittelte Reibleistungsgewinne und Kraftstoffeinsparpotentiale am Vollmotor 114

Tabelle 6: SRV-Prüfparameter für Konstantlast- und Ölabstellversuch 122

Tabelle 7: Versuchsmatrix der am Einzylinder gefahrenen Varianten 125

Tabelle 8: Tragspiel der gefahrenen Kompressionsringe (Position: ggü. Ringstoß) 127

Tabelle 9: Übersicht beschaffte Versuchseinrichtungen..... 130

Glossar

AFM	Rasterkraftmikroskopie
AGN	Abgasnachbehandlung
APS-C	Atmosphärisches Plasmaspritzen (Keramik)
CVD	chemical vapour deposition (Chemische Gasphasenabscheidung)
DBP	Drahtbürstpolierung
DLC	Diamantartige Kohlenstoffschichten
DLIP	Direkte Laserinterferenzstrukturierung
DMA	Dynamic Mechanical Analysis
DOC	Diesel Oxidations Katalysator
DPF	Diesel Partikel Filter
EEDF	Elektronen- und Ionenenergieverteilungsfunktion
EHD	Elasto-Hydrodynamik
FEM	Finite Elemente Methode /Festigkeitsberechnung
GG	Grauguss
GPa	Gigapascal
HIPIMS	Hochleistungsimpulsmagnetronspattern
IEDF	Elektronen- und Ionenenergieverteilungsfunktion
LDS	Lichtbogendrahtspritzen
MKS/EHD	Mehrkörpersimulation
MPa	Megapascal
MTM	Mini-Traction-Machine
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
OES	Optische Emissionsspektroskopie
PMR	Reibmitteldruck
PTP	Passive Thermosonde
PTWA	Plasma Transferred Wire Arc Thermal Spraying („Thermisches Lichtbogen Draht Plasma-spritzen“)
PVD	physical vapour deposition
REM	Rasterelektronenmikroskopie
RNT	Radionuklidtechnik
RRS	Rolls-Royce Solutions GmbH
SBP	Schlüsselbetriebspunkte
SCR	Selective Catalytic Reduction (Technologie für die Behandlung von Abgasen)
SF	Superfinish
SPM	Scanning Probe Microscopy
SRV	Schwing-Reib-Verschleiß-Tribometer. (SRV® ist ein eingetragenes Warenzeichen der Firma Optimol Instruments Prüftechnik GmbH.)
TMZ	Tribomesszelle
UHV	Ultrahochvakuum
OWHSC	Worldwide Harmonized Stationary Cycle, Zertifizierungszyklus NFZ
WHTC	Worldwide Harmonized Transient Cycle, Zertifizierungszyklus NFZ
WLTC	Worldwide harmonized Light vehicles, Zertifizierungszyklus PKW
XPS	Röntgenphotoelektronenspektroskopie

EINFÜHRUNG

Das 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung zielte neben der umweltfreundlichen Energieversorgung auch auf alle Maßnahmen für eine höhere Energieeffizienz ab. Darüber hinaus hat die Politik ambitionierte Klimaschutzziele ausgegeben: 1990 betrug der Treibhausgas-Ausstoß des Verkehrssektors 164 Millionen Tonnen CO₂. Die Emissionen des Sektors sollen bis 2030 auf höchstens 85 Millionen Tonnen CO₂ reduziert werden.

Kraftfahrzeuge liefern einen großen Beitrag zum Gesamtemissionsaufkommen. Bedingt durch die große Bedeutung von Kraft- und Nutzfahrzeugen einerseits am Emissionsaufkommen und andererseits am Wirtschaftsaufkommen, bieten sie einen großen Hebel für die Umsetzung energieeffizienter Maßnahmen und den damit verbundenen Energieeinsparungen. Ein beträchtlicher Teil der Energie in mechanischen Systemen von Fahrzeugen und stationären Maschinen geht durch Reibung verloren. Gleitpaarungen sollten so ausgelegt werden, dass nur ein minimaler Verschleiß und eine minimale Reibung auftreten. Die hohe Relevanz der tribologischen Forschung im Energieforschungsprogramm des BMWK wird durch die Etablierung des **Forschungsfelds Tribologie** als eines von sieben Forschungsfeldern im **Forschungsnetzwerk Energie in Industrie und Gewerbe** widergespiegelt.

Um eine möglichst hohe Energieeffizienz zu erzielen, sind Anstrengungen für eine globale Betrachtung und Optimierung tribologischer Kontakte in Verbrennungsmotoren, Getrieben und Lagern in Fahrzeugen sehr bedeutsam.

Das Grundanliegen von PROMETHEUS ist die ganzheitliche Betrachtung eines komplexen Systems wie das eines Verbrennungsmotors um die im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Problematik zu überwinden und somit durch verschiedene tribologische Maßnahmen nochmals deutliche Fortschritte bei der Effizienz von Motoren zu erreichen. Im Unterschied zu früheren Projekten wurden über die **Pkw-Anwendungen** hinaus auch die **Motoren von Lkw/ Bus- und Offroad-Fahrzeugen** (Bergbau/mobile Baumaschinen), sowie **Industrie- und Gasmotoren** mit einbezogen und damit das Anwendungsspektrum signifikant erweitert.

Die tribologischen Maßnahmen beinhalten die Weiterentwicklungen von Beschichtungen und Schmierstoffen, insbesondere deren chemische Modifizierung für eine optimale Wechselwirkung miteinander. Wertvolle Hinweise für die Modifizierung wurden von der atomistischen Simulation der Reibungsvorgänge geliefert. Die Auswirkungen der einzelnen Reibstellen wurden ausgehend von Reibungs- und Verschleißmodellen für einzelne Kontakte in einer Gesamtsystemsimulation zusammengeführt.

Dabei sind aufgrund der konstruktiven Gegebenheiten der Verbrennungsmotor, das Getriebe und die Lager von besonders hohem Interesse und Nutzen. Reib- und Verschleißreduktion einzelner Komponenten bieten ökologisch und wirtschaftlich u.a. folgende Potenziale:

- Reduktion von CO₂-Emissionen und Energiekosten,
- Verringerung bis hin zur vollständigen Reduktion von Kosten für Emissionen bzw. Emissionsüberschreitungen,
- Verringerung des Rohstoffverbrauchs infolge längerer Lebensdauern der Komponenten,
- Erhöhung der Gewährleistung von Fahrzeugen und Komponenten,
- Ausbau der Marketingaussagen zur Energieeffizienz.

Aufgabenstellung

Die im Projekt PROMETHEUS gesetzten Zielstellungen erforderten eine ganzheitliche Herangehensweise, die verschiedene Betrachtungsebenen verlangten:

- Wechselwirkungen im Tribosystem (atomare Ebene)
- Tribologische Modellbetrachtungen (Tribosystem-Ebene)
- Effizienzbetrachtung (motorische Erprobungsebene)

Diese Betrachtungsebenen wurden genutzt, um eine möglichst zielgenaue Entwicklung im Projekt in den gewählten Marktsegmenten PKW, LKW und Industrieanwendungen mit den damit verbundenen spezifischen Randbedingungen zu steuern.

I KURZDARSTELLUNG

1 Aufgabenstellung

Reiben bewegliche Motorkomponenten gegeneinander, entstehen immer hohe Energieverluste. Aufgabe von PROMETHEUS war es eine signifikante Reibungsreduzierung in Verbrennungsmotoren unterschiedlicher Größen und Anwendungen durch eine konsistente Verknüpfung von Maßnahmen wie Beschichtung, Oberflächenstruktur und Schmierung zu erreichen. Insbesondere durch innovative Oberflächenbeschichtungen und neuartige Schmierstoffe unter Berücksichtigung eines ganzheitlichen Ansatzes war es Ziel von PROMETHEUS weitere Reserven für den Antriebsstrang zu erschließen. In vorangegangenen Projekten wie PEGASUS I & II wurden für den Pkw-Antriebsstrang bereits große Reibminderungspotenziale erschlossen, jedoch wurden hier Maßnahmen an einzelnen Bauteilen erforscht. PROMETHEUS dagegen hat den ganzheitlichen Ansatz verfolgt.

Aufgabe des Vorhabens war die umfassende Betrachtung der Reibstellen eines Verbrennungsmotors um somit durch geeignete Kombination verschiedener tribologischer Maßnahmen nochmals deutliche Fortschritte bei der Effizienz von Motoren zu erreichen. Zu den tribologischen Maßnahmen gehören die Weiterentwicklungen von Beschichtungen und Schmierstoffen, insbesondere deren chemische Modifizierung für eine optimale Wechselwirkung miteinander. Wertvolle Hinweise für die Modifizierung wurden von der atomistischen Simulation der Reibungsvorgänge erwartet. Die Auswirkungen der einzelnen Reibstellen sollten ausgehend von Reibungs- und Verschleißmodellen für einzelne Kontakte in einer Gesamtsystems simulation zusammengeführt werden.

Ein wichtiger Bestandteil des Vorhabens war der Aufbau von Datenbanken bzw. die Ergänzung bestehender Datenbanken um die im Projekt anfallenden Ergebnisse experimenteller, insbesondere tribometrischer Daten. Dabei wurde kritisch geprüft, inwieweit die Daten im Sinne einer Übertragbarkeit auf reale Systeme relevant sind.

1.1.1 Ziele und Aufgabenstellung

- Tribologische Untersuchungen an DLC-Metall und Metall-Metall Materialpaarungen
- Entwicklung realitätsnaher (Multiskalen-) Tribologiemodelle, die in der Lage sind, Mischreibungszustände zu beschreiben
- Untersuchung verschiedener Einflussgrößen auf den Einlauf
- Klärung des Einflusses des Einlaufs auf das Verschleißverhalten
- Belastungen an Asperiten und Mikrospannungen berechenbar machen
- Aufbau einer Datenbank
- Zusammenspiel Oberflächenstrukturierung und Schmierstoffmolekül optimieren

2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Projektkonsortium hatte eine ausgewogene Zusammensetzung aus Entwicklungspartnern, Komponentenherstellern, Anlagenlieferanten, Systemherstellern und Endanwendern. Diese komplette Abbildung der Wertschöpfungskette sollte sicherstellen, dass die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auch eine industrielle Umsetzung erfahren. Damit war sichergestellt, dass von Anfang an auch nur

Planung und Ablauf des Vorhabens

umsetzungsfähige Lösungen im Projekt verfolgt wurden. Außerdem war die Verfolgung des ganzheitlichen Ansatzes eine wesentliche Voraussetzung der Forschungsarbeiten.

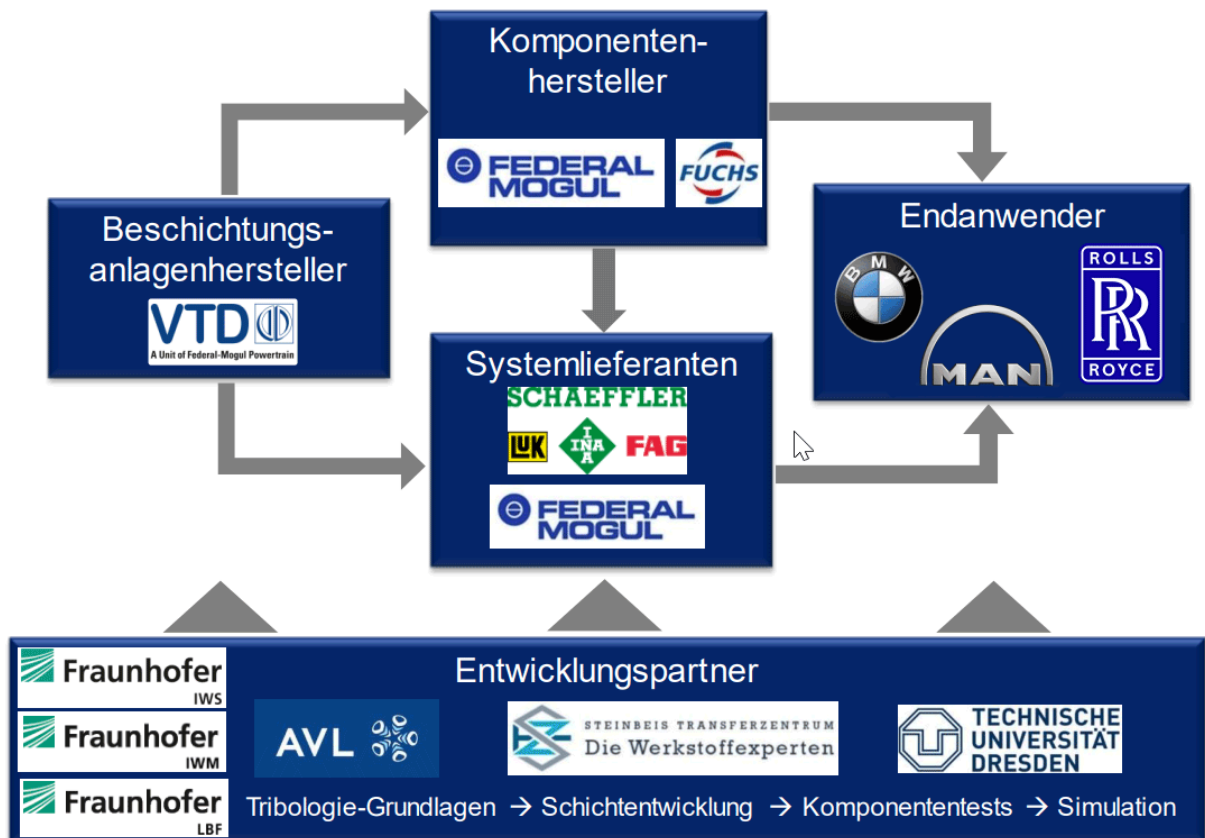


Abbildung 1: PROMETHEUS-Projektpartner als Wertschöpfungskette

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt hat sich insgesamt in 7 Teilprojekte gegliedert, wobei das „administrative“ TP 1000 die Gesamtkoordination unter der Federführung von Tenneco umfasste.

Die 6 technischen Teilprojekte waren wie folgt strukturiert:

- TP2000 Tribologiemodelle und deren Validierung
- TP3000 Schmierstoffstrategie
- TP4000 Beschichtung und Oberflächenstrukturierung
- TP5000 Systemkomponenten
- TP6000 Simulation Antriebsstrang
- TP7000 Funktions- und Effizienznachweise

In der Antragsphase wurde für jedes Teilprojekt ein Partner bestimmt, der die partnerübergreifende Planung der Teilprojekteinhalte, d.h. der Hauptarbeitspakete übernahm.

Planung und Ablauf des Vorhabens

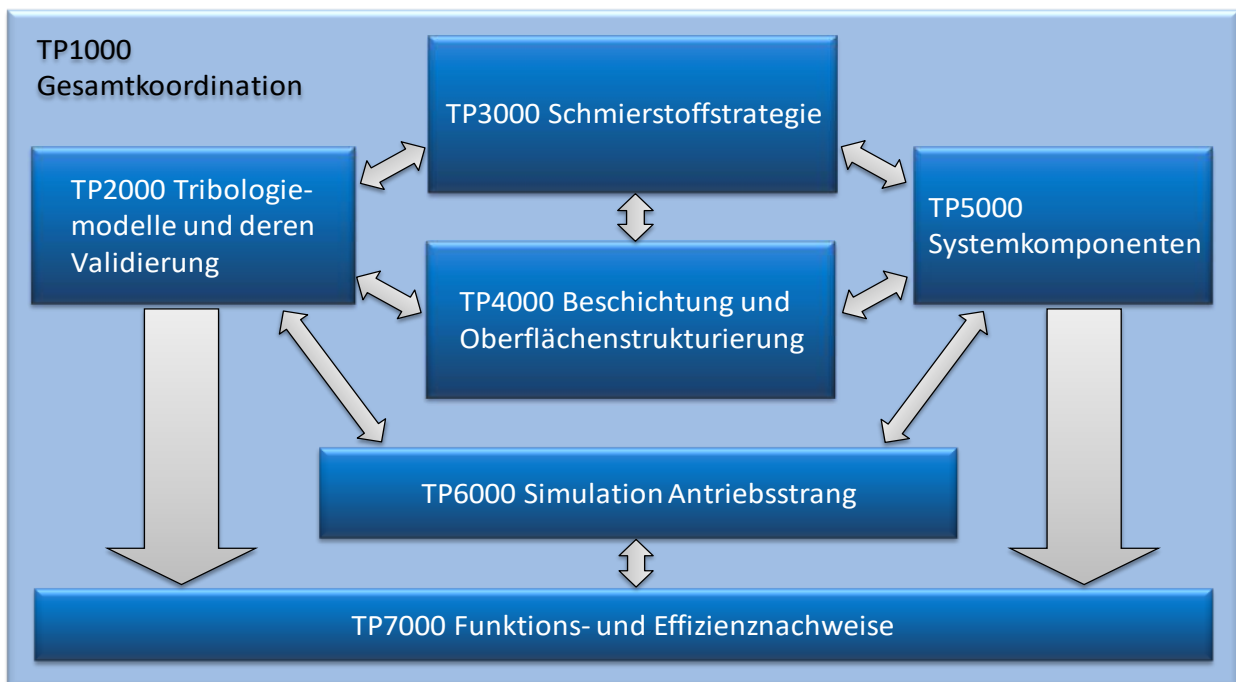


Abbildung 2: Visualisierung der Vernetzung der Teilprojekte im Vorhaben PROMETHEUS

Für jedes Teilprojekt wurden Arbeitsgruppenleiter und ein Stellvertreter benannt. Zu Beginn des Projektes fanden innerhalb der Teilprojekte regelmäßige Meetings statt. Im weiteren Verlauf hat sich gezeigt, dass regelmäßige teilprojektübergreifende Abstimmungen erforderlich sind. Um die effiziente Abstimmung der Teilprojekte bezüglich Kommunikation untereinander und Interaktion zwischen den Teilprojekten sicherzustellen, wurden wöchentlichen TP-übergreifende Webkonferenzen etabliert. Die Teilprojekte TP2000, TP3000, TP6000 und TP4000, TP5000, TP7000 haben sich thematisch wochenweise abgewechselt. Die Gruppe TP2000, TP3000 und TP6000 wurde moderiert vom FHG IWM und die Gruppe TP4000, TP5000 und TP7000 vom FhG IWS. Während des Projektes gab es regelmäßig Projekttreffen mit allen Partnern, die teilweise virtuell stattfinden mussten.

Anfangs wurde für jedes Teilprojekt ein eigenes GANTT zum Monitoring des Projektfortschritts und der Nachverfolgung der Meilensteine erstellt. Mit zunehmender Projektlaufzeit wurde deutlich, dass die hohe Komplexität des Projektes einerseits als auch die zunehmende Vernetzung der Teilprojekte zu einer neuen Ausrichtung der Gesamtprojektplanung führen muss. Unter maßgeblicher Führung von BMW wurde ein MS Project Projektplan erstellt. Im weiteren Verlauf wurden die Abhängigkeiten und Vernetzungen der Meilensteine im Projekt ausgehend vom finalen Potenzialnachweis in TP7000 in diesem MS-Projektplan dargestellt. Die Wechselwirkungen der Meilensteine aus den einzelnen TP's werden durch sogenannte Synchropunkte berücksichtigt, die den Startpunkt eines TP übergreifenden Vorganges (=Aufgabe) beschreiben. Der Abschluss dieser Vorgänge aus Synchropunkten wurde durch globale Meilensteine dokumentiert. Aus diesem zwischen den Partnern regelmäßig abgestimmten Projektplan resultierte der PROMETHEUS-Synchroplan. In diesem wurde festgelegt, wer, wann, was liefern muss, damit der Projektfortschritt durch entsprechende Funktionsergebnisbewertungen aus dem Fokus von TP7000 zeitlich und inhaltlich in ganzheitlicher Form sichergestellt wird.

Im Laufe des Projektes haben sich die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Projekt, vor allem bedingt durch die Coronakrise, deutlich verzögert. Aufgrund des hohen Vernetzungsgrades des Projektes und der damit einhergehenden starken Abhängigkeit der einzelnen Arbeitspakete zueinander, traten

Anknüpfung an wissenschaftlichen und technischen Stand

zusätzlich weitere Verschiebungen in der Umsetzung der einzelnen Arbeitspakete auf. Es wurde daher eine 6-monatige Projektverlängerung beantragt und bewilligt.

4 Anknüpfung an wissenschaftlichen und technischen Stand

Niedrige Reibleistungen und Verschleißraten der kritischen Bauteile mit Werten unter 10 Nanometern pro Stunde werden erreicht, wenn der oberflächennahe Bereich beider Reibpartner (einige 10 bis mehrere 100 nm) durch reibungsverursachtes plastisches Fließen und intensive chemische Wechselwirkung nanokristallin geworden ist¹. Dieses neue Material, welches neben extremer Kornverfeinerung auch tribochemischen Reaktionen unterworfen ist, wird als *Dritter Körper* bezeichnet². Schmierstoffe und ihre Additive können die Bildung des dritten Körpers entscheidend unterstützen. Durch die Reibung verursacht, können chemische Reaktionen ausgelöst werden, die die Bildung des dritten Körpers einleiten³.

Für trockene Reibkontakte konnte bereits Rigney und Mitarbeiter⁴ ein nanokristallines Gefüge nachweisen, aber erst Scherge *et al.* zeigten den Zusammenhang zwischen drittem Körper und Verschleiß⁵ für Gußwerkstoffe. Dienwiebel *et al.*⁶ stellten in ihrer Untersuchung von Laufflächen einer AlSi17Cu3Mg-Legierung die Änderung des Randzonengefüges dar und erklärten damit die tribologische Funktion.

Zur Schmierung stark belasteter mechanischer Kontakte in Verbrennungsmotoren kommen hoch entwickelte Schmierstoffe zum Einsatz. Um die Oberflächen effektiv vor Verschleiß zu schützen, sind diese Schmierstoffe additiviert, wobei im sogenannten Extreme Pressure Bereich phosphorbasierte Verbindungen (ZDDP) verwendet werden. Diese Additive bilden unter Druck und Temperatur Schichten, die die Oberflächen schützen sollen. Derartige Schichten bestehen aus einer glasartigen Verbindung aus Schwefel, Zink und dem genannten Phosphor⁷. Als Hindernis bei der Verringerung von CO₂ Emissionen gilt ZDDP als Kat-Vergifter und soll als Additiv abgelöst werden. Außerdem ist von ZDDP bekannt, dass es auch reibungserhöhend wirken kann, was den Forderungen nach Energieeinsparung zuwider läuft⁸. Als Alternative zu ZDDP stehen Festschmierstoffe auf Basis von MoS₂ oder leistungsfähigen Polymeren zur Verfügung.

Ein neuer Effekt, der in jüngerer Zeit viel Aufsehen erweckt, ist die sogenannte „Superlubricity“, bei dem es sich um einen Zustand mit extrem kleinen Reibwerten handelt⁹. Nachdem reibungsfreie Systeme in atomaren Reibkontakten erfolgreich demonstriert werden konnten, strebt man danach, diesen Effekt auf makroskopische Modellsysteme zu übertragen. Einen interessanten Ansatz haben M. Goto und Mitarbeiter gezeigt¹⁰. In dieser Arbeit wurde bei einem 0,5 nm dicken polykristallinen Silberfilm, der auf eine Si(111) Oberfläche aufgedampft wurde, ein Reibungskoeffizient von 0,007 gegen Diamant im Ultrahochvakuum (UHV) erreicht.

Ein vielversprechendes Verfahren zur Reduzierung der Reibung im Kontakt zweier relativ zueinander bewegter Oberflächen ist die Oberflächentexturierung. In Modellversuchen zeigte sie bereits ihr enormes Potenzial, aber auch in Modellanwendungen wurden Oberflächentexturen bereits erfolgreich eingesetzt¹¹.

Es gibt verschiedene Methoden eine Oberfläche mit einer Textur zu versehen. Die Erstellung mikrotexturierter Oberflächen kann mechanisch, zum Beispiel durch Indentation¹², Prägen^{13,14} oder Fräsen¹⁵, photolithographisch¹⁶, durch reaktives Ionenätzen¹⁷ oder mittels Laserabtrag^{18,19} erfolgen.

Mit PVD- und CVD-Beschichtungstechnologien begann eine neue Ära bei der Weiterentwicklung hochbelasteter Motorenkomponenten. Während mit den klassischen Hartstoffbeschichtungen (vor allem CrN und Cr₂N) der Fokus noch auf einer Verschleißreduzierung der Oberflächen lag, brachte die

Anknüpfung an wissenschaftlichen und technischen Stand

Entwicklung der amorphen diamantartigen Kohlenstoffschichten (DLC) das Potenzial einer Reibungsreduzierung unter ungünstigen Schmierungsbedingungen mit sich. Eine längere Entwicklung verschiedener Typen von DLC-Schichten für Motorenkomponenten auf Komponenten der Kraftstoffeinspritzung, der Kolbengruppe und des Ventiltriebes begann, die bis heute nicht abgeschlossen ist (siehe Projekte PEGASUS und PEGASUS II). Eine der wichtigsten Entwicklungslinien ist die Verfolgung des „Superlubricity“-Ansatzes in den genannten Projekten, die den Reibungsvorteil der Kohlenstoffschichten über den klassischen Effekt hinaus durch gezielte Kombinationen mit bestimmten Schmierstoff-Zusammensetzung nochmals deutlich steigert. Während für Anwendungen z.B. für Hydraulikpumpen durch eine gezielte Wahl des Hydraulikfluids mit tetraedrisch-amorphen Kohlenstoffschichten (ta-C) außerordentlich niedrige Reibwerte auf Superlubricity-Niveau gemessen werden konnten, gibt es im Anwendungsbereich der klassischen Motoren- und Achsöle immer noch zu viele Maskierungseffekte, um die Superlubricity-Eigenschaften der ta-C Schichten gezielt nutzen zu können²⁰.

Im Bereich alternative Dünnschichten zur Reibungsminderung (abseits von DLC-Schichten) wurden vor einigen Jahren Molybdänitrid-Schichten ins Gespräch gebracht²¹.

Bedingt durch die Multiskaligkeit tribologischer Systeme muss deren vollständige simulative Beschreibung zwangsläufig skalenübergreifend erfolgen. Um die verschiedenen Skalen zu überbrücken, stehen mittlerweile eine Vielzahl von numerischen Methoden zur Verfügung²².

Hinsichtlich der makroskaligen Simulation von Verbrennungskraftmaschinen besteht eine der Hauptaufgaben in der Untersuchung der komplexen Belastungszustände sowie der Bauteildynamik. Um den Kraftstoffverbrauch minimieren zu können, ist insbesondere die Untersuchung der mechanischen Reibung in Radialgleitlagern und beim Kolben-Liner-Kontakt ein wichtiges Thema.

Grundlegende Untersuchungen von Coy²³, Taylor und Coy²⁴, Taylor²⁵, Daniels und Braun²⁶ sowie Mufti und Priest²⁷ ergeben sehr komplexe Anforderungen zur Vorhersage motorischer Reibungsverluste.

Ein generischer Reibmodellierungsansatz, welcher auch im Fall von Mischreibungskontakten angewendet werden kann, wird von Offner und Knaus²⁸ beschrieben: Neben viskoser Reibung berücksichtigt der Ansatz insbesondere Grenzreibung. Die Anwendung dieses Reibmodellierungsansatzes zur Simulation von Mischreibung bei Radial- und Axial-Gleitlagern sowie beim Kolben-Liner-Kontakt wird von Offner²⁹ beschrieben.

Die Bedeutung einer genaueren Modellierung des Schmieröls und der Schmieröl-Beschichtungs-Interaktion stellen Allmaier et al.³⁰ dar. Eine Methode zur Berechnung von Verschleißprofilen bei Radiallagern wurde von Priestner et al.³¹ vorgestellt. Die Methode wurde anhand von Reibungs- und Verschleißmessungen validiert.

Den Einfluss der Zylinderabschaltung auf das Reibungsverhalten und die transiente Thermo-Hydrodynamik im Kontakt zwischen Kompressionsring und Zylinderliner eines 4-Zylinder Ottomotors untersuchen Bewsher et al.³². Die Untersuchungen zeigen, dass sich die Reibungsverluste im Kolbenring-Liner-System auf Grund der höheren Verbrennungsdrücke und Linertemperaturen im aktiven Zylinder um bis zu 10% verschlechtern.

Die tribologischen Eigenschaften eines Systems sind in hohem Maße abhängig von den chemischen und mechanischen Transformationen, die an einer tribologischen Grenzfläche stattfinden und die zur Bildung eines dritten Körpers führen. Da die Reibfläche experimentell schwer zugänglich ist, haben sich atomistische Simulationen als zentrale Methode etabliert, um experimentelle Beobachtungen zu ergänzen

Anknüpfung an wissenschaftlichen und technischen Stand

und interpretieren, und um Einblicke in die Mechanismen der Reibung, des Verschleißes und der Schmierung zu gewinnen. Erst kürzlich haben leistungsfähigere Computer und die Entwicklung von zuverlässigen „reaktiven“ interatomaren Potentialen^{33, 34, 35, 36} für Molekulardynamik (MD) Simulationen zu einem wesentlichen Fortschritt in diesem Feld geführt.

MD Simulationen wurden auch für DLC-Tribosysteme durchgeführt. Es konnten neue Erkenntnisse über die tribo-induzierte Rehybridisierung und Plastizität von ta-C³⁷ sowie über Einlauf, Reibung und Schmierung von a-C:H Schichten³⁸ erlangt werden.

Der Kolben und die Kolbenringgruppe tragen mit bis zu 40% zu reibbedingten Verlusten im Verbrennungsmotor bei. Der Anteil der Kolbenringgruppe kann bei hochaufgeladenen Motoren in der Größenordnung von 25%, was einem Kraftstoffverbrauch von ca. 4-5% entspricht, liegen³⁹.

Es ist allgemein bekannt, dass das Ringdesign einen entscheidenden Einfluss auf die Reibleistung des Motors besitzt. Die Auslegung eines hinsichtlich der Reibleistung optimierten Ringdesigns erfolgt dabei unter Berücksichtigung von Ölverbrauch und Blow-by. In einem groß angelegten Forschungsvorhaben hat Federal-Mogul zusammen mit dem Lehrstuhl für Verbrennungsmotoren LVK München umfangreiche Motorentests mit einem Einzylinder-Reibungsmotor, mit dem Floating-Liner-Verfahren, durchgeführt. Anhand systematischer Untersuchungen wurden die Einflüsse einzelner Designmerkmale auf die Reibleistung des Kolbenrings untersucht und klassifiziert. Die aus den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse ermöglichen nun eine gezielte Auslegung des Kolbenringdesigns⁴⁰.

Mit der industriellen Einführung von CarboGlide® (wasserstoffhaltiges DLC), einer reibreduzierenden Beschichtung, konnten die reibungsbedingte Verluste weiter gesenkt werden. Bei der konsequenten Anwendung von CarboGlide® auf das gesamte Ringpaket ergaben sich Reibleistungsvorteile von bis zu 20%⁴¹. Im Rahmen einer konsequenten Weiterentwicklung wurde mit DuroGlide® (wasserstofffreies DLC) ein Schichttyp entwickelt, welcher gegenüber klassischen DLC-Schichten eine nochmals verbesserte Verschleiß- und Temperaturbeständigkeit aufzeigt. Damit ist dieser Schichttyp prädestiniert, den steigenden tribologischen Anforderungen hochaufgeladener Motoren gerecht zu werden. Allein durch die Einführung von DuroGlide® für den Kompressionsring konnten die reibungsbedingten Verluste um bis zu 11%, im Vergleich zu einer Standardschicht, gesenkt werden³⁹.

Zylinder haben die Aufgabe, die Kolben bei ihrer Auf- und Abwärtsbewegung zu führen und die beim Verbrennungsvorgang entstehende Wärme an das Kühlsystem weiterzuleiten. Die Zylinder eines Verbrennungsmotors bilden gemeinsam mit dem Kolben und dem Zylinderkopf den Arbeits- und Brennraum.

BMW stellt seine Zylinder mittels Aluminiumgießtechnik her⁴², die weiterbearbeitet und dadurch mit idealen tribologischen Eigenschaften ausgestattet werden. Für die Herstellung von Aluminiumdruckguss-Kurbelgehäusen für Benzin- und Dieselmotoren setzt die BMW Group seit Anfang 2012 auf das Lichtbogendrahtspritzen (LDS) und hat damit entscheidend diese Technologie genutzt, weiterentwickelt und als branchenweit erster Motorenproduzent die LDS-Technologie für die Zylinderlaufflächenbeschichtung in Großserie zum Einsatz gebracht. Die Beschichtung ist 0,3 mm dick, porös und besteht aus einer Eisen-Legierung, die als Draht dem Prozess zugeführt, mittels Lichtbogen aufgeschmolzen und in flüssigem Zustand mit hoher Geschwindigkeit auf die Laufflächen geschossen wird. Sie wird in einem weiteren Schritt auf ein Tausendstel feinbearbeitet. Das richtige Material stellt sicher, dass an den Motorblock und/oder an das Kühlwasser ein guter Wärmetransfer stattfinden kann.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zylinderwand wird bei laufendem Motor mit Motoröl benetzt. Damit wird den im Zylinder auf und ablaufenden Kolben und Kolbenringen eine ausreichende Schmierung sichergestellt, Reibungsverluste eingespart und ein Rückgang des Kraftstoffverbrauchs erwirkt. Weitere Vorteile sind hohe Designfreiheit und Materialflexibilität, optimale Verschleißigenschaften sowie die sehr gute Wärmeübertragung an das Kurbelgehäuse. Zudem zeichnen sich die mittels LDS beschichteten Zylinder durch hohe mechanische und thermische Robustheit aus.

Auch die Reibung des Kolbenbolzens gegen das kleine Pleuelauge und die Bolzenbohrung leistet einen Gesamtbeitrag zur Reibleistung des Verbrennungsmotors, gerade da hier eine Drehbewegung im Bereich höchster Zünddrücke dargestellt werden muss. Aus diesem Grund werden die Kolbenbolzen bereits seit langer Zeit geschliffen, um möglichst geringe Oberflächenrauheiten und damit geringe Reibwerte zu erreichen. Seit etwa 2006 ist der Stand der Technik bei hochbelasteten Dieselmotoren, eine wasserstoffhaltige DLC Beschichtung (a-C:H) auf den Kolbenbolzen aufzubringen. Hierbei wird sowohl die Fressneigung der Materialien erfolgreich gehemmt, als auch ein positiver Beitrag zum Reibwert erreicht.

Ventiltriebskomponenten sowie Lager spielen eine wesentliche Rolle in Bezug auf Reibungsverluste im Verbrennungsmotor. Der Ventiltrieb z.B. trägt je nach Betriebszustand bis zu 40% zu den Reibverlusten des Motors bei. Seit 2006 werden deshalb DLC (a-C:H) Beschichtungen zur Reibungsreduzierung im Ventiltrieb in Großserie eingesetzt. Seit 2011 sind superharte wasserstofffreie ta-C Beschichtungen Stand der Technik für Komponenten wie z.B. den Tassenstößel.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt PROMETHEUS war ein elementarer Bestandteil in der Projektlandschaft des Forschungsfelds Tribologie innerhalb des BMWi-Forschungsnetzwerks Industrie und Gewerbe. Bereits im Vorfeld der Konsultationen zum 7. Energieforschungsprogramm fanden in der deutschen Tribologieszene etliche Beratungen zu den aktuellen Herausforderungen der Tribologieforschung statt. Experten aus den Bereichen Werkstoff- und Plasmatechnologie sowie der Schmierstoffentwicklung berieten sich mit Komponentenherstellern und -anwendern über die Möglichkeiten grundlegender tribologischer Lösungen für Gleitpaarungen. Im Austausch mit zahlreichen Fachleuten der Tribologieforschung, besonders Mitgliedern der deutschen Gesellschaft für Tribologie (GfT), entstand ein fruchtbarer Gedankenaustausch. So hat sich beispielsweise bei der jährlichen Jahrestagung der GfT eine Sondersession zum Forschungsfeld Tribologie etabliert, auf der regelmäßig Ergebnisse aus dem PROMETHEUS-Konsortium vorgestellt werden.

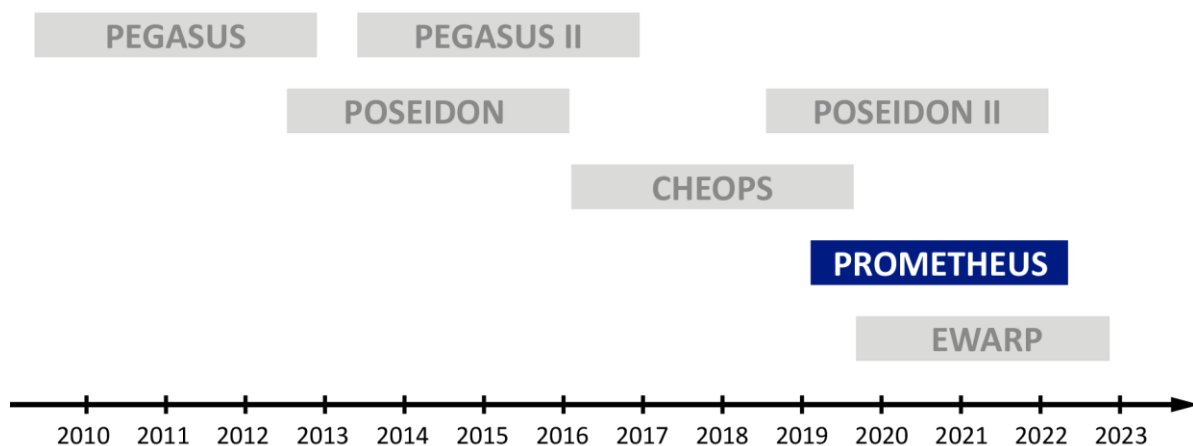


Abbildung 3: Zeitstrahl der vom BMWi geförderten Projekte im Forschungsfeld Tribologie

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

BMW pflegte mit dem IF (Inst. für Fertigungstechnologien) der TU Dresden zur DLIPisierung der Kompressionsringe und mit dem KIT zur atomphysikalischen Analyse der via PROMETHEUS beim optimierten BMW PROMETHEUS-Honprozess „LDSHonopt“ u.a. zur gezielten Ansiedlung „3ter Körper“ mechanisch dotierten LDS-Zylinderlaufbahn äußerst intensive Zusammenarbeiten. Diese Aufgaben waren in den PROMETHEUS-Projektaufgaben nicht beschrieben und mussten deshalb in von BMW beauftragten Fremdleistungen samt zugehörigen Dokumentationen bearbeitet werden.

Im Rahmen von TP7000 wurden Zuwendungen an Tenneco zum Nachweis der Effizienzsteigerungen durch tribologische und vollmotorische Untersuchungen verwendet.

Arbeiten zur Triboontologie wurden von der FAU in Zusammenarbeit mit Schaeffler durchgeführt.

Rolls-Royce hat mit der TU Braunschweig bei der Durchführung von Schnellalterungsversuchen zusammengearbeitet.

Die VTD Vakuumtechnik Dresden GmbH hat im Projektrahmen den Kooperationspartner AG Plasma-technologie, CAU zu Kiel mit der Unterstützung der plasmadiagnostischen Untersuchungen des Kohlenstofflichtbogenplasmas beauftragt.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

II EINGEHENDE DARSTELLUNG

1 Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

1.1 Tribologiemodelle und deren Validierung (TP2000)

1.1.1 Verwendung der Zuwendung

Beim Fraunhofer IWM wurde die Zuwendung wie folgt verwendet:

- Finanzierung von zwei Promotionsstellen
- Teilfinanzierung von Mitarbeitern in Richtung Unterstützung in Atomistik und Oberflächenanalytik
- Projektmanagement Moseler und Scherge
- Mittel für radioaktive Markierungen (externer Anbieter) für hochauflösende Verschleißmessung
- geringe Aufwendungen für Anpassungen der Messtechnik
- Dienstreisen und Konferenzteilnahmen (WTC, WOM, GfT)

1.1.2 Erzielte Ergebnisse

1.1.2.1 Experimentell (Fraunhofer IWM)

Einlaufkennfeld mit Schlüsselbetriebspunkten

Für Metall-Metall-Tribosysteme existiert ein Einlaufkorridor. Das heißt, dass die resultierenden Reibwerte und Verschleißraten maßgeblich von der initialen Belastung abhängen. Für die erste Untersuchung des DLC-Metall-Systems wurde ein Ansatz nach Richard Stribeck gewählt. In einem Stift-Scheibe-Tribometer (SST) wurden die Last-Geschwindigkeits-Ebene in der Form durchlaufen, dass mit aufsteigender Last die Stribeckkurve von Hydrodynamik bis zur Grenzreibung durchfahren wurde. Als Schmierstoff diente dabei das Referenz-Motorenöl PROM PC Ref01 des Projektpartners FUCHS. Das Ergebnis ist in Abbildung 4 aufgetragen.

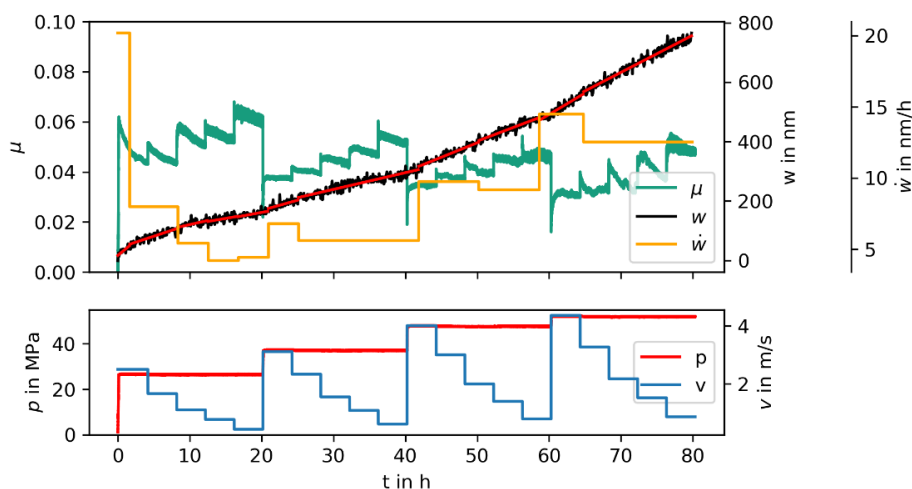


Abbildung 4: Initiales Parameterkennfeld mit Reibwert in Grün, Verschleiß in Schwarz und der linearisierten Verschleißrate in Gelb. Im unteren Diagramm werden Pressungen in Rot und Gleitgeschwindigkeiten in Blau dargestellt.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Aus diesem Kennfeld wurden die Schlüsselbetriebspunkte (SBP) abgeleitet und in einem optimierten Kennfeld (in Abbildung 5) von scharf zu sanft angeordnet. Im Ergebnis konnte statt des linearen, ein degressives Verschleißverhalten bei gleichzeitiger Reduktion der Einlaufdauer erzielt werden.

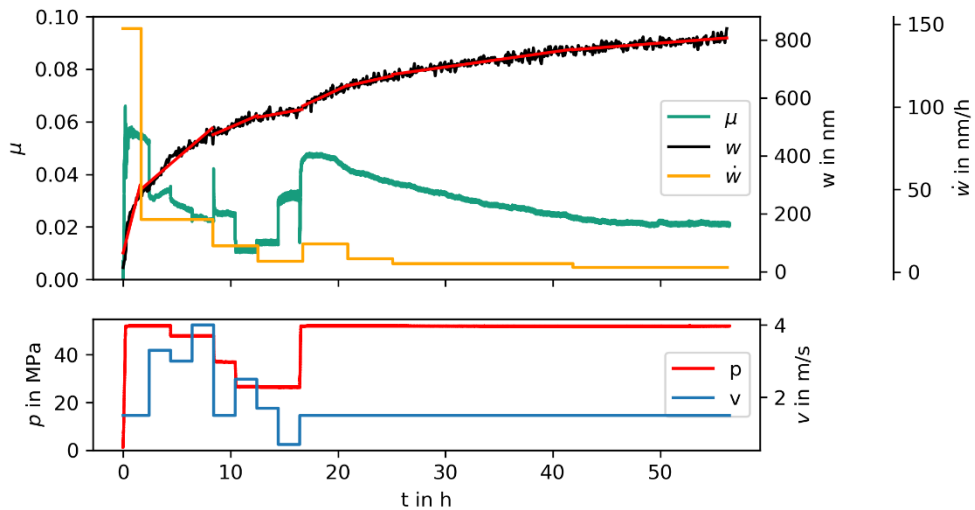


Abbildung 5: Schlüsselbetriebspunktkennfeld in optimierter Anordnung.

Rauheitskorridor

Da sich gezeigt hat, dass die Glättung einen entscheidenden Einfluss hat, wurde durch unterschiedliche Bearbeitungsarten (Bürsten/Kurzhubhonen) und Bearbeitungsdauer systematisch die Schichtrauheit variiert und im Anschluss tribologisch untersucht. Die resultierenden Stribeckkurven sind in Abbildung 6a aufgetragen. Bis auf die glatteste Variante sind alle ta-C V1 Varianten der nitrierten Variante überlegen.

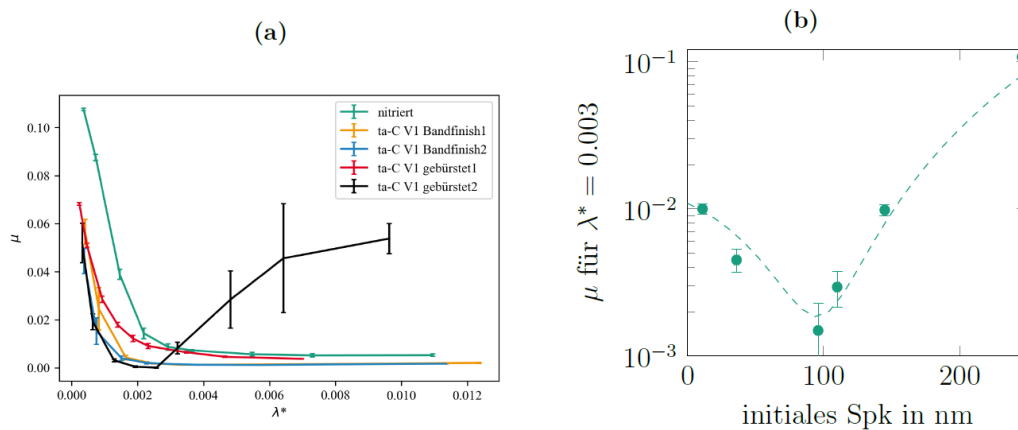


Abbildung 6: Stribeckkurven nach Einlauf der ta-C V1 Schichten mit unterschiedlichen Rauheiten nach Endbearbeitung (a) und Auftragung der resultierenden Reibwerte im Bereich des Minimums der Stribeckkurven über die initiale Spitzenrauheit Spk (b).

Eine systematische Auftragung des Reibwerts in der Mischreibung über die initiale Spitzenrauheit Spk in Abbildung 6b zeigt einen schmalen Rauheitskorridor mit einem Optimum bei einer Spitzenrauheit zwischen 95 und 105 nm.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Verschleißmechanismen in Wechselwirkung mit sp^3 -Gehalt

Vom Fraunhofer IWS wurde ein breites Spektrum an Schichten hergestellt. Neben der Dotierung mit Fremdatomen liegt ein wesentlicher Unterschied im nominellen sp^3 -Gehalt. Dieser wirkt sich auch direkt auf das tribologische Verhalten und insbesondere das Verschleißverhalten der DLC-Schichten aus. Aus der Veränderung der Topographie konnten die Verschleißraten *post mortem* ermittelt werden. Diese linearen Verschleißraten sind über den sp^3 -Gehalt in Abbildung 7 aufgetragen.

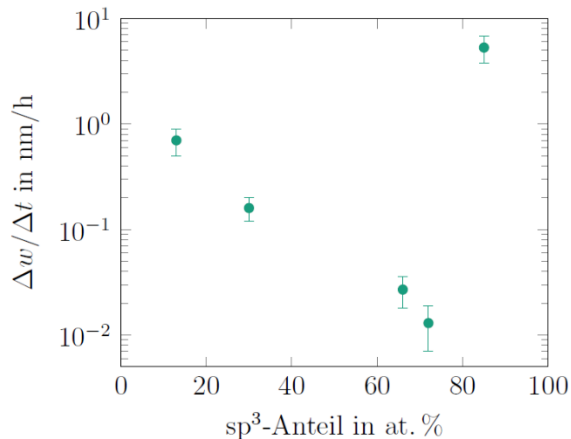


Abbildung 7: Abhängigkeit der linearisierten Verschleißraten von DLCs mit nominellen, unterschiedlichen sp^3 -Gehalten.

Es zeigt sich bis zu einem Minimum des Verschleißes bei knapp 70 at.% sp^3 eine lineare Abnahme der Verschleißrate. Bei der härteren DLC Variante trat dann katastrophaler Hochverschleiß auf. Aus der Sicht der Verschleißraten stellen die ta-C V1 und die ta-C:B mit dem PC-Ref-1 Öl das Optimum dar.

Topographischer Einlauf

Da die ta-C:B Beschichtung generell niedrige Reibung und kaum messbaren Verschleiß gezeigt hat, wurde eine genauere Untersuchung des Einlaufverschleißes durchgeführt. Dazu wurde mittels *in situ* Vermessung im Tribometer die Topographie mit einem AFM aufgenommen und simultan durch die RNT der Verschleiß am Gegenkörper in Echtzeit aufgezeichnet. Das zugehörige Kennfeld ist in Abbildung 8 dargestellt.

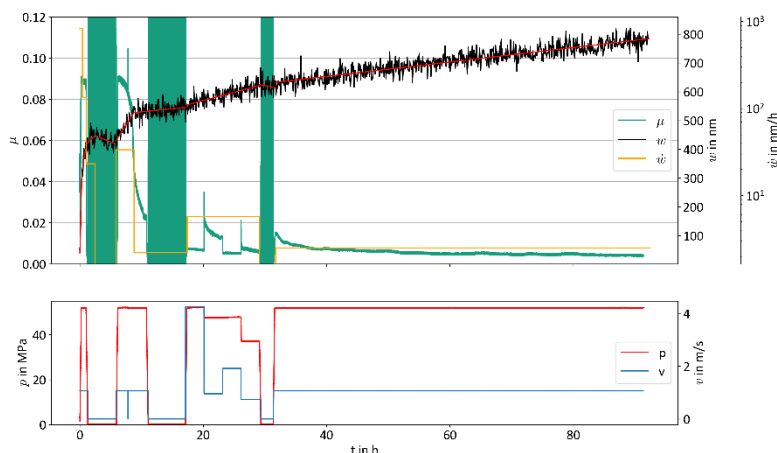


Abbildung 8: Einlaufkennfeld der ta-C:B Schicht mit RNT. Die grünen Balken stehen für die *in situ* AFM Messungen.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Eine Auswertung der Topographie ergibt den Verlauf der Spitzenrauheit in Abbildung 9a.

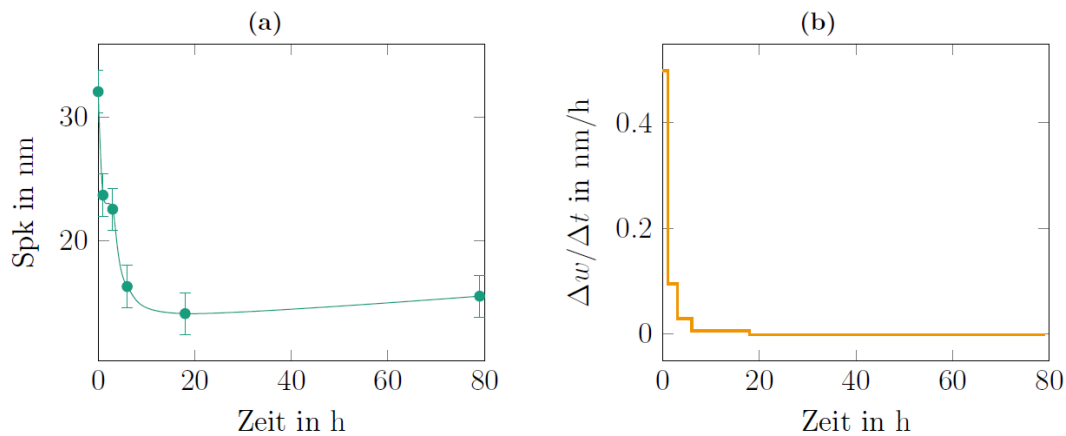


Abbildung 9: Topographischer Einlauf der ta-C:B Schicht. Auftragung der mittels *in situ* AFM gemessenen Spitzenrauheit in (a) und der aus der Abnahme des Spitzenvolumens berechneten Verschleißrate in (b).

Es kommt zu einer schnellen Abnahme der Spitzenrauheit in den ersten sechs Stunden, was den topographischen Einlauf darstellt. Ab 18 h ist die Spitzenrauheit über die gesamte Versuchsdauer konstant. Aus der Abnahme des nichtlinearen Spitzenvolumens lässt sich eine linearisierte Verschleißrate, deren Verlauf in Abbildung 9b zu sehen ist, berechnen. Diese startet unter 0,5 nm/h und fällt auf Werte in der Größenordnung pm/h. Auffällig ist, dass diese Verschleißrate parallel zum mittels RNT gemessenen Verlaufs der Verschleißrate des LDS-Stifts ist.

Tribochemische Veränderung der DLC-Schichten

Die Veränderungen der Topographie und der Verschleiß der harten ta-C (V1) Schichten findet auf der Nanoskala statt. Die ist zusammen mit den niedrigen Reibwerten ein Indiz für die Bildung eines dritten Körpers im DLC-Metall-Tribosystem. Im Gegensatz zu Metall-Metall-Systemen ist hier der Nachweis allerdings nicht trivial. Da es im DLC aufgrund des amorphen Zustandes keine Mikrostruktur gibt, finden Veränderungen nur in der Schichtchemie statt.

Diese zu analysieren, erfordert präzise (Nano-)Messmethoden. Einen Einstieg ermöglicht die Nanoindentation. Hier ist zu beachten, dass die herkömmliche Kalibrierung der Spitze mit der Oliver-Pharr-Methode nicht ausreicht, sondern eine *in situ* Vermessung der Spitze nach Saringer erforderlich ist. Des Weiteren müssen aufgrund der Topographie die Indents mittels SPM-Modus platziert und nach der Vermessung validiert werden. Die mittels nanoDMA tiefenabhängig bestimmten E-Moduln einer ta-C V1 Probe sind in Abbildung 10 aufgetragen. Hierbei liegt der E-Modul des ungelautenen Bereichs durchgängig über dem der Reibspur. Dieser Unterschied ist aber nicht durchgehend signifikant (2σ -Fehlergrenze). Trotzdem ist dies ein starkes Indiz für eine Zunahme des sp^2 -Anteils in der Randzone der Reibspur.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

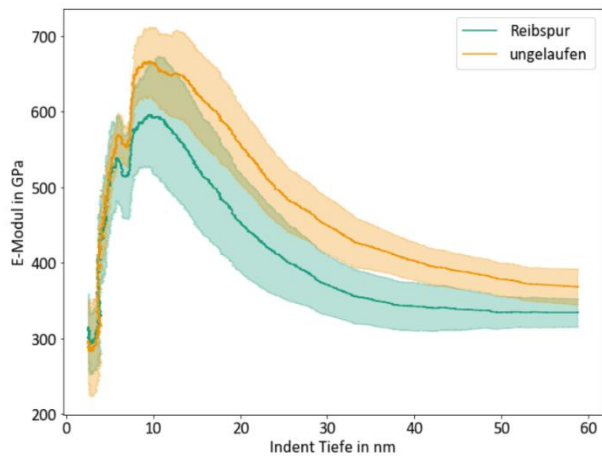


Abbildung 10: Mittels nanoDMA Nanoindentation bestimmte E-Modul in einer ta-C V1 Schicht innerhalb der Reibspur (grün) und im endbearbeiteten Bereich (orange).

Des Weiteren lässt sich aus den Nanoindents ableiten, dass die ersten zehn Nanometer mit dieser Methode nicht hinreichend charakterisiert werden können. Mittel der Wahl ist an dieser Stelle die Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS), die stark oberflächensensitiv ist. Zusammen mit Argonsputterätzen können Tiefenprofile aufgenommen werden. Ein Ergebnis des Projekts besteht darin, dass herkömmliches Sputterätzen das Material zerstört, respektive dieses auf ~100 % sp^2 umhybridisiert. Statt monoatomarem Ar^+ Beschuss, kann mit Ar^+ -Clustern schädigungsfrei abgetragen werden und tiefenaufgelöst mittels C1s Peakfit der Bindungszustand gemessen werden.

Abbildung 11 zeigt zwei solcher Tiefenprofile an einer ta-C V1 Probe. Der erste Nanometer zeigt in beiden Kurven die stärkste sp^2 -Zunahme und ist somit der Oberflächenkontamination mit CH_x zuzuordnen. Bis in 2,5 nm Tiefe stellen sich jedoch unterschiedliche Plateaus ein, wobei das in der Reibspur signifikant mehr sp^2 -Anteil aufweist.

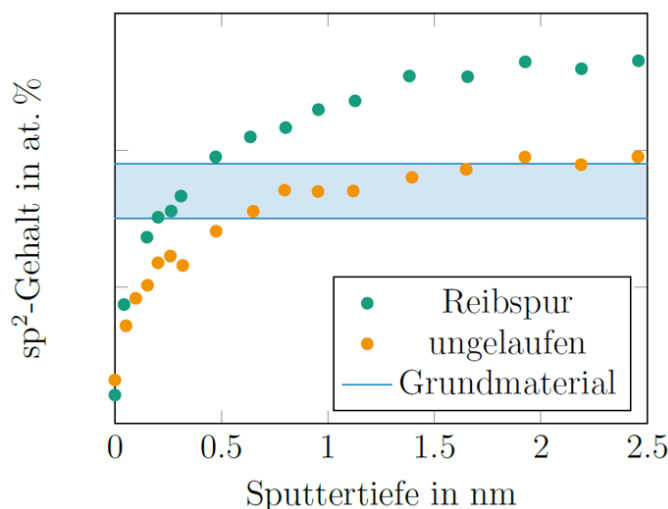


Abbildung 11: Durch XPS und Argon-clusterionensputtern aufgenommenen C1s Tiefenprofile einer ta-C V1 Schicht innerhalb der Reibspur (grün) und im endbearbeiteten Bereich (orange). Zum Vergleich der nominelle sp^2 -Gehalt in Blau.

1.1.2.2 Simulation (Fraunhofer IWM)

Im Berichtszeitraum wurden eine Vielzahl von Simulationsansätzen zur Auffindung reibreduzierender Maßnahmen verfolgt. Zunächst war vom Fraunhofer IWS die Frage aufgeworfen worden, in welchem Bereich Kolbenringe mit einem Laser zu strukturieren sind, um eine Verringerung der Reibleistung im

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

hydrodynamischen Reibregime zu erzielen. Am Fraunhofer IWM wurden daraufhin umfangreiche hydrodynamische Berechnungen einer Kolbenring-Liner-Paarung durchgeführt (siehe nächstens Kapitel).

Daraufhin erfolgten Kontaktmechanikrechnungen (basierend auf experimentellen Topographien) zur Ermittlung der lokalen Flächenpressungen im Reibkontakt (siehe übernächstes Kapitel). Diese wurden für die darauffolgenden atomistischen Reibsimulationen als Eingabeparameter benötigt.

Im PEGASUS-Projekt hatte das Fraunhofer IWM bereits das supraschmierende Potential einer geschmierten ta-C/ta-C-Paarung demonstriert. Es stellte sich die Frage, ob sich LDS/ta-C-Kombinationen ähnlich verhalten. Deshalb wurden quantenchemische Simulationen des Kolbenring-Liner-Tribosystems unter Grenzreibungsbedingungen durchgeführt, um zu klären, ob auch die Kombination von ta-C mit LDS-Schichten zu supraschmierenden Oberflächenterminierungen führen kann (siehe weiteres Kapitel).

Das Fraunhofer LBF und die Firma FUCHS waren über weite Strecken des Projekts mit der Entwicklung von Sternpolymeradditiven als weiteren innovativen Ansatz zur Reibreduktion beschäftigt. Deshalb widmete sich ein Großteil der Simulationsarbeiten zum Abschluss des Projekts dem Verständnis der reibreduzierenden Wirkung von Sternpolymeren.

Im Folgenden wird auf die einzelnen Unterarbeiten eingegangen.

1.1.2.2.1 Berechnung der optimalen Oberflächenstrukturierung von Kolbenringen

In der Literatur sind bereits zahlreiche Studien zur Reibreduktion in Tribosystemen mittels topographischer Strukturierung der Reibpartner belegt. Für das System Kolbenring/Liner sollte deshalb untersucht werden, in welche Bereiche eine Vertiefung in den Kolbenring durch Laserbeschuss eingebracht werden sollen. Hierzu war von Federal-Mogul eine Kolbenringgeometrie zur Verfügung gestellt worden (Abbildung 12:, rechts). Es wurden verschiedene Geometrien für zwei symmetrisch um die Kolbenringmitte eingebrachte umlaufende Rillen durchgerechnet. Dabei stellte sich heraus, dass die exakte Rillengeometrie eher unwesentlich die Reibminderung beeinflusst. Die Lage und Tiefe der Rille sind die maßgeblichen Parameter, die für eine optimale Reibreduktion verantwortlich sind. Anfangspunkt und Endpunkt der Rillen hängen von der Balligkeit des Kolbenrings und der minimalen Höhe h_{min} des Schmierpalts ab (Abbildung 12:, links). Für die durchschnittliche Tiefe der Rille hat sich ein Wert von ca. $0.6 h_{min}$ herausgestellt. Bei optimalen Rillen sollte der Reibwert um 5-8% sinken. Das Fraunhofer IWS hat innerhalb von PROMETHEUS die durch die Simulation gegebenen Vorgaben umgesetzt.

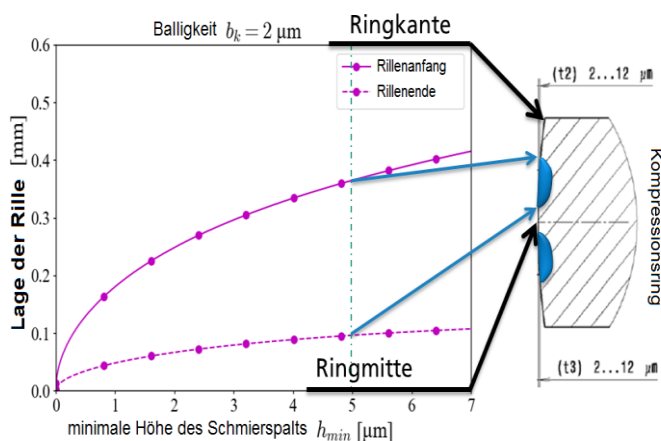


Abbildung 12: Fluiddynamische Berechnung einer möglichen Strukturierung des Kolbenrings. Hier wurden zwei Rillen betrachtet, die symmetrisch um die Ringmitte herum angeordnet sind. Die Graphik zeigt Vorhersagen für die optimale Lagen und Breite der Rillen.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

1.1.2.2.2 Kontaktmechanikrechnungen der lokalen Flächenpressungen

Da die unterschiedlichen LDS und ta-C-Varianten (vor allem nach diversen Nachbearbeitungen, wie Bürsten, Schleifen oder Bandfinishen) deutliche Variationen in Reibung und Verschleiß aufweisen, stellt sich die Frage, ob sich die tribologischen Eigenschaften mit den Unterschieden in den Oberflächentopographien erklären lassen. Im Rahmen einer Masterarbeit wurden die Voraussetzungen geschaffen, die mikroskaligen Topographien der LDS-Liner und der ta-C-Kolbenringe in eine Pythonumgebung einzulesen und mittels eines halbraumbasierten Fourierkontaktmechanikprogramms (PyCo) auszuwerten.

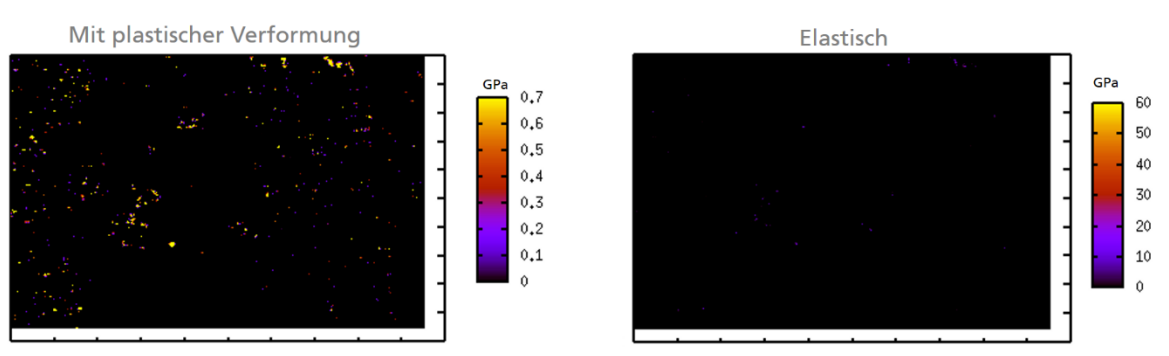


Abbildung 13: Druckverteilung auf der Grundfläche

Es wurde sowohl rein elastisch als auch plastisch gerechnet. Plastizität kann in einfacher Form in die Kontaktmechanik integriert werden, indem Drücke, die größer als die Härte des weicheren Materials sind, beim iterativen Ermitteln der Druckverteilung auf den Härtewert gesetzt werden. Wie zu erwarten war, wurde bei der plastischen Rechnung der maximale Druck auf die Härte der LDS-Schicht (0.7 GPa) reduziert (Abbildung 13, links), während sie, bei der elastischen Rechnung bei ca. 60 GPa lag (Abbildung 13, rechts). Des Weiteren macht Abbildung 13 deutlich, dass die reale Kontaktfläche infolge der Plastizität um 2 Größenordnungen ansteigt.

Resümee: Bei den hier betrachteten Topographien muss von einem deutlichen topographischen Einlauf infolge eines plastischen Wegfließens von Rauheitsspitzen ausgegangen werden. Die maximalen Pressungen hängen hierbei nicht von der Topographie ab. Für die atomistischen Rechnungen kann daher von lokalen Pressungen von größenordnungsmäßig 1 GPa ausgegangen werden.

1.1.2.2.3 Atomistische Beschreibung des LDS/ta-C-Tribokontaktes

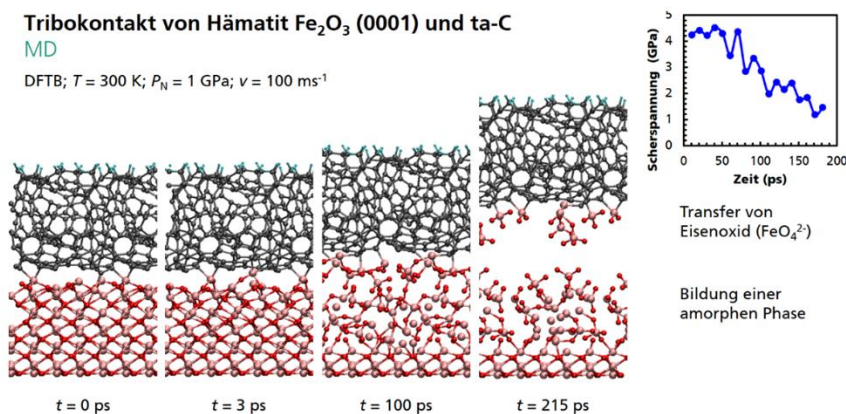


Abbildung 14: Das Gleiten einer Hämatitoberfläche gegen einen ta-C

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Es sollte geklärt werden, wie sich trockenen LDS/ta-C-Kontakte chemisch verhalten und, ob eine kleine Menge Schmierstoff ausreichen kann, eine Aromatisierung der ta-C-Oberfläche zu bewirken. Abbildung 14 zeigt eine Tight-Binding-Rechnung des trockenen Gleitens einer LDS-Schicht (repräsentiert durch eine Fe_2O_3 -Oberfläche, rote und rosa Atome) gegen eine ta-C-Schicht (schwarze Atome). Man sieht deutlich, dass die Hauptscherarbeit innerhalb des Fe_2O_3 geleistet wird. Dieses amorphisiert, was mit einer deutlichen Reduktion der benötigten Scherspannung von anfänglich 4 GPa zu einem finalen Wert von 1 GPa einhergeht. Nach einer Zeit von 200 ps wurden die beiden Flächen auseinandergezogen, was zur Bildung eines dünnen Eisenoxidtransferfilmes auf den ta-C führte.

Abbildung 15 stellt dieselbe Simulation mit einer zusätzlichen Grenzschmierung durch ein einzelnes Glycerolmolekül dar. In analogen Simulationen mit zwei ta-C-Oberflächen hatte sich Supraschmierung ergeben, weil sich auf den ta-C-Schichten aromatische (graphenoide) Passivierungen einstellten. Es wird deutlich, dass dieser Effekt bei der Heteropaarung LDS/ta-C nicht auftritt. Zwar wird das Glycerol (ähnlich zur ta-C/ta-C-Simulation) mechano-chemisch zerstört, jedoch unterbleibt die Aromatisierung des ta-C, da die gesamte Scherung im Fe_2O_3 stattfindet und daher nicht genügend Mobilität der C-Atome zum Umbau des amorphen Gefüges in eine aromatische Deckschicht zur Verfügung steht. Dementsprechend bleiben die Scherspannung auf hohem Niveau (~1GPa).

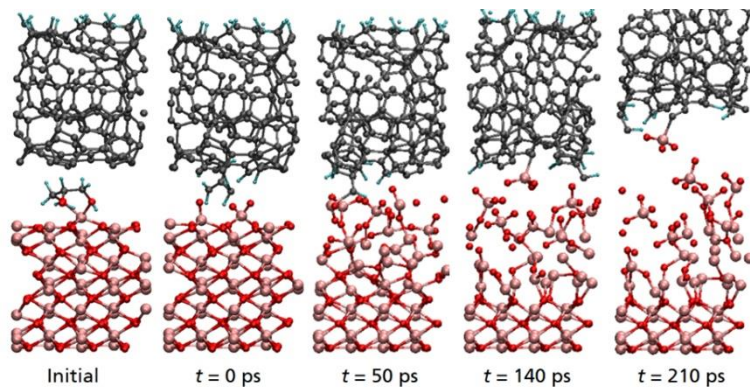


Abbildung 15: Gleiten eines mit einem Glycerolmolekül geschmierten Hämatit/ta-C-Tribokontaktes

Resümee: Die mechano-chemische Erzeugung von supraschmierenden Lagen auf den ta-C-Oberflächen ist bei ta-C/LDS-Paarungen unterdrückt. Dies könnte das Ausbleiben der Supraschmierung in den Realkontakten erklären.

1.1.2.2.4 Sternpolymere

Ein wesentlicher Fokus der atomistischen Simulationen lag auf der Untersuchung der Wirkweise von Sternpolymeren als Schmierstoffadditive. Diese Simulationen erfolgten in Absprache mit den Partnern des Fraunhofer LBF und der Firma FUCHS, die an der Synthese und experimentellen Untersuchung dieser neuartigen Additive arbeiten.

Es wurde eine atomistische Beschreibung eines mit Sternpolymeren additierten Grundöls entwickelt. Hierzu wurde ein nichtreaktives Kraftfeld für das Grundöl PAO4 und das vom LBF synthetisierte Sternpolymer zusammengestellt und in einer Serie von Molekulardynamiksimulationen wurden die tribologischen Eigenschaften des PAO/Sternpolymer-Gemisches ermittelt.

Im Rahmen der atomistischen Simulationen wurde ein Modellsystem für die Untersuchung der Wirkweise von Sternpolymeren als Schmierstoffadditive implementiert. Anschließend wurden Schersimulationen im engen Tribospalten durchgeführt. Dazu wurde das Modellsystem der Schmierstofflösung zwischen zwei

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

amorphen Kohlenstoffwänden untersucht (Abbildung 16). Es wurde beobachtet, dass sich Sternpolymere an den Wänden anlagern. Diese Anhaftung bleibt selbst bei hohen Scherraten bestehen.

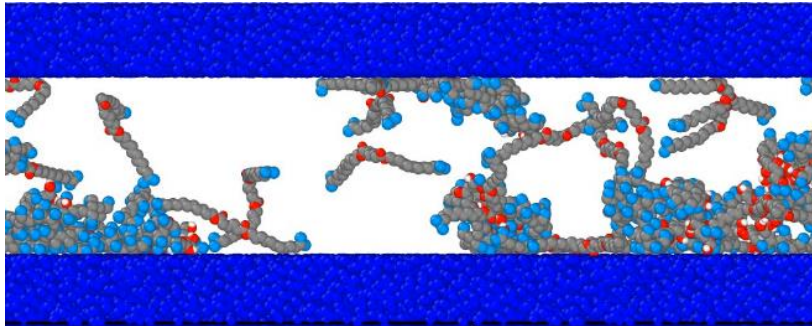


Abbildung 16: Scherkonfiguration der Schmierstofflösung aus PAO4 (nicht sichtbar) und Sternpolymeren.

In den Diskussionen mit LBF und FUCHS hat sich als Hauptfragestellung ein Konflikt im Design der Sternpolymere zwischen Löslichkeit im Basisöl und Wandaffinität ergeben. Mit steigendem Anteil an polaren Sternpolymer-Gruppen wird zum einen die Wandaffinität gesteigert, zum anderen jedoch auch die Löslichkeit im Basisöl durch Sternpolymer-Agglomerationen verringert. Um die Wandaffinität zu untersuchen, wurden Desorptionssimulationen von Molekülen an der Wand in das Flüssigkeitsvolumen durchgeführt. Mit diesen Simulationen wurden verschiedene Ziele verfolgt. Zum einen können aus dem wandnahen Verhalten der Sternpolymere Rückschlüsse auf Designoptimierungen getroffen werden. Zum anderen ist aus den berechneten Desorptionsenergien die Quantifizierung der Wandaffinität einzelner Moleküle möglich.

Um die Desorptionsenergie eines einzelnen Moleküls zu untersuchen, wurden höhen-kontrollierte Molekulardynamik-Simulationen durchgeführt. Hierzu wird ein zu untersuchendes Molekül in Wandnähe aufgesetzt. Mittels einer Feder wird eine Kraft in entgegengesetzter Wandrichtung auf das Zentralatom des Sternpolymers aufgebracht (Abbildung 17). Die notwendige Arbeit, um das Sternpolymermolekül von der Wand abziehen, wird dann aus dem Kraftintegral berechnet:

$$W = -\int F ds$$

Da es sich um einen dynamischen Prozess handelt, ist in dieser Arbeit auch noch ein Dissipationsanteil enthalten, woraus sich für die Freie Desorptionsenergie $A \leq W$ ergibt. Die Freie Desorptionsenergie A kann mit Hilfe des Jarzinski-Theorems berechnet werden und wurde für die LBF-Sternpolymere auf ca. 1 eV abgeschätzt.

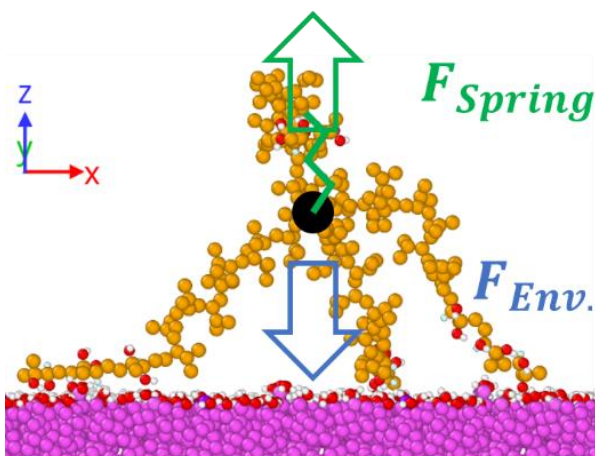


Abbildung 17: Schnappschuss eines wandnahen Sternpolymer Moleküls mit Illustration der wirkenden Kräfte. Umgebendes Grundöl wird nicht dargestellt.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Resümee: Die atomistischen Untersuchungen haben gezeigt, dass die vom Fraunhofer LBF synthetisierten Sternpolymere hervorragende Voraussetzungen zur Reibreduktion bieten, da sie die Viskositäten des Grundöls kaum verändern, sich bevorzugt an den ta-C-Schichten anlagern und deshalb lange im engen Spalt verbleiben. Damit können sie die PROMETHEUS-Tribosysteme in der Grenzreibung vor Trockenkontakt, hoher Reibung und hohem Verschleiß schützen. Diese Ergebnisse wurden, wie im folgenden Kapitel gezeigt, eindrucksvoll durch die Experimente der Firma FUCHS bestätigt.

1.2 Schmierstoffstrategie (TP3000)

1.2.1 Ziele und Aufgabenstellung

Kernziel der Arbeiten bei FUCHS war die Formulierung optimierter Motorenöle unter Einbeziehung der gewonnenen Erkenntnisse aus anderen Teilpaketen. Die Arbeiten umfassten Untersuchungen zu den Wechselwirkungen von Schmierstoffkomponenten mit den relevanten Materialkombinationen, insbesondere den neuen Beschichtungen von Zylinderlaufbahn und Kolbenringen. Weiterhin wurden tribologische Grundkonfigurationen in Tribometern dargestellt, womit Synergien und Antagonismen zwischen oberflächenaktiven Additiven und Beschichtungen ermittelt wurden.

Im Mittelpunkt der Arbeiten stand die Entwicklung von Kandidatenölen für verringerte Reibleistung in den betrachteten Tribosystemen. Folgende Aufgaben wurden bearbeitet:

- Vervollkommnung und Abgleich der tribologischen Testmethoden
- Spezialanalytik für tribochemische Aspekte
- Absenkung der Viskosität
- Einsatz von Reibwert-Modifikatoren und unkonventionellen Grundölen
- Additivkonzepte mit verringertem Aschegehalt

In Zusammenarbeit mit Fraunhofer LBF:

- Entwicklung und Testung von reibungsreduzierenden polymeren Additiven.

1.2.2 Verwendung der Zuwendung

FUCHS:

Die dem Projekt zugeordneten Aufwendungen konzentrierten sich auf die Arbeitspakete 3020, 3030 und 3040, also auf die Entwicklung, tribologische Charakterisierung und Bewertung von Schmierstoffen für sehr unterschiedliche Motorenkonzepte – vom Motorrad- und PKW-Antrieb bis zu Großmotoren. Infolgedessen waren unterschiedliche Fachabteilungen an der Durchführung des Vorhabens beteiligt, insbesondere die F&E-Abteilung "Motorenöl", die koordinierende Vorausentwicklung und das mechanisch-technische Prüffeld. Die Aufteilung auf drei Motorenhersteller erforderte spezifische Lösungen; dazu kamen im Verlauf des Vorhabens neue Erkenntnisse aus vielfältigen Verträglichkeitsuntersuchungen zu bestimmten Additivkombinationen mit neu entwickelten Hartstoffschichten.

Auch wenn im Zentrum von PROMETHEUS die Reibungsoptimierung der Kolbengruppe von Verbrennungsmotoren stand, also des tribologischen Kontaktes zwischen Kolbenringen und Zylinderlaufbahn, so muss doch darauf hingewiesen werden, dass Motorenöle immer auch multifunktionelle Eigenschaften aufweisen müssen:

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Motorenöle reduzieren Reibung und damit Kraftstoffverbrauch, verhindern Verschleiß, führen Wärme ab und schützen vor Korrosion; sie halten den Motor sauber, übertragen Kräfte, reduzieren Geräusche und beeinflussen Motoremissionen. Allein die tribologischen Systeme eines Motors – Kolbengruppe, Pleuellager, Kurbelwellenlager, Zylinderkopf sowie Pumpen und Hilfsaggregate, z.B. Turbolader – beinhalten sehr unterschiedliche Anforderungen an den Schmierstoff. Kurz: Das Motorenöl muss immer im Kontext dieser „Multifunktionalität“ optimiert werden.

In jedem Fall ist das Thema des PROMETHEUS-Projekts auch aus der Sicht des Motorenöls von besonderer Bedeutung: Etwa ein Drittel der gesamten mechanischen Verluste eines Verbrennungsmotors fallen allein in der Kolbengruppe an – dies unterstreicht die volkswirtschaftliche Bedeutung von PROMETHEUS.

Fraunhofer LBF:

Im Hauptarbeitspaket HAP3050 wurden für Synthesen und Charakterisierungen Projektmittel für verschiedene Chemikalien und Lösemittel sowie auch Laborverbrauchsmaterialien verwendet. Der weitaus größte Teil der Zuwendung wurde für wissenschaftliches Personal eingesetzt. Die Projektleitung war für die Kommunikation mit dem interdisziplinär aufgestellten Projektkonsortium sowie auch die Planung des Projektablaufs und der Ergebnisinterpretation verantwortlich. Das wissenschaftliche Fachpersonal plante die Experimente im Labor, beschaffte alle nötigen Materialien und führte die Synthesen selbst durch. Es war weiterhin verantwortlich für die Charakterisierung der synthetisierten Polymere und aller Zwischenstufen.

1.2.3 Erzielte Ergebnisse

1.2.3.1 Schmierstoffentwicklung

TP3000 beschäftigte sich mit Fragestellungen rund um das Reibungsminderungspotenzial von Motorenölen. Im ersten Schritt wurden die Rahmenbedingungen für die Schmierstoffentwicklung unter Einbeziehung der anwendungsspezifischen Anforderungen ausgehend vom Stand der Technik festgelegt. Hierbei wurden die spezifischen Anforderungen der Industrie-, LKW-, PKW- und Motorradmotoren erfasst und unter Berücksichtigung der verfügbaren Reibungsminderungsmaßnahmen daraus die jeweils optimalen Schmierstoffentwicklungsstrategien abgeleitet.

Eine bestmögliche Senkung der Reibungsverluste in tribologischen Systemen kann nur durch eine wechselseitige Optimierung der Reibpartner erreicht werden, bestehend aus Körper ↔ Schmierstoff ↔ Gegenkörper.

Aus Schmierstoffsicht sind zur Steigerung der Energieeffizienz dabei vor allem folgende Stellgrößen zu nennen:

- Absenkung der Viskosität,
- Einsatz unkonventioneller Grundöle
- Reibungsreduzierende Additivierung.

Die Darstellung niedrigviskoser, reibungsarmer Motorenöle erfordert zudem eine Anpassung der Schmierstoffformulierung, um Nachteile aus höheren Mischreibungsanteilen zu kompensieren. Das Reibungs- und Verschleißverhalten im Bereich der Grenz- und Mischreibung wird dabei maßgeblich durch das Additivsystem bestimmt. Alternative Ansätze – z.B. eine zinkfreie Additivierung, die Reduzierung

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

aschebildender Additive und ggf. der Einsatz geeigneter Festschmierstoffe – ermöglichen vielversprechende Potentiale für eine Reibungsreduzierung, die sich darüber hinaus meist auch durch ein günstigeres Verhalten auf Emissionen und damit Abgasnachbehandlungssysteme auszeichnen.

Die gezielte Beeinflussung der rheologischen Charakteristik eines Motoröls bietet weitere Optimierungspotenziale; dieser Ansatz geht weit über eine einfache „Viskositätsabsenkung“ hinaus. Hier ist an erster Stelle die Optimierung des Schmierfilmaufbaus in dünnen Schmierpalten durch Einsatz spezifischer Polymere zu nennen. Damit soll ein früherer Übergang aus der Mischreibung in die Hydrodynamik erreicht werden, wodurch sich die Verweildauer im verschleißgefährdeten Bereich der Grenz- und Mischreibung verringert.

Ein weiterer Schwerpunkt in TP3000 lag daher in der Entwicklung maßgeschneiderter, Rheologie-modifizierender Komponenten auf Polymerbasis. Die hierfür erforderlichen Grundlagen wurden in enger Verzahnung mit TP2000 entwickelt.

Im Rahmen des Projektes wurde auf diesen Grundlagen eine Reihe unterschiedlichster Schmierstoffansätze entwickelt und dargestellt. Eine Übersicht über die wesentlichen Schmierstoffmuster und deren Formulierungsansätze ist in Abbildung 18 dargestellt. In dieser Grafik werden den verschiedenen Motortypen die erfolgversprechendsten Öle zugeordnet, mit einer Kurzcharakterisierung der umgesetzten Maßnahmen:

- A Viskositätsabsenkung
- B Alternative Formulierungsansätze
- C Einsatz unkonventioneller Grundöle (Ester, Glykole)
- D Reduzierung aschebildender Additive
- E Einsatz neuer funktionaler Polymere

Bei einigen Varianten wurden mehrere Maßnahmen parallel realisiert.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

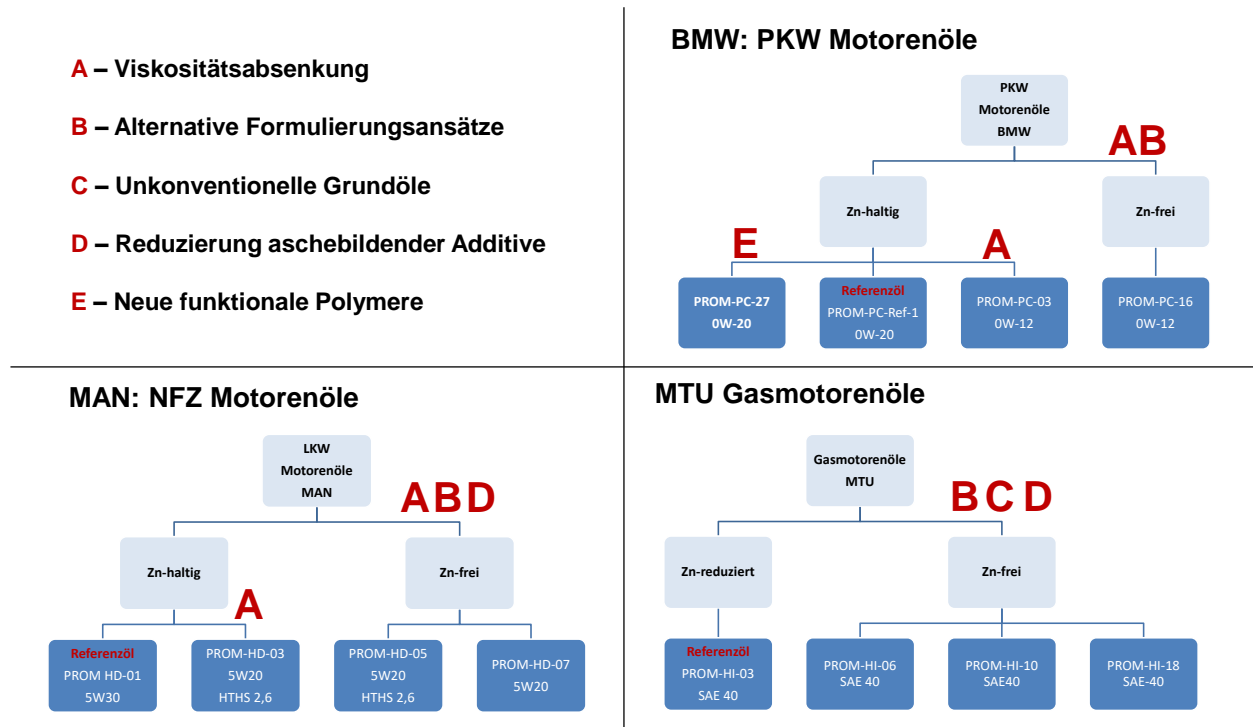


Abbildung 18: Schmierstoffmuster und deren Formulierungsansätze

Von den im Projekt dargestellten Schmierstoffen wurden rheologische Kenndaten ermittelt, angefangen beim Verlauf der Viskosität in Abhängigkeit der Temperatur; von wichtigen Kandidaten zudem Druckviskositäten und Schmierfilmhöhen (EHL-Tribometer). Exemplarisch ist dies in Abbildung 19 dargestellt.

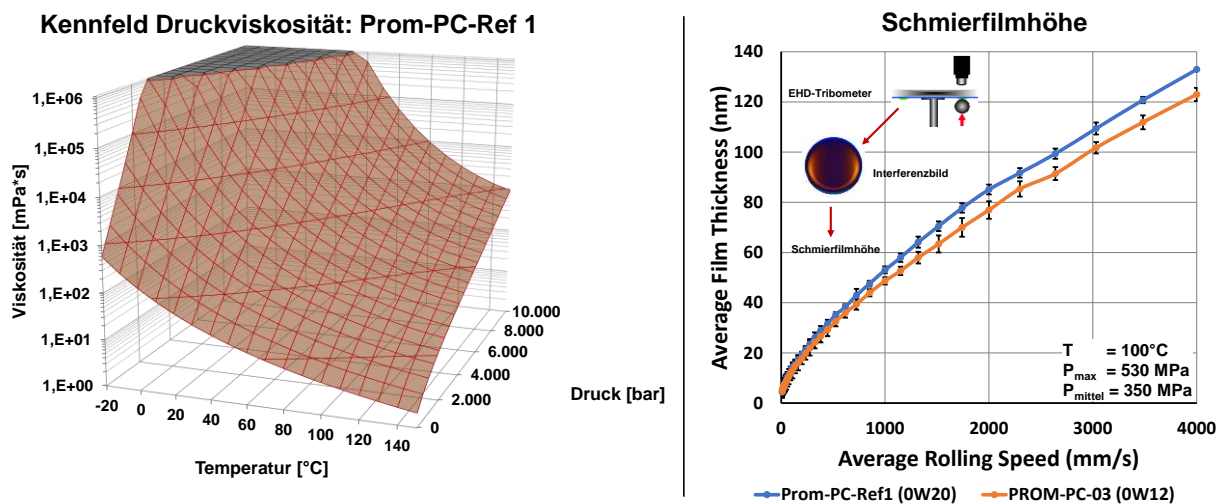


Abbildung 19: Schmierstoffkenndaten

Die ermittelten Kenndaten wurden als Eingangsdaten für die simulatorische Berechnungen in TP2000 und TP5000 zur Verfügung gestellt.

1.2.3.2 Screening der Schicht-Schmierstoff Wechselwirkung

Ein gut funktionierendes Schicht-Schmierstoff-System zeichnet sich aus tribologischer Sicht mit einem gutmütigen Verhalten in der Wechselwirkung zwischen Schicht und Schmierstoff aus; „gutmütig“ meint:

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

1. Stabilität der Schicht und günstiges Verschleißverhalten
2. stabiles Reibungsverhalten.

Die Kenntnis darüber stellt einen wesentlichen (und essenziellen) Bestandteil sowohl für die Schmierstoff- als auch Schichtentwicklung dar.

Im Projekt wurde eine erste Bewertung mit Hilfe der Tribomesszelle (TMZ), einem „Kugel auf 3 Platten“-Messsystem im Anton-Paar Rheometer MCR 301, durchgeführt. Die Versuchsparameter wurden so gewählt, dass die initiale Pressung zu Versuchsbeginn, d.h. in der Konditionierungs- und Einlaufphase, trotz des Punktkontakts bei 380 MPa liegt (berechnet für die Materialpaarung 100Cr6/100Cr6). Für die hier betrachteten beschichteten Systeme lässt sich hingegen lediglich eine Abschätzung der Pressung vornehmen, die im Bereich zwischen 400 – 500 MPa angenommen wird. Die Messungen umfassen dabei ein umfangreiches Last-, Geschwindigkeits- und Temperaturprofil (Lasten: 25 und 10N; Temperaturen: 120°C und 25°C; Gleitgeschwindigkeit in den Stribeckkurven bis zu 3,6 m/s). Zudem wurden nach Versuchsende die Kalottendurchmesser auf den Plättchen gemessen, was auch die Grundlage für die Bewertung der Schichtbeständigkeit gegenüber den verschiedenen Schmierstoffansätzen darstellt.

Insgesamt deckt die Tribomesszelle in der gewählten Konfiguration allerdings einen etwas höheren Pressungsbereich ab, als er in konventionellen Kolbenringsystemen anzutreffen ist.

Verschleißbewertung:

Eine Zusammenfassung der Resultate hinsichtlich der Schichtstabilität / des Verschleißverhaltens ist in Abbildung 20 aufgeführt. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die ta-C-v1 Schicht unter diesen Testbedingungen mit den eher konventionellen Schmierstoffansätzen (PKW: PROM-PC-Ref-1, PROM-PC-03 / LKW: PROM-HD-01 / Industriemotor: PROM-HI-01) eine sehr gute Schicht- bzw.- Verschleißbeständigkeit zeigt.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

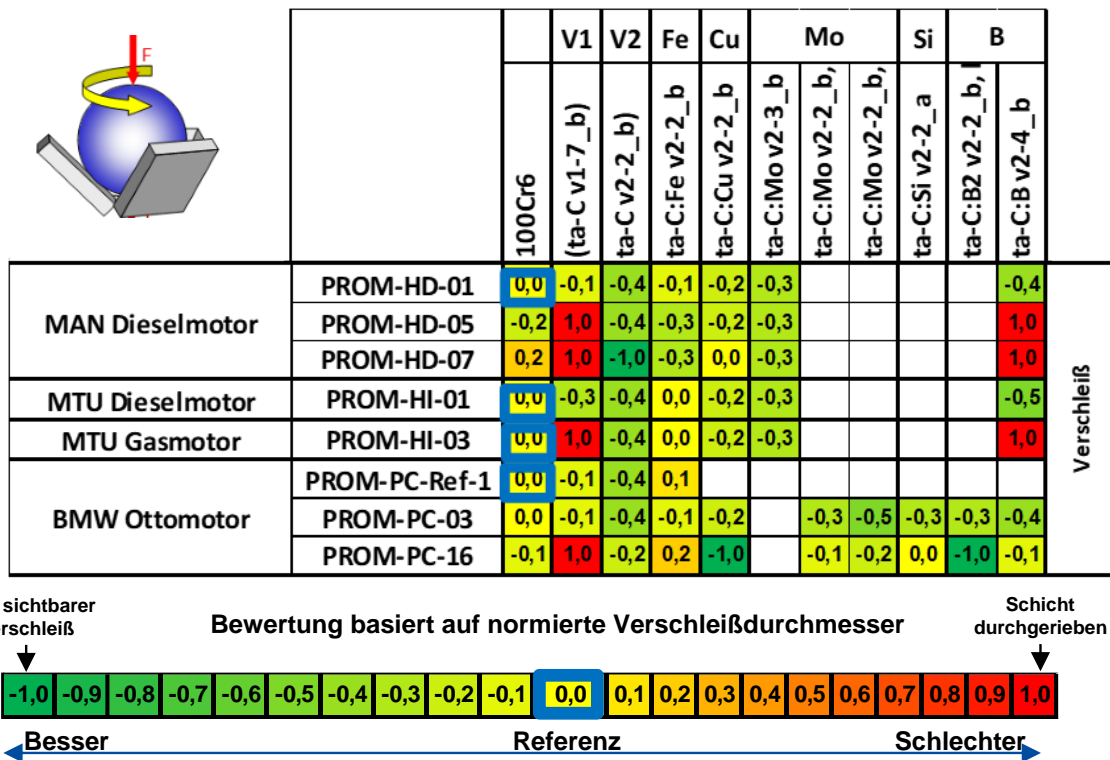


Abbildung 20: Tribomesszelle - Verschleißbewertung dotierte und undotierte ta-C Schichten

Mit den im Projekt betrachteten vorwiegend innovativen Schmierstoffansätzen zeigt sich ein anderes Bild. Hier wurde unter diesen Testbedingungen mit der ta-C_v1 Schicht ein hoher Schichtverschleiß festgestellt (PKW: PROM-PC-16 / LKW: PROM-HD-05, PROM-HD-07 / Industriemotor: PROM-HI-03).

Diese Resultate zeigen die Notwendigkeit weiterer Schichtentwicklungsschritte, um eine entsprechend verbesserte Kompatibilität der Kohlenstoffschichten mit innovativen und zukunftsweisenden Schmierstoffkonzepten zu erreichen.

Ein erster Ansatz war die Darstellung der weniger harten (t)a-C_v2 Schicht. Diese zeigte in gewählten Testumfeld mit allen untersuchten Schmierstoffkonzepten ein recht robustes Verschleißverhalten (Abbildung 20). Exemplarisch ist ein Vergleich der Schichtbeständigkeit gegenüber den verschiedenen Schmierstoffansätzen in Abbildung 21 aufgeführt.

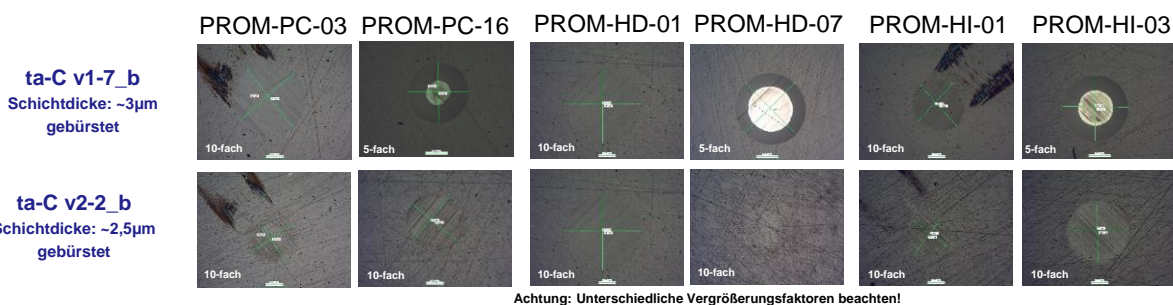


Abbildung 21: TMZ Verschleißkalotten im Vergleich: ta-C_v1 und (t)a-C_v2

Ein weiterer Ansatz im Projekt lag in der in der Entwicklung dotierter Kohlenstoffschichten → (t)a-C:X in TP4000. Die tribologische Erstcharakterisierung der betrachteten Dotierungs- und Schmierstoffkonzepte

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

zeigten sich unter den gewählten Bedingungen in Bezug auf die Schichtbeständigkeit in den meisten Fällen sehr vielversprechend. Lediglich die ta-C:B Schicht zeigte sich gegenüber einigen Schmierstoffkonzepten noch als verschleißanfällig. Die weiterentwickelte a-C:B Variante wurde innerhalb der Projektlaufzeit an der Tribomesszelle zwar nicht mehr untersucht; weitere in TP4000 durchgeführte tribologische Untersuchungen zeigten diesbezüglich ein deutlich verbessertes Verschleißverhalten.

Mit der Verschleißauswertung an der Tribomesszelle konnte aufgezeigt werden, dass die tribologische Schichtbeständigkeit gegenüber den innovativen Schmierstoffkonzepten durch die Weiterentwicklung von ta-C-Schichten deutlich verbessert werden konnte. Die beschriebene tribologische Grundcharakterisierung mittels TMZ liefert frühzeitige Kenntnisse, die wichtig sind für zukünftige Schmierstoffkonzepte. Zu anwendungsnäheren Untersuchungen wird auf TP4000 verwiesen.

Reibungsbewertung:

Die Gewährleistung bzw. die Verbesserung der Schicht-Schmierstoff-Verträglichkeit bildet quasi die Basis für den zweiten, für das PROMETHEUS-Projekt wesentlichen Schwerpunkt der Arbeiten – die Verringerung der Reibung. Aus Schmierstoffsicht sind die Maßnahmen im Kapitel 1.2.3.1 Schmierstoffentwicklung beschrieben.

- Die Tribomesszelle bietet sich auch hier als Screening-Instrument an. Das Ansprechverhalten des Additivsystems in einer tribologischen Umgebung mit beschichteten Prüfkörpern kann einen ersten Eindruck über die Funktionalität liefern.
- Für die zweite Stufe in der Bewertung des Reibverhaltens wurde ein Schwing-Reib-Verschleiß- (SRV-) Tribometer der Fa. Optimol eingesetzt. Als Konfiguration wurden neben dem Punkt-Scheibe-Kontakt vorzugsweise auch Adapter für die Prüfung von Originalsegmenten aus (beschichtetem) Kolbenring und Zylinderlaufbahn verwendet.
- Darüber hinaus wurde zusätzlich eine Mini-Traction-Machine (MTM) der Fa. PCS Instruments eingesetzt.

Die spezifischen Bedingungen des Punktkontakts führen in Verbindung mit den betrachteten tribologischen Komponenten (nach der Einlaufphase) zu unterschiedlichen Pressungen und damit Triboregimen. Dies erschwert zunächst einen direkten Vergleich der Ergebnisse mit Punktkontakt-Geometrie (TMZ, SRV, MTM). Insbesondere in den Versuchen, bei denen bereits der Referenzschmierstoff ein ausgeprägt niedriges Reibungsniveau aufweist, macht sich dies bemerkbar (BMW Ottomotorenöl und Rolls-Royce Gasmotorenöl). Hier müssen die Reibungsergebnisse immer im Kontext zum Verschleiß bewertet werden, was mit der Quadrantendarstellung der Auswertung berücksichtigt wird. Trotz dieser Einschränkung können Aussagen zur Schicht-Schmierstoff-Wechselwirkung getroffen werden.

In den Quadrantendarstellungen werden Reibungs- (Abszisse) und Verschleißbewertungen (Ordinate) einander gegenübergestellt. Dabei bedeuten negative Einstufungen jeweils Reibungs- bzw. Verschleißreduktion gegenüber der jeweiligen Referenz.

Ergebnisse für BMW Kolbengruppe

In der Quadrantendarstellung (Abbildung 22) zeigt sich über alle Kombinationen hinweg (unterschiedlich beschichtete Kolbenringe in Verbindung mit viskositätsreduziertem PROM-PC-03 (SAE 0W-12) bzw. zusätzlich aschefreiem PROM-PC-16) ein tendenziell verschlechtertes Reibverhalten bei wenig bis deutlich verringertem Verschleiß.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

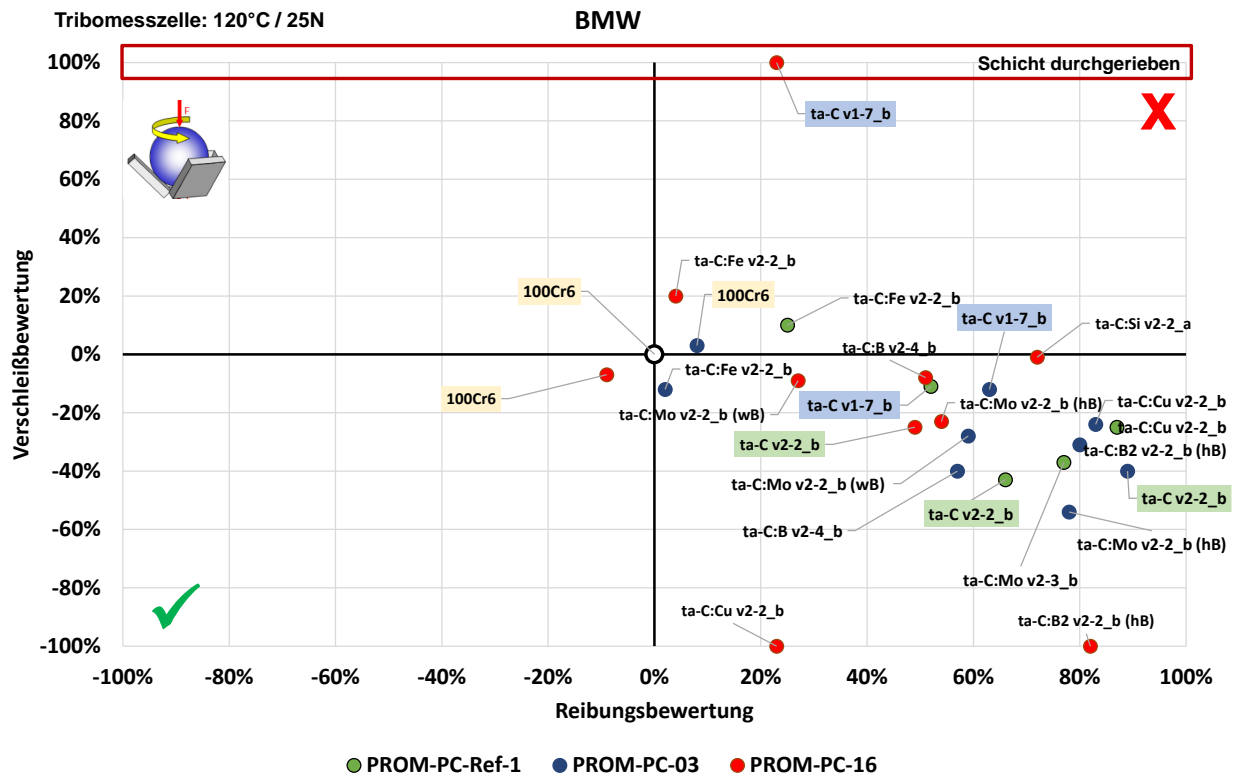


Abbildung 22: Resultate Tribomesszelle der BMW Umfänge - Quadrantendarstellung

Die Reibungskoeffizienten aus den SRV-Messungen (mit Segmenten aus Kolbenring und Zylinderlaufbahn) sind in Abbildung 23 dargestellt. Man erkennt auch in diesen Ergebnissen ein teilweise deutlich höheres Reibniveau mit den neuen Varianten.

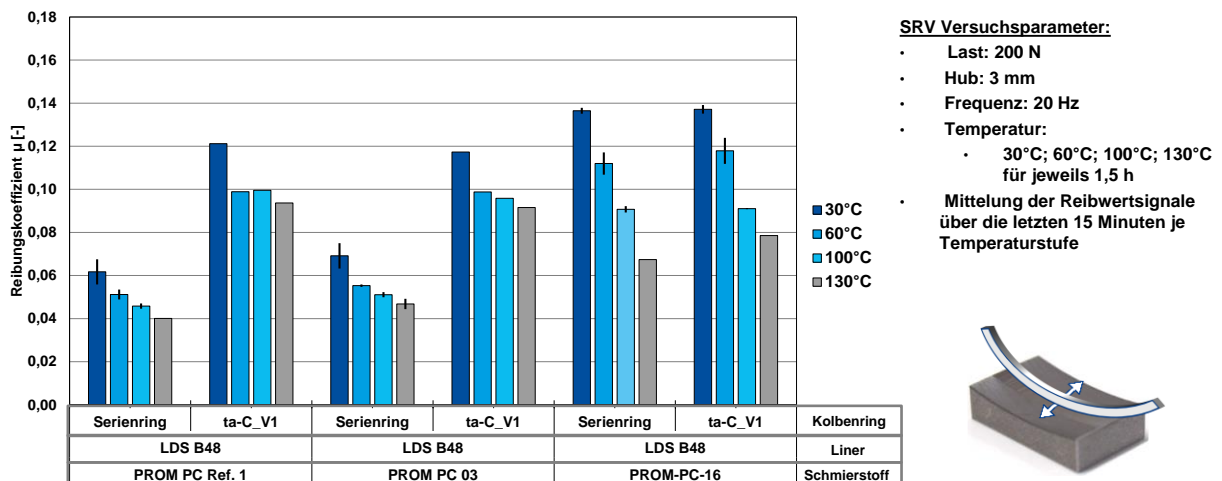


Abbildung 23: SRV BMW Umfänge – Reibungsbewertung

Ergebnisse für MAN-Kolbengruppe

In der Quadrantendarstellung (s. Abbildung 24) zeigen sich aus Schmierstoffsicht die Reibungsminderungspotentiale im Vorscreening an der Tribomesszelle besonders deutlich. Bereits mit der ersten Ausbaustufe PROM-HD-05 wird eine Reibungsverringerung von ca. -25% im Stahl/Stahl Kontakt

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

(100Cr6/100Cr6) erzielt. Mit der zweiten Ausbaustufe PROM-HD-07 verbessert sich die Reibung gegenüber dem Referenzsystem unter diesen Testbedingungen sogar um ca. -50%.

Alle untersuchten MAN-Schmierstoffkonzepte zeigten mit den dotierten (t)a-C:X Schichten in den meisten Fällen ein zum Teil deutlich verbessertes Verschleißverhalten gegenüber dem Stahl/Stahl Kontakt.

Ein extrem hoher Verschleiß wurde hingegen mit der ta-C_v1 und der dotierten ta-C:B_v2 Schicht in Zusammenhang mit den innovativen Schmierstoffkonzepten PROM-HD-05 und PROM-HD-07 festgestellt. Bemerkenswert dabei ist, dass die etwas weniger harte ta-C_v2 Schicht diesbezüglich ein deutlich robusteres Verschleißverhalten aufweist. Im Falle des PROM-HD-07 waren unter dem Mikroskop optisch z.B. so gut wie keine Verschleißmarken feststellbar.

Auch bezüglich Reibungsverringerung weisen die meisten der untersuchten dotierten (t)a-C:X Schichten mit den betrachteten Schmierstoffkonzepten noch weitere Potentiale aus.

Als Beispiel ist hier PROM-HD-07 zu nennen, dessen niedrige Reibung in der Tribomesszelle auch in anderen Tribometeruntersuchungen und befeuerten Motorentests nachgewiesen werden konnte (siehe TP4000 und TP7000).

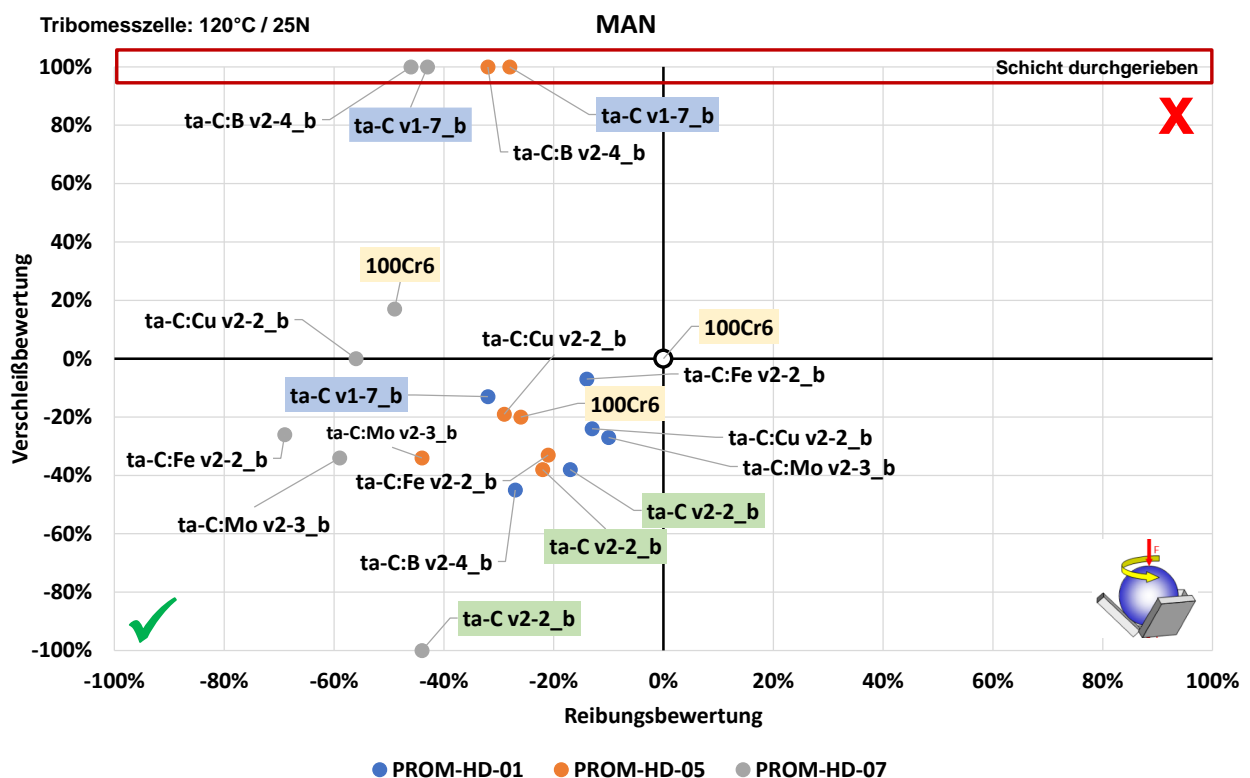


Abbildung 24: Resultate Tribomesszelle der MAN-Umfänge - Quadrantendarstellung

Ergebnisse für die Rolls-Royce-Kolbengruppe

In der Dieselmotorenanwendung konnten mit allen betrachteten Schmierstoff-Schicht-Kombinationen z.T. deutliche Verbesserungen in Hinsicht auf Verschleiß und Reibung festgestellt werden – s. Abbildung 25. Die Reibungsverbesserungen liegen im Bereich zwischen -10% bis -30% und die Verschleißverbesserungen zwischen -5% bis -50%.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Für die gasmotorische Anwendung ist mit dem Schmierstoff PROM-HI-03 ein sehr hoher Verschleiß mit der ta-C_v1-Schicht und der dotierten ta-C:B_v2-Schicht zu verzeichnen. Mit der ta-C_v2 und den anderen dotierten (t)a-C:X Schichten ist hingegen ein deutlich verbessertes Verschleißverhalten auch gegenüber dem Referenzsystem (PROM-HI-03/100Cr6/100Cr6) zu erkennen.

Innerhalb der Projektlaufzeit wurden die innovativen Schmierstoffkonzepte PROM-HI-06, PROM-HI-10 und PROM-HI-18 mit diesem Testaufbau lediglich mit unbeschichteten Prüfkörpern (100Cr6/100Cr6) geprüft. Ziel war es, mit den neuen Ansätzen ein mindestens gleichwertiges Verschleiß- und Reibungsverhalten zum Referenzschmierstoff PROM-HI-03 zu erzielen, was mit PROM-HI-18 als Zwischenziel auch erreicht werden konnte.

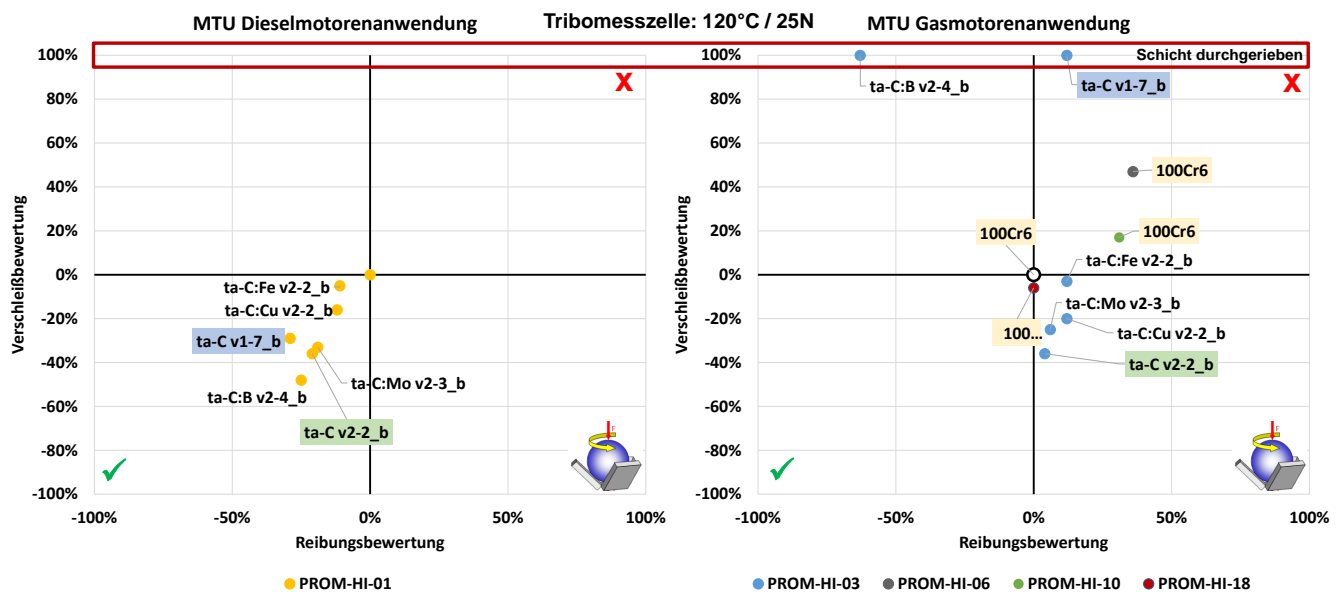


Abbildung 25: Resultate Tribomesszelle der Rolls-Royce-Umfänge - Quadrantendarstellung

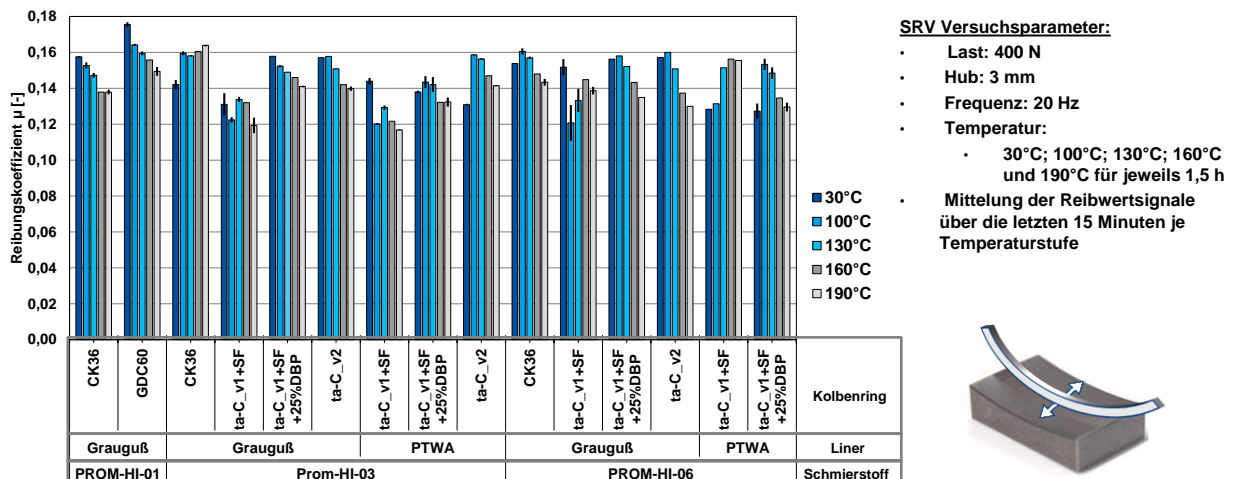


Abbildung 26: SRV Rolls-Royce-Umfänge – Reibungsbewertung

Ergänzend zu den Untersuchungen in der Tribomesszelle wurden tribologische Untersuchungen mit der Kolbenring-/Zylinderlaufbahn-Konfiguration im SRV-Tribometer durchgeführt. Als Liner-Materialien kamen Grauguß- (GJL) und plasmagespritzte (PTWA) Buchsensegmente zum Einsatz sowie Ringsegmente aus

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

CKS36 bzw. ta-C_v1- und ta-C_v2-Beschichtungen, die mit unterschiedlichen Glättungsverfahren vorbehandelt wurden.

Die zusammengefassten Resultate sind in Abbildung 26 aufgeführt. Die dargestellten SRV-Reibwerte je Temperaturstufe und beziehen sich auf das Referenzsystem Grauguss/CKS 36/PROM-HI-03. Unter diesen Versuchsbedingungen wurden vor allem in den höheren Temperaturbereichen mit allen ta-C beschichteten Kolbenringen teilweise deutlich niedrigere Reibungskoeffizienten erzielt. Am stärksten ausgeprägt zeigte sich dies im System ta-C-v1 + SF sowohl mit Grauguss als auch PTWA und dem Schmierstoff PROM-HI-03. Anzumerken ist, dass das SRV-Prüfprogramm aufgrund der relativ kurzen Prüflaufzeit keine Aussagen über das längerfristige Verschleißverhalten erlaubt. Daher müssen die SRV-Resultate für die ta-C_v1-Schicht im Kontext des in der Tribomesszelle festgestellten Verschleißverhaltens dieser Schicht bewertet werden.

1.2.3.3 Gleitlacke

Für die Reibverluste in der Kolbengruppe werden zumeist Kolbenringe und Zylinderlaufbahn betrachtet. Unterschätzt wird dabei der Reibungsbeitrag des Kolbenhemds gegenüber der Zylinderlaufbahn. In diesem Projekt wurden deshalb einige Entwicklungsansätze zu einem spezifischen Gleitlackkonzept für die Kolbenhemdbeschichtung betrachtet.

Ein erster Eindruck der Verschleißbeständigkeit zeigte sich in TMZ-Untersuchungen (Abbildung 27): Referenzbeschichtung und FUCHS-Gleitlack zeigten ähnliche Verschleißbilder; nur das Motorenöl PROM-HI-03 führte zu etwas größerem Verschleiß beim Gleitlack.

Konditionierung

- 1.) @100°C – 0,24 m/s – 2....10N Rampe
- 2.) @100°C – 0,24 m/s – 10N

(30 Minuten)
(20Minuten)

Stribeckkurven

- @100°C: 10N; 7N; 4N und 2N
@25°C: 10N; 7N; 4N und 2N

Körper:

- 10x10x3mmTMZ-Plättchen (100Cr6)
- AV-15 Schicht (Tenneco)
- FUCHS-Gleitlack

Gegenkörper:

- 30mm 100Cr6 Kugel

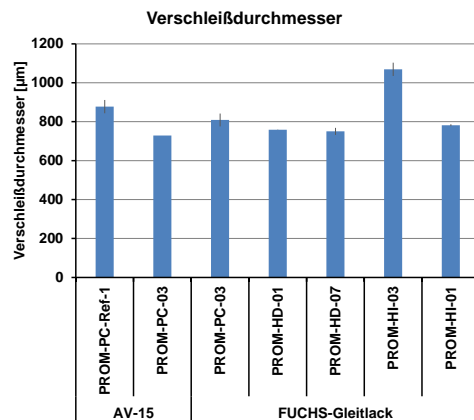


Abbildung 27: TMZ Gleitlack

Ein SRV-Kurztest zeigte für den FUCHS-Gleitlack sowie die Referenzbeschichtung AV21 über die Versuchsdauer jeweils ruhige Reibwertverläufe. Das Reibungsniveau fiel für den FUCHS-Gleitlack im Vergleich zur AV21-Beschichtung niedriger aus – s. Abbildung 28. Die Verschleißauswertung ergab für den FUCHS-Gleitlack zudem ein deutlich geringeres Verschleißvolumen.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

**SRV Linienkontakt: Zylinder 6x8 mm / T= 110°C / Frequenz: 20Hz / Gleitweg: 2mm
Last: 2 Min @ 10N; 1 Min @20N; 1 Min @30N; 30 Min @60N / Schmierstoff: 5W30 Motoröl**

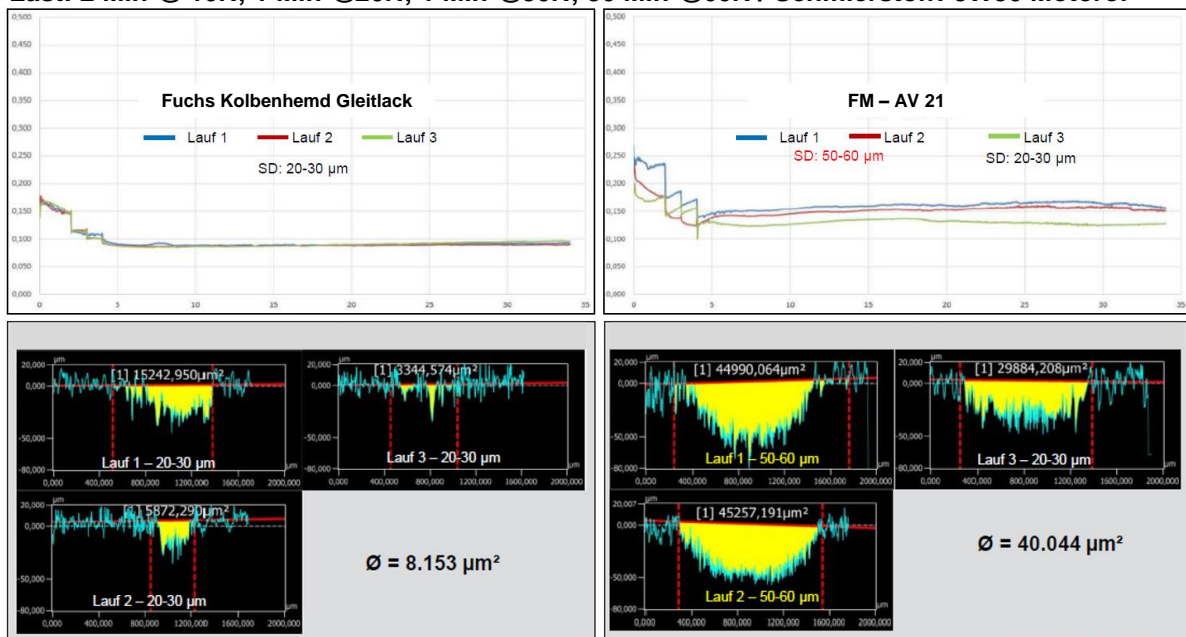


Abbildung 28: SRV Kolbenhemdbeschichtung

1.2.3.4 HAP3050 Oligomere und polymere Öladditive zur Minimierung von Reibung und Verschleiß (Fraunhofer LBF)

Die Schwerpunkte der Arbeiten im HAP3050 lagen auf Recherche und Entwicklung von Strategien zur Synthese neuer polymerer Schmierstoffadditive. Aus theoretischen Überlegungen, die im Folgenden näher beschrieben werden, wurden innovative und in dieser Form in der Literatur noch nicht beschriebene Zielmoleküle definiert sowie eine Synthesestrategie für diese Polymere erarbeitet. Der erarbeitete Synthesepfad stellt einen mehrstufigen Prozess dar, in dem die maßgeschneiderten Polymere hergestellt werden sollten. Bei der Ausarbeitung des Plans wurde berücksichtigt, dass alle benötigten Syntheseschritte, wenn auch nicht in dieser Kombination, aber zumindest einzeln großtechnisch etablierte Prozesse sind.

Das Konzept sah das Design eines Schmierstoffadditivs in polymerer Form vor, welches aus dem Schmierstoff heraus an tribologisch relevante Oberflächen im Verbrennungsmotor gekoppelt oder adsorbiert werden kann. Die hierbei entstehende Polymerschicht sollte insbesondere im Bereich der Grenz- und Mischreibung den Aufbau einer Schmierfilmschicht begünstigen, wodurch eine Reibminderung im tribologischen System angestrebt wird. Gleichzeitig sollte der Einfluss des Polymers auf die Viskosität des Schmierstoffs minimal gehalten werden. Dies sollte durch Polymere mit sternförmiger Architektur erreicht werden. Dieser Lösungsansatz war vielversprechend:

Die Viskositätserhöhung einer Lösung, die von einem darin gelösten Polymer ausgeht, ist unter anderem eine Funktion des Volumens, das ein einzelnes Polymer in dieser Lösung einnimmt. Durch die Architektur bedingt kann sich ein Sternpolymer in Lösung weniger aufweiten als ein lineares Polymer mit gleicher Molmasse unter identischen Bedingungen und leistet somit einen geringeren Beitrag zur Viskositätserhöhung. Ein weiterer Vorteil, der sich aus dem Einsatz der Sternpolymere ergibt, ist die Tatsache, dass das Polymer mit mehreren Armen auf der Oberfläche verankert sein kann. Wenn ein Arm abgeschert wird,

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

verbleibt das Molekül trotzdem an der Oberfläche, so dass der Schmierfilm erhalten bleiben kann (Abbildung 29).

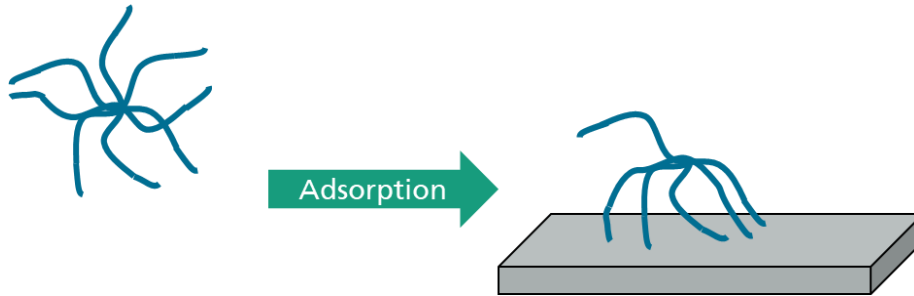


Abbildung 29: Schematische Darstellung der Adsorption eines Sternpolymers an eine Oberfläche

Die Arme des Sternpolymers sollten für eine ausreichende Öllöslichkeit aus unpolaren Monomeren und für eine Adsorption/Anbindung an die Oberfläche aus funktionalen Monomeren aufgebaut sein. Als Synthesemethode für wohldefinierte Sternpolymere können nur kontrollierte und lebende Polymerisationsverfahren eingesetzt werden, bei denen es nicht wie z.B. bei der freien radikalischen Polymerisation während der Wachstumsreaktion zu Abbruchreaktionen kommt. Grundsätzlich können die Sterne auf zwei unterschiedlichen Wegen erhalten werden:

1. Die Arme werden zuerst einzeln synthetisiert und danach mit einem Kopplungsagens zusammengefügt („arm-first“). 2. Ausgehend von einem multifunktionalen Initiator lässt man die Arme von der Mitte nach außen wachsen („core-first“) (Abbildung 30).

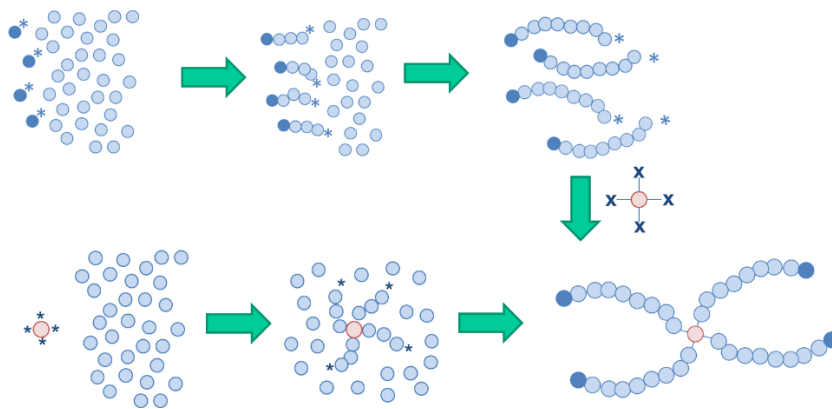


Abbildung 30: Schematische Darstellung möglicher Synthesewege zu Sternpolymeren

Da solche multifunktionalen Initiatoren nicht großtechnisch verfügbar sind und eine spätere großtechnische Umsetzung erheblich verteuern würden, wurde die Arm-First-Methode gewählt. Dabei ergab sich zunächst die Schwierigkeit einer unvollständigen Kopplung der Arme (Abbildung 31 a und b).

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

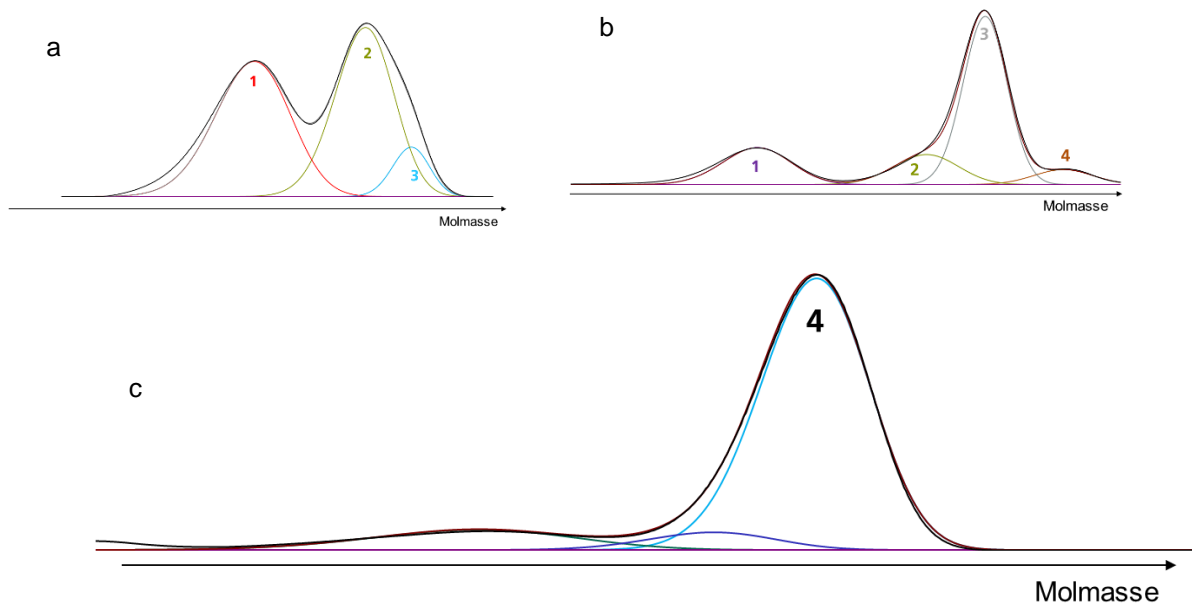


Abbildung 31: Molmassenverteilungen von Sternpolymeren mit unvollständiger Kopplung (a und b) sowie mit vollständiger Kopplung (c)

Nach mehreren Optimierungszyklen hinsichtlich der Reaktionsbedingungen gelang es schließlich, einheitliche Sternpolymere zu erzeugen, bei der alle Arme an die Kerne gekoppelt waren (Abbildung 31 c). Im weiteren Verlauf wurden die Polymere hinsichtlich des Verhältnisses zwischen unpolaren und funktionellen Monomer-Einheiten optimiert, um einerseits eine ausreichende Löslichkeit im Schmierstoff und andererseits eine hinreichende Oberflächenadsorption zu gewährleisten (Abbildung 32).



Abbildung 32: Proben von Sternpolymeren im Schmierstoff mit ungenügender (links) und ausreichender (rechts) Löslichkeit

Bei anfänglichen Versuchen im Labormaßstab wurden Polymere in der Größenordnung von wenigen Gramm erhalten. Um dem Projektpartner FUCHS ausreichende Mengen für Schmierstoffformulierungen bereitstellen zu können, wurde die Synthese schrittweise hochskaliert (Abbildung 33). Bei einer ersten Ansatzvergrößerung konnten Probenmengen im Bereich von ca. 30 g erzielt werden, die für Modellformulierungen bei FUCHS ausreichend war; mit diesen konnten dann erste tribologische Tests durchgeführt werden. Final wurde die Synthese auf den 20 L-Maßstab hochskaliert, um Muster in der Größenordnung von ca. 1 kg zu erhalten, so dass FUCHS eine Serie von vollformulierten Motorölen für weitere Tests herstellen konnte. Bei der Reaktion im 20L-Maßstab verlief die Reaktion anders als im Labormaßstab, was auf eine andere Wärmeübertragung und Durchmischung des Reaktionsgemischs

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

zurückzuführen war, was durch die Geometrie der Reaktionsgefäße und das sich daraus ergebende Volumen/Oberfläche-Verhältnis verursacht war.



Abbildung 33: Reaktionsapparaturen zum Upscaling der Sternpolymersynthesen (links, 1,5 L, rechts 20 L)

Experimentelle Charakterisierung

Die vom Projektpartner Fraunhofer LBF bereitgestellten Polymere wurden ausführlich erprobt. Dabei kam – angesichts nur in kleinen Mengen verfügbarer Syntheseprodukte – zunächst vor allem das MTM-Tribometer zur Ermittlung der Reibungseigenschaften zum Einsatz.

Im 1. Schritt wurde die Additivwirkung in einer Modellformulierung evaluiert; zu Vergleichszwecken wurden drei weitere Polymertypen eingesetzt: kommerzielles Kammpolymer, konventioneller PMA-Typ, kommerzielles Sternpolymer. Durch Variation von Polymer- und Grundölmenge wurden alle Varianten einheitlich auf eine kinematische Viskosität von $5 \text{ mm}^2/\text{s}$ @ 100°C eingestellt. Die Messungen in der MTM erfolgten anschließend bei 105°C , sodass also alle Fluide bei nahezu gleicher Viskosität vermessen wurden.

Es zeigte sich, dass die Reibwerte mit dem neuen Polymer deutlich unter denen herkömmlicher Polymere liegen – ein wesentliches Entwicklungsziel konnte also erreicht werden (Abbildung 34 – 1. Schritt).

Im 2. Schritt konnten anschließend die zunächst mit einer Modellformulierung in der MTM ermittelten Reibungsvorteile auch mit einer Motorenölvollformulierung bestätigt werden. Die Formulierungen mit dem synthetisierten Polymer basierten auf einem PROMETHEUS-Motorenöl der Viskositätsklasse 0W-20; die Additivierung war identisch, lediglich das ursprüngliche Polymer wurde durch das neue Material ersetzt.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die Ergebnisse zeigen deutliche Vorteile für das neu entwickelte Sternpolymer (Abbildung 34 – 2. Schritt).

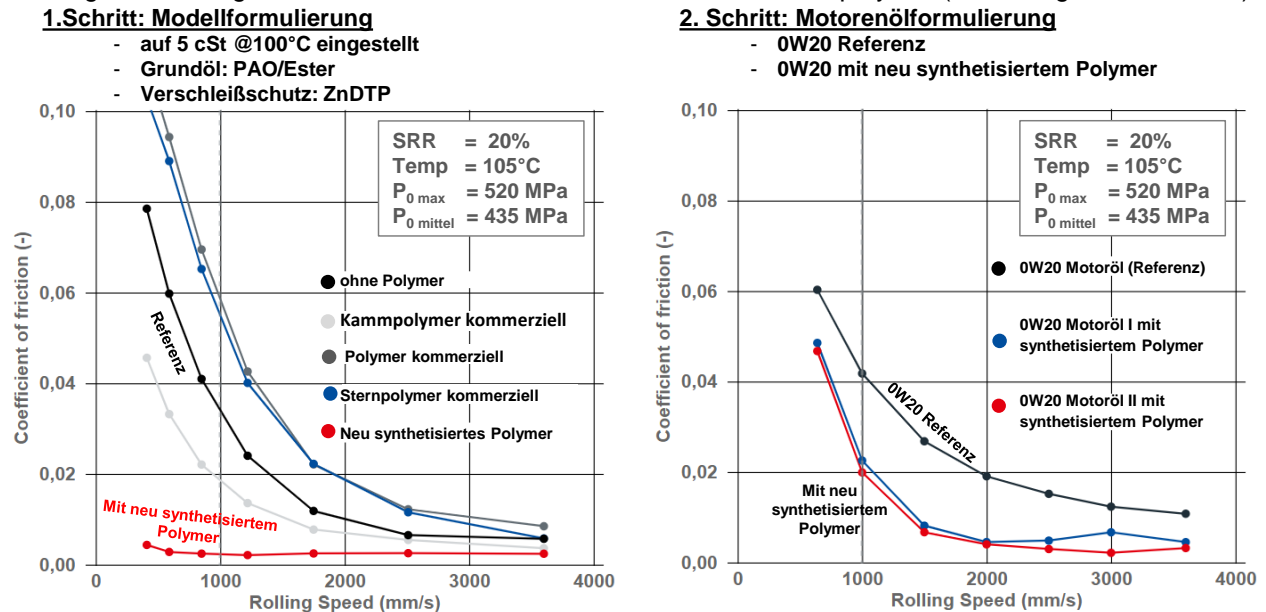


Abbildung 34: MTM Stribeckkurve

Insgesamt konnte mit diesen Arbeiten im Rahmen des PROMETHEUS-Projekts ein vielversprechender Ansatz für eine neue Klasse von Funktionspolymeren realisiert werden.

1.3 Beschichtung und Oberflächenstrukturierung (TP4000)

1.3.1 Ziele und Aufgabenstellung

Im Fokus des TP4000 steht die Schichtentwicklung der Reibkomponenten in der Kolbengruppe. Dies umfasst die Weiterentwicklung und Qualifizierung gefilterter ta-C-Schichten, die Neuentwicklung tribologisch optimierter (t)a-C:X-Schichten und ebenfalls die Prozess- und Schichtentwicklung auf der Zylinderlaufbuchse. Die Entwicklung wird mit umfangreichen Charakterisierungsmethoden flankiert, um Zusammenhänge im wissenschaftlichen Kontext herausarbeiten zu können. Die Ergebnisse fließen in ein industriell umsetzbares Beschichtungsanlagenkonzept ein.

1.3.2 Verwendung der Zuwendung

Die Zuwendungen wurden im Rahmen des TP4000 für die Neu- und Weiterentwicklung und Charakterisierung der Schichten, der anwendungsoptimierten Nachbehandlungen der Oberflächen sowie der intensiven tribologischen Charakterisierung verwendet.

Dabei wurden Komponenten von den Industriepartnern bereitgestellt, die nach Beschichtung und Nachbehandlung wieder für weiterführende Untersuchungen an die Projektpartner bereitgestellt worden.

Weiterhin wurde eine Demonstratoranlage aufgebaut und deren Beschichtungseigenschaften umfangreich charakterisiert und optimiert.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

1.3.3 Erzielte Ergebnisse

1.3.3.1 Entwicklung und prototypische Herstellung reibungsoptimierter Fe-basierter LDS-Schichten (BMW)

Dabei stand in PROMETHEUS die Optimierung von Lichtbogendraht-gespritzten Fe-basierten Zylinderinnenbeschichtungen bzgl. Materialzusammensetzung und Porenstrukturen durch F&E der LDS ReibMind-Technologien wie Porositäts- und Honstruktur, Porenform- sowie Schmierstoff-anlagerungsoptimal dotierte Porenoberflächenbeschichtung zu einer starken Verkürzung der Hydrodynamikanlaufstrecke des Schmierstoffs im Fokus der F&E-Arbeit. Die Bewertung der Ergebnisse erfolgte u.a. im Landshuter Labor von BMW und beim STZ und SIZ in Friedrichshafen.

Im Zuge dieses Projektes wurden Aluminium-Bauteile aus der Legierung AlSi7MgCu0,5 bzw. aus der Legierung 226 mit einem speziellen Eisen-Basis-Wertstoff (ähnlich dem Stahlschlüssel: 1.0616) mittels Lichtbogendrahtspritzen beschichtet.

Bei Lichtbogendrahtspritzen werden zwei kontaktierungsoptimierte Drähte mit dem Durchmesser von 0,6 mm mit einem elektrischen Potential von ca. 400A und 36V versehen. Durch dieses immense Potential wird zwischen den beiden Drähten ein Lichtbogen erzeugt, der den Drahtwerkstoff zum Schmelzen bringt.

Diese ideale Basis für Tribologie-basierte Hon-Optimierungen lässt sich durch Nutzung von modernen, Inverter-geregelten Starkstromquellen (bis 800A) an die Vorgaben der Hontechnologie anpassen. Durch Veränderung der Parameter STROM, SPANNUNG, GASDRUCK und BESCHICHTUNGSWINKEL ist es möglich, das Verschmelzen der Tropfen zu beeinflussen. Hierdurch lässt sich die nach dem Honen sichtbare Porosität deutlich beeinflussen (siehe Abbildung 35).

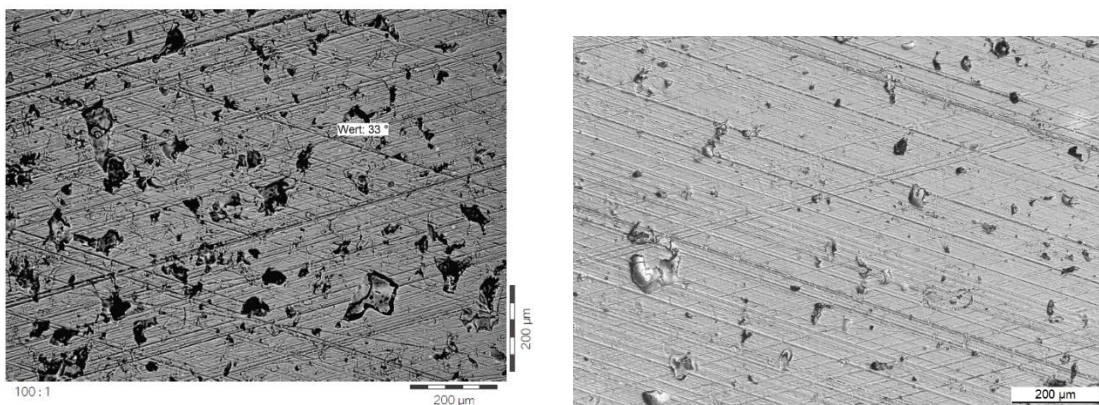


Abbildung 35: Gehonte Beschichtung: Gegenüberstellung verschiedener Beschichtungsparameter auf die Ausprägung von Poren und Lamellen [Quelle BMW].

Zur präzisen Steuerung und Überwachung kommen in der heutigen Zeit Hochtemperatur-Hochgeschwindigkeits-Thermokameras zum Einsatz, die eine deutliche Veränderung der Beschichtungscharakteristik durch die zuvor beschriebenen Parameter dokumentiert und automatisch bewertet.

1.3.3.2 Entwicklung von (t)a-C:X-Schichten (Fraunhofer IWS)

Durch Verwendung von Verbundkathoden wurden den aufwachsenden Schichten Dotierstoffe hinzugefügt. Auswählt wurden dafür Bor wegen des minimalen Einflusses auf das sp^3/sp^2 -Verhältnis bei gleichzeitiger Erhöhung der Verformbarkeit/ Schadenstoleranz, Silizium wegen der Erhöhung der

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Temperaturbeständigkeit, Molybdän für Bildung von MoS_2 (Schwefel im Schmierstoff + Abrieb Schicht) und Eisen für die Verbesserung der Oberflächenwechselwirkung für auf Eisenoberflächen optimierte Schmierstoffe. Hierfür kamen scheibenförmige Grafitkathoden mit jeweils 5 at% des Zuschlagstoffs B, Mo, Fe und Si zum Einsatz. Die Prozessparameter wurden für alle Beschichtungen konstant gehalten und nur die Beschichtungsdauer variiert. Dabei entstehen wasserstofffreie Schichten mit einem sp^3/sp^2 -Verhältnis in Abhängigkeit des Dotierstoffs und der Dotierstoffkonzentration (Abbildung 36). Hier wurden im Projektverlauf Erkenntnisse gewonnen, wonach eine zusätzliche Kathodensorte C-Mo2,5 at% untersucht wurde.

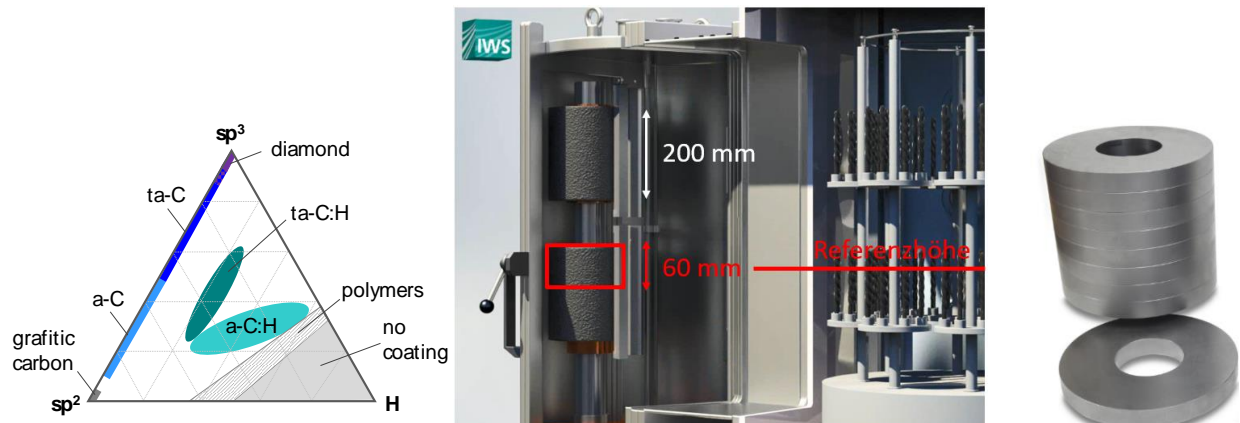


Abbildung 36: Phasendiagramm (links), Beschichtungsaufbau (Mitte) und scheibenförmige Kathoden am Bsp. C-Fe5 at% (rechts)

Die Verbundkathoden haben einen deutlichen Einfluss auf das Ausbreitungsverhalten der Brennflecken der elektrischen Entladung (Abbildung 37). Das System ist optimiert für Grafit und eine größere Brennfleckausbreitung wie für Eisen und Silizium beobachtet, führt zu einer teilweisen Verschattung des Plasmas und dadurch reduzierten Durchsatz. Hier kann eine Reduktion des maximalen Entladungsstroms erfolgen, um die Abschattung zu verringern.

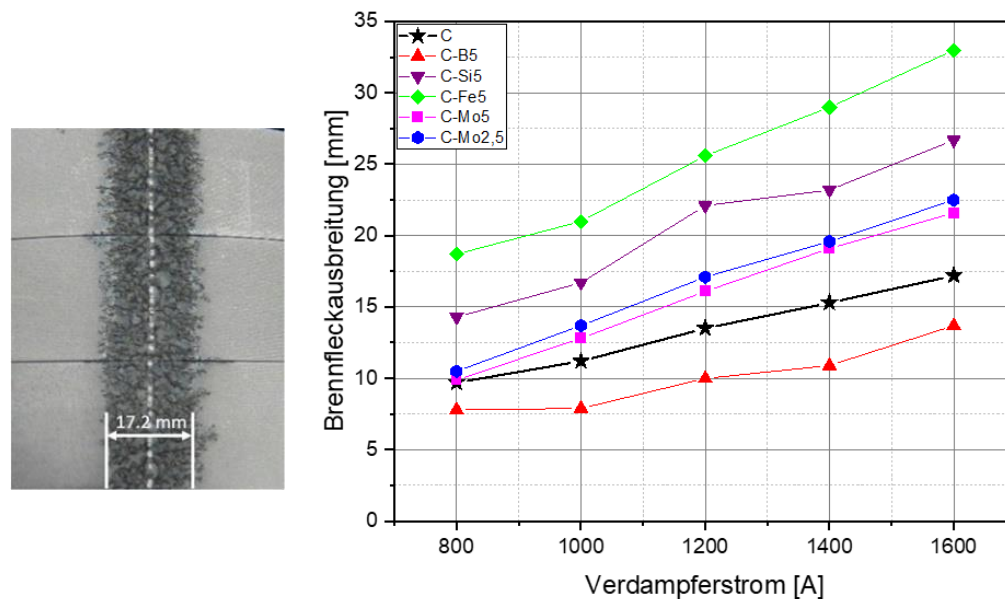


Abbildung 37: Entladungsspur bei stehender Kathode (links) und Entladungsstromabhängigkeit der Brennfleckbreite (rechts)

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Gegenüber der reinen Grafitkathode wird für alle Verbundkathoden eine reduzierte Beschichtungsrate beobachtet. Für die Nichtmetall-dotanten Bor und Silizium fällt die Rate auf 70 %, bei den Metall-dotanten auf unter 35 %. Am Beispiel von C-Mo_{2,5} konnte gezeigt werden, dass die Reduktion des Dotierstoffanteils die Rate deutlich erhöht und nahezu 80 % der Referenz erreicht wird. Der geringe Rateabfall für B und Si korreliert mit einer Zusammensetzung der Schicht nahe an der Kathodenzusammensetzung. Für C-Fe₅ und C-Mo₅ kommt es zu einer deutlichen Anreicherung des Dotierstoffs in der Schicht. Bei C-Fe₅ enthält die Schicht doppelt so viel Eisen, wie in der Kathode vorhanden war (Abbildung 38 links). Ursache ist hier mutmaßlich die Rückspatterung des Kohlenstoffs durch die schweren und hoch angeregten Metallionen.

Die Dotierstoffe haben einen verschieden starken Einfluss auf Härte und E-Modul der Schicht. Grundsätzlich senken die Dotierstoffe die Härte gegenüber der undotierten Referenzschicht. Bei Bordotierung sind die Unterschiede nur marginal, bei Silizium gering und bei den Metall-dotanten drastisch. Gegenüber ta-C:B und ta-C:Si entstehen a-C:Fe und a-C:Mo Schichten. Der Abfall der Härte korreliert dabei mit der Anreicherung des Dotierstoffs in der Schicht. Die Verringerung des Mo-Anteils von C-Mo₅ auf C-Mo_{2,5} erhöht die Härte wieder in den superharten Bereich, wobei anhand des E-Moduls ein sp³-Gehalt deutlich größer als 50 % abgeschätzt werden kann, jedoch die Härte strukturbedingt nur knapp über 40 GPa liegt. Das für ta-C typische Verhältnis von E zu H von 10 bleibt bei den dotierten Schichten größtenteils erhalten. Einzig abweichend sind die (t)a-C:Mo-Varianten (Abbildung 38 rechts).

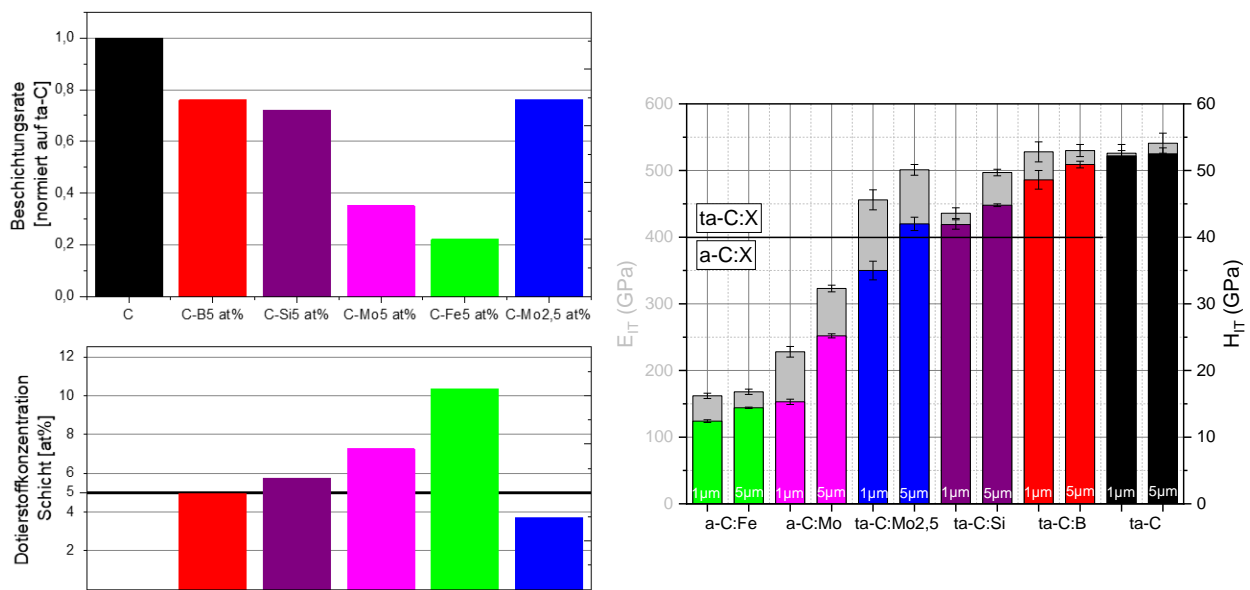


Abbildung 38: Beschichtungsrate und Dotierstoffkonzentration (links) und mechanische Schichteigenschaften (rechts)

Das Hinzufügen eines Dotierstoffs hat ebenfalls signifikante Auswirkungen auf die Schichtoberfläche. Bei dünnen Schichten um 1 µm sind die Unterschiede gering, wobei ta-C:Si sehr ähnlich zu der ta-C-Referenz ist. Bei dickeren Schichten, hier 4-5 µm, sind die Unterschiede sehr deutlich. Besonders ta-C:B und a-C:Mo zeichnen sich durch eine sehr geringe Störstellendichte aus (Abbildung 39).

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

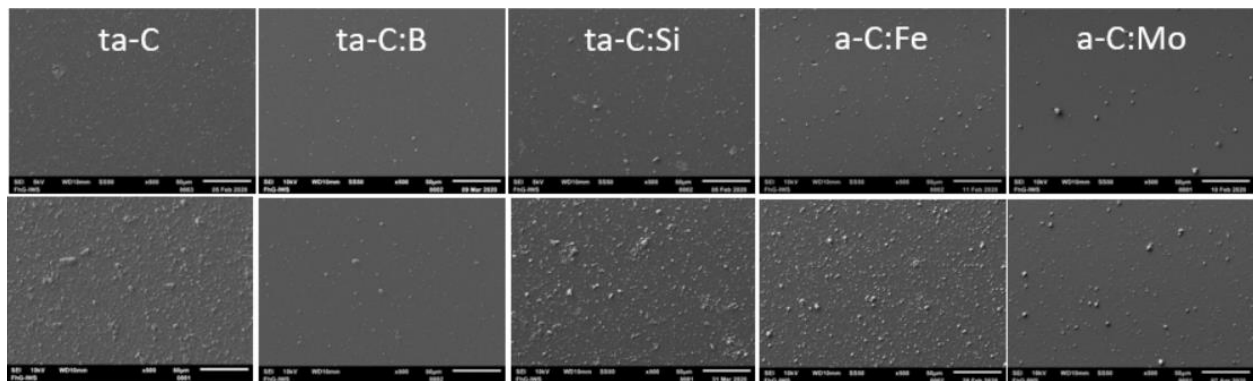


Abbildung 39: REM-Oberflächenaufnahmen von 1 µm dicken (oben) und 4-5 µm dicken (t)a-C(:X)-Schichten (unten)

Für eine genaue Nachweisführung wurde ein Verfahren entwickelt, welches über eine bedienerunabhängige Routine aus Mikroskopbildern die Größenverteilung der oberflächlichen Defektstrukturen ermittelt. Meist reicht schon die Betrachtung der defektbehafteten Oberfläche. Prozessbedingt nimmt diese mit zunehmender Schichtdicke zu und geht bei hohen Schichtdicken in eine Sättigung über. Zusammengesetzt ist diese Fläche aus neu hinzugekommenen Partikeln und aus Defektstrukturen, die durch Partikel/Substratstörungen initial entstanden sind und anwachsen. Für ta-C wird dabei ein sehr steiler Anstieg beobachtet, was für ta-C:Si ähnlich ist. Demgegenüber zeichnen sich die ta-C:B und (t)a-C:Mo durch sehr geringe Defektbelegungen aus. Somit sind 5 µm dicke Schichten ta-C:B und a-C:Mo nur oberflächlich so gestört wie bereits 1 µm dicke ta-C Referenzschichten. Bei ta-C:Mo_{2,5} sind es sogar 7,5 µm (Abbildung 40 links). Die Defektbelegung korreliert mit dem arithmetischen Rauheitswert und ist somit ein direkter Indikator für die Glattheit der Schichten (Abbildung 40 rechts).

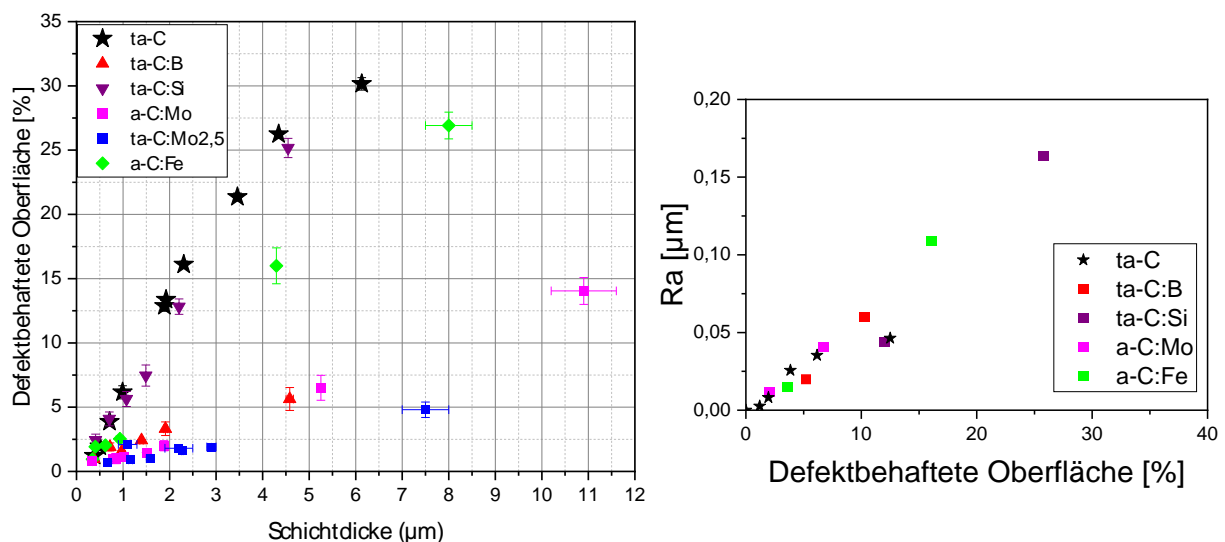


Abbildung 40: Defektbehaftete Oberfläche von (t)a-C(:X)-Schichten in Abhängigkeit der Schichtdicke (links) und in Abhängigkeit der arithmetischen Mittenrauheit Ra (rechts)

Die innere Struktur der (t)a-C(:X)-Schichten unterscheidet sich von der amorphen ta-C-Referenz, ta-C:B bleibt vollständig amorph, enthält jedoch kaum innere Defekte. Bei a-C:Mo lassen sich graphitische Nanocluster erkennen und in den Schichten sind nahezu keine Defekte mehr zu finden. Ursache ist hier die hohe Anregung der Mo-Ionen bei der Bogenverdampfung, welche dann beim Auftreffen auf die Schicht Stoßkaskaden und damit Umordnungsprozesse auslösen. Dieser Effekt bleibt auch bei ta-C:Mo_{2,5} erhalten

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

und durch Partikel entstandene Defektstrukturen werden im großen Maße nachträglich wieder aufgelöst (Abbildung 41).

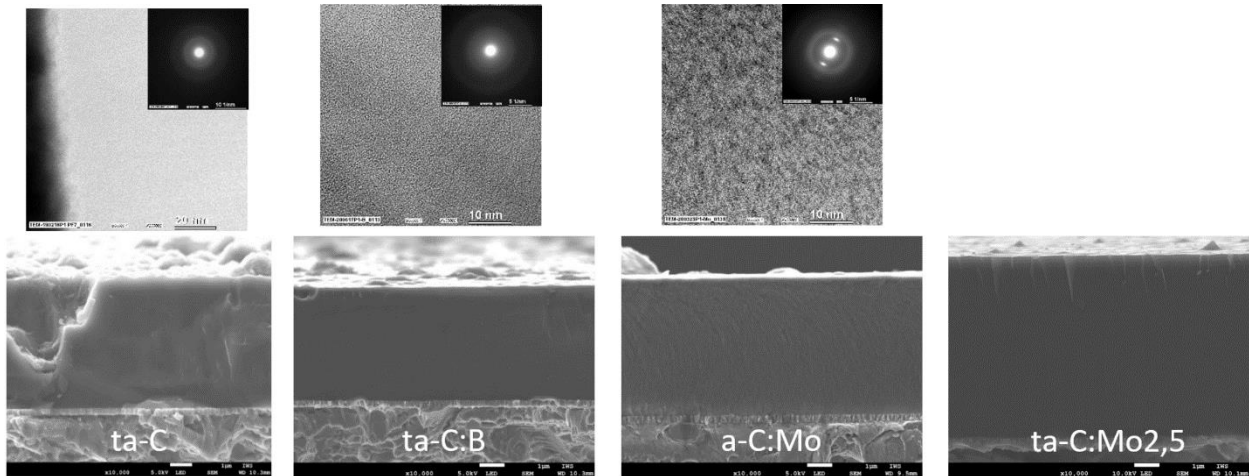


Abbildung 41: TEM-Aufnahme und Beugungsbild (oben) und Kryobrüche von (t)a-C(X)-Schichten (unten)

Bei der Schichtentwicklung für die geplanten Anwendungen hat sich die hohe Härte als nicht zielführend herausgestellt. Diese lässt sich durch die Prozessführung sehr gut steuern und es wurden für ta-C, ta-C:B und ta-C:Mo2,5 jeweils Varianten mit $E = 500$ GPa und $E = 300$ GPa hergestellt. Für die Anwendung auf Kolbenringe wurden $10\ \mu\text{m}$ dicke Schichten hergestellt, ta-C v1 und a-C v2 sind darin die weiterentwickelten, gefilterten Schichten. Die Filterung geht mit einem Rateverlust von 50 % einher. Die geringe Störungsdichte der dotierten Schichten führt zu glatteren ungefilterten (t)a-C:X-Schichten gegenüber der gefilterten Referenz. Dabei beträgt der Rateverlust nur 25 % und bestehende Anlagen können über einen Wechsel der Kathoden sofort mit dem neuen Schichtsystem arbeiten. Wie in den Kalotten zu erkennen ist, führt die geänderte Prozessführung zur Erreichung der geringeren Härte zu einer leicht erhöhten Störungsdichte (Abbildung 42).

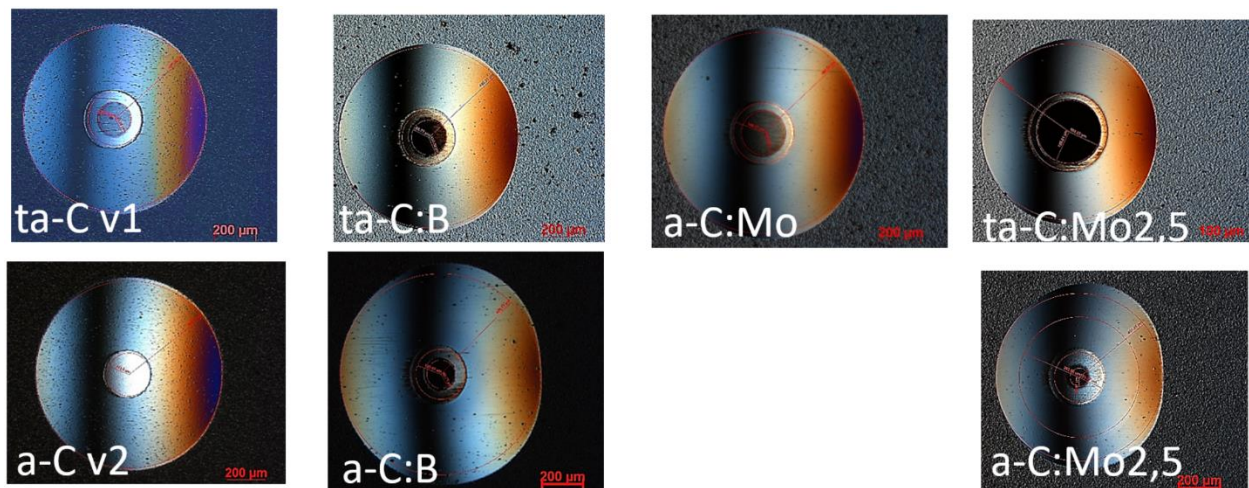


Abbildung 42: Kalotten von je $10\ \mu\text{m}$ dicken gefilterten Schichten (erste Spalte) und (a)C:X-Schichten (ab zweiter Spalte)

Die Wechselwirkungen mit den verschiedenen Schmierstoffvarianten hängt stark vom jeweiligen Schichttyp ab. Hier konnte gezeigt werden, dass sich ta-C gefiltert oder ungefiltert sehr ähnlich verhält. Hervorgehoben

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

werden kann das System mit Mo-Dotierung. Dieses zeigt mit allen Schmierstoffen eine sehr geringe Reibung (Abbildung 43).

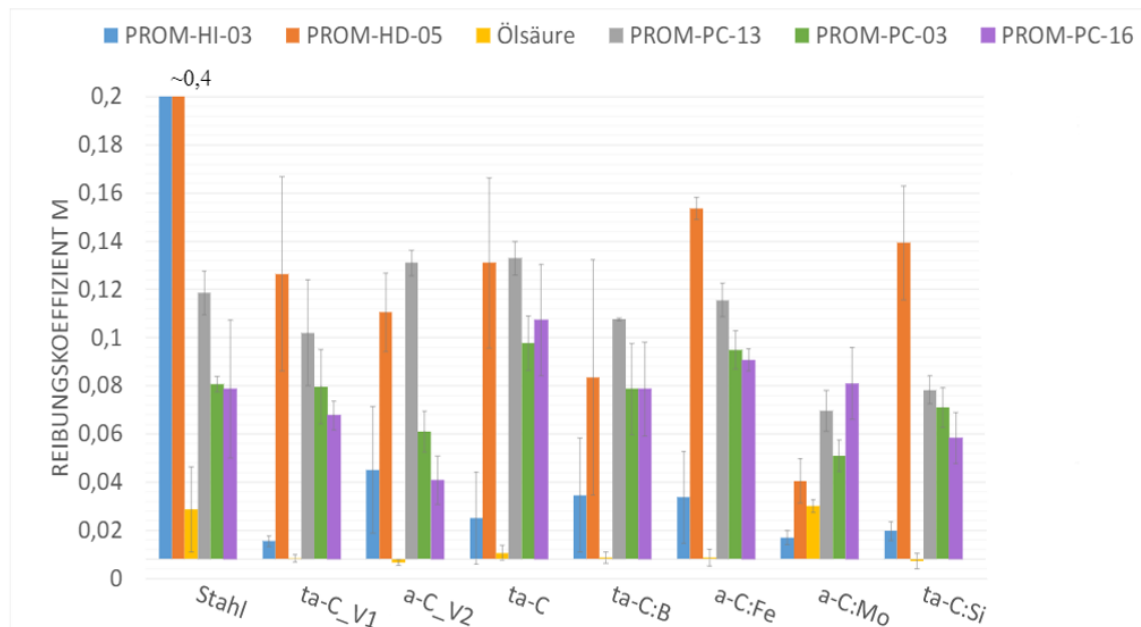


Abbildung 43: Reibwerte aus SRV-Tribometerscreening für (t)a-C(X)-Schichten gegen Stahl

1.3.3.3 Laserstrukturierung von Kolbenringen (Fraunhofer IWS)

Direktschreibende Strukturierung

Zu Vorhabensbeginn wurde in Grundlagenuntersuchungen an Flachmaterialien die Basis für das spätere Strukturieren annähernd rotationssymmetrischer Kolbenringe gelegt.

Hierzu zählten vor allem die Entwicklung und Charakterisierung von einzelnen oder größerflächigen Strukturierungsvarianten mit Augenmerk auf Gratfreiheit und thermischem Minimaleinfluss sowie die Umsetzung anwendungsorientierter Mehrpulslayouts (Abbildung 44).

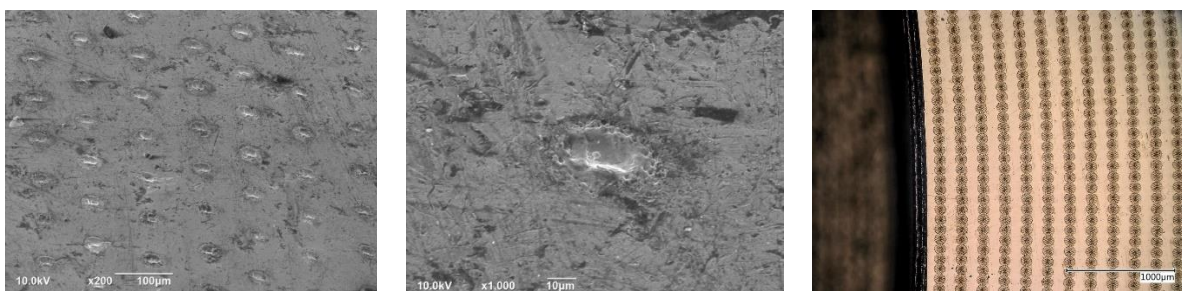


Abbildung 44: Hexagonalanordnung (links), Einzelstruktur (Mitte), Mehrpuls-Layout (rechts)

Auch auf die Erarbeitung konkreter Technologieumsetzungsschritte für die Kolbenringbearbeitung unter Realbedingungen (v.a. Rundlauf und Lagegenauigkeiten bei der Verwendung von Drehachs- und translatorischen Positioniersystemen) wurde fokussiert und mit Kompensationsstrategien reagiert.

Im anschließenden Arbeitspaket „Oberflächenoptimierung für Kolbenringe“ wurden die Grundlagen-ergebnisse auf Realbauteile übertragen. Laserstrukturierungsseitig lag der Schwerpunkt der Arbeiten in

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

diesem Arbeitspaket auf den Umsetzungen von Berechnungen und Erfahrungen des Projektpartners FhG IWM.

Zunächst in Kolbenringsegmente, dann in vollständige Ringe wurden unterschiedliche Haschuren sowie weitere Muster eingebracht. Variable Größen bei diesen Mustern waren Anordnung (Dichte, Anstellwinkel zur KR-Vorschubrichtung, Tiefe) sowie die vektorielle Ausrichtung (linear, gekrümmt) (Abbildung 45).

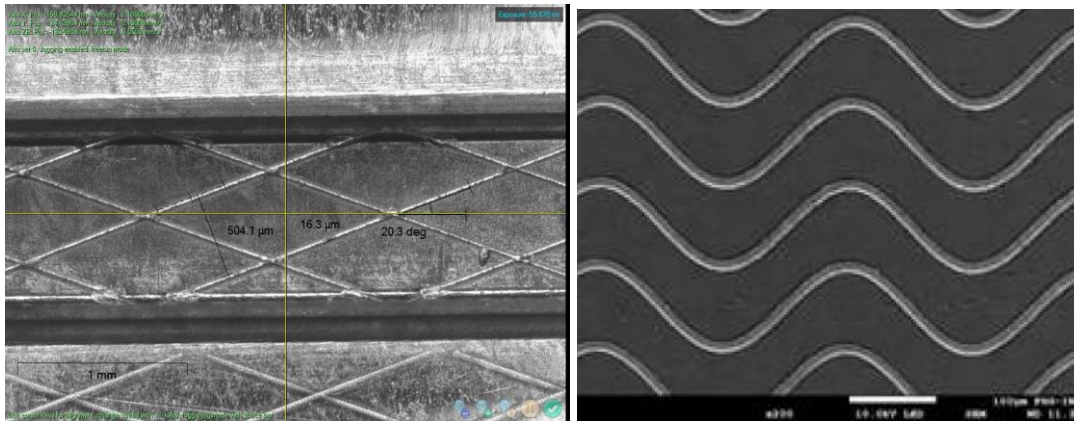


Abbildung 45 Lasergenerierte Haschur auf KR-Segmenten 82mm mit 20° Anstellwinkel sowie Sinusrillenstruktur

Die Auswirkungen der Laserbestrahlung auf den Hybridisierungszustand der diamantartigen Beschichtung wurden per Raman untersucht und konnten als unter der Relevanzschwelle eingeordnet werden.

Direkte Laserinterferenzstrukturierung

Im Rahmen des Projekts wurden ta-C beschichtete Kolbenringe unter Einsatz der Direkten Laserinterferenzstrukturierung (DLIP) durch Aufbringung von linienförmigen Oberflächenstrukturen funktionalisiert. Dabei war das Ziel, das Reibungsverhalten zu optimieren. Die Strukturgeometrie wurde auf Grundlage von Simulationen des Steinbeis-Innovationszentrum Werkstoff- und Oberflächentechnologie ausgelegt. Durch einen optischen Aufbau bestehend aus einem diffraktiven optischen Element wurde der Strahl eines gepulsten Lasers mit einer Wellenlänge von 532 nm und einer Pulsdauer von 12 ps in zwei Teilstrahlen geteilt, die von einem Prisma parallelisiert wurden. Durch eine asphärische Sammellinse wurden die Strahlen anschließend auf der Substratoberfläche zur Interferenz gebracht, wodurch ein linienförmiges Interferenzmuster erzeugt wurde (siehe Abbildung 46a).

Die Strukturperiode (Λ) wurde anhand der Simulationen auf 3 μm festgelegt. Die Strukturtiefe wurde in einem ersten Iterationsschritt durch Variation der Laserparameter (Fluenz (Φ), Pulsüberlapp (O), Hatch-Abstand (hd) und Strahldurchmesser ($2\omega_0$)) auf die aus der Simulation hervorgehenden vielversprechenden Zieltiefen (d) von ungefähr 0,7 μm und 1,4 μm eingestellt (siehe Tabelle 1). Beide Strukturgeometrien wurden jeweils in radialer (0°) und axialer (90°) Richtung aufgebracht. Die Varianten wurden anschließend am Steinbeis-Innovationszentrum mittels Tribometer vermessen, um erste Rückschlüsse auf die tribologischen Eigenschaften zu erlangen. Anhand dieser Ergebnisse und weiterer Simulationen wurde eine finale Variante mit einer Strukturtiefe von ca. 1.0 μm und einer Orientierung von 0° auf mehreren Kolbenringen hergestellt (Schritt 2), welche im Einzylinderexperiment an der TU Dresden vermessen wurden. Eine Vermessung mittels Konfokal- und Rasterelektronenmikroskopie (REM) ist in Abbildung 46b dargestellt. Zuletzt wurden verschiedene Varianten mittels Raman-Spektroskopie hinsichtlich der Rehybridisierung durch die DLIP-Bearbeitung und durch Verschleiß untersucht. Die

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

gewonnenen Ergebnisse werden im Rahmen einer wissenschaftlichen Publikation in einer Fachzeitschrift veröffentlicht.

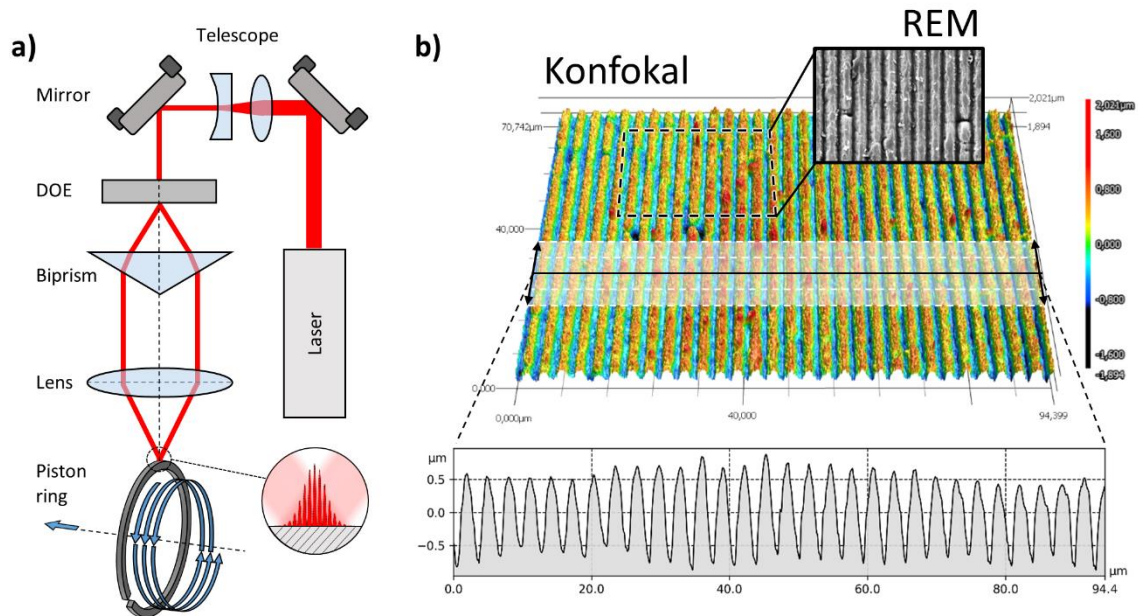


Abbildung 46: a) Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für die Strukturierung der ta-C beschichteten Kolbenringe und b) Konfokalaufnahme der finalen Textur mit zugehörigem gemitteltem Profil sowie REM Aufnahme.

Tabelle 1: Laser- und geometrische Parameter der hergestellten Strukturen.

Schritt	Orientierung (°)	Λ (μm)	Φ (J/cm^2)	O (%)	hd (μm)	$2\omega_0$ (μm)	d (μm)
1	0, 90	3.0	0.27	93.3	15	150	0.69 ± 0.14
1	0, 90	3.0	0.31	95.0	15	150	1.43 ± 0.26
2	0	3.0	0.40	98.0	60	150	0.97 ± 0.33

1.3.3.4 Umsetzung/Optimierung von Laserstrukturierungen und -konturierungen (BMW)

Via DLIPisierungen bzw. Linienstrukturierungen der Kompressionsringe wurden im Rahmen der Dissertation Michelberger ReibMind-Effekte erfolgreich nachgewiesen. U.a. hierfür erfolgten bilaterale Beauftragungen von BMW ans STZ und ans TUD-LMO / Prof. Dr. Lasagni et al. (unter Mitsteuerung von TENNECO). Das TUD-LMO Strukturierungswissen und -können in der DLIP-Technologie konnte so für PROMETHEUS auf unternehmerisch vorteilhafte Art nutzbar gemacht werden.

Ergebnisse beim **STZ** via der **Dr.- Arbeit** vom **Björn Michelberger** auf Basis von BMW Komponenten mit Funktionsnachweisen am Einzylinder des TUD-LVM und **MKS/EHD-Simulationen von AVL:**

Anhand von Optimierungsroutinen wurden geometrische Prozessparameter der DLIP-Strukturierung (Periodenlänge, Strukturtiefe und Orientierung) systematisch variiert und deren Einfluss auf den hydrodynamischen Druckaufbau bewertet. Die hierfür benötigten Oberflächendaten wurden digital erzeugt und mit realen Oberflächen von Kolbenringen verrechnet. Dieser Prozess ist beispielhaft in Abbildung 47a dargestellt. Die simulative Vorauswahl ergab eine Erhöhung des hydrodynamischen Drucks unter

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

bestimmten Randbedingungen um ca. 5%. Eine exemplarische reale Oberflächentextur mit DLIP-Strukturierung ist in Abbildung 47b dargestellt. Die Strukturierungsdauer pro Kompressionsring lag bei etwa einer Sekunde (Optimalfall).

Die damit verknüpfte HK-Mehrung pro Kolbenring dürfte also bei < 10 Ct liegen.

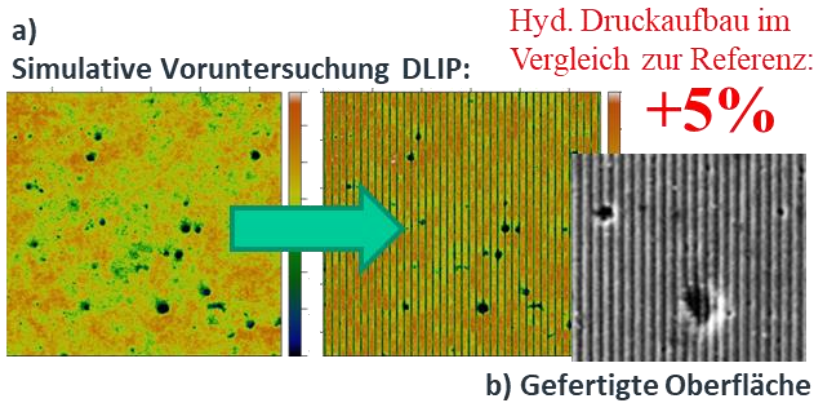


Abbildung 47: a) Referenz-Kolbenringoberfläche und Kolbenringoberfläche mit DLIP-Linienstruktur orthogonal zur Bewegungsrichtung und b) SE-Aufnahme eines strukturierten Rings.

Im Anschluss wurden dementsprechende Untersuchungen auf dem 1-Zyl.-Prüfstand durchgeführt. Dabei wurden a-C Beschichtungen mit und ohne DLIP-Strukturierung und mit zwei Schmierstoffen, sowohl ein BMW Motorrad-Öl als auch ein BMW PKW-Öl, geprüft. In Abbildung 48 sind die Ergebnisse mittels Motorkennfeldern dargestellt. Diese zeigen die Mitteldruck-Differenz des Einzylinders-Prüfstands über verschiedene Drehzahlen und indizierte Mitteldrücke. Die Versuche mit dem a-C Kolbenring und entsprechendem Schmierstoff dienen als Ausgangsbasis. Die grünen Bereiche zeigen einen geringeren Reibmitteldruck gegenüber der Ausgangsbasis, rote einen erhöhten. Insbesondere bei dem BMW Pkw-System zeigt sich über fast das gesamte Motorkennfeld hinweg ein Vorteil durch die DLIP-Struktur.

Die Ergebnisse der Oberflächenanalytik der Kolbenringe nach der tribologischen Beanspruchung durch den Einzylinder sind in Abbildung 49 für das BMW Motorrad-System und in Abbildung 49 für das BMW PKW-System visualisiert. Bei beiden Systemen zeigt sich auch nach einer intensiven Prüfung eine intakte DLIP-Struktur.

Einfluss von Mikrostrukturen (DLIP) auf Kompressionsringen bei versch. Ölen

Lehrstuhl VERBRENNUNGSMOTOREN

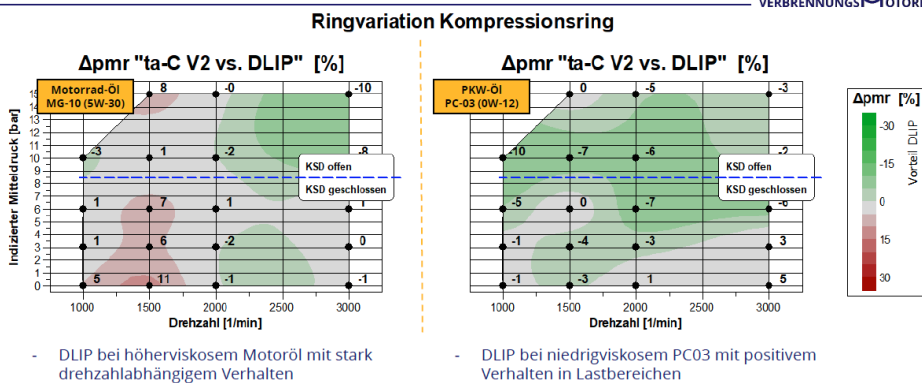


Abbildung 48: Änderung der Reibmitteldrücke: a-C vs. DLIP mit BMW Motorrad-Schmierstoff und BMW PKW Schmierstoff. ta-Cv2 entspricht a-C.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

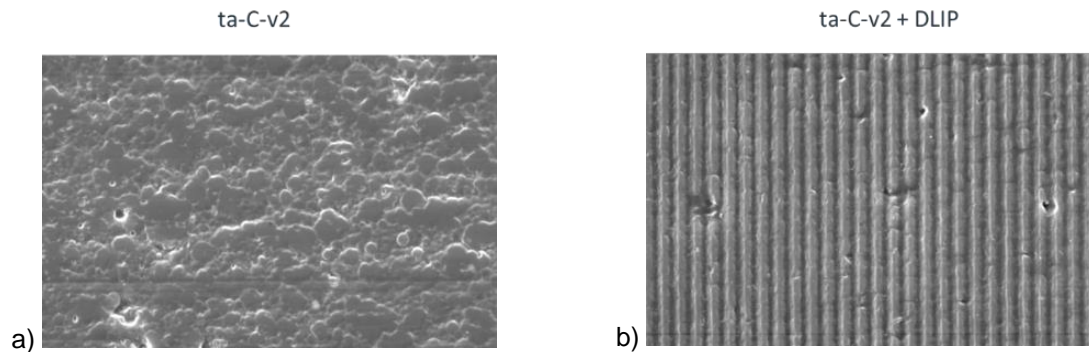


Abbildung 49: Oberflächenanalytik der Einzylinder DLIP-Versuche mit BMW Motorrad-Schmierstoff (5W30). a) a-C und b) a-C-DLIP.

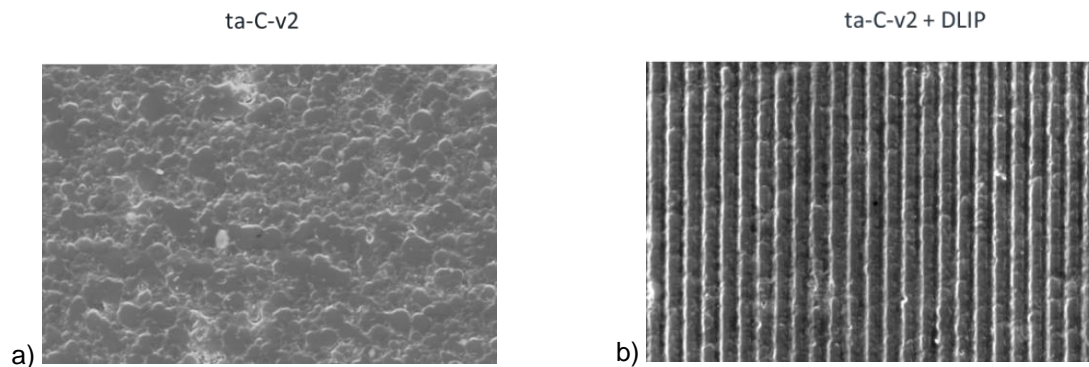


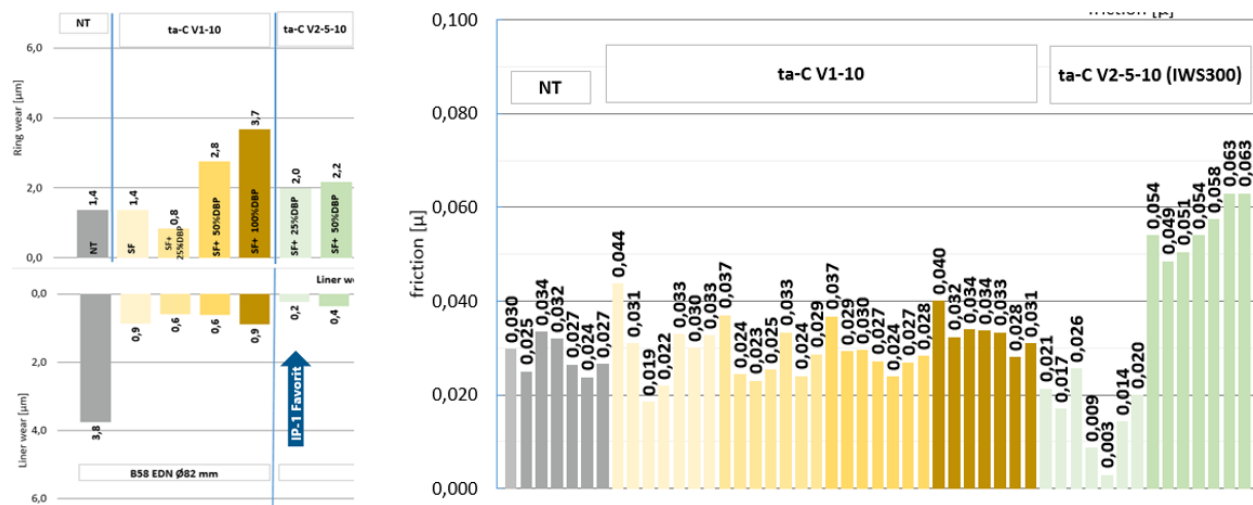
Abbildung 50: Oberflächenanalytik der Einzylinder DLIP-Versuche mit BMW PKW-Schmierstoff (0W12). a) a-C und b) a-C-DLIP.

1.3.3.5 Anwendungsnahe tribologische Charakterisierung beschichteter Kolbenringe am Plint-Tribometer (Tenneco)

Im Rahmen des Innovationspaketes 1 (IP1) wurde mit Hilfe des Plint-Tribometers der Fragestellungen der Wechselwirkung der Schichtrauheit auf das Reib- und Verschleißverhalten nachgegangen. Hierzu wurden ta-C-Schichten (ta-C V1) und a-C-Schichten (ta-C V2) mit Superfinish (SF) und Bürstglättung (DBP) geglättet.

Die Reib- und Verschleißauswertung zeigte, dass die zu favorisierende Glättungsvariante aus einer Kombination aus SF und einem 25 % DBP Anteil (Zeitanteil bis Spiegelpolitur) in der getesteten Ring-Liner-Kombination besteht. Durch Einsatz dieser Glättungsvariante (SF+25 % DBP) konnten mit der ta-C V2 Variante signifikante Reibvorteile über das gesamte Plint-Prüfparameterfeld, gegenüber der unbeschichteten Referenz nachgewiesen werden, siehe Abbildung 51.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele



Ring.: ta-C V1-10 VS. ta-C V2-5-10
Liner.: LDS Ø82 mm
Öl.: Prom-PC-Ref-01
Prüfprogramm.: 7Ph. 23 h 200-300N 10Hz 60-190°C 30 mm

Abbildung 51: IP1: Einfluss der Glättung auf das Reib- und Verschleißverhalten undotierter ta-C Varianten auf dem BMW Tribosystem

Im Fokus des IP2 stand die Entwicklung dotierter ta-C Varianten. Das Plint-Tribometer wurde dabei für ein breites Screening zur Bewertung des Reib- und Verschleißverhaltens von dotierten Schichtvarianten mit unterschiedlichen Glättungsvarianten eingesetzt. Als Versuchsträger für das breite Schichtscreening wurde die Ring-Liner-Kombination von BMW genutzt.

In Abbildung 52 oben sind die Ring- und Linerverschleiß für die unterschiedlichen Dotier- sowie Glättungsvarianten aufgetragen. Durchweg zeigten alle ta-C Varianten einen sehr niedrigen Linerverschleiß gegenüber der Referenz. Der schichtseitige Verschleiß variiert hingegen deutlich stärker. So war beispielsweise ein moderater Verschleiß bei der ta-C:B Variante mit dem reinem SF zu beobachten. Bei der im IP1 favorisierten Glättungsform (SF+25 % DBP) hingegen kam es zum Durchrieb der Schicht. Interessant ist auch die Beobachtung, dass einige Dotiervarianten ohne einen mechanischen Glättungsprozess niedrigen Verschleiß aufgewiesen haben.

Beim Reibverhalten, siehe Abbildung 52 unten, konnten die mit Bor, Eisen und Molybdän dotierten Varianten zusätzliche Reibpotentiale gegenüber der favorisierten undotierten ta-C V2 Variante generieren. Die ta-C:Mo Schicht war im Hinblick auf die Kombination aus Reibung und Verschleiß die am vorteilhaftesten getestete Variante.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

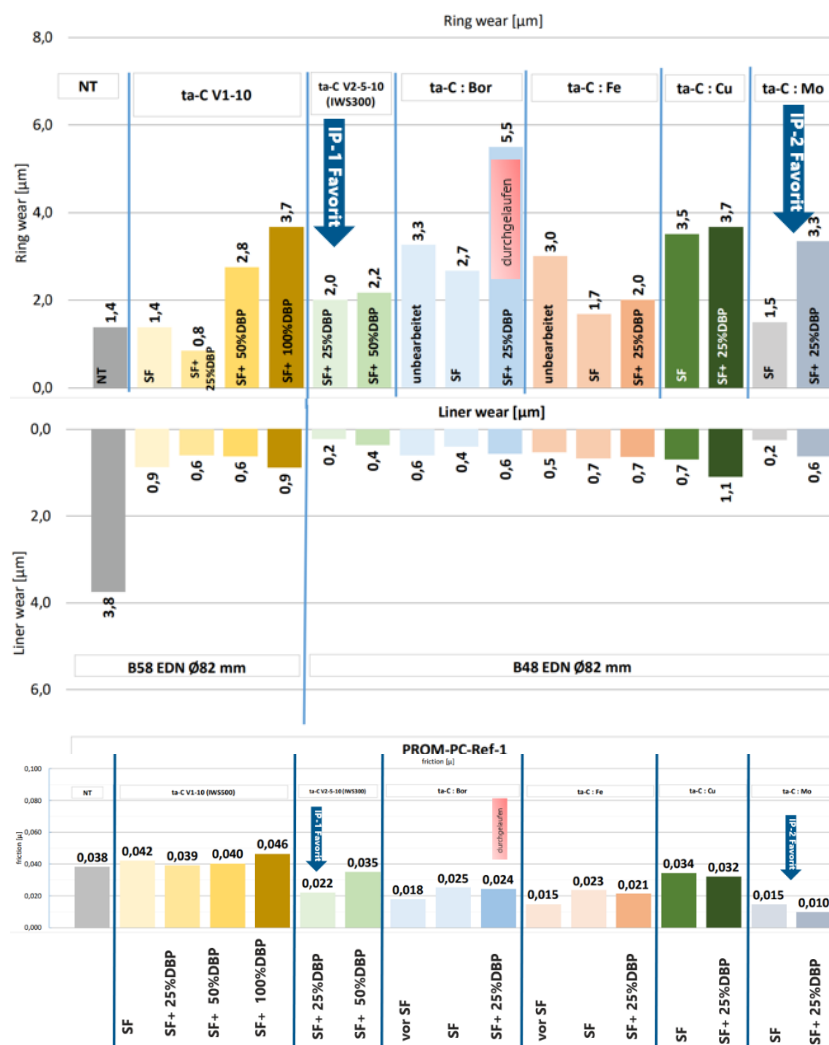


Abbildung 52: IP2: Einfluss der Dotierung sowie Glättung auf das Reib- und Verschleißverhalten auf dem BMW-Tribosystem

MAN-Tribosystem mit HD-07 Öl

Für die sowohl auf den BMW als auch MAN-Abmessungen durchgeführten Plint-Messungen für das MAN-Tribosystem zeigte sich aus dem IP1 heraus die ta-C V2 Variante mit SF+25 % DBP am vorteilhaftesten. Auffällig war bei dieser Kombination der erhöhte Linerverschleiß. Die mit Bor dotierten ta-C bzw. a-C Varianten zeigten hingegen unauffällige bis sehr niedrige Verschleiß, siehe Abbildung 53. Einzig die Kombination ta-C:B mit dem APS-C Liner und dem HD-07 Öl zeigten massive Ring- als auch Linerverschleiß. Am Beispiel der Bor-dotierten Varianten scheint sich der Eindruck zu bestätigen, dass Schichten mit sehr hohem E-Modul in speziellen Schmierstoffkombinationen zu tendenziell erhöhten Schichtverschleiß neigen.

Durch den Einsatz des HD-07 Öls im Vergleich zum Referenzöl HD-01 (hier nicht gezeigt) konnten die Reibwerte für das MAN-Tribosystem bis zu 50 % gesenkt werden. Im direkten Vergleich der getesteten Variante mit HD-07 Öl war das Reibniveau weitestgehend vergleichbar, wobei insbesondere die härtere ta-C:B Variante, welche auch die höchsten Schichtverschleiß aufgewiesen hat, höhere Reibwerte zeigte.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

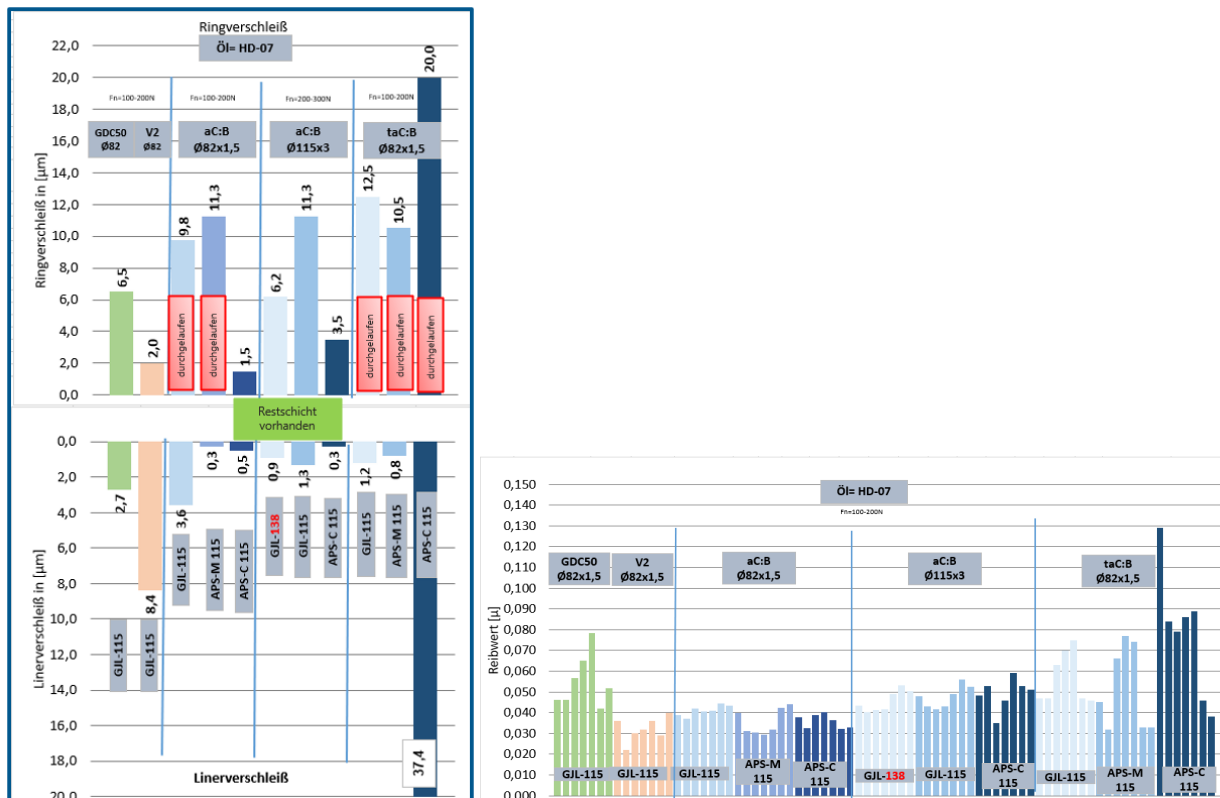


Abbildung 53: IP2: Einfluss der Dotierung auf das Reib- und Verschleißverhalten für das MAN-Tribosystem

Rolls-Royce-Tribosystem

Die Plint-Messungen auf $\varnothing 170$ mm Topringen konzentrierten sich auf zwei unterschiedliche Liner-Materialien (GJL und PTWA). Als Ergebnis aus dem IP1 erwies sich die ta-C V1 Variante mit sehr niedrigen Ring- und Linerverschleiß, bei leicht reduzierten Reibwerten, als vorteilhaft.

Im Rahmen des IP2 zeigte die ta-C:B Variante zusammen mit dem GJL-Liner eine Reibreduktion von ca. 50 % gegenüber der Referenz. Gleichzeitig wurde dabei ein deutlich erhöhter Linerverschleiß beobachtet. Im Zusammenspiel mit dem PTWA-Liner zeigte die ta-C:B Variante ebenfalls die geringsten Reibwerte aber dafür deutlich höhere Ringverschleiß als die im E-Modul reduzierte a-C:B Variante, siehe Abbildung 54.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

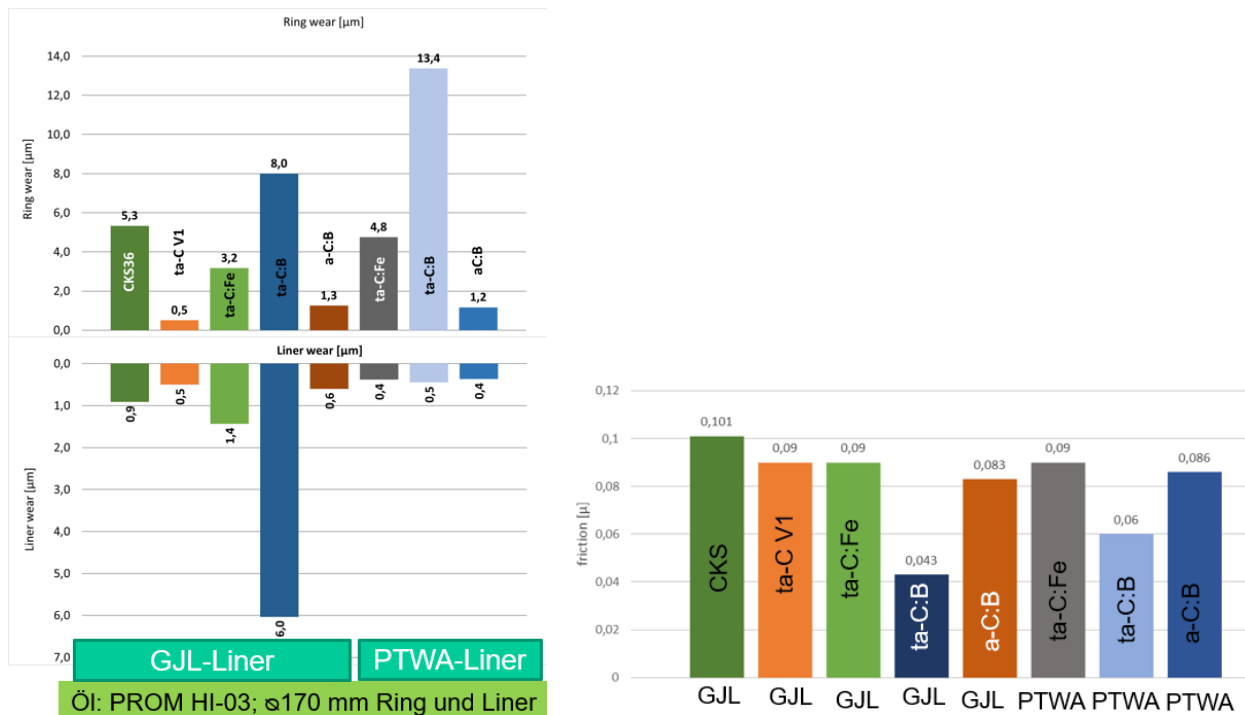


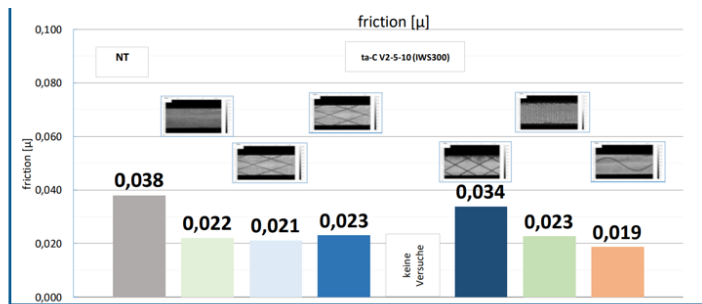
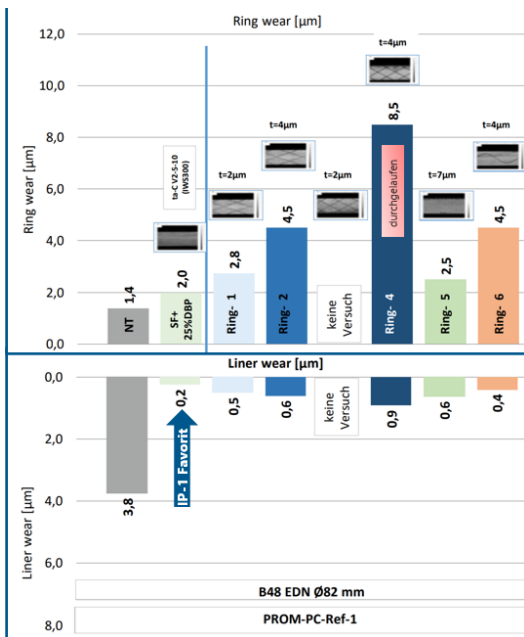
Abbildung 54: IP2: Bewertung der dotierten ta-C Varianten auf Basis des Rolls-Royce-Tribosystems

Plint-Tribometermessungen auf strukturierten Kolbenringen

Die auf den automotiven Topringen aufgebracht Laserstrukturen, welche einen früheren Übergang in den hydrodynamischen Reibungszustand ermöglichen sollen, wurden ebenfalls auf dem Plint-Tribometer untersucht. Allerdings sind die Prüfbedingungen am Plint-Tribometer im Grenz- und Mischreibungsgebiet zu finden, weshalb der angestrebte Effekt der Strukturierung ggf. nicht korrekt in den ermittelten Reibkoeffizienten abgebildet werden konnte. Eine Aussage zum Verschleißverhalten konnte dennoch abgeleitet werden.

Aus Abbildung 55 lässt sich ein durch die Laserstruktur beeinflusstes Verschleißverhalten erkennen. Ob der zum Teil deutlich erhöhte Schichtverschleiß auf eine Modifizierung der Schicht im Bereich der Strukturierung, hervorgerufen durch den Strukturierungsprozess oder durch eine geänderte Kontaktgeometrie hervorgerufen wurde, ist derzeit nicht vollständig geklärt. Im Reibverhalten konnten hingegen kaum Vorteile gezeigt werden. Einzig die sinusförmige als auch die rautenförmige Strukturierung (2 µm Strukturtiefe) zeigten leichte Vorteile am Plint-Tribometer.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele



- Ring1 vs. Ring2 – Einfluss Strukturtiefe
- Ring2 vs. Ring4 - Einfluss des Strukturierungswinkels
- Ring2 vs. Ring5 - Einfluss des Orthogonalabstandes

Abbildung 55: IP3: Direkt-Laser strukturierte Topringe auf Basis des BMW-Tribosystems

1.3.3.6 Demonstratoranlage für partikelarme ta-C Beschichtung im industriellen Maßstab (VTD)

Die Zielstellung bestand in der Weiterentwicklung bestehender Beschichtungsanlagentechnik auf das Niveau einer industrietauglichen Beschichtungstechnologie für die im Projekt neu entwickelten Schichtvarianten (1.3.3.2). Im Rahmen des Projektes wurde dazu eine Demonstratoranlage auf Grundlage der Entwicklungsstände bereits bestehender industrieller Anwendungen für ta-C-Kolbenringbeschichtungsanlagen (z.B. DREVA 1050 bei Tenneco) und aus vorangegangenen Förderprojekten (Pegasus I/II) konzipiert, aufgebaut und optimiert. Zentrale Punkte der Arbeiten umfassten dabei u.a. (i) die Entwicklung und Qualifizierung einer leistungsstarken Bogenpulsstromquelle mit einstellbaren Pulsparametern und Ratesteigerungspotential, (ii) die Optimierung der Partikelfilterung für Kohlenstoff LASER-ARC sowie (iii) die Abscheidung hafter, partikelarmer Metallhaftsichten mittels Hochleistungsimpulsmagnetronspütern (HiPIMS). Durch zahlreiche Zusatzoptionen u.a. für die Untersuchung einzelner Plasmaprozesse, der Erhebung für Prozessoptimierung relevanter Daten und zur Optimierung von Anlagenkomponenten eignet sich die Demonstratoranlage nicht für einen direkten Einsatz bei einem potenziellen Industriekunden im Sinne eines Anlagen-Prototypen.

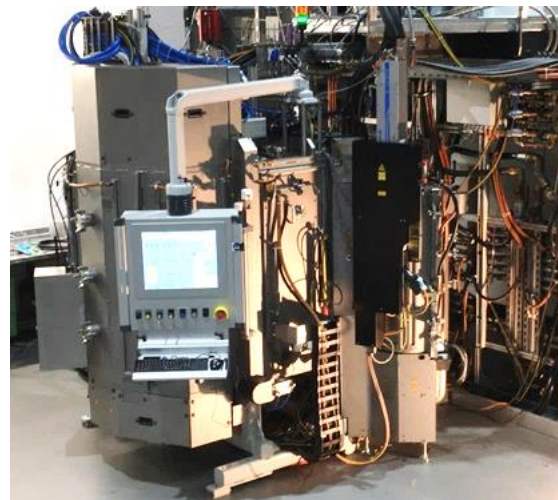


Abbildung 56: Demonstratoranlage für die partikelarme taC-Beschichtungen am Standort der VTD Vakuumtechnik Dresden GmbH.

In diesem Projekt wurde neben der Aufskalierung der beim Projektpartner Fraunhofer IWS im Labormaßstab durchgeführten Entwicklung von Schichtvarianten auch ein besonderes Augenmerk auf die

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Vertiefung und Erweiterung des Verständnisses der Einflüsse von Pulsparametern auf die Plasmaeigenschaften gelegt. Dazu wurde mit der Neuentwicklung einer flexiblen Bogenpulsstromquelle die wichtige Voraussetzung geschaffen, die Entladungsbedingungen gezielt variieren zu können (Patent in Prüfung). Die Auswirkung der Bogenparameter auf die Plasmaeigenschaften wurde umfassend untersucht und ist im folgenden Kapitel beschrieben. Bei der Auslegung der Pulsstromquelle wurde außerdem berücksichtigt, dass Partikelfiltration fast immer mit Rateminderung einhergeht und Ratesteigerungspotentiale offengehalten werden sollten, um die Einbußen zumindest teilweise kompensieren zu können.

Für die Filterung der bei der Kohlenstoffbogenentladung entstehenden Partikel wurde zunächst auf das System eines Ablenfilters⁴³ zurückgegriffen, wie es auch beim Projektpartner Fraunhofer IWS im Projekt für die Herstellung von gefilterter ta-C Schichten zum Einsatz kommt. Insbesondere bei Erhöhung der Bogenstromamplitude konnte keine zufriedenstellende Ratenhomogenität über die gesamte angestrebte Beschichtungshöhe mit vertretbarem Optimierungsaufwand erzielt werden. Daher wurde zu einem durch VTD für Laserarcmodule (LAM) weiterentwickelten Linearfilterkonzept übergegangen, welches das Plasma durch eine verjüngte Austrittsöffnung hindurch magnetisch fokussiert. Zur Charakterisierung der Oberflächeneigenschaften hinsichtlich Rauheit und Partikelbelegung und damit der Bewertung u.a. von Filtereigenschaften kam das im Rahmen des Projektes beschaffte Keyence LASER Topografie Mikroskop zum Einsatz. Im Vergleich der Analyse von taC-Schichten auf polierte Edelstahlprobekörper konnte gezeigt werden, dass beide Filterkonzepte vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich der Partikelzahl und -verteilung liefern (Abbildung 57) und verbesserte Eigenschaften im Vergleich zum bisher verwendeten, ungefilterten Betrieb zeigen. Der weiterentwickelte Linearfilter zeigt unter gleichen Pulsbedingungen neben der verbesserten Ratenhomogenität auch eine höhere Beschichtungsrate.

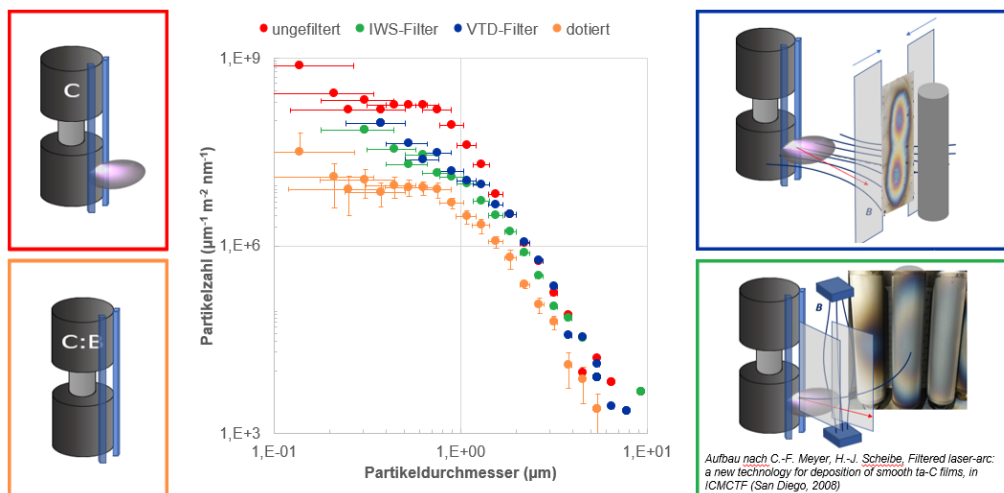


Abbildung 57: Vergleich der Auswirkungen verschiedener Filteransätze auf die normierte Partikelverteilungen gemessen auf der Schichtoberfläche.

In Abbildung 57 ebenfalls dargestellt ist eine gleichermaßen ausgewertete Referenzprobe einer beim Fraunhofer IWS hergestellten ta-C:B-Beschichtung, welche eine nochmals stark verminderte Partikelbelegung aufweist, obwohl keine zusätzlichen Filtermaßnahmen getroffen wurden. Leider konnte im Projekt die physikalische Ursache nicht geklärt werden, die prinzipiell zu einer partikelärmeren Schichtabscheidung durch Beimengung bestimmter Dotierstoffe im Kohlenstofftarget zu führen scheint. Im Projektzeitraum konnten für dotierte Kohlenstofftargets keine Angebote im marktreifen Kostenrahmen eingeholt werden, die für eine industrietaugliche Ausstattung der Demonstratoranlage mit dotierten Targets nötig gewesen

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

wären, um die Technologieübertragung der im Projekt entwickelten dotierten Schichtvarianten durchzuführen.

Um jede Art der ta-C-Beschichtung optimal an die Substrate anzubinden, werden zunächst Metallhaftsichten aufgebracht, wofür in den bisherigen Technologien typischerweise lichtbogenverdampftes Chrom verwendet wird. Um der Zielstellung möglichst glatter Oberflächen gerecht werden zu können, muss schon bei der Haftsicht auf die deutlich partikelärmere HiPIMS Beschichtungstechnik zurückgegriffen werden. Diese zeichnet sich im Vergleich zum normalen Sputtern durch höheren Ionisierungsgrad aus und führt daher i.d.R. zu kompakteren und hafteren Schichten. Neben deutlich geringeren Partikelanteilen im Vergleich zur Lichtbogenverdampfungstechnik konnte auf Edelstahlprobekörpern für die Metalle Chrom und Titan eine gute Haftfestigkeit von ta-C-Beschichtungen unterschiedlicher Härte nachgewiesen werden.

Die Schichteigenschaften (wie E-Modul und Härte) der ta-C-Schichten werden stark von den Plasmaeigenschaften (u.a. Energieeintrag, Ionisierungsgrad etc.) determiniert. Das aus den plasmadiagnostischen Messungen gewonnene, erweiterte Verständnis (nachfolgendes Kapitel) erlaubt gezielte Einstellmöglichkeiten bestimmter Plasmaeigenschaften. Im Ergebnis der Prozessentwicklung stehen ta-C Beschichtungen auf Edelstahlprüfkörpern im E-Modul Bereich von 300 bis 900 GPa, die auch auf Kolbenringe übertragen wurde. Diese Technologieübertragung steht unter der Herausforderung unterschiedlicher Ausgangsqualität der Teile. Im gerichteten, fokussierten Plasma ist teilweise die Haftungstoleranz gegenüber Unebenheiten, Kanten, Riefen auf allen Substraten gering und zusätzlich von den Schichteigenschaften abhängig. Die Haftung kann gegebenenfalls durch zusätzliches Nachbearbeiten/Polieren der Teile vor der Beschichtung oder anschließendes Tempern verbessert werden.

Mit der Demonstratoranlage konnten die für den industriellen Einsatz wichtigen Aspekte der Reproduzierbarkeit und Langzeitstabilität der Prozesse sowie die Stabilität der entwickelten bzw. neu eingesetzten Technologiekomponenten (u.a. Bogenstromquelle, LAM-Filter, HiPIMS) erfolgreich nachgewiesen werden.

Charakterisierung des Kohlenstofflichtbogenplasmas

In Kooperation mit dem assoziierten Partner AG Plasmatechnologie, CAU zu Kiel wurden umfangreiche plasmadiagnostische Untersuchungen zur Charakterisierung des Lasergezündeten gepulsten Kohlenstofflichtbogenplasmas durchgeführt. Hierzu kamen die im Rahmen des Projekts beschafften Messgeräte (Emicon Plasmamonitor von Plasus, Langmuir-Sonde von Impedans, Gegenfeldanalysator von CRR Technology) zum Einsatz. Diese Gerätschaften mussten größtenteils erst auf die hohen messtechnischen Anforderungen der vorliegenden Plasmabedingungen angepasst werden. Das Equipment wurde durch weitere vom Kooperationspartner entwickelte Plasmasonden (passive Thermosonde (PTP)⁴⁴, Langmuir-Sonde und Kraftsonde⁴⁵) sowie leihweise zur Verfügung gestellte Messmittel (Hochgeschwindigkeitskamera und Echelle-Spektrometer) ergänzt. Die komplette Charakterisierung des Kohlenstoffplasmas ist Thema einer noch nicht abgeschlossenen Dissertationsarbeit, deren gesamter Umfang nur in Teilen durch die Projektarbeit unterstützt werden konnte.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

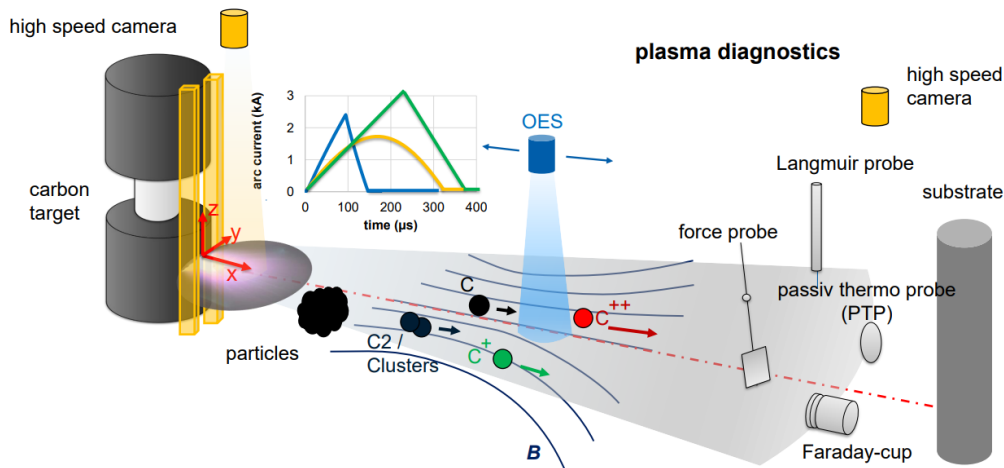


Abbildung 58: Skizzenhafte Übersicht des Messaufbaus zur Untersuchung des Kohlenstofflichtbogenplasmas mit unterschiedlichen plasmadiagnostischen Mitteln (genauere Beschreibung siehe Text)

Mit der Hochgeschwindigkeitskamera wurde zunächst die zeitliche Entwicklung von Bogenentladungspulsen untersucht. Neben dem sich ausbreitenden Laserzünd- und Bogenplasma sind deutlich die ebenfalls bei der Entladung entstehenden Mikropartikel zu erkennen (Abbildung 59). Die aus den Bildern ableitbare Richtungs- und Geschwindigkeitsverteilung der Partikel ist wichtige Grundlage für die Auslegung und Optimierung von Partikelfiltern.

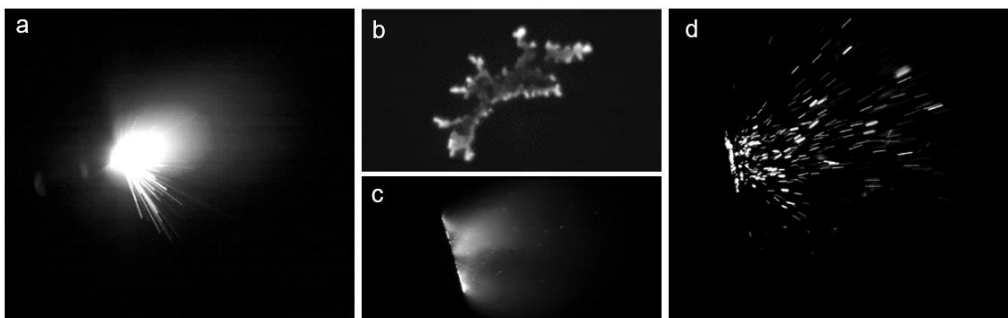


Abbildung 59: Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen vom Laserzündplasma (a), dem Bogenplasma (c) und den Mikropartikeln (d) jeweils im senkrechten Einblick sowie frontal von der Bogenentladung (b).

Die Passive Thermosonde (PTP) misst den Gesamtenergieeintrag des Plasmas, der sich aus einer Reihe von Einzelbeiträgen u.a. der kinetischen Energien der Elektronen und Ionen sowie der Neutralteilchen und Mikropartikel zusammensetzt. Durch die Wahl unterschiedlicher Sonden und Methoden, können diese Beiträge weitestgehend aufgetrennt werden.

Mithilfe integraler und zeitaufgelöster optischen Emissionsspektroskopie (OES) lässt sich das beschichtende Kohlenstoffplasma hinsichtlich seiner Anteile unter verschiedenen Bogenentladungsbedingungen untersuchen. Bei der qualitativen Analyse der Spektren konnte erstmals eine klare Abhängigkeit des Ionisierungsgrades vom Stromanstieg des Bogenpulses nachgewiesen werden (Abbildung 60). In der normierten Darstellung der Peakverhältnisse auf die Intensität der einfach geladenen Kohlenstoff-Ionen (CII) zeigt sich bei zunehmendem Stromanstieg eine Abnahme des neutralen Kohlenstoffs (CI) und eine Zunahme der zweifach ionisierten Kohlenstoff-Ionen (CIII) im Plasma.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

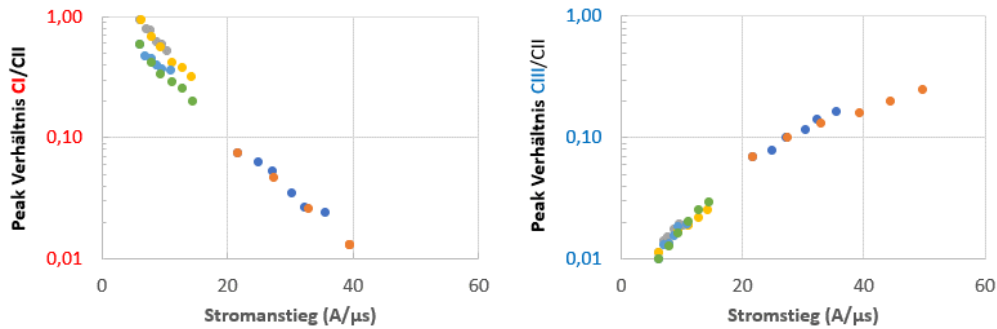


Abbildung 60: Exemplarisches optisches Emissionsspektrum einer Kohlenstoffbogenentladung und die normierten Peakverhältnisse als Funktion des Stromstieges des Bogenpulses.

Aufgrund der Besonderheiten des gepulsten Bogenplasmas musste die Messtechnik zur Bestimmung von Elektronen- und Ionenenergieverteilungsfunktion (EEDF und IEDF) mittels Langmuir-Sonde bzw. Faraday-Behchers/Gegenfeldanalysators speziell auf die herausfordernden Plasmabedingungen abgestimmt und hinsichtlich der zeitaufgelösten Bestimmung weiterentwickelt werden. Aus den Verteilungsfunktionen werden die für die Schichtbildungsprozesse wichtigsten Eigenschaften der Elektronen und Ionen und deren Abhängigkeiten von den Entladungsbedingungen abgeleitet.

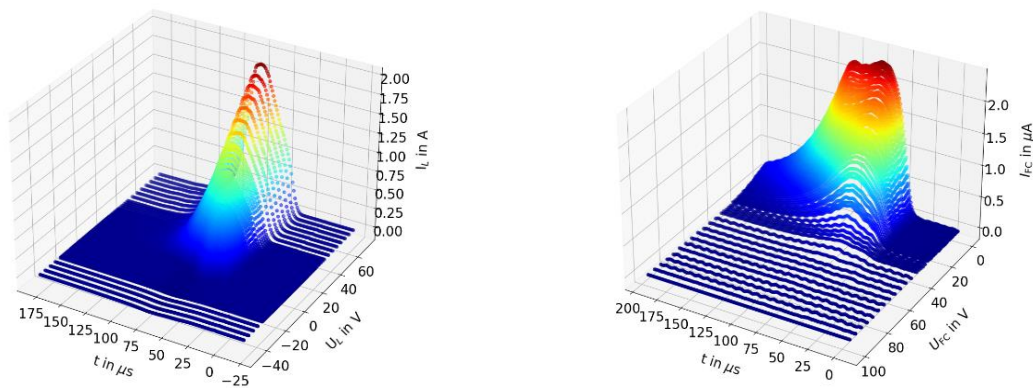


Abbildung 61: Exemplarische Darstellung der vorläufig analysierten zeitaufgelöster Langmuir- (links) und Gegenfeldanalysator-Messungen (rechts).

Zusätzlich kann über eine Kraftsonde der Neutralteil des Plasmas durch geeignete elektrische Filterung der geladenen Teilchen gemessen werden.

Diese Untersuchungen bestätigen zum jetzigen Stand der Auswertungen, dass es sich um ein sehr elektronenreiches und dichtes Plasma handelt. Es deutet sich an, dass sich das Kohlenstoffplasma nicht als klassisches Niederdruckplasma (d.h. rein Maxwell-verteilt) beschreiben lässt. Selbst nach der Passage längerer Strecken im Vakuum ändern sich die Zusammensetzung und Eigenschaften wenig. Im Magnetfeldfokus des Linearfilters steigt die gemessene Ionisierung und die Intensitäten der optischen Emission im Zentrum des sich ausbreitenden Plasma im Magnetfeld bleiben auf ihrem Weg zum Substrat vollständig erhalten, was zu höherer Ionisierung des schichtbildenden Plasmas beiträgt.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

1.4 Systemkomponenten (TP5000)

1.4.1 Ziele und Aufgabenstellung

Im Teilprojekt TP5000 sollen die Ergebnisse der anderen Teilprojekte in der Anwendung auf Komponenten zusammengeführt werden. Ziel ist, die Verbesserungen im Bereich Oberflächen und Schmierstoff auf verschiedenen Komponenten zu erproben und den damit verbundenen Vorteil hinsichtlich Reibung und Verschleiß auf Bauteilen zu realisieren. Im Fokus stehen hier neben denen unter Gleitbeanspruchung stehenden Komponenten der Kolbengruppe auch Komponenten die einer wälzenden Beanspruchung unterliegen, hierzu zählen Ventiltriebskomponenten sowie Lager im Antriebsstrang. Bei einer Optimierung derartiger Systemkomponenten durch Beschichtungen und Schmierstoffe ist es entscheidend das gesamte Tribosystem von Grund auf zu analysieren und alle Elemente aufeinander abzustimmen. Die Betrachtung beginnt also beim Grundmaterial und dessen Wärmebehandlung und erstreckt sich dann über die Oberfläche, deren Kennwerte und Behandlungsverfahren, über die Wahl geeigneter Schichtsysteme und Abscheidemethoden bis hin zur passenden Formulierung des zugehörigen Schmierstoffes.

1.4.2 Verwendung der Zuwendung

Die Zuwendungen wurden in TP5000 im Wesentlichen für das im Projekt beschäftigte Personal im Rahmen der Entwicklung, Herstellung sowie Erprobung der Systemkomponenten eingesetzt. Außerdem wurden die für diese Arbeiten notwendigen Materialien, der Betrieb von Prüfständen und diverse Dienstleistungen finanziert. Zu letzteren gehört vornehmlich der in diesem TP assoziierte Unterauftragnehmer Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

1.4.3 Erzielte Ergebnisse

1.4.3.1 Designoptimierung Öhring BMW B48 (Tenneco)

Die im Rahmen der Innovationspakete 1 und 2 positiv für die Topringe getesteten ta-C Varianten (ta-C V1, ta-C V2) wurden für die motorische Erprobung am Einzylinder der TU Dresden ebenfalls auf den Rails des Öhrings appliziert. Die motorische Erprobung dieser Schichten auf Öhringen mit Seriendesign führte jedoch entgegen den Erwartungen zu einer Erhöhung der Reibwerte. Erst durch die anschließend durchgeführte Verschleißauswertung der Rails wurde deutlich, dass bei den ta-C Varianten, aufgrund ihres hohen Verschleißwiderstandes, kein Einlauf analog zu den Serien (nitrierten) Rails stattgefunden hat, siehe Abbildung 62. Die Aufrechterhaltung des spitzballigen Ringdesigns durch die ta-C-Beschichtung führte im tribologischen Kontakt des Öhrings zur Zylinderlaufbahn zu einer erhöhten Ölabstreifwirkung, verursacht durch die höheren Flächenpressungen. Dadurch ist davon auszugehen, dass auch der Ölhaushalt in der 1. Nut negativ beeinflusst wird, was als ursächlich für die erhöhten Reibwerte diskutiert wurde.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

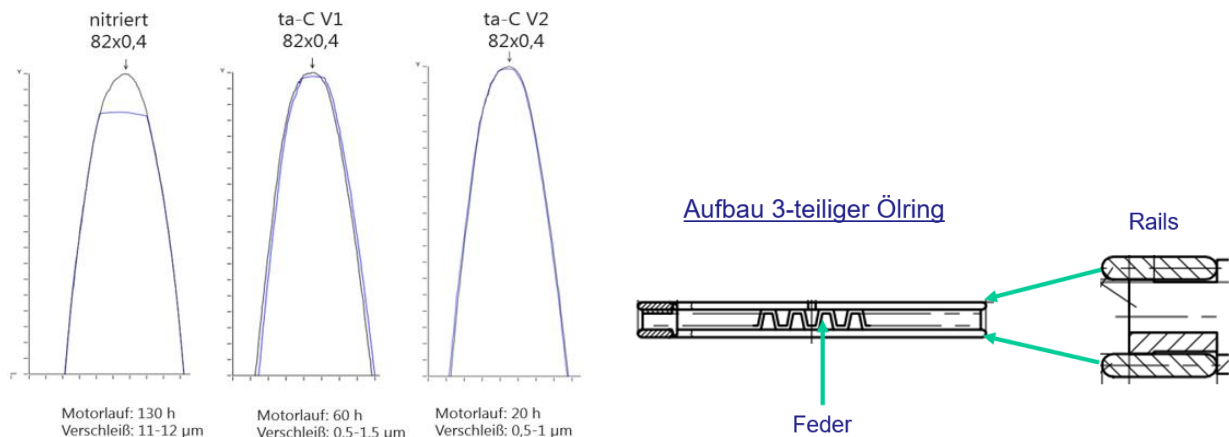


Abbildung 62: Verschleißgegenüberstellung Rails nach Motorlauf; rechts: Aufbau 3-teiliger Öling

Um das Ölabbstreifverhalten auf ein vergleichbares Niveau zur aktuellen Serie zu bringen, wurde auf das unbeschichtete Rail ein Plateau mit ähnlicher Ausprägung wie auf dem eingelaufenen Serien-Rail aufgebracht und im Anschluss beschichtet, siehe Abbildung 63



Abbildung 63: Designanpassung automotives Rail

Um neben dem direkten positiven Einfluss der Beschichtung auf das Reibverhalten einen zusätzlichen Effekt zu erzielen, wurde im Rahmen einer Designoptimierung die axiale Wandstärke reduziert und mit einem Federkörper mit reduzierter Tangentialkraft versehen. Dieser Ansatz ermöglicht eine zusätzliche Reduzierung der Reibkräfte bei gegenüber der aktuellen Serie konstanten Ölabbstreifeigenschaften. Dieser Ansatz zur Senkung der Reibverluste in der 3. Nut ist erst durch den hohen Verschleißschutz der ta-Beschichtung und die damit verbundene hohe Konturtreue sinnvoll umsetzbar.

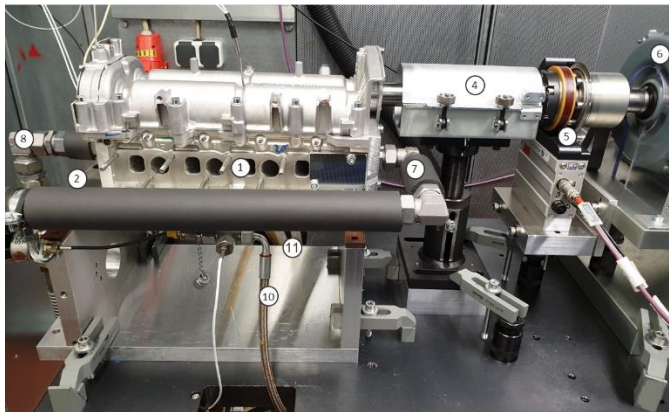
Diese Variante wurden im Rahmen der vollmotorischen Untersuchungen bei Tenneco im Lauf V05 mit untersucht, siehe TP 7064.

1.4.3.2 Ventiltriebskomponenten (Schaeffler / FAU)

1.4.3.2.1 PKW Rollenschlepphebel Ventiltrieb

Im Folgenden sind die Ergebnisse der ersten Vorvalidierungsversuche an einem bei Schaeffler verfügbaren geschleppten Zylinderkopf mit Rollenschlepphebeln dargestellt.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele



1. Zylinderkopf
2. Zylinderkopfplatte
3. Externes Temperiergerät (nicht auf Bild)
4. Berstschutz (Kupplung)
5. Drehmomentmesstechnik
6. Antriebsmotor
7. Kühlmedium Vorlauf
8. Kühlmedium Rücklauf
9. Ölaggerat (nicht auf Bild)
10. Ölzulauf Zylinderkopf
11. Ölrücklaufschlauch

Abbildung 64: Darstellung des Rollenschlepphebl-Zylinderkopf mit den relevanten Baugruppen

Versuche zur Vorvalidierung verschiedener Beschichtungen auf Nockenrollen (Rollenschlepphebel) wurden gestartet. Neben nicht beschichteten Rollenschlepphebel kamen eine Silizium dotierte tetraedrisch-amorphe Kohlenstoffschicht sowie eine mit Kupfer dotierte Molybdänitridschicht zum Einsatz. Dabei wurden lediglich die Außendurchmesser der Nockenrollen beschichtet. Die Versuche wurden auf einem vorhandenen Zylinderkopfprüfstand durchgeführt

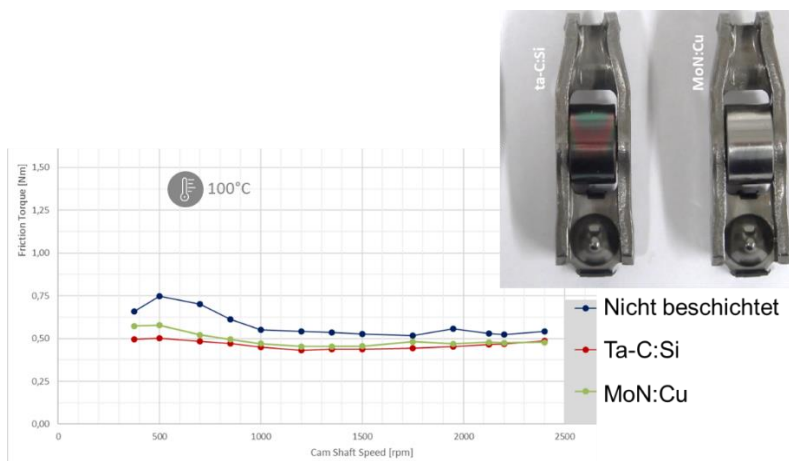


Abbildung 65: Darstellung der beschichteten Rollenschlepphebel (oben rechts). Gemessener Reibmomentverlauf für die verschiedenen Varianten.

Gegenüber der nicht beschichteten Variante konnte mit den beschichteten Nockenrollen eine Reibungsreduzierung über den gesamten Drehzahlbereich nachgewiesen werden. Im niedrigen Drehzahlbereich ist sogar bis zu 40% weniger Reibung mit der ta-C:Si aufgetreten. Das entspricht nahezu einer Halbierung der Reibung im Ventiltrieb. Bezogen auf das Gesamtfahrzeug entspricht das in etwa einer Reduzierung des CO₂ Ausstoßes um 1%. Auf Basis dieser positiven Ergebnisse wurden ta-C:Si beschichteten Rollenschlepphebel für die befeuerten Motorversuche bei Tenneco vorbereitet und geliefert.

1.4.3.2.2 Heavy Duty Kipphebel Ventiltrieb

Bei Schaeffler wurde auf einem vorhandener MAN D26 Zylinderkopfprüfstand genutzt, um den Einfluss der dotierten ta-C Beschichtungen auf das Reibungs- und Verschleißverhalten in dieser Anwendung zu untersuchen. Die Nockenwelle des Zylinderkopfs wird dabei mit einem Elektromotor angetrieben und das aufgebrauchte Drehmoment mit einer Messwelle aufgezeichnet.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

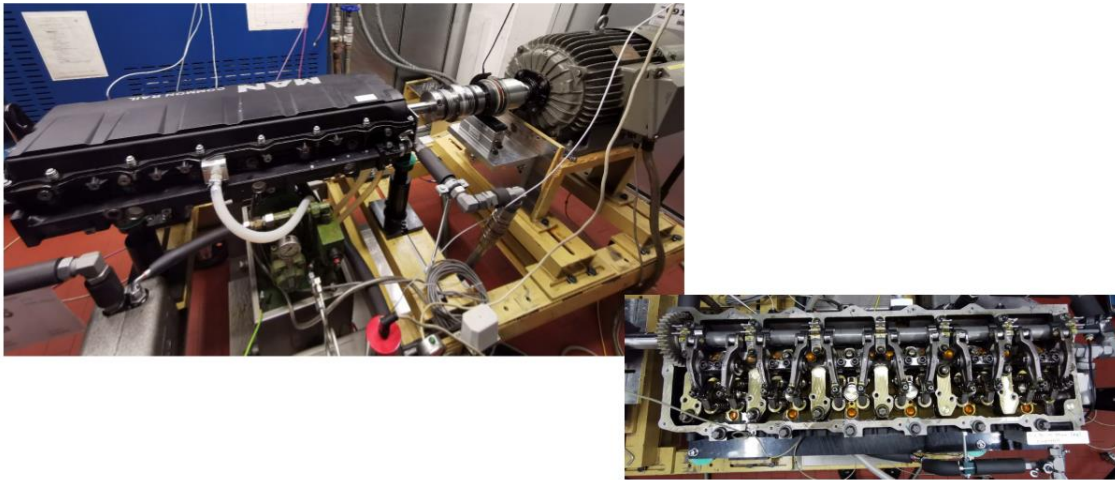


Abbildung 66: Geschleppter MAN D26 Zylinderkopf bei Schaeffler

In einer ersten Versuchsreihe wurden vier verschiedene Varianten untersucht. Zunächst, der Serienstand mit Bronzebolzen und gleitgelagerter Achse als Referenz, eine Variante mit wälzgelagerter Nockenrolle bzw. wälzgelagerter Achse und eine Variante bei der der Bronzebolzen durch einen optimiert beschichteten Stahlbolzen ersetzt wurde.

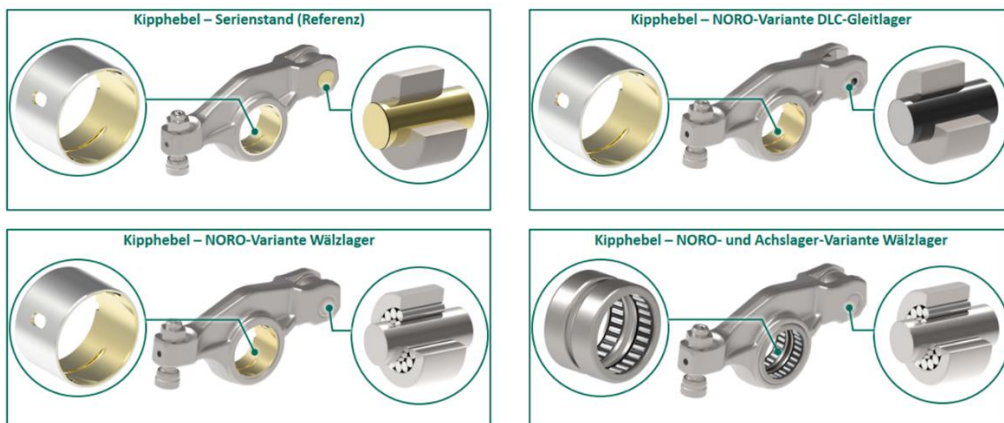


Abbildung 67: Kipphebelvarianten im Reibmomentvergleich

Um eine valide Aussage über das auftretende Reibniveau geben zu können, muss die Reibmomentmessung in einem „quasistationären“ Zustand erfolgen. Hierfür durchläuft das System ein festgelegtes Drehzahlprofil mit anschließendem Messprogramm. Dies wird solange wiederholt, bis die gemessene Änderung des Reibmoments vernachlässigbar gering ist.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

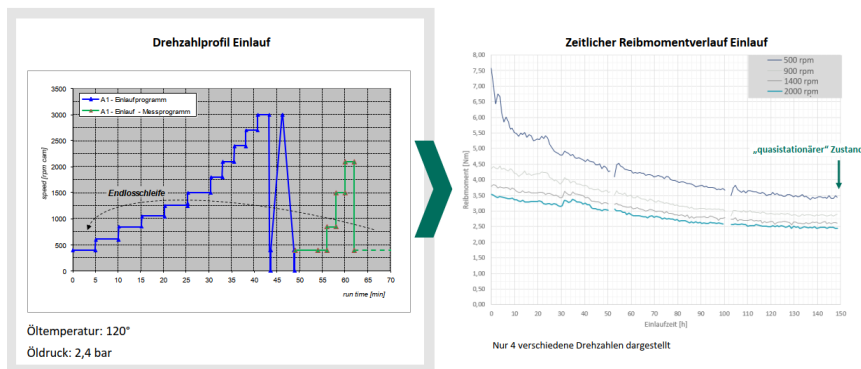


Abbildung 68: Einlaufprozedur der verschiedenen Kipphebelvarianten

Es hat sich gezeigt, dass die Dauer dieses Einlaufs stark von den eingesetzten Materialpaarungen und der Ausprägung der Tribokontakte des Kipphebels abhängt. Während z.B. der Referenzhebel bereits nach 150h Einlauf den „quasistationären“ Zustand erreicht hat, war dies bei der Variante mit ta-C Beschichtetem Bolzen erst nach 470h der Fall.

Vergleicht man die ermittelten quasistationären Reibmomente der verschiedenen Varianten, so fällt auf, dass der Einsatz von Wälzlagerungen in diesem System keine Vorteile hinsichtlich Reibung bringt. Der Grund hierfür konnte nicht abschließend geklärt werden.

Die ta-C beschichtete Variante hingegen hat im niedrigen Drehzahlbereich bis 1500 U/min ein um ca. 10% geringeres Reibmoment. Im Vergleich mit der Referenz zeigt diese Variante zudem deutlich geringeren (nicht messbaren) Verschleiß und von Beginn an geringere Reibwerte.

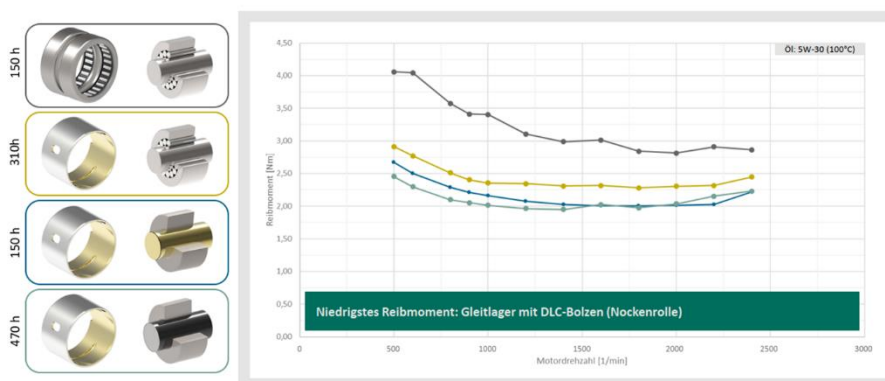


Abbildung 69: Vergleich des Reibmoments der verschiedenen Kipphebelvarianten

Dies konnte auch durch eine Simulation des Reibmomentverlaufs über einen Nockenhub hinweg bestätigt werden. Bei der Simulation wird deutlich das das Referenzsystem vor allem zu Beginn des Einlaufs sehr hohe Reibmomente aufweist, was zweifelsohne mit hohem Verschleiß am weichen Bolzen einhergeht. Hier zeigt sich das die Paarung Nockenrolle mit optimiert beschichtetem Bolzen tribologisch gesehen wesentliche Vorteile gegenüber dem weichen einlaufbehaffeten Bronzebolzen hat.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

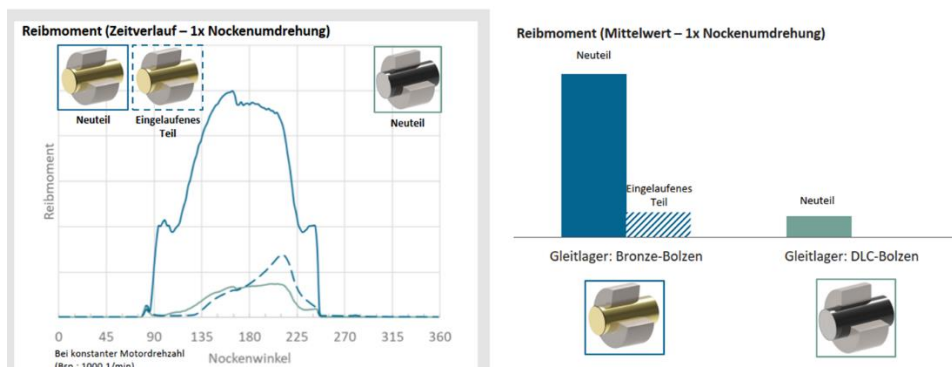


Abbildung 70: Simulationsergebnisse zum Reibmomentverlauf während eines Nockenhubes

Aufgrund der geringen darstellbaren Reibungsreduzierungen in diesem System wurde davon abgesehen dies in einem befeuerten Motorenlauf bei MAN einzusetzen, da der Beitrag zur Reibungsreduzierung unterhalb der Auflösungsgrenze des befeuerten Prüfstandes liegen würde.

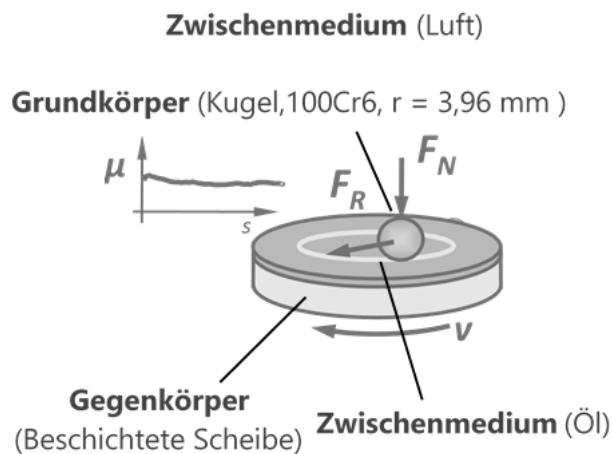
1.4.3.3 Lagerkomponenten (Schaeffler / FAU)

Auf Basis der undotierten ta-C Referenzschicht wurden bei Schaeffler verschiedene Dotierungen eingesetzt, um das Potential der Reibungs- und Verschleißreduzierung und die Wechselwirkung mit Schmierstoffadditiven in hochbelasteten Wälzkontakten zu untersuchen. An der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg wurden hierzu tribologische Untersuchungen ausgewählter Schichtsysteme entlang einer tribologischen Prüfkette, bestehend aus einem Kugel-Scheibe-Tribometer und einem 2-Scheiben-Tribometer, durchgeführt. Dadurch ist einerseits die Vergleichbarkeit der tribologischen Wirksamkeit verschiedener Schichtsysteme bei standardisierten Versuchsbedingungen im Gleitkontakt gegeben und andererseits kann ein erstes Screening verschiedener Schichtsysteme auf unterschiedlich gekrümmten Oberflächen bei anwendungsbezogenen Roll-Gleitbedingungen durchgeführt werden. Neben der undotierten ta-C Referenzschicht werden Dotierungen von ta-C mit Stickstoff (N) zur Reduzierung der Oberflächenenergie und metallischen Dotierungselementen, wie Kupfer (Cu) und Molybdän (Mo) zur Verschleiß-, Reibungs- und Schichteigenspannungsreduzierung verwendet⁴⁶.

Die Eigenschaften der Beschichtung wurden auf vor dem Beschichten polierten Probekörpern ermittelt. Dabei wurde die Härte und Elastizität der Proben mittels instrumentierter Eindringprüfung ermittelt. Es wurde daraus der arithmetische Mittelwert für die Eindringhärte H_{IT} und das Eindringmodul E_{IT} sowie das Verhältnis aus H_{IT}^3/E_{IT}^2 gebildet. Die Oberflächenbeschaffenheit wurde mittels Tastschnittverfahren untersucht. Die Schichtdicke wurde mittels Kalottenschleifverfahren ermittelt und mit einem optischen Lichtmikroskop ausgewertet. Um die Unterschiede der mechanischen Eigenschaften besser dem Einfluss der Dotierungselemente zuordnen zu können, wurden an den Proben Raman-Spektren an einem konfokalen Raman-Mikroskop aufgenommen. Ein diodengepumpter Festkörperlaser generierte dabei die Anregungswellenlänge von 523 nm.

Die Auswirkungen der Dotierungselemente auf die tribologische Wirksamkeit der Schichten wurde anhand der Änderungen ihres Reibungs- und Verschleißverhaltens gegenüber der undotierten ta-C Referenzschicht ermittelt. Die Prüfung der Probekörper erfolgte zum einen in einem Kugel-Scheibe-Tribometer und zum anderen in einem 2-Scheiben-Prüfstand. In den Versuchen wurden die PROMETHEUS-PKW Schmierstoffe von FUCHS verwendet. Das KST (Abbildung 71) bildet einen Gleitkontakt unter konstanter Last aus.

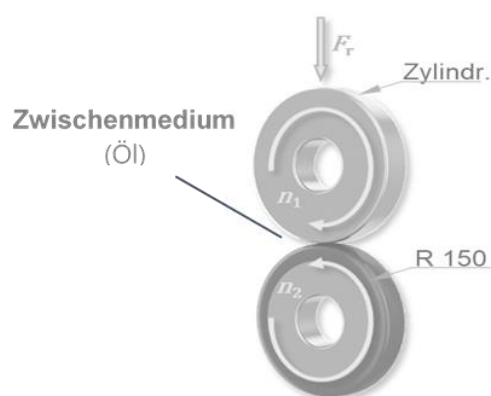
Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele



Belastungskollektiv	
r_{Ball} in mm	3,96
F_N in N	40,0
p_{max} in MPa	3700
v_{rot} in rpm	96
r_s in mm	10,0
Δv in m/s	0,10
$S_{\text{total}} = 1000 \text{ m}$	1000
T in °C	22
Wiederholversuche n	3

Abbildung 71: Schematische Darstellung und Belastungskollektiv des KST-Versuchsaufbaus

Das 2ST stellt eine bewährte Prüfmethode zur funktions- und anwendungsorientierten Untersuchung an Tribosystemen unter Gleit-, Wälz- und Rollbeanspruchung dar. Unter variabler Last und einstellbaren Schlupfgeschwindigkeiten können dynamische Kontaktsituationen und -verläufe bei hohen Geschwindigkeiten und Temperaturen über längere Zeiträume abgebildet werden. Um die tribologische Wirksamkeit der entwickelten Schichten in hochbelasteten, schlupfbehafteten Kontakten zu untersuchen, wurde ein erstes Screening am 2ST durchgeführt (siehe Abbildung 72). In dieser Versuchsreihe wurde eine beschichtete ballige Scheibe (Balligkeit R_{ballig} : 150 mm) gegen eine unbeschichtete zylindrische 100Cr6-Scheibe rotiert. Im ersten Teil des Versuchs laufen die Scheiben mit ca. 1% Schlupf, nahe dem Rollkontakt, für 20 Minuten und einer resultierenden Strecke von etwa 800 m, um das Einlaufen der Schicht sicherzustellen und einen Ausgangswert für niedrige Schlupfzustände zu erhalten. Im zweiten Teil des Versuchs durchlaufen die Scheiben verschiedene Schlupfbereiche von -20% bis 20% um das Reibungsverhalten der Schichten über die verschiedenen Schlupfzustände erfassen zu können.



Belastungskollektiv	
F_N in N	1000
p_{max} in MPa	1800
v_{rot} in rpm	137 – 168
Σv in m/s	0,64
$S_{\text{total}} = 1000 \text{ m}$	2300
T in °C	22
n	2

Abbildung 72: Schematische Darstellung und Belastungskollektiv des 2ST-Versuchsaufbaus.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Diese sogenannte Traktionskurve wird in einem Zeitraum von 40 Minuten insgesamt zwei Mal durchlaufen und legt eine Strecke von etwa 1500 m zurück. Das in einem Durchlauf ermittelte Reibungsverhalten und die Topographie der Grund- und Gegenkörper werden nach dem Versuch miteinander verglichen. Die Oberfläche der gelaufenen Proben wird mittels Laser Rastermikroskop und dem Tastschnittsystem gemessen.

In Tabelle 2 ist eine Übersicht der verschiedenen Schichtsysteme mit ihren mechanischen und topographischen Eigenschaften gelistet.

Tabelle 2: Arithmetische Mittelwerte und Standardabweichungen der mechanischen und topographischen Eigenschaften.

Schichtsystem	#	Eindringhärte HIT in GPa	Eindringmodulus EIT in GPa	HIT ³ /EIT ²	Rauheit Rpk in µm	Schichtdicke in µm
ta-C	1	71	533	1,26	0,15	0,70
ta-C:N	2	50	331	1,12	0,09	0,39
ta-C:CuMoN	3	47	383	0,73	0,15	0,76
ta-C:Mo	4	41	301	0,74	0,14	0,90

Aus den mechanischen Untersuchungen ging hervor, dass alle Schichtsysteme eine sehr hohe Härte (> 40 GPa) aufwiesen. Ein hohes H_{IT}^3/E_{IT}^2 -Verhältnis gilt als Indikator für einen hohen Widerstand des Schichtwerkstoffs gegen plastische Verformung unter Kontaktdruck⁴⁷. Die ermittelten Quotienten für die hier gezeigten Schichtsysteme sind in Abbildung 73 abgebildet und lassen die Folgerung zu, dass die undotierte ta-C-Referenzschicht und die ta-C:N Schicht ähnliche H_{IT}^3/E_{IT}^2 -Verhältnisse hatten. Im Vergleich dazu zeigten die ta-C:CuMoN und ta-C:Mo Schichten geringere H_{IT}^3/E_{IT}^2 -Verhältnisse. Demnach ist der Widerstand gegen Abrasivverschleiß der letztgenannten Schichten in dieser Untersuchungen deutlich geringer als von ta-C und ta-C:N⁴⁸.

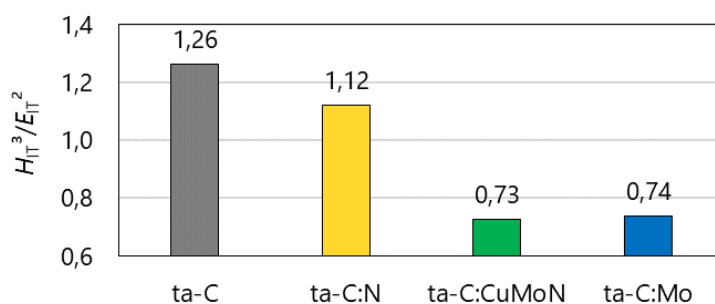


Abbildung 73: H_{IT}^3/E_{IT}^2 Verhältnis der dotierten Schichtsysteme im Vergleich zur undotierten ta-C Referenzschicht.

Um die Unterschiede der mechanischen Eigenschaften besser dem Einfluss der Dotierungselemente zuordnen zu können, wurden die gemittelten Raman-Spektren der Schichten verglichen. Die daraus, nach FERRARI und ROBERTSON, ermittelten I_D/I_G -Verhältnisse sind in Abbildung 74 illustriert⁴⁹.

Für die undotierte ta-C-Referenzschicht und die N-dotierte Schicht konnte das typische Spektrum einer sp³-hybridisierten Kohlenstoffschicht beobachtet werden. Repräsentativ waren die hohen G-Peaks bei einer Wellenzahl von etwa 1560 cm⁻¹. Für die undotierte ta-C Referenzschicht wird keine Schulter an der

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Position des D-Peaks (1350 cm^{-1}) erwartet. Eine leichte Ausprägung dieser Schulter spricht für eine gewisse Anzahl sp^2 -hybridisierter Cluster, die aber hier im Verhältnis zur Intensität des G-Peaks relativ gering waren (circa 1:5). Ein hohes Verhältnis wird dabei mit einem hohen Anteil an sp^2 hybridisiertem Kohlenstoff assoziiert⁵⁰. Für die Mo-haltigen Schichten konnte gefolgert werden, dass ein höherer Anteil an sp^2 -Hybridisierungen vorliegt, was auf einen erhöhten amorphen Charakter dieser Schichten im Vergleich zur ta-C und ta-C:N Schicht schließen lässt⁵¹. Die Ausbildung von zunehmend amorphen Bereichen konnte auf die Dotierungselemente zurückgeführt werden und erklärt die Abnahme der Härte von Mo-haltigen ta-C Schichten.

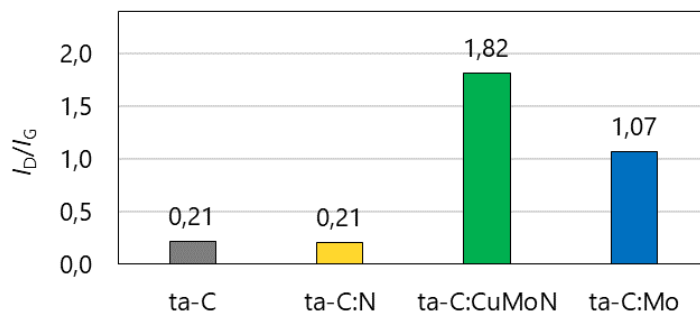


Abbildung 74: Arithmetischer Mittelwert des I_D/I_G -Verhältnisses verschiedener Schichtsysteme.

Die im KST gemessene stationäre Reibungskoeffizient μ_{stat} ist für die untersuchten Schicht-Schmierstoffkombinationen in Abbildung 75 dargestellt. Für das Referenzöl zeigen alle dotierten Schichtsysteme eine Reduzierung der Reibung, ta-C:N weist im Rahmen der Standardabweichung eine Reduzierung um 5% auf, was ausgehend von ähnlichen mechanischen Eigenschaften im Vergleich zur Referenzschicht zu erwarten war. Die weicheren Mo-haltigen Schichtsysteme zeigten mit 12% (ta-C:CuMoN) respektive 23% (ta-C:Mo) reduziertem Reibungskoeffizienten ein deutlich verbessertes Reibungsverhalten gegenüber der undotierten ta-C Referenzschicht auf. Für das zusätzlich mit Mo-additivierte Öl konnte keine signifikante Reibungsreduzierung festgestellt werden. Basierend auf den Gleitversuchen ist davon auszugehen, dass das zusätzliche Mo-haltige Additiv im Schmierstoff keine benefaktorielle Wirkung in diesem tribologischen System hervorruft, sondern sogar für eine Verschlechterung der Reibung sorgen kann.

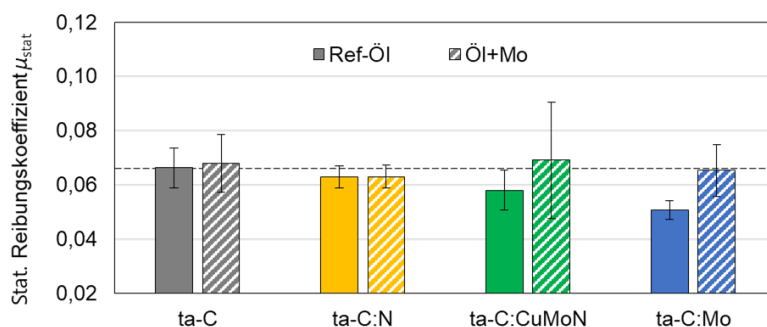


Abbildung 75: Mittlere stationäre Reibungskoeffizienten μ_{stat} aus den Kugel-Scheibe-Tribometer Versuchen.

Zur vollständigen Einordnung der tribologischen Wirksamkeit der Schichten, muss das Verschleißverhalten der Grund- und Gegenkörper betrachtet werden. Dazu sind in Abbildung 76, die Verschleißkoeffizienten der beschichteten Probekörper k_{Disc} und der dagegen gelaufenen Kugeln k_{Ball} , dargestellt. Aus der Darstellung geht hervor, dass die Schichten keinen nennenswerten Verschleiß aufwiesen und es sich

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

hierbei eher um die Einglättung der Rauheitsberge handelte. Bei allen dotierten Schichtsystemen zeigte sich, dass der Verschleiß des Gegenkörpers für beide Schmierstoffe niedriger ist als der Verschleiß der Stahlkugel gegen die Referenzschicht. Trotz relativ hoher Härte besaß die N-dotierte Schicht eine verschleißreduzierende Wirkung bei gleichzeitig leicht geringeren Reibungszahlen als die restlichen Schichtsysteme. Zusätzlich wies die ta-C:Mo Schicht ein verschleiß- und reibungsreduzierendes Verhalten – gerade bei der Verwendung des Referenzöls – auf. Für die dotierten ta-C Schichten konnte eine deutliche Verbesserung des tribologischen Verhaltens, gemessen an den Reibungszahlen und dem Verschleißschutz des unbeschichteten Gegenkörpers, festgestellt werden.

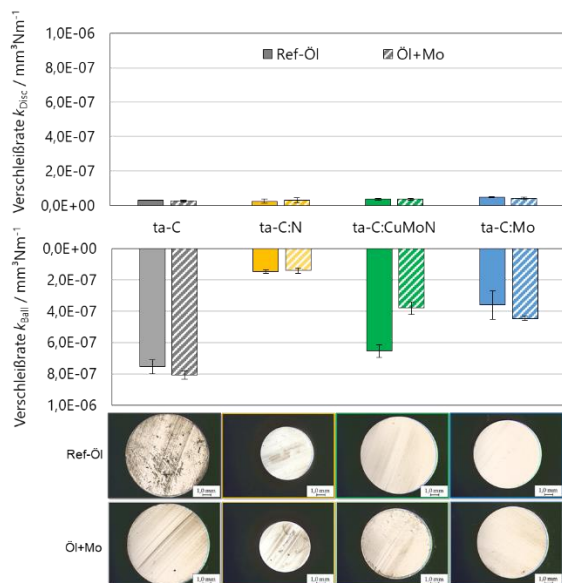
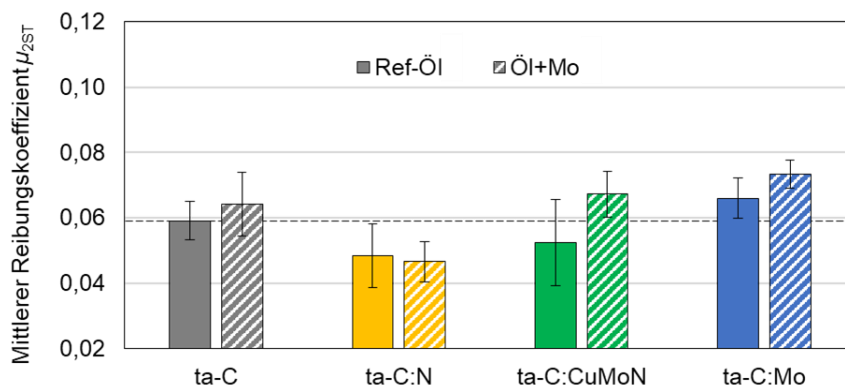


Abbildung 76: Verschleißraten der Grund- und Gegenkörper nach dem KST Versuch mit repräsentativen LSM Aufnahmen der Verschleißkalotte der verwendeten 100Cr6-Kugel.

Für eine Übertragbarkeit der Steigerung der tribologischen Wirksamkeit der Schichten auf die Versuche am 2ST wird im Vergleich zur undotierten ta-C Referenzschicht unter Verwendung des Referenzöls sowohl eine Reibungsreduzierung als auch ein verringerter Gegenkörperverschleiß für die dotierten Schichten erwartet. Die Ergebnisse der 2ST-Versuche sind in Abbildung 77 und Abbildung 78 in Form der gemittelten Reibungskoeffizienten bestimmt nach Abschnitt 2.3 für die jeweilige Schicht-Schmierstoff-Kombination dargestellt. Zur Auswertung der Einlaufphase wurden die Reibungskräfte der letzten 5 Minuten berücksichtigt. Aus Abbildung 77 geht hervor, dass für niedrige Schlupfzustände unter Verwendung des Referenzöls grundsätzlich Reibungskoeffizienten analog zu den KST Versuchen vorlagen.



Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Abbildung 77: Mittlere Reibungskoeffizienten μ_{2ST} nach den 2ST-Versuchen am Ende der Einlaufphase mit niedrigem Schlupf.

Es ist zu sehen, dass die ta-C:N Schicht für beide Schmierstoffe, eine Reduzierung der Reibung um etwa 20% ermöglichte, was eine deutliche Verbesserung des Reibungsverhaltens gegenüber dem KST-Versuch ist, ta-C:CuMoN spiegelte mit 11% Verbesserung nahezu das identische Reibungsverhalten aus den KST-Versuchen unter Verwendung des Referenzöls wieder. Bei Verwendung von Mo-additiviertem Öl zeigte sich analog zu den KST-Versuchen keine Verbesserung der Reibung für gegenüber Versuchen mit dem Referenzöl. Für die ta-C:Mo-Schicht, die im KST noch die größte Verbesserung des Reibungsverhaltens erzielte, war zu beobachten, dass sich im 2ST für keine Schicht-Schmierstoff-Kombination ein vorteilhaftes Reibungsverhalten festgestellt werden konnte. Die Diskrepanz in diesem Verhalten kann auf die relativ niedrige Anzahl der Versuche zurückgeführt werden.

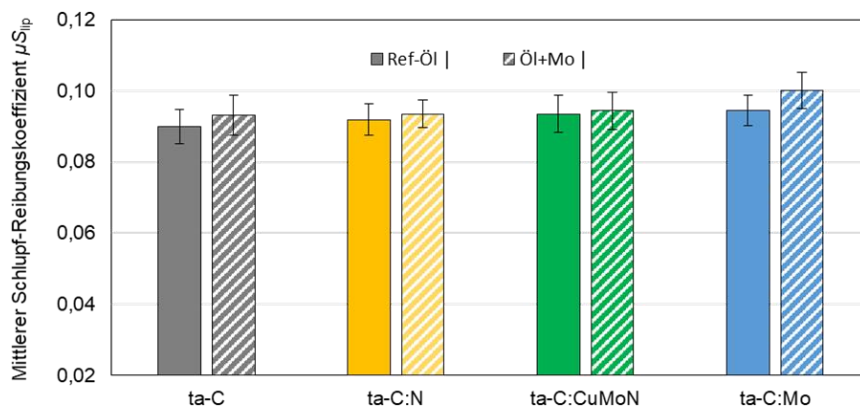


Abbildung 78: Mittlere Reibungskoeffizienten μ_{Slip} nach den 2ST-Versuchen gemittelt über die durchlaufenen Schlupfbereiche von -20% bis +20% Schlupf.

In Abbildung 78 sind die Reibungskoeffizienten der zweiten Phase der 2ST-Versuche der jeweiligen Schicht-Schmierstoff-Kombinationen dargestellt. Durch dieses Vorgehen konnte für den zweiten Teil des 2ST-Versuchs zum einen festgestellt werden, dass für Bereiche hohen Schlupfs ein insgesamt höheres Reibungsniveau vorlag. Zum anderen, dass die Verbesserungen des Reibungsverhaltens, die im einfachen Gleitkontakt bzw. im sehr niedrigen Schlupfkontakt / nahe Rollen beobachtet wurden, nicht mehr auszumachen waren. Die Unterschiede des Reibungsverhaltens innerhalb dieses Versuchsabschnittes lagen für die Schichtsysteme im Rahmen der Standardabweichung und können deshalb als für das betrachtete Belastungskollektiv als nicht unterscheidbar angesehen werden. Da keine Unterschiede im Reibungsverhalten festgestellt wurden, liegt die Bewertung der tribologischen Eignung der Schichten für hochbelastete Kontakte mit Schlupf in der Betrachtung des Verschleißverhaltens der Kontaktkörperpaarung. In Abbildung 79 sind exemplarische Aufnahmen der Probekörper und die korrespondierenden mittleren Verschleißraten dargestellt. Analog zu den KST-Proben ist die Verschleißrate planimetrisch bestimmt worden.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

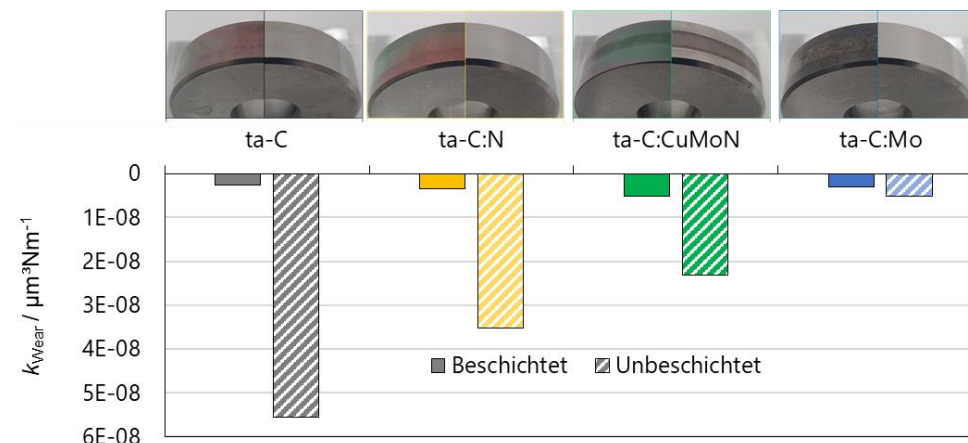


Abbildung 79: Gemittelte Verschleißraten der Grund- und Gegenkörper nach dem 2ST Versuch mit repräsentativen Aufnahmen der verwendeten Probekörper.

Für die beschichteten Proben war wiederum nur ein vernachlässigbar sehr geringer Verschleiß festgestellt worden. Die ta-C:N Schicht zeigte, trotz der geänderten Belastungsart kein gravierendes Verhalten im Verschleiß, sodass eine klare Korrelation zwischen Verschleißraten und den mechanischen Eigenschaften hergestellt werden konnte. Mit einer Abnahme der Schichthärte konnte wiederum eine Verschleißminderung an den unbeschichteten zylindrischen Gegenkörpern beobachtet werden. Der beschichtete ballige Körper wirkte in diesem Fall für weichere Schichten weniger abrasiv gegenüber den unbeschichteten zylindrischen Oberflächen. Mit Hilfe der tribologischen Prüfkette, konnte entlang der KST- und 2ST-Versuche ein insgesamt verbessertes tribologisches Verhalten dotierter Schichtsysteme gegenüber der undotierten ta-C-Schicht dargestellt werden.

1.4.3.4 Tribologie (Schaeffler /FAU)

Im Rahmen des Projektes galt es geeignete Software-Werkzeuge zur zielgerichteten Auswertung anfallender analytischer Daten zu schaffen. Dieses Arbeitspaket „TribOntology“ hatte daher die Entwicklung einer Domänenontologie, die als Grundlage zur semantischen Speicherung und Suche verknüpfter Daten und Ergebnisse dient, zum Ziel (z.B. Oberflächeninformationen, Simulationsergebnisse, Berichten, etc.).

Die Vorhersehbarkeit von Reibung und Verschleiß auf Basis von Materialkennwerten und Simulationen ist kompliziert und schwierig, da unterschiedlichste Effekte auf den unterschiedlichsten Längenskalen das Verhalten eines tribologischen Kontakts beeinflussen, die Datenbasis oft klein ist und durch die Expertise des Konstrukteurs/Ingenieurs erweitert werden muss. Zur Unterstützung des Experten bei der Auswahl der richtigen Materialien für ein Tribosystem ist eine große, verlässliche und nachvollziehbare Datenbasis für die Anwendung von Methoden zur Erkennung von Trends unabdingbar.

Dazu gilt es, eine Vielzahl von Größen und Zusammenhängen aus unterschiedlichen werkstoffwissenschaftlichen Untersuchungen zu bestimmen, zu analysieren und in der Zusammenschau zu bewerten. Derartige Untersuchungen sind beispielsweise die simulative oder auf Experimenten basierende Bestimmung von Werten mechanischer, physikalischer oder chemischer Eigenschaften („Wie verhält sich eine Oberfläche aus Material X unter Rotationseinwirkung mit einem Material Y?“). Das im Arbeitspaket TribOntology betrachtete Umfeld, stellt sich daher wie in Abbildung 80 gezeigt, dar.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

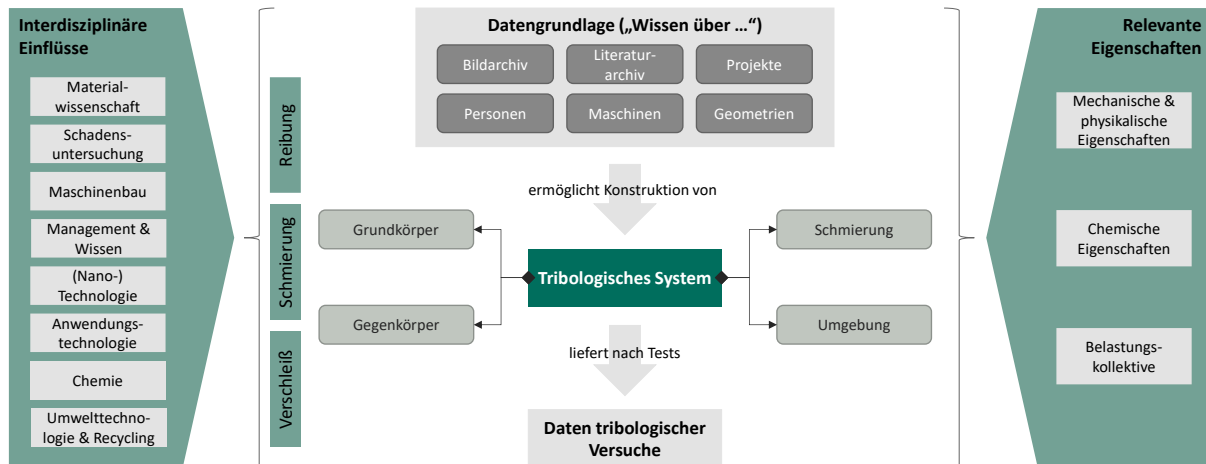


Abbildung 80: Anwendungsumfeld TribOntology

Die zugehörigen Datenerhebungen erfordern nicht nur unterschiedliche hochspezialisierte Software-Werkzeuge, z.B. für Simulationen, mit dedizierten und heterogenen Datenformaten. Auch die nachfolgende Integration und Zusammenschau benötigt heute einen hohen manuellen und fehleranfälligen Aufwand, der nur von Experten bewältigt werden kann. Es gilt daher, diese Datenintegration und -interpretation zu automatisieren und auf Grundlage der Bedeutungen der Daten eine einfachere wissensbasierte Nutzung für analytische Zwecke zu ermöglichen. Dies soll den gesamten Arbeitsprozess durch damit realisierbare neuartige Software-Werkzeuge, die die Analytik auf integrativer und kognitiver Ebene unterstützen, erleichtern. Zudem soll damit eine kontinuierliche Anreicherung des tribologischen Wissens und Wiederverwendung von erzielten Erkenntnissen ermöglicht werden.

Zielsetzung

Leitbild des Arbeitspakets war daher die Entwicklung eines tribologischen Expertensystems für eine automatisierbare wissensbasierte Analytik der Tests tribologischer Systeme und ihrer Ergebnismengen (siehe Abbildung 81). Zielanwender sind dabei Experten aus dem Fachbereich Tribologie selbst.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

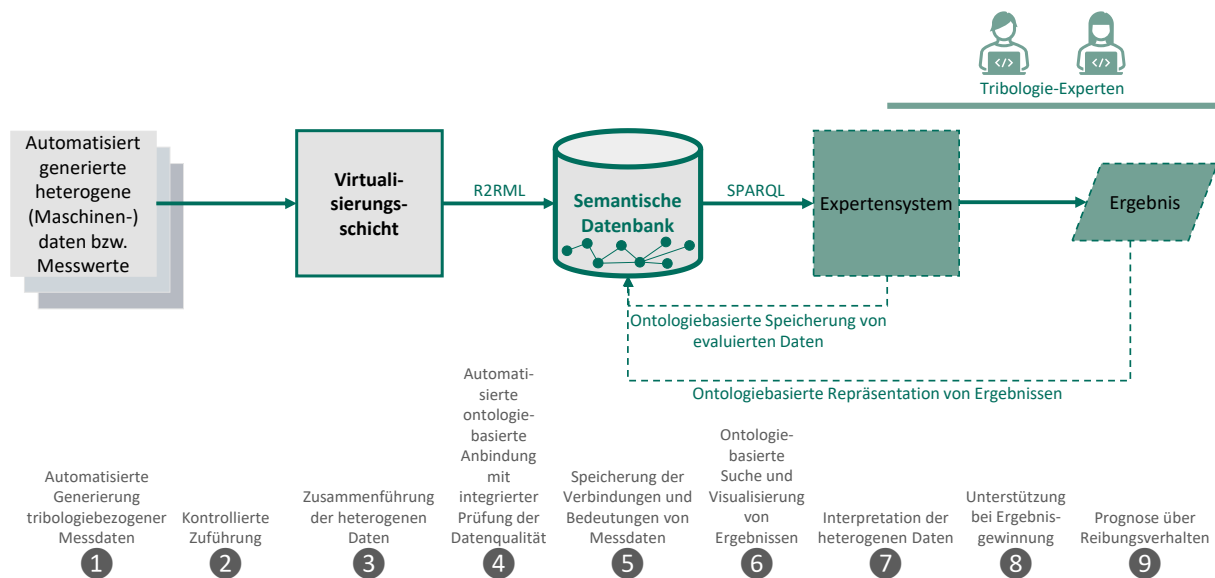


Abbildung 81: Datenstrecke von den Ausgangsdaten bis zu den Ergebnissen basierend auf einem Expertensystem

Es galt daher, einerseits ein operationalisierbares semantisches Informationsmodell (Ontologie) für die Domäne Tribologie zu entwickeln. Diese Ontologie, genannt TribOntology, modelliert deklarativ die spezifischen Begrifflichkeiten („Was ist ein Tribosystem?“, „Welche Attribute sind zu berücksichtigen?“) und Zusammenhänge („Welche Ergebnisse lieferte welcher Versuch?“) in einer semantischen Datenbank (Wissensbasis) (Abschnitt 5 in der Grafik). Damit bildet diese die grundsätzliche architektonische Grundlage für wissensbasierte Applikationen, wie eben Expertensysteme. Zudem ermöglicht eine Ontologie die Erkennung und Ableitung von Wissensinhalten durch automatisiertes Schlussfolgern (Reasoning). Im Projekt wurden dazu verschiedene anwendertypische Kompetenzfragen und -Antworten festgelegt; von einfachen Attribut- bis hin zu komplexen, logikbasierten Strukturabfragen, die die Wissensbasis unterstützen soll. Beispiele sind etwa:

- (einfache Frage) „Was ist die Bezeichnung des Tribosystems X?“
- (komplexe Frage) „Welche Schadensmechanismen haben die Merkmale X1, ..., Xn gemein?“

Mittels einer ebenfalls zu entwickelnden Virtualisierungsschicht (Abschnitt 3) galt es dann die Verbindung zu den heterogenen, z.B. im PDF-, Excel- oder Text-Format vorliegenden, Quell- oder Messdaten aus den Teildisziplinen bzw. Datenquellen herzustellen und damit einen vollwertigen Wissensgraph (Knowledge Graph) zu generieren. Die Stärke der Ausrichtung der Abschnitte 1 bis 9 der Datenstrecke an TribOntology ist in der obigen Grafik in grün angedeutet. Die Bedienung dieser Datenstrecke ist eine zentrale Voraussetzung für nachfolgende wissensbasierte Anwendungen.

Bei der Entwicklung wurden zudem folgende Anforderungen zugrunde gelegt:

- Die Systemarchitektur soll eine automatische Integration und Interpretation neuer Daten aus den Quellsystemen sowie das Hinzufügen neuer Quellsysteme erlauben.
- Die Ontologie soll domänenübliche Begriffe und Strukturen abbilden und darüber die heterogene Datenlandschaft effizient zugänglich machen, so dass sich fachspezifische Anwender leicht zurechtfinden.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

- Vorhandene Report-Strukturen sollen genutzt und maschineninterpretierbar gemacht werden.
- Es sollen konsequent offene Standards, auch zur Unterstützung der Interoperabilität mit anderen (Schaeffler-)Fachbereichen/-Domänen, zum Einsatz kommen.

Die Arbeiten zu TribOntology resultierten in einer informationsdurchgängigen Bereitstellung von verschiedenartigen tribologischen Daten unterschiedlicher Teildomänen in einer wissensbasierten, adaptiven Form mit wohldefinierten Begrifflichkeiten. Diese erlaubt die kontextbasierte Abfrage bzw. Durchsuchbarkeit von Ergebnisdaten von Experimenten, Simulationen und Tests zur leichteren Identifikation analytisch relevanter Merkmale. Die dazu aufgestellten Kompetenzfragen konnten alle beantwortet und die Anforderungen an das semantische Informationsmodell erfüllt werden. Dabei kann die ursprüngliche Arbeitsgrundlage, d.h. die Arbeitsprozesse und Software-Werkzeuge, unangetastet bleiben und es werden somit keine Eingriffe in bestehende Arbeitskulturen nötig. Lediglich eine kontrollierte Zusammenführung der zu durchsuchenden Ausgangsdaten ist für die automatisierte Datenstrecke erforderlich.

1.5 Simulation Antriebsstrang (TP6000)

In PROMETHEUS koordinierte die AVL das Teilprojekt 6000, Simulation Antriebsstrang. TP6000 stellt die Schnittstelle zwischen TP2000 (Entwicklung und Validierung von Tribologiemodellen), TP5000 (Auslegung und Beschichtungsentwicklung der Systemkomponenten) sowie TP7000 (Funktions- und Effizienz-nachweise) dar. AVL entwickelte im TP6000 verbesserte Reibungs- und Verschleißmodelle für den Kolben-Liner-Kontakt, Kolbenring-Liner-Kontakt sowie elastohydrodynamische Modelle für Laufsichten. Ein Schwerpunkt der Arbeiten war die Charakterisierung niedrig-viskoser Schmierstoffe für die Simulation und in enger Abstimmung mit TP2000 die Entwicklung eines Mischreibungmodells, welches die Interaktion Schmierstoff-Oberflächenbeschichtung berücksichtigt. In Zusammenarbeit mit TP5000 wurden Simulationsmodelle zu den in TP7000 untersuchten Motoren aufgebaut und auf Basis dieser Modelle numerische Untersuchungen zur Reibungsoptimierung durchgeführt. Zur Optimierung des Gesamtsystems wurde eine Methode zur Integration der detaillierten Reibungssimulation in die Gesamtsystemsimulation entwickelt und validiert.

1.5.1 Ziele und Aufgabenstellung

Wichtiges Arbeitsziel des Teilprojekts der AVL Deutschland GmbH war die Entwicklung bzw. Verbesserung neuer Reibungs- und Verschleißmodelle, um ein besseres Verständnis über den Wirkmechanismus tribologischer Maßnahmen wie z.B. die Viskositätsabsenkung des Schmiermittels oder zur Interaktion Schmierstoff-Oberflächenbeschichtung zu erlangen. Die verbesserten Reibungsmodelle wurden eingesetzt, um Reibungsreduktionsmaßnahmen an den im Projekt definierten Versuchsmotoren zu untersuchen. Die Messergebnisse am Versuchsmotor dienen zur Verifikation und Validierung der Modelle und der damit verbundenen Vorhersagekraft im Entwicklungsprozess. Eine Extrapolation der simulierten Zyklusverbräuche auf eine mögliche gesamte CO₂- Reduktion ist Teil des Projekts.

1.5.2 Verwendung der Zuwendung

Die Zuwendung diente größtenteils zur Finanzierung der im Projekt arbeitenden Experten. Ein geringer Teil wurde für Reisekosten verwendet.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

1.5.3 Erzielte Ergebnisse

Aufgrund der Vielzahl an Projektergebnissen und untersuchten Varianten tribologischer Systeme werden für die im Projekt entwickelte Methodik exemplarisch die Ergebnisse mit dem größten Reibungsreduktionspotential dargestellt. Diese werden im Folgenden für die einzelnen im Forschungsantrag beschriebenen Hauptarbeitspakete (HAP) untergliedert und dargestellt. Im Forschungsvorhaben wurden die in der Simulationssoftware AVL EXCITE™ innerhalb der elasto-hydrodynamischen Kontakte enthaltenen Reibungsmodelle verbessert und eingesetzt, um die Reibung auf Komponentenebene und in den einzelnen tribologischen Kontakten des Verbrennungsmotors im Detail zu analysieren und quantifizieren zu können. Die Reibungsmodelle wurden durch Komponentenversuche parametrisiert und dann in der Motorsimulation verwendet und anhand von Messungen validiert. Dadurch ist es möglich den Einfluss der Reibungsreduktionsmaßnahmen innerhalb der einzelnen tribologischen Kontakte des Verbrennungsmotors gezielt bewerten zu können und diese im Detail zu analysieren. Der Hauptfokus lag dabei auf der Kolbengruppe, da diese einen sehr beträchtlichen Anteil an der motorischen Gesamtreibung aufweist und damit erhebliche Potentiale zur Reibungsreduktion bietet. Weiterhin wurde eine Methode zur Integration der detaillierten Reibungssimulation in die Gesamtfahrzeugsimulation entwickelt, um die Kraftstoffverbrauchsreduktionspotentiale einzelner Reibungsreduktionsmaßnahmen bewerten zu können. Innerhalb des Projektes konnte eine längenskalenübergreifende Simulationskette dargestellt werden, um Reibungsreduktionspotentiale zu identifizieren sowie motorische Reibung und Kraftstoffverbrauch zu reduzieren.

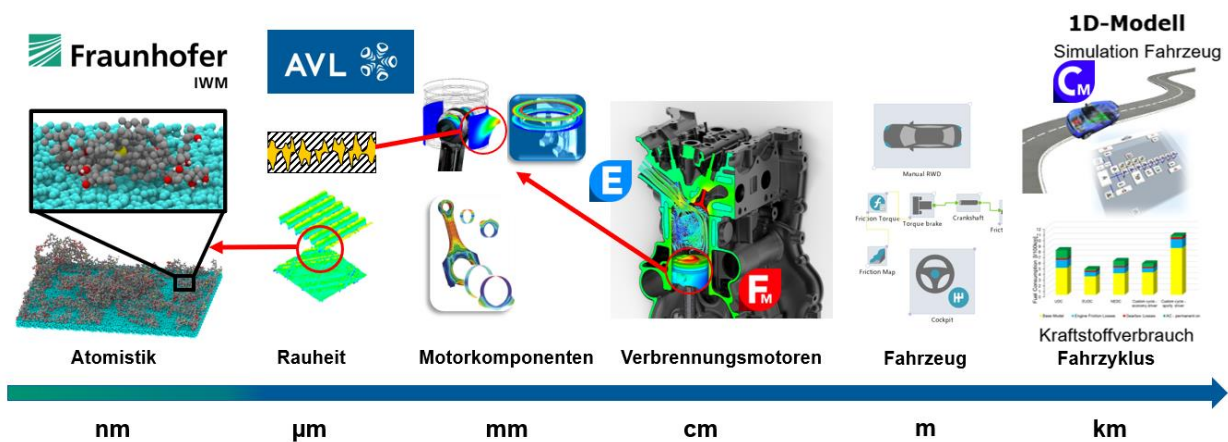


Abbildung 82: Skalenübergreifende Simulation zur Reduktion der Reibung und des Kraftstoffverbrauchs

1.5.3.1 HAP 6010 Entwicklung verbesserter Reibmodelle

In Arbeitspaket HAP 6010 wurden verbesserte Reibungsmodelle in AVL EXCITE™ implementiert, die aus den Anforderungen neuer funktioneller Oberflächen und Schmierstoffe abgeleitet werden. Dabei lag der Fokus auf einer im industriellen Anwendungsbereich effizient einsetzbaren praxistauglichen Simulationsmethodik. Die Reibungsmodelle wurden anhand von Tribometermessungen am Realhubtribometer vom SIZ parametrisiert und validiert. Die parametrisierten Modelle wurden bei der Simulation des Einzylinder- und des Vollmotors verwendet und deren Übertragbarkeit untersucht und validiert. Innerhalb des Projektes konnte die entwickelte Methodik an einer Vielzahl verschiedenster Komponenten und Schmierstoffkombinationen erfolgreich validiert werden.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

1.5.3.1.1 Verbesserung des Reibungsmodells für den Kolben-Zylinder-Kontakt

In der MKS-/EHD-Simulationssoftware AVL EXCITE™ wird bislang für den elastischen Kolben-Zylinder-Kontakt (EPIL Joint) üblicherweise eine für die gesamte Laufbuchse mittlere repräsentative Oberflächentopografie für den Zylinderliner verwendet. Aufgrund unterschiedlicher Oberflächen des Liners ist es jedoch notwendig mehrere verschiedene Oberflächenpaarungen lokal über der Höhe und dem Umfang der Laufbuchse in Form von verschiedenen Oberflächendefinitionen abbilden zu können. Unterschiedliche Materialdaten, Oberflächen- und Reibungsmodellendaten über dem Umfang und der Höhe der Laufbuchse können definiert werden. Dadurch ist es möglich, den lokalen Einfluss unterschiedlicher Rauheiten auf den Festkörperkontakt, die Flussfaktoren, die Reibung und den Verschleiß im Simulationsmodell realitätsgetreu abzubilden und damit die Ergebnisqualität entscheidend zu verbessern. Hierfür wurde innerhalb von AVL EXCITE™ ein lokales Modell für alle EHD-Kontakte wie den Kolben-Zylinder-Kontakt, die Radial- und Axiallager entwickelt und in die Simulationssoftware integriert.

1.5.3.1.2 Validierungsmodell Kolbenring-Liner

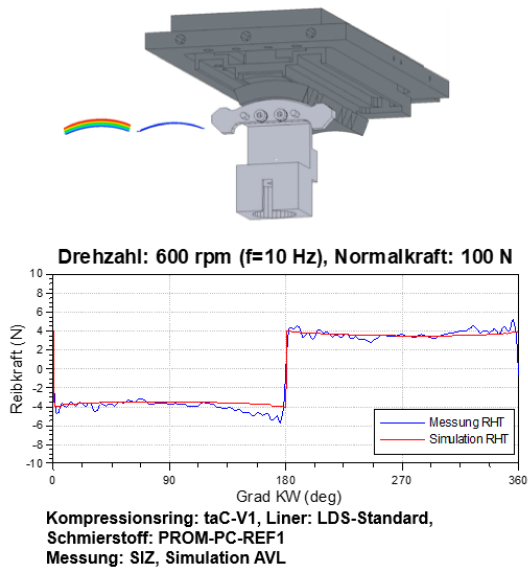
Zur Parametrierung der Reibmodelle für die Simulation der Kolbengruppe des Einzylinder-Demonstratormotors des IAD der TU-Dresden und des Vollmotors wurden die Realhubtribometerversuche für den Kolbenring-Liner-Kontakt am SIZ versuchsbegleitend mit AVL EXCITE™ anhand eines aufgebauten Modells simuliert. Dabei wurde sowohl ein Simulationsmodell für die BMW als auch MAN Komponenten aufgebaut. Die Parametrierung und Validierung der elastohydrodynamischen Simulationsmodelle erfolgte anhand von durch das SIZ zur Verfügung gestellten Geometrie und Versuchsdaten: 3D-Oberflächendaten für Kolbenring und Laufbuchse, Kolbenringkontur und Randbedingungs- und Messdaten. Ein Abgleich der Reibkräfte mit Messdaten zeigt für die untersuchte Vielzahl an tribologischen Systemen und Betriebspunkten stets eine sehr gute Übereinstimmung der Messung mit der Simulation. In Abbildung 83 werden die Simulationsmodelle und deren Reibkrafteergebnisse im Vergleich zur Messung sowohl für die BMW als auch die MAN Komponentenkonfiguration für jeweils ein tribologisches System und einen Betriebspunkt exemplarisch dargestellt.

Durch den virtuellen Prüfstand ist es möglich, den tribologischen Kolbenring-Liner-Kontakt genauer analysieren zu können und das in der Messung beobachtete Verhalten verstehen und interpretieren zu können. Eine Vielzahl an Betriebspunkten am validierten tribologischen System kann so sehr wirtschaftlich untersucht werden, um ein deutlich breiteres Kennfeld abdecken zu können. Darüber hinaus kann auch ein sehr großes Spektrum an Parametern wie beispielsweise Änderungen an den Kolbenringkonturen, an den Oberflächenrauheiten, den Schmierstoffdaten, Schmierstoffverhältnissen oder auch geometrische Änderung an der Oberfläche hinsichtlich der Auswirkung auf das Reibungsverhalten untersucht werden.

Die anhand der realen Messdaten validierten Reibungsmodelle des Realhubtribometers wurden anschließend vom Realhubtribometer auf das Simulationsmodell des Einzylindermotors des IAD der TU Dresden übertragen und wiederum anhand von Messungen validiert. Auch die Übertragbarkeit, der auf dem Realhubtribometer nachgewiesenen Reibungsvorteile werden über den Einzylindermotor auf den Vollmotor in HAP 6040 und HAP 6050 simulativ analysiert und anhand validierter Modelle nachgewiesen.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Simulationsmodell BMW Komponenten



Simulationsmodell MAN Komponenten

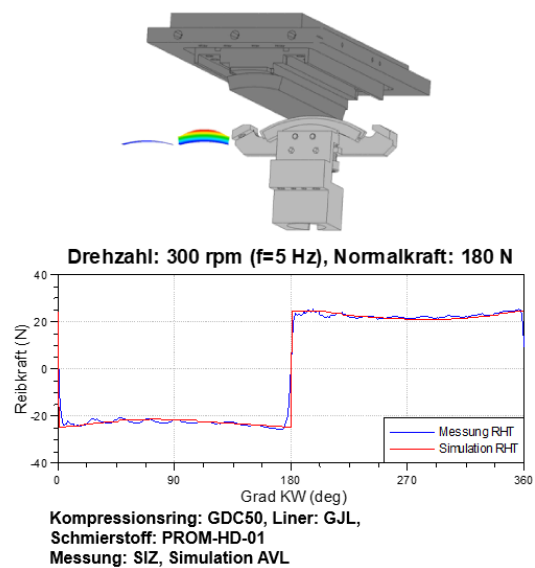


Abbildung 83: Realhubtribometer Simulationsmodelle und Validierung

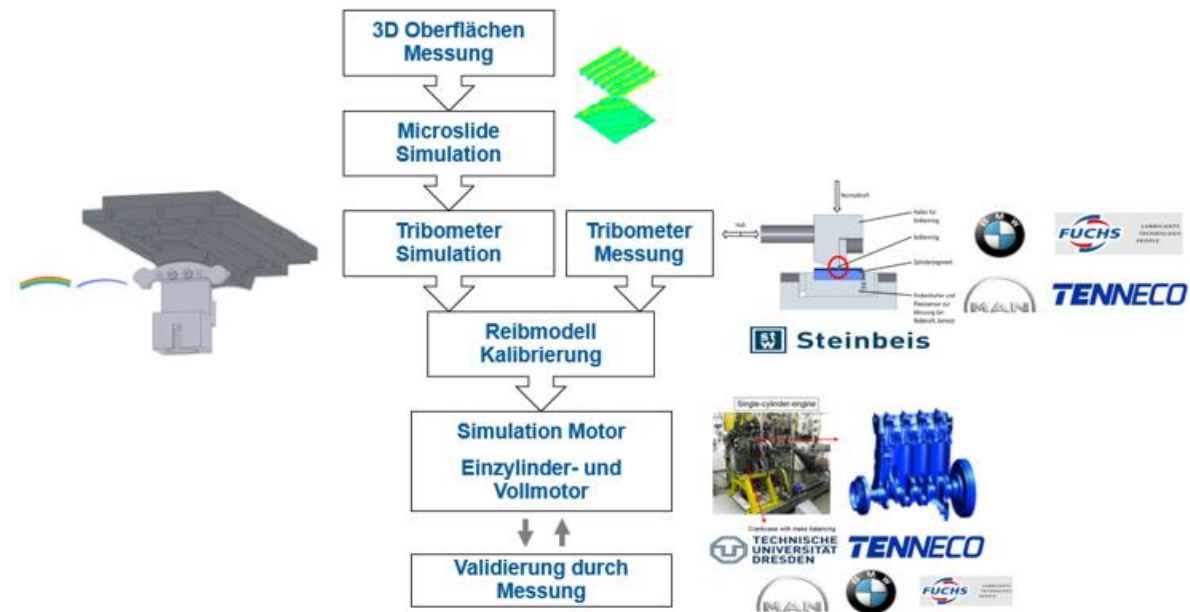


Abbildung 84: Vorgehensweise Reibmodellkalibrierung Kolbenring-Liner-Kontakt

1.5.3.2 HAP 6020 Berechnungsmethoden zur Schmieröl-Oberflächen-Interaktion

1.5.3.2.1 Integration der Schmierstoffdaten für die Simulation

Die vom Projektpartner FUCHS zur Verfügung gestellten Schmierstoffparameter wurden in die AVL EXCITE™ Öldatenbank für die im Forschungsvorhaben verwendeten Simulationsmodelle integriert. Anhand der Validierung der Simulationsmodelle mit den Messdaten werden notwendige Arbeitsumfänge im Arbeitspaket definiert und umgesetzt. Ziel ist eine rechenzeiteffiziente und damit in der industriellen Anwendung praxistaugliche Lösung zur Integration der wesentlichen Effekte der Schmieröl-Oberflächen-Interaktion.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

1.5.3.2.2 3D-Oberflächen der Bauteile

Für die Simulation des Realhubtribometers in HAP 6010, des Einzylindermotors in HAP 6040 und den Vollmotor in HAP 6050 ist es notwendig den eingelaufenen Zustand der Bauteile an den tribologischen Kontaktstellen, der während der Reibungsmessung vorliegt zu berücksichtigen. Somit wurden für alle untersuchten tribologischen Systeme sowohl die Oberflächenrauheiten der Tribopaarungen Kolben und Zylinderlaufbahn sowie Kolbenring und Zylinderlaufbahn als auch die Konturen der Kolbenringe der gelaufenen Bauteile durch das SIZ vermessen und zur Verfügung gestellt. Dabei vermisst das SIZ die notwendigen Topografiedaten der in den Realhubtribometer- und Einzylinderprüfstandsmessungen eingelaufenen Bauteile. Diese wurden in den entsprechenden Simulationsmodellen als Randbedingung berücksichtigt. Hierfür wurden mit den vermessenen Oberflächentopografien in der AVL Software Microslide Simulationen für die jeweilige Paarung des einzelnen tribologischen Systems durchgeführt. Dabei werden Kennfelder ermittelt, die den Rauheitseinfluss auf die Fluidströmung in Form von Druck- und Scherflussfaktoren in Abhängigkeit der Spalthöhe beschreiben. Des Weiteren wird auch eine Kontaktmechaniksimulation der rauen Oberflächen durchgeführt um die Kontaktsteifigkeiten, Kontaktflächenanteile und den Kontaktdruck als Kennfeld in Abhängigkeit der Spaltweite zu ermitteln. Die für die jeweiligen eingelaufenen Komponenten berechneten Rauheitskennfelder werden im entsprechenden AVL EXCITE™ Simulationsmodell des Realhubtribometers, Einzylindermotors oder Vollmotors verwendet, um den Rauheitseinfluss auf die Reibung im tribologischen Kontakt abzubilden.

1.5.3.3 HAP 6030 Numerische Untersuchungen zum Kraftstoffeintrag in das Schmieröl

Die grundlegende Methodenentwicklung der Simulation zum Kraftstoffeintrag wurde durchgeführt und abgeschlossen. Weiterhin wurde ein Demonstrator-Modell aufgebaut und an diesem die entwickelte Methodik untersucht. Die Übertragung auf Motormodelle im Forschungsprojekt wurde im weiteren Verlauf zu Gunsten anderer gesetzter Schwerpunktthemen der Projektpartner nicht detailliert weiterverfolgt.

1.5.3.4 HAP 6040 Numerische Untersuchungen und Validierung am Einzylinder Demonstrator-Motor (TUD/BMW)

Für den Einzylindermotor des IAD der TU Dresden wurde anhand der zur Verfügung gestellten Daten der Projektpartner: TU Dresden, BMW, Tenneco, FUCHS und dem Fraunhofer IWS Simulationsmodelle zur Berechnung der Kolben- und Kolbenringdynamik erstellt. Von allen relevanten Komponenten wurde jeweils ein FEM-Modell erstellt und zur Verwendung in AVL EXCITE™ entsprechend kondensiert. Alle Komponenten werden als flexible Strukturen innerhalb der dynamischen Berechnung berücksichtigt und mit nicht-linearen doppelseitigen EHD-Kontaktstellen zur Modellierung der tribologischen Kontakte verbunden. Das erstellte Simulationsmodell wurde anhand der zur Verfügung gestellten Daten parametrisiert. Die gelieferten Randbedingungsdaten und Parameter haben dabei im Allgemeinen einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse. Das Modell bildet dabei den realen Prüfstands Aufbau ab und wurde so aufgebaut, dass das Pleuellager, die Pleuellagerbolzenlagerung sowie der Pleuellagerbolzen-Zylinderkontakt und die Pleuellagerbolzenringe abgebildet werden, siehe Abbildung 85.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

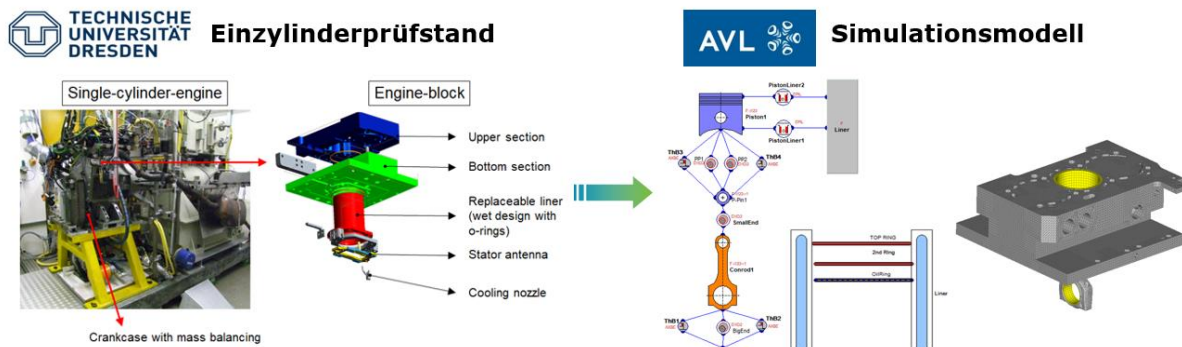


Abbildung 85: Simulationsmodell des Einzylindermotors des IAD der TU Dresden

Die Validierung des Simulationsmodells erfolgte anhand der gemessenen Gesamtreibung der Kolbengruppe für die Betriebspunkte. Die am Prüfstand gemessenen Reibkräfte sind dabei die Summe aus den Reibkräften, die am Kolben und den Kolbenringen anfallen. Durch die Simulation ist die lokale und zeitlich aufgelöste Darstellung der in den einzelnen tribologischen Kontakten auftretenden Reibkräfte und Reibungsverluste möglich. Somit können am virtuellen Prüfstand die physikalischen Vorgänge in den einzelnen tribologischen Kontakten aufgelöst dargestellt und interpretiert werden, um verstehen zu können bei welcher Komponente die entsprechenden Reibungsanteile entstehen und durch welche Maßnahmen sich diese verringern lassen. In der Simulation ist es möglich in den mischreibungsbehafteten tribologischen Kontakten die hydrodynamischen Reibungsanteile und Kontaktreibungsanteile voneinander getrennt lokal und zeitlich aufgelöst zu betrachten. Diese beeinflussen das grundsätzliche Reibungsverhalten maßgeblich. Zudem ist es möglich sehr wirtschaftlich ein sehr großes Spektrum an Designparametern wie beispielsweise Änderungen an den Kolbenringkonturen, den Oberflächenrauheiten oder -beschichtungen, den Schmierstoffdaten oder auch geometrische Änderung an der Oberfläche wie Strukturierungen hinsichtlich der Auswirkung auf das Reibungsverhalten zu untersuchen.

1.5.3.4.1 Simulation von Schmierstoffvarianten

Für den Einzylindermotorversuch wurde neben des Referenzschmierstoffs PROM-PC-03 (0W-12) ein PROM-PC-REF1 (0W20) simulativ untersucht, um die Reibungsanteile an der Gesamtreibung der Kolbengruppe aufzulösen und die tribologischen Einzelkontakte der Kolbengruppe im Detail zu analysieren, um deren Reibungsreduktionspotential über dem relevanten Betriebsbereich aufzuzeigen. Alle relevanten Betriebspunkte wurden für die beiden Varianten im Detail simulativ untersucht und die über alle vier Takte anfallende prozentuale Reibungsreduktion in den tribologischen Kontaktstellen der Kolbengruppe über alle Betriebspunkte dargestellt, siehe Abbildung 86. Exemplarisch wird für einen Betriebspunkt die integrale Reibarbeit über alle vier Takte für beide Schmierstoffvarianten im Vergleich dargestellt. Grundsätzlich zeigt die Referenz mit dem Schmierstoff PROM-PC-03 aufgrund der abgesenkten Viskosität gegenüber PROM-PC-REF1 Reibungsvorteile. Diese sind auf den Bereich der hydrodynamischen Reibung aufgrund der niedrigeren Viskosität des Schmierstoffes zurückzuführen. Die Kontaktreibarbeit steigt etwas an, da die Tragfähigkeit des Schmierfilms abnimmt. Deshalb nehmen die Reibungsvorteile tendenziell mit steigender Drehzahl und sinkender Last aufgrund ansteigendem Hydrodynamikanteil an der Gesamtreibung zu. Die Beurteilung des Verschleißes an den Komponenten und deren Einfluss auf die Motorlebensdauer ist nicht Gegenstand des Forschungsvorhabens, ist jedoch durch Langzeitmotorversuche abzusichern.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

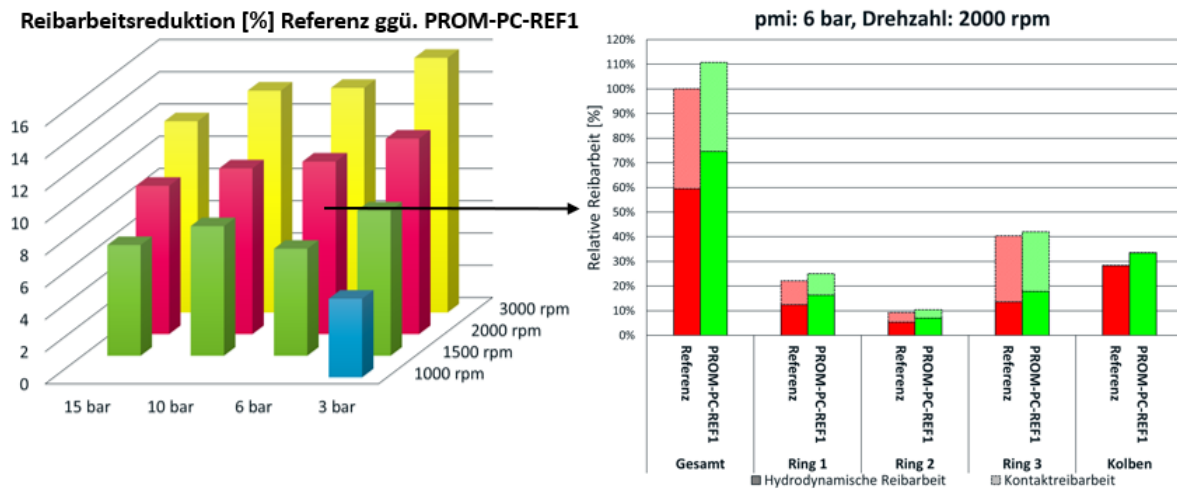


Abbildung 86: Simulation der Schmierstoffvarianten im Vergleich

1.5.3.4.2 Simulation von Toppingvarianten

Für die Untersuchung des Reibungsreduktionspotentials bei der Verwendung von ta-C Schichtsystemen am ersten Kolbenring, dem sogenannten Topping wurden neben der Referenz die Varianten ta-C V1 und ta-C V2 simulativ untersucht, um die Reibungsanteile an der Gesamtreibung der Kolbengruppe aufzulösen und das Reibungsreduktionspotential über dem relevanten Betriebsbereich aufzuzeigen. Im Fokus der Einzylinderuntersuchung am IAD der TU-Dresden stand die Variation des Toppinges und dessen Änderung auf die Summenreibkraft der Kolbengruppe im Bezug zur Referenz. Während des Versuchs wurde der 2. und der 3. Kolbenring sowie der Kolben über der Versuchsdauer beibehalten. Im Forschungsprojekt liegt der Fokus gänzlich auf dem Topping, da dieser Reibungsreduktionspotentiale bietet. Jedoch ist der Ölabbstreifring der BMW-Kolbengruppe aufgrund der Simulationsergebnisse ebenfalls in den Fokus von weiteren Reibungsanalysen gerückt und näher untersucht worden. Denn der Ölabbstreifring weist die höchste Vorspannkraft auf und bei den im Projekt relevanten Betriebspunkten sind die Reibungsanteile des Ölabbstreifrings an der Gesamtreibung am größten.

Alle relevanten Betriebspunkte wurden im Detail simulativ untersucht und die über alle vier Takte anfallenden Reibungsanteile der tribologischen Kontaktstellen der Kolbengruppe als integraler Wert dargestellt und für die dargestellten Toppingvarianten verglichen. Mit einer Verringerung der Drehzahl steigt aufgrund einer Verminderung der Hydrodynamik der Kontaktreibungsanteil. Eine Drehzahlerhöhung verringert hingegen den Kontaktreibungsanteil und die hydrodynamische Reibung nimmt zu. Bei höheren Drehzahlen steigt jedoch auch das Gesamtreibungsniveau an. Die ta-C Toppinge zeigen wie auch im Einzylinderversuch gegenüber der Referenz generell eine geringere Reibarbeit. Diese ist zum einen auf die verminderte Kontaktreibung und zum anderen auf eine Reduktion der hydrodynamischen Reibung zurückzuführen. Die Verminderung der hydrodynamischen Reibung ist aufgrund der weniger stark ausgeprägten Veränderung der Kolbenringkontur und Oberflächenrauheit durch Einlauf- und Verschleißvorgänge zurückzuführen. Die hohe Härte der ta-C Schichten führt im Vergleich zu den nitrirten Referenztoppingen zu einem deutlich geringeren Kolbenringverschleiß. Dadurch verändert sich die Kolbenringkontur und die Oberflächenrauheit über der Betriebszeit des Motors nur marginal was wiederum das tribologische Systemverhalten auch im hydrodynamischen Bereich beeinflusst. Dies wirkt sich hierbei positiv in Form einer Verringerung der hydrodynamischen Reibung aus. Insgesamt weist der ta-C V2 Topping über allen Betriebspunkten geringfügig weniger Reibung auf und ist somit etwas vorteilhafter als

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

der ta-C V1 beschichtete Topleing. Beim direkten Vergleich der simulierten Gesamtreiarbeit der Kolben- gruppe des Einzylindermotors im relevanten Betriebsbereich ergibt sich unter Verwendung der ta-C be- schichteten Topleingvarianten gegenüber der Referenzkonfiguration im gesamten relevanten Betriebs- bereich eine Reiarbeitsreduktion, siehe Abbildung 87. Der ta-C V2 beschichtete Topleing zeigt dabei leichte Vorteile gegenüber der ta-C V1 Schicht. Das grundsätzliche Reiarungsverhalten und die Reiarungsvorteile der ta-C Schichten in der Simulation konnte auch im Einzylindermotor erfolgreich validiert und bestätigt werden.

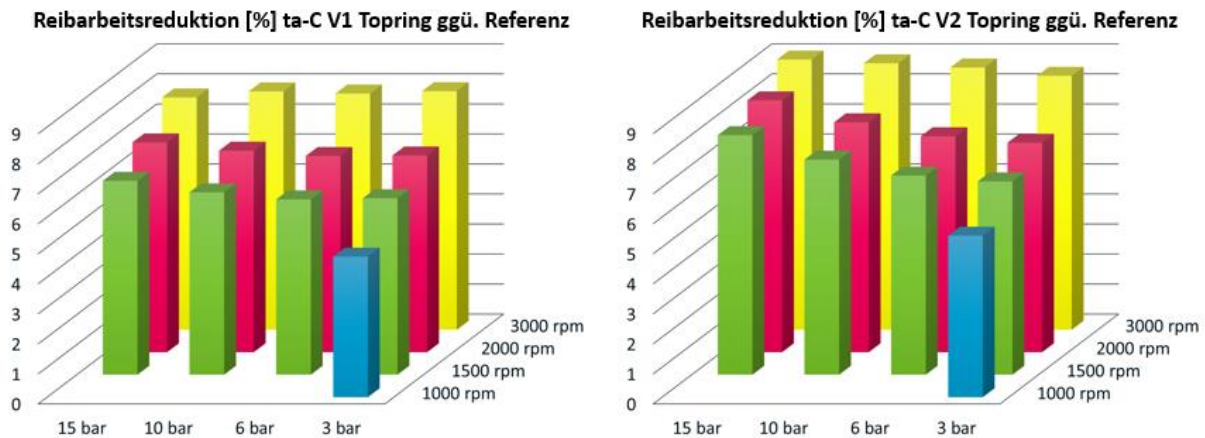


Abbildung 87: Berechnete Reiarbeitsreduktion durch ta-C Beschichtung am Topleing

1.5.3.4.3 Vorspannkraftvariation des Ölabstreifrings für die Referenzkonfiguration

Eine Möglichkeit die Reiarung am Ölabstreifring, der den größten Reiarungsanteil an der Gesamtreiarung der BMW Kolben- gruppe für die untersuchten Betriebspunkte aufweist, zu senken, besteht darin die Vorspannkraft zu reduzieren, um dadurch die Tangentialkraft und somit die Reiarung zu vermindern. Im Folgenden wurde dieses Potential anhand einer gezielten Reduktion der Vorspannkraft rein simulativ bewertet, ohne Berücksichtigung der Auswirkungen auf Ölverbrauch (Blow-By) und möglichen Öltransport in den Brennraum (Reverse Blow-By). Durch die gezielte Reduktion der Vorspannkraft am Ölabstreifring auf 2/3 bzw. 1/2 des Niveaus der Referenz lässt sich die Gesamtreiarbeit der Kolben- gruppe gegenüber der Referenz signifikant reduzieren, siehe Abbildung 88.

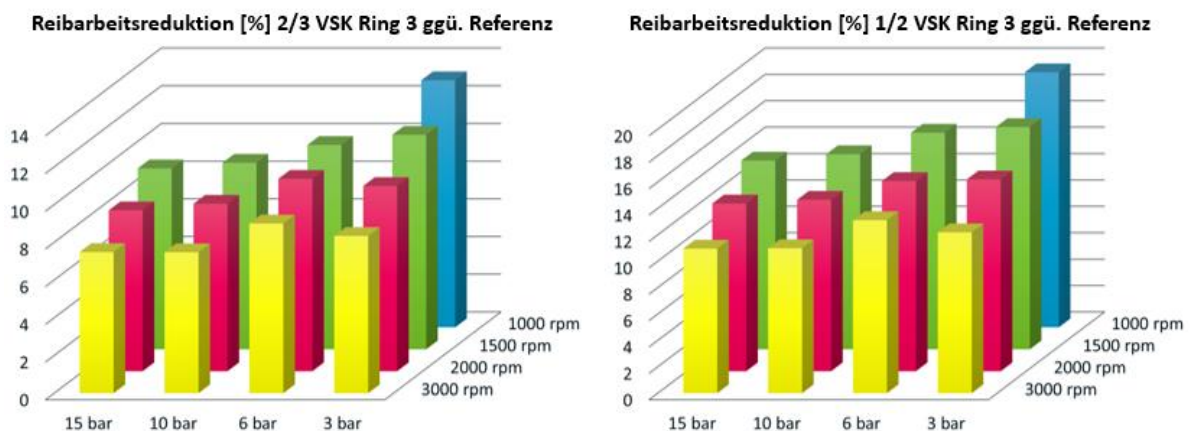


Abbildung 88: Berechnete Reiarbeitsreduktion der Kolben- gruppe für den Betriebsbereich

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

1.5.3.4.4 Simulation DLIP strukturierter ta-C V2 Topping

Um die Reibungsanteile an der Gesamtreibung der Kolbengruppe aufzulösen und die tribologischen Einzelkontakte der Kolbengruppe im Detail zu analysieren sowie deren Reibungsreduktionspotential über dem relevanten Betriebsbereich aufzuzeigen, wurde im Vergleich zum ta-C V2 Topping auch eine Variante des Toppings mit DLIP-Strukturierung untersucht. Die über alle vier Takte anfallenden Reibungsanteile der tribologischen Kontaktstellen der Kolbengruppe wurden als integraler Wert im relativen Bezug zur ta-C V2 Variante dargestellt und verglichen. Bei der Variante ta-C V2 ist der Topping mit ta-C V2 beschichtet und bei der Variante DLIP wurde ein mit ta-C V2 beschichteter Topping zusätzlich mit einer DLIP Strukturierung versehen. Der Reibungsanteil des Ölabbstreifrings ist aufgrund seiner hohen Vorspannkraft (VSK) von 22,1 N an der Gesamtreibung der Kolbengruppe in allen untersuchten Betriebspunkten am höchsten. Desto geringer die Drehzahl ist, umso höher ist der Kontaktreibungsanteil. Mit steigender Drehzahl verringert sich dieser und die hydrodynamische Reibung nimmt zu. Bei höheren Drehzahlen steigt jedoch auch das Gesamtreibungsniveau an. Der DLIP strukturierte ta-C V2 Topping zeigt gegenüber der ta-C V2 beschichteten Toppingvariante einen Reibungsvorteil über alle untersuchten Betriebspunkte hinweg. Die Simulation bestätigt hierbei somit das im Einzylinderversuch bereits beobachtete grundsätzliche Reibungsverhalten und die Reibungsvorteile einer DLIP Strukturierung am Topping.

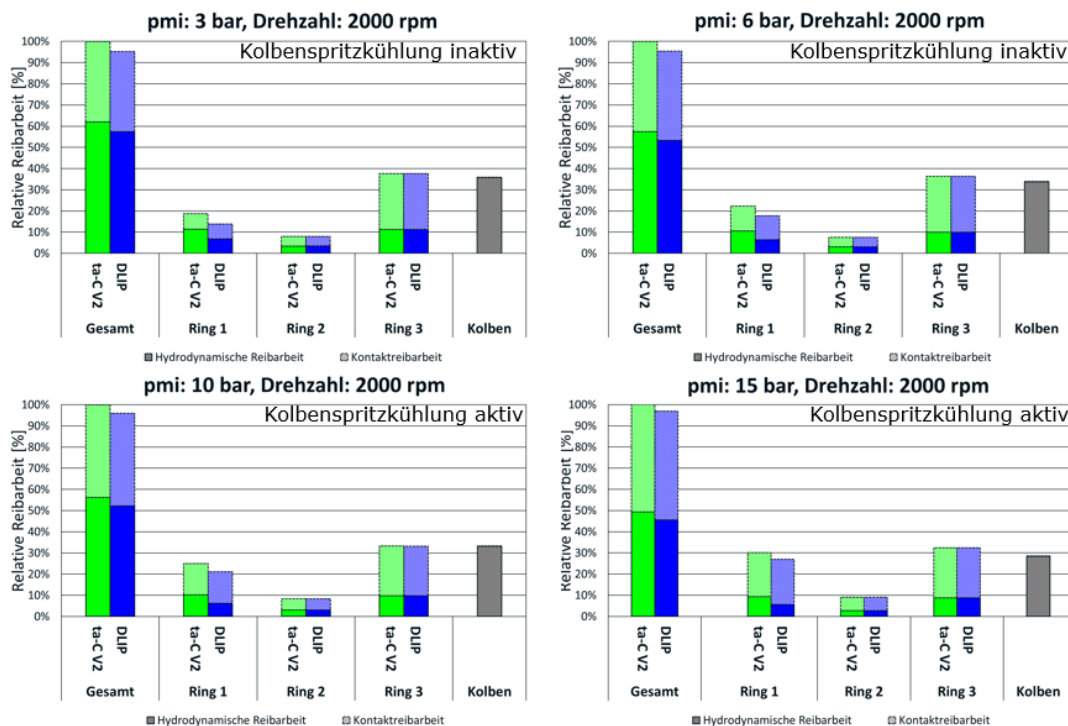
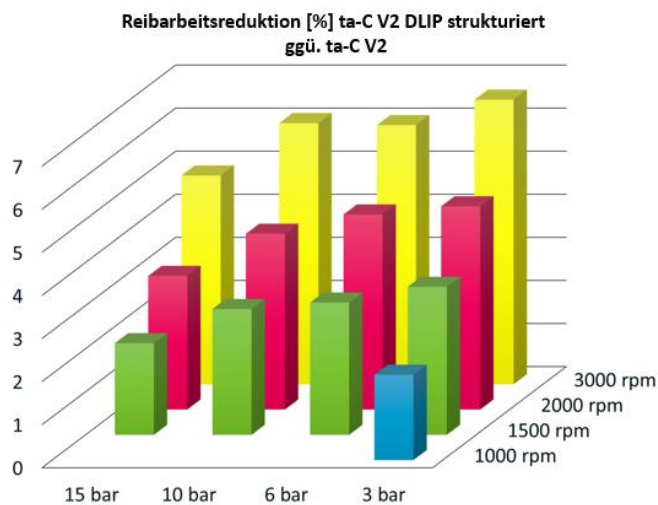


Abbildung 89: Simulation Einzylindermotor Topping Varianten im Vergleich (2000 rpm)

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele



Beim direkten Vergleich der Reibarbeit der Kolbengruppe des Einzylindermotors im relevanten Betriebsbereich ergibt sich bei der Variante DLIP bei der ein ta-C V2 beschichteter Topping zusätzlich DLIP strukturiert wurde gegenüber der ta-C V2 beschichteten Toppingvariante im gesamten relevanten Betriebsbereich eine Reibbarkeitsreduktion, siehe Abbildung 90.

Abbildung 90: Simulation Einzylindermotor Topping ta-C V2 mit DLIP Strukturierung ggü. ta-C V2

1.5.3.5 HAP 6050 Reibungsuntersuchungen am Vollmotor

1.5.3.5.1 Simulationsmodell des BMW-Vollmotors

Ein AVL EXCITE™ Modell wurde anhand der vorliegenden Daten von BMW und Tenneco für den Vierzylindermotor aufgebaut und parametrisiert. Die spezifischen Randbedingungsdaten für die im Zyklusbetrieb relevantesten Betriebspunkte wurden von Tenneco aus der Vollmotormessung zur Verfügung gestellt. Die Simulation wurde für die Toppingvarianten ta-C-V1 und ta-C-V2 durchgeführt. Die Varianten wurden für die Analyse ausgewählt, da sich diese bereits im Einzylindermotor als reibungsoptimal herausgestellt haben. Innerhalb der Variantenuntersuchung wurde der erste Kolbenring, der sogenannte Topping verändert und gegenüber der Referenzkonfiguration durch einen ta-C beschichteten Kolbenring ausgetauscht. Dabei wurden die in der Motormessung von Tenneco relevantesten Betriebspunkte im Fahrzyklus anhand Ihrer Zeitanteile identifiziert und diese durch AVL gezielt simulativ untersucht. Die über alle vier Takte anfallenden relativen Reibbarkeitsanteile der tribologischen Kontaktstellen der Kolbengruppe werden als integraler Wert dargestellt und für die dargestellten Toppingvarianten miteinander verglichen.

Die Oberflächenrauheiten der eingelaufenen Komponenten vom Einzylindermotor wurden in der Simulation des Vollmotors als Randbedingung berücksichtigt. Hierfür werden mit den am Steinbeis SIZ vermessenen Oberflächentopografien der am Einzylindermotor der TU-Dresden gelaufenen Komponenten in der AVL Software Microslide Simulationen für die jeweilige Paarung des einzelnen Tribosystems durchgeführt. Die berechneten Kennfelder werden anschließend im Simulationsmodell für die Kolbengruppe des Vollmotors verwendet, um den Rauheitseinfluss auf die hydrodynamische Reibung und Kontaktreibung im tribologischen Kontakt abzubilden.

Der Reibbarkeitsanteil des Ölabstreifrings ist aufgrund seiner hohen Vorspannkraft (VSK) von 22,1 N an der Gesamtreibung der Kolbengruppe in allen untersuchten Betriebspunkten am höchsten. Eine Drehzahlverringerung erhöht aufgrund der Verringerung der Hydrodynamik den Kontaktreibungsanteil. Mit steigender Drehzahl verringert sich der Kontaktreibungsanteil und die hydrodynamische Reibung nimmt zu. Bei höheren Drehzahlen steigt tendenziell auch das Gesamtreibungsniveau an. Die ta-C Toppinge zeigen gegenüber der Referenz eine geringere relative Reibarbeit. Der ta-C V2 Topping weist dabei die geringste Reibung in allen Betriebspunkten auf, siehe Abbildung 91.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

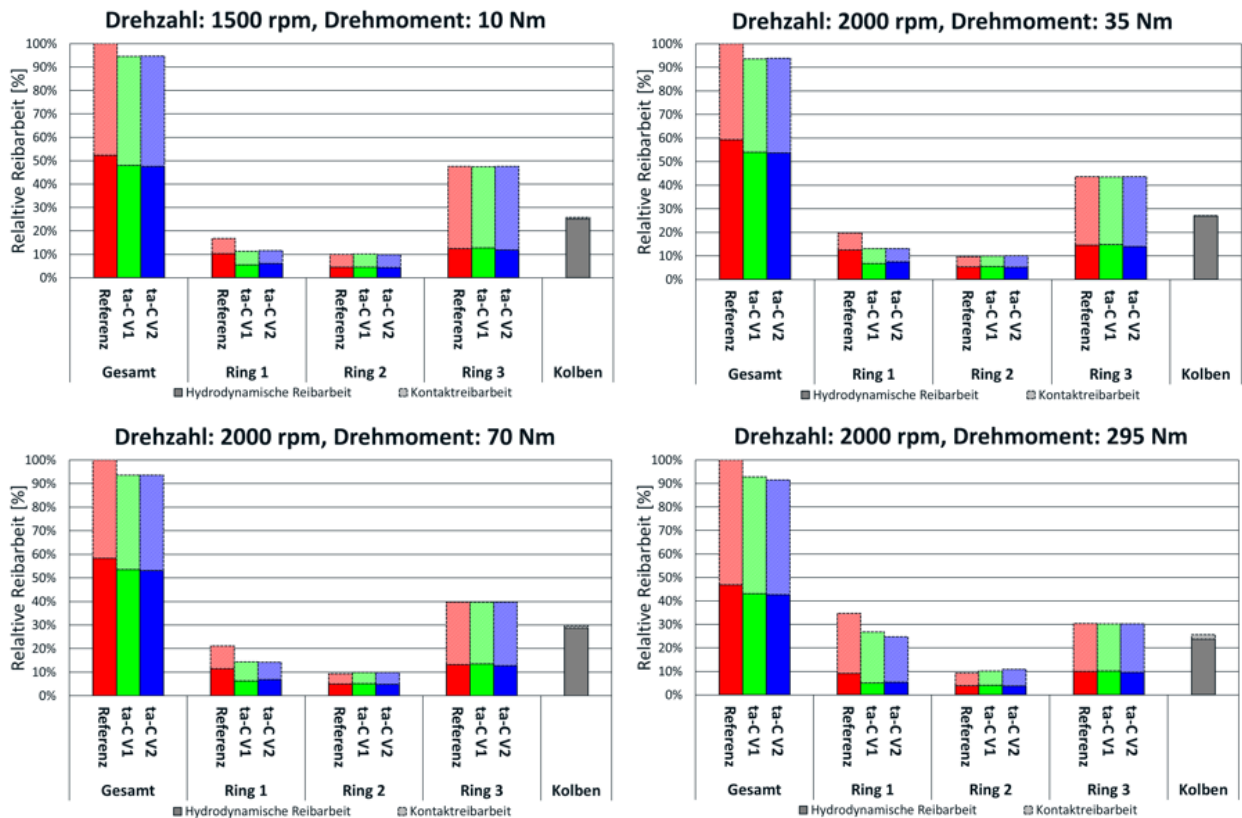


Abbildung 91: Berechnete relative Reibarbeit der Topping Varianten im Vergleich (Betriebspunkte 1)

Der ta-C V2 beschichtete Topping zeigt im Vollmotor wie auch bereits im Einzylindermotor generell leichte Vorteile gegenüber der ta-C V1 Schicht. Des Weiteren konnten die Tendenzen der Simulationsergebnisse auch im Vollmotorversuch für den BMW-Motor bei Tenneco für die ta-C Toppingvarianten bestätigt und die Simulation damit erfolgreich validiert werden. Somit konnte die Übertragbarkeit der auf dem Realhubtribometer gemessenen Reibungsvorteile für die ta-C Toppingvarianten über den Einzylindermotor bis in den Vollmotor nachgewiesen und verifiziert werden.

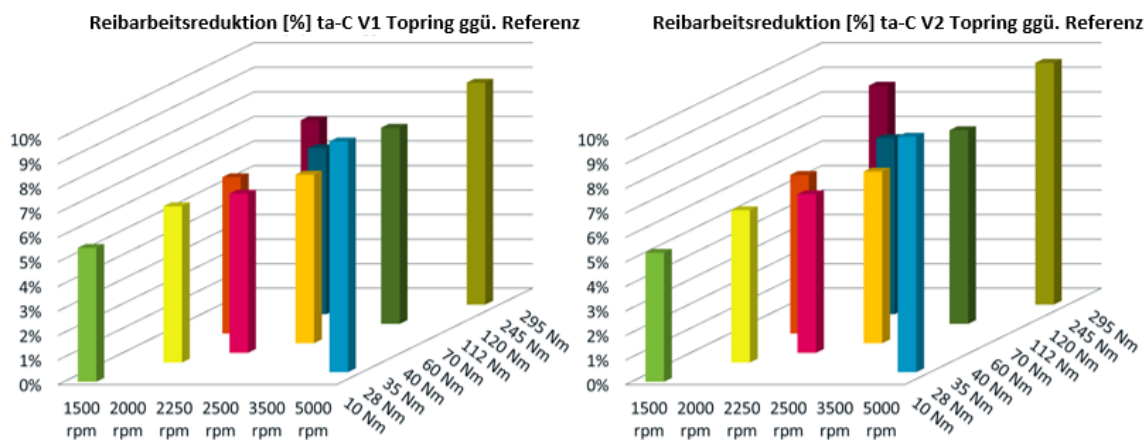


Abbildung 92: Berechnete Reibungsreduktion durch ta-C Beschichtung am Topping

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

1.5.3.6 HAP 6060 Reibungsuntersuchungen im Gesamtsystem Motor-Antriebsstrang-Fahrzeug

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde ein Gesamtfahrzeugmodell zur Untersuchung des Reibungseinflusses auf den Kraftstoffverbrauch aufgebaut. Dieser ergibt sich bedingt durch die Veränderung der Komponenten in den tribologischen Systemen der Kolbengruppe des Verbrennungsmotors. Das Modell kann somit zur Untersuchung und Optimierung der Bauteile der Kolbengruppe und deren Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch in der Gesamtfahrzeugsimulation verwendet werden. Die Analyse erfolgte anhand eines Vierzylindermotors, wobei die simulierten Betriebspunkte sowohl den Teil- als auch den Vollastbetrieb des NEFZ abdecken. Anhand des Vergleichs unterschiedlicher Topringkonfigurationen innerhalb der Kolbengruppe des Verbrennungsmotors und deren Auswirkung auf die Reibung im Gesamtfahrzeug lassen sich die wesentlichen Erkenntnisse in Bezug auf den Kraftstoffverbrauch analysieren und quantifizieren.

Ein Ziel ist die Potentialuntersuchung einer erweiterten Kolbengruppenmodellierung innerhalb der Gesamtfahrzeugsimulation und deren Einfluss innerhalb der Gesamtfahrzeugsimulation hinsichtlich Ihrer Abbildungsgüte. Im Vergleich zu den derzeit noch überwiegend verwendeten Reibungsmodellen in der Motorprozesssimulation wird hierbei die Reibung der Kolbengruppe separat abgebildet und ausgewertet. Hierfür wird in AVL EXCITE™ die Reibung in den tribologischen Kontaktstellen der Kolbengruppe des Vollmotors für alle relevanten Betriebspunkte im 3D MKS/EHD-Simulationsmodell im Detail berechnet und kennfeldbasiert in die 1D Gesamtfahrzeugsimulation in AVL CRUISE™ M eingebunden und damit der betriebspunktabhängige Reibungseinfluss innerhalb der geschmierten Kontakte der Motorkomponenten im Detail abgebildet.

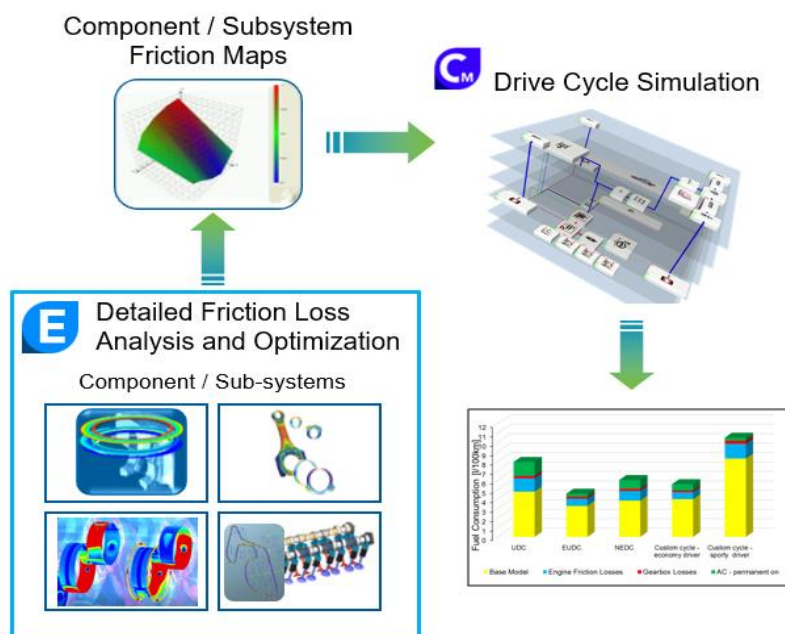


Abbildung 93: Reibungsuntersuchung in der Gesamtfahrzeugsimulation

1.5.3.6.1 Modellaufbau und Vorgehensweise

In der Gesamtfahrzeugsimulation werden die Reibungskennfelder der tribologischen Kontakte der Kolbengruppe benötigt. Diese mehrdimensionalen Kennfelder werden durch AVL EXCITE für die tribologischen Kontakte der Kolbengruppe in einer detaillierten EHD Simulation berechnet und für die weiteren

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Untersuchungen im Gesamtfahrzeugmodell verwendet. Die Reibungskennfelder werden in das Gesamtfahrzeugmodell im 1D-Simulationstool AVL CRUISE™ M importiert und für die Bestimmung der Reibungsanteile im jeweiligen tribologischen Kontakt wie beispielsweise im Kolben-Laufbuchse- oder Kolbenring-Laufbuchse-Kontakt betriebspunktabhängig verwendet.

Der prinzipielle Modellaufbau des Gesamtfahrzeugmodells in AVL CRUISE M und die dafür benötigten Teilsysteme sind in Abbildung 94 dargestellt. Mit der entwickelten Methodik ist es möglich Vergleiche verschiedener Motorkonzepte im Fahrzeug durchzuführen, um so beispielsweise die Auswirkung einzelner Reibungsreduktionsmaßnahmen innerhalb eines tribologischen Kontakts des Verbrennungsmotors auf den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen für ein reales Fahrzeug bewerten zu können. Die Qualität der Simulationsergebnisse und die Aussagesicherheit ist fahrzeugspezifisch und im Allgemeinen stark abhängig von den verwendeten Fahrzeugdaten und Randbedingungen.

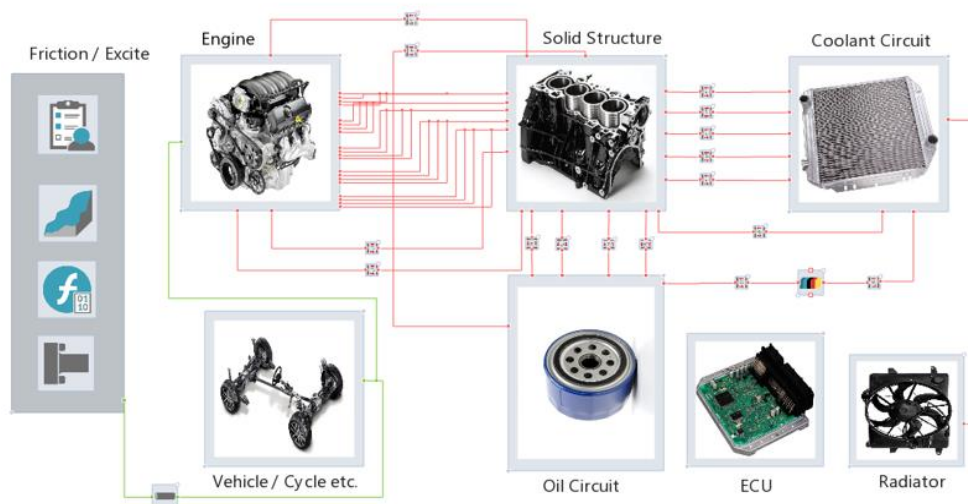


Abbildung 94: 1D-Simulationsmodell in Cruise M

Das Gesamtmodell besteht aus den folgenden Modulen Reibungsmodell („Friction/Excite“), Thermodynamisches Modell („Engine“), Motorblock („Solid Structure“), Kühlkreislauf und Ventilator („Coolant Circuit“), Leistungselektronik („ECU“), Ölkreislauf („Oil Circuit“) und Fahrer-/Fahrzeug-/Zyklusmodell („Vehicle/Cycle“), die miteinander interagieren und so das Systemverhalten des Gesamtfahrzeugs im Simulationsmodell abbilden. Es wurde ein Demonstrator Modell aus Motor, Antriebsstrangkomponenten sowie Kühlmittel- und Ölkreislauf aufgebaut. Die dargestellten Subkomponenten interagieren miteinander und bilden so das detaillierte Systemverhalten des Gesamtfahrzeugs im Simulationsmodell ab. Im Modell ist ein Vierzylinder PKW Motor mit Frontantrieb und einem Schaltgetriebe abgebildet. Innerhalb des Modells lässt sich grundsätzlich jeder Motor und jedes Antriebsstrangkonzept eines beliebigen Fahrzeugs adaptieren. Der Motor wird durch das Lastsignal des Fahrers und die Lambda-Regelung im ECU gesteuert, welche die eingespritzte Kraftstoffmenge berechnet. Im Subsystem ECU ist ein Fahrprofil hinterlegt, dass die Änderung der Gas- und Bremspedalstellung, die in der Realität durch den Fahrer erfolgt, berücksichtigt.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

1.5.3.6.2 Datenbasis für das Simulationsmodell des Gesamtfahrzeugs

Das aufgebaute Gesamtfahrzeugmodell des AVL Referenzfahrzeugs beinhaltet ein typisches verbrennungsmotorisches Antriebsstrangkonzept eines Personenkraftwagens mit einem Vierzylinder-motor. Mit der entwickelten Methodik ist es möglich, Vergleiche verschiedener Motorkonzepte im Fahrzeug durchzuführen, um so beispielsweise die Auswirkung einer einzelnen Reibungsreduktionsmaßnahme innerhalb eines tribologischen Kontakts des Verbrennungsmotors auf den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen für ein reales Fahrzeug bewerten zu können. Die Reibungskennfelder wurden für die vorhandenen relevanten Betriebspunkte der Vollmotorsimulation des BMW-Motors generiert und verwendet. Für alle darüber hinaus verwendeten notwendigen weiteren Betriebspunkte wurden die Daten interpoliert.

1.5.3.6.2.1 Berücksichtigung der Reibungsverluste in der Gesamtfahrzeugsimulation

Die Berücksichtigung der Reibung in den einzelnen tribologischen Kontakten der Kolbengruppe des Verbrennungsmotors im 1D-Gesamtfahrzeugmodell in Form von betriebspunktabhängigen Kennfeldern hat gegenüber der Abbildung als effektiv gemessenem Reibmitteldruck an der Kurbelwelle den entscheidenden Vorteil, dass der Einfluss der lokalen Reibungsverluste auf den Kraftstoffverbrauch berücksichtigt werden kann. Damit ist es möglich, den Einfluss einer Reibungsreduktionsmaßnahme z.B. einer DLC Beschichtung in den einzelnen tribologischen Kontakten der Kolbengruppe auf den gesamten Kraftstoffverbrauch und die Emissionen des Fahrzeugs untersuchen und bewerten zu können. Grundsätzlich kann das dargestellte Demonstrator Modell auf jedes beliebige Motor- und Antriebsstrangkonzept adaptiert werden. Eine Vielzahl an Fahrzyklen und Umgebungsrandbedingungen kann untersucht werden. Fahrzeugkonzepte können gezielt bewertet und zu optimiert werden.

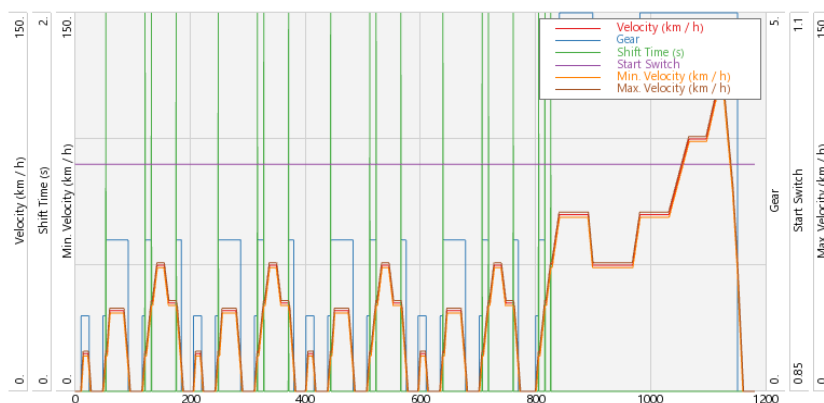


Abbildung 95: Simulierter NEFZ Fahrzyklus

Im Rahmen der Untersuchungen wurde der NEFZ Zyklus verwendet. Zur Erfüllung der Fahrfunktion werden die drei Komponenten Fahrprofile, Fahrer und Umgebungsrandbedingungen benötigt. Der Fahrer steuert das Fahrzeug und fährt das Fahrprofil durch die Anpassung des Gas- und Bremspedals nach. In der Komponente Umgebung werden die Fahrbedingungen definiert. Hier lässt sich beispielsweise die Luftfeuchtigkeit, die Zusammensetzung der angesaugten Luft oder die Höhenlage festlegen, siehe Abbildung 95.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

1.5.3.6.2.2 Ergebnisse und Auswertung

Im Rahmen der Gesamtfahrzeugsimulation wurde die in der Vollmotorsimulation vielversprechendste Variante mit der geringsten Reibung der ta-C V2 Topping gegenüber der Referenz untersucht. Das Ziel der Untersuchung ist die Analyse des Einflusses der betriebspunktabhängigen Reibungsreduktion auf den zyklischen Kraftstoffverbrauch im NEFZ Fahrzyklus.

Innerhalb der BMW-Vollmotor-Simulation in AVL EXCITE hat sich die ta-C V2 Toppingbeschichtung als besonders vorteilhaft im Hinblick auf die Reibungsreduktion über die untersuchten Betriebspunkte hinweg gezeigt. Somit wird diese gegenüber der Referenz im Gesamtfahrzeug hinsichtlich der Auswirkung auf den Kraftstoffverbrauch im Fahrzyklus gegenüber der Referenz untersucht. Dabei werden die Reibungskennfelder für die Gesamtfahrzeugsimulation beider Varianten generiert und in das Gesamtfahrzeugmodell eingebunden. Das Ziel dabei ist die Auswirkung der Reibungsreduktion auf den zyklischen Kraftstoffverbrauch durch beschichtete Kolbenringe zu analysieren und zu quantifizieren.

In Abbildung 96 ist der in der Gesamtfahrzeugsimulation berechnete Kraftstoffverbrauch über der Zeit dargestellt. Die V2 Variante zeigt gegenüber der Referenz über die verschiedenen Betriebspunkte hinweg eine Verbesserung der Reibung und des Gesamtkraftstoffverbrauchs. Lediglich in den Zuständen zwischen drei und vier ist das Reibmoment der Referenz vernachlässigbar geringer. Die Gesamtreibung der V2 Variante ist global über die Betriebspunkte hinweg in der betriebspunktabhängig gewichteten Summe jedoch deutlich geringer und dadurch ergibt sich im **mittleren Kraftstoffverbrauch pro Zyklus ein Vorteil von 0,6 Prozent** für das AVL Referenzfahrzeug, siehe Abbildung 97.

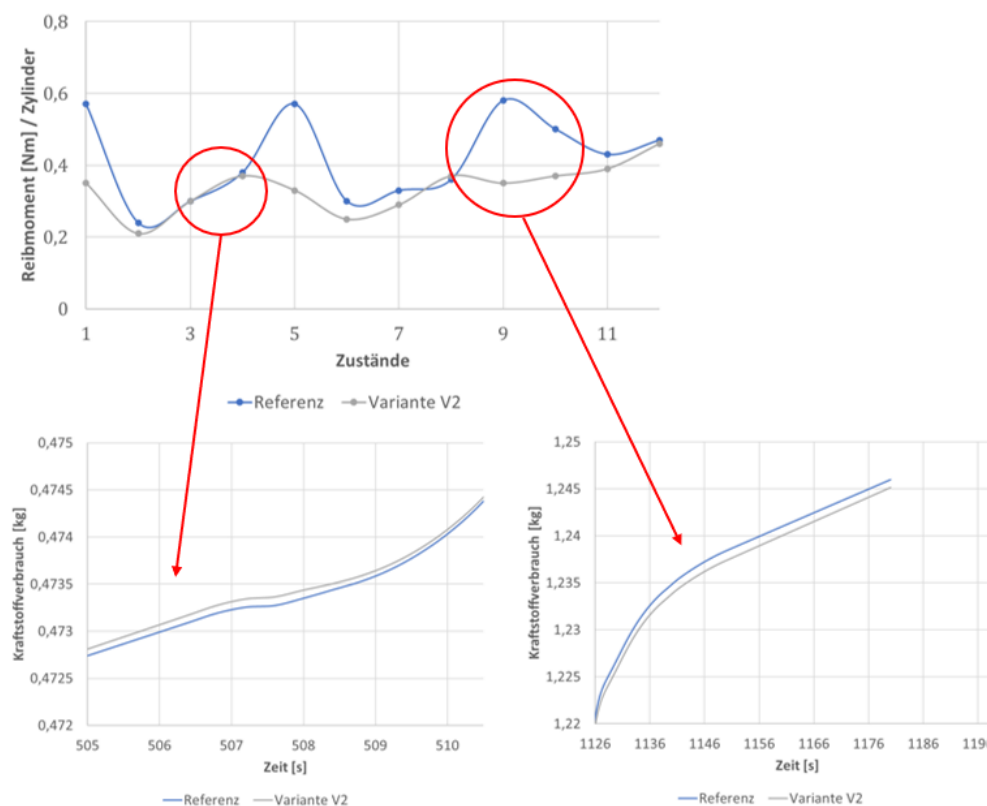


Abbildung 96: Reibungseinfluss auf den Kraftstoffverbrauch um Gesamtfahrzeugmodell

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

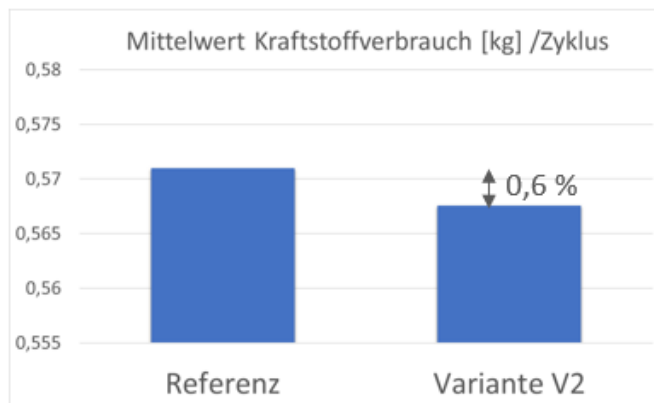


Abbildung 97: Vergleich des Kraftstoffverbrauches / Zyklus im Gesamtfahrzeugmodell

1.6 Funktions- und Effizienznachweise (TP7000)

1.6.1 Ziele und Aufgabenstellung

1) BMW: Im Fokus von TP7000 standen die Ingangbringung, Organisation, Steuerung und Ausführung der in TP2000 bis TP6000 machbar gewesenen ReibMind-Fortschritte an den Kolbengruppen-/Zylinder-/Ventiltriebskomponenten sowie deren ganzheitlichen ReibMind-Funktionsnachweise am STZ-Realhub-tribometer, am befeuerten 1-Zyl. F&E-Motor beim LVM der TU Dresden sowie am 4-Zyl. F&E BMW Motor bei TENNECO in Burscheid und mit den Ein- und Mehrzylinder-F&E-Motoren bei MAN und Rolls-Royce.

2) MAN: Hauptziel war, die aus der tribologischen Prüfkette ermittelten „Best of“ Varianten der angepassten Schmierstoffe, der im Wirkkontakt befindlichen Oberflächen wie Kolbenringbeschichtungen und Zylinderlaufbuchsen-Beschichtungen, den Gesamtfunktions- und Effizienznachweis zur Kraftstoffreduktion zu erbringen.

3) Rolls-Royce: Das Hauptziel der Rolls-Royce innerhalb des Projekts liegt in der Erreichung der Reibleistungsreduktion von bis zu 20 % durch Kombination aller erarbeiteten Lösungen und damit verbunden einer Kraftstoffeinsparung von 1-2%.

Folglich ist das Ziel die Erreichung einer signifikanten CO₂- Reduktion bei gleichzeitiger Verschleißreduzierung und somit Erhöhung der Systemrobustheit.

1.6.2 Verwendung der Zuwendung

1) BMW: Bei BMW wurde die Zuwendung u.a. insbesondere für betriebsinterne PROMETHEUS-bezogene Spezialtätigkeiten sowie für die Begleichung der Kosten spezielle F&E-Dienstleister [u.a. 1.) Steinbeis Transferzentrum Friedrichshafen (für die F&E / den Aufbau / den Betrieb eines Realhub-tribometers auf Basis des BMW Luftboxer-Motorradmotors; Grundausstattung für eine affirmative Dr.-Arb. an der TU Dresden), 2.) Institut für Fertigungstechnik (LMO) der TU Dresden (Laserbasierte Methoden der großflächigen Oberflächenstrukturierung) 3.) KIT der Uni Karlsruhe (atomphysikalische Analyse reaktiv gehonter LDSHonopt-Zylinderlaufbahnen) eingesetzt.

2) MAN: Die Zuwendungen wurden im Wesentlichen für Motorversuche (Einzylinder, D15 Motor, D26 Motor), d.h. auch Kraftstoffkosten, eingesetzt.

3) Rolls-Royce: Bei Rolls-Royce wurde die Zuwendung im TP7000 vor allem für die internen F&E Personalaufwände im Rahmen des Funktionsnachweises der im Projektverlauf erarbeiteten optimierten

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Tribosysteme sowie die Kostenerstattung für die im Antrag eingeplanten F&E-Fremdleistungen verwendet. Fremdleistungen wurden überwiegend seitens Rolls-Royce Solutions Magdeburg (Durchführung der Einzylinderversuche), TU Braunschweig (Durchführung von Schnellalterungsversuchen AGN-Systeme) aufgewendet.

Im Rahmen von TP 7000 wurden auch Zuwendungen zum Nachweis der Effizienzsteigerungen durch tribologische, Einzylinder- und vollmotorische Untersuchungen verwendet. Diese wurden durch verschiedene Partner umgesetzt.

1.6.3 Erzielte Ergebnisse

TP7000 hat für TP2000 / TP3000 / TP4000 / TP5000 / TP6000 folgende Zuarbeiten geleistet:

Das Hauptziel der TP7000-Schmierstoffstrategie von PROMETHEUS war eine wesentliche Abkürzung der Weglängen von Festkörper-Berührungen / der Mischreibungszone via einer Anlagerungsoptimierung der tribologisch aktiven reibungsmindernden Schmierstoffmoleküle wie z.B. MoDTC zum Beginn des Reibkontaktes und während des tribologischen Betriebs der Kontaktflächen.

Die hierfür geeigneten Schmierstoffteilchen müssen u.a. an den Kolbenring- und Gleitschlepphebeloberflächen (z.B. durch Katalyse) eine aromatisierende / graphenisierende Wirkung auslösen, damit sich diese Graphen-Konglomerate direkt an ta-C Oberflächen der Kolbenringe sowie an den Zylinderlaufbahn anlagern und dadurch an diesen Bauteilen die beschriebene nachhaltige Oberflächen-Flaumierung bewirken können.

Ergebnis: Erhöhung der Funktionsqualitäten solcher Fahrzeugantriebe für die Kunden - in direkter Kombination von CO₂-Minderung in Verbrauchszyklen und im Alltagsbetrieb.

FUCHS und BMW arbeiteten bei der diesbezüglichen F&E zur Schmierstoffanlagerungsoptimierungsflüssigkeit eng zusammen. Bsp.: Das 5W30 VE-Öl für die Motorradantriebe erschließt dadurch gut messbare Fahrleistungssteigerungen und Verbrauchsminderungen sowie damit verknüpfte zusätzliche Fahrzeug-Absatzchancen.

HAP 3040 Beiträge von TP 7000 zur Optimierung der Wirkungsmechanismen der ReibMind- und Verschleißschutz-Schmierstoffmoleküle via **Funktionalitätsoptimierungen der Schmiermolekül-Arbeitsplätze:**

BMW

Das PROMETHEUS-Hauptaufgabenfeld von BMW konzentrierte sich in Bezug auf die BMW intern hergestellten Grundmotoren-Gehäuse samt den Zylinderlaufbahnen auf die Funktionalitäten des Beschichtungsverfahrens und der zugehörigen Oberflächenbearbeitung via Honung zur Schaffung tribologisch höchstwertiger mechanischer Reibflächen über den Druck- und Temperaturprofilen der Verbrennung. Das Motorenöl und die Kolbengruppen wurden in allen BMW PROMETHEUS-Motoren von FUCHS und TENNECO geliefert.

In Bezug auf die LDSisierung (Lichtbogen-Drahtspritz-Prozess zur Innenbeschichtung der Zylinderbuchsen aus Sekundäraluminium) konnten folgende Wissensinhalte samt einer zentralen Kernbotschaft erarbeitet werden:

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Durch die Schaffung einer individuell ausprägbarer Großserienbeschichtung ist es möglich, durch leichte Veränderungen von Porositäten und Lamelligkeiten deutliche tribologische Effekte zu erreichen und nachhaltig in Funktion zu halten.

Die Nutzung neuester Invertertechnik bei der Energieregulierung im LDSisierungsprozess ermöglicht auf präzise Art, lokal angepasste Eigenschaften und den nachgelagerten Honprozessen die Möglichkeit zu schaffen sowie ideale belastungsorientierte Schichtdotierungen zu erzeugen. An diesen Keimzellen entstehen nach aktueller Kenntnis wohl die Ausgangszonen der sogenannten 3ten Körper in der Zylinderlaufbahn-Schichtmaterialstruktur.

BMW hatte im Rahmen unseres Förderprojektes „**PROMETHEUS**“ die Aufgabe, die tribologischen Eigenschaften der Zylinderlaufbahn zu optimieren (Honopt). Ein im Projektablauf in vertiefender Form erkanntes Thema war u.a. auch der sogenannte „**3te-Körper**“, welcher in darauf ausgerichteten Ergänzungsprojekten nach aktueller Erkenntnis höchstwahrscheinlich zu ausgeprägter ReibMind führen kann.

Die Projektpartner vom Fraunhofer-IWM haben darauf hingewiesen, dass der „**3te-Körper**“ im Rahmen des Einlaufs eines Motors in mehr oder weniger ausgeprägter Form entsteht. Dieser nimmt umfassenden Einfluss auf die Reibeigenschaften der TENNECO-Kolbengruppen via FUCHS-Schmierfilm an den LDSisierten Zylinderlaufbahnen der BMW Pkw Baukastenmotoren sowie an den Motorrad Motoren des Konzerns.

Die Messungen vom KIT haben ergeben, dass gewisse in die Zylinderlaufbahn mechanisch eingeriebene Moleküle die tribologischen Eigenschaften auf atomphysikalischen Wegen um bis zu 30% verbessern. Diese Molekülkonstellationen sind standardmäßig auf und in den Zylinderlaufbahn-Materialstrukturen nach der bisherigen BMW LDSisierung und Normalhonung dort bisher nicht vorhanden.

Daher wurde auf Anregung des IWM bei BMW zusammen mit diesbezüglich beauftragten Werkzeugherstellern ein PROMETHEUSianisches Honopt-Verfahren entwickelt, welches die Entstehung des „**3ten-Körpers**“ in nachhaltiger Form bereits in den fließbandmäßigen Zylinderlaufbahn-Honprozess implementiert.

Hier hat BMW in PROMETHEUS mit viel Aufwand den Nachweis erbracht, auf/in den Zylinderlaufflächen, die in der Serie für die 3./4-/6-/8-zylindrigen Pkw-Motoren sowie in den Wasserboxern baukastenförmig verwendet werden, das geforderte molekular Design eines „3ten-Körpers“ darstellen zu können. Bei dieser mechanischen Dotierung werden via Materialdotierungsleisten des Honwerkzeugs in reibungstechnisch vorteilhafter Form Fremdatome an die Zylinderlaufbahn übertragen.

Hierzu wurden unterschiedliche „Dotierungsleisten“ nach und nach weiterentwickelt, um die Anzahl der Initialmoleküle für 3te Körper am Akzeptor zu erhöhen und so für BMW die Chancen auf eine Industrialisierung dieser ReibMind-Technologie zu ermöglichen.

Damit ist PROMETHEUS zum jetzigen Zeitpunkt wohl das erste Projekt, in dem die Option dieser tribologischen Optimierung der Zylinderlaufbahn aufgezeigt wurde. Auf dieser Basis kann möglicherweise die Funktionalität von Supraschmierstoff-Molekülen zielführend erschlossen werden. Im Förderprojekt „**CHEPHREN**“ ist das u.a. neben der Kunststoffisierung von Antriebsstrang-Komponenten das Kernthema.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Bewertung der PROMETHEUSianischen Motorrad Motoren-/Kupplungs-/Schaltgetriebe-Schmierstoffe:

Den in PROMETHEUS von und mit FUCHS erarbeiteten schmiermolekültechnischen Funktionsfortschritten wurden seitens BMW und den BMW Partnern / Lieferanten bis zum Projektende via Oberflächenbearbeitung, -beschichtung, -dotierung und -strukturierung machbar gewesene Arbeitsplatzfunktionalitäten für die FUCHS Schmierstoffmoleküle in bestmöglicher Form zur Verfügung gestellt.

Ergebnisdetails und Grundempfehlungen für die BMW PKW- und Motorrad-Motoren:

Ausgehend vom BMW Motorrad Motoren-/Schaltgetriebe-Schmieröl in der Viskositätsklasse 10W40 wurde im Rahmen der diesbezüglichen PROMETHEUS-Projektarbeiten von FUCHS ein 5W30er Motorrad ReibMind-Öl entwickelt und dem Projekt in verschiedenen Weiterentwicklungsstufen für die Erprobung zur Verfügung gestellt.

Dieses FUCHS-Öl bewährt(e) sich in den Prüfstandsversuchen sowie in den im BMW Dienstfahrzeug-Alltag auf Dienstreisen, Touren und Kurzstrecken im Arbeitsalltag praxiserprobten BMW Fahrzeug-Versuchsmotoren [S1000XR; R1200RS; R1250GS und R1250RS] über jeweils > 50 tkm / > 68 tkm / > 57 tkm / > 52 tkm in sehr vorteilhafter Weise. Bei diesen Dauererprobungen wurde der infolge der geringeren Viskosität aufkommende Anstieg der mechanischen Geräusche durch den Feinschliff der Viskositätswerte et al. innerhalb der 5W30-Klasse auf ein gemeinsames Optimum zwischen Mischreibung / Hydrodynamik-Reibung / Spritverbrauch / Fahrleistungen / Mechanik-Geräusche gebracht.

Ein Ölverbrauch zwischen den Ölwechseln wurde trotz des viskoser gewordenen FUCHS PROMETHEUS Motorrad-Öls nicht festgestellt.

1.6.3.1 HAP 7018a PROMETHEUS-orientierte Weiterentwicklung eines Realhubtribometers auf Basis des luftgekühlten 1200er BMW Motorradboxermotors

Ziel war die Verfügbarkeit eines realitätsnahen Kolbenring-Prüfstands zur Bewertung von Reibung & Verschleiß an den Kolbenringen und an den Zylinderlaufbahnen unterschiedlicher Konsistenzen:

* 73 mm / 20 Hz mit variablen Lasten bis 200 N (100 bar Zylinderdruck) bei einer Breite von ca. 20 mm je LDS-Zylindersegment.

* Zyklische Auflösung des Reibwerts und der Reibarbeit (gemäß "Stribeck") über dem Kolbenhubweg.

Mit Hilfe dieses RHT-Modellprüfstands können Reibzustände, wie sie in der motorischen Anwendung auftreten, näherungsweise nachgebildet werden. Die Prüfandbedingungen wurden speziell auf die Kinematik, welche im serienmäßigen Tribokontakt zwischen Kolbenring und Zylinderlaufbahn vorherrschen, angepasst.

1.6.3.2 HAP 7018b PROMETHEUS-orientierte Anpassung des Steinbeis-Realhubtribometers

Das Realhubtribometer (RHT) sowie die zugehörige Prüfmethodik (Abbildung 98) wurden während der Projektlaufzeit kontinuierlich weiterentwickelt. Es umfasst daher mehrere Entwicklungsstände: Die RHT-Konfiguration V0.1 umfasste die Messeinrichtung inkl. Schwingungskompensation mit Probenaufnahme und eine Einhausung mit einem vereinfachten Temperaturregelsystem. Diese Einheit bildete somit den grundlegenden Rahmen, um tribologische Untersuchungen und Simulationen durchführen zu können. Dieser Stand wurde durch bilaterale Beauftragungen um eine Bestimmung des Kurbelwellenwinkels und

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

einer Schmierstoffdosiereinheit inkl. Heizung zur Aufbringung realitätsnaher Randbedingungen erweitert. Das ermöglichte die kurbelwellenwinkel aufgelöste Messung der Reibkraft, welche Voraussetzung für den Abgleich mit der MKS/EHD-Simulation ist. In der Konfiguration V0.2 wurden die Messeinrichtung und Schmierstoffaufbringung komplett überarbeitet und optimiert, zum Zwecke einer verbesserten Versuchsdurchführung. Durch die bauliche Verbesserung des Prüfstands und die umfangreiche Prüfmethodikentwicklung zeigte sich schließlich eine hohe Übereinstimmung mit der MKS/EHD-Simulation. Dies erlaubt die Berechnung der Triboelement-Wechselwirkungen in der Kontaktzone, um experimentelle Ergebnisse im Detail bewerten zu können.

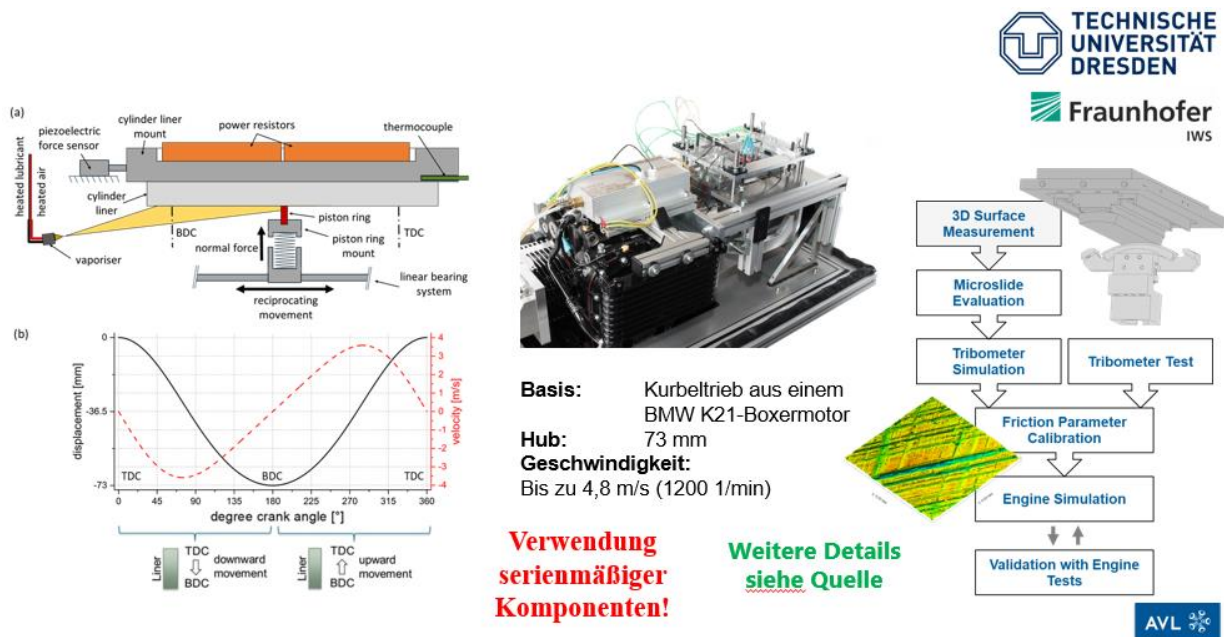


Abbildung 98: Prüfmethodik um das STZ-Realhubtribometer.

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme und Optimierung wurde die Reproduzierbarkeit des Prüfstandes erfolgreich nachgewiesen. Teile dieser Ergebnisse sowie die nachgewiesene Reproduzierbarkeit wurden 2021 in der Tribology International 163 vom Elsevier-Verlag veröffentlicht.

Der Abgleich hinsichtlich einer Übertragbarkeit der Prüfsysteme von Realhubtribometer und Einzylinderprüfstand zeigt in Zusammenarbeit mit AVL und dem TUD LVM eine gute Übereinstimmung. Wie in Abbildung 99 dargestellt, können die absoluten Reibwerte bei einer Schmierrate von 0,05 ml/min für bestimmte Betriebsbereich abgebildet werden. Die Ableitung von Reibkennfeldern aus den RHT-Untersuchungen erlaubt weiterhin die Bedatung von Einzylinder/Vollmotor-Simulationen.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

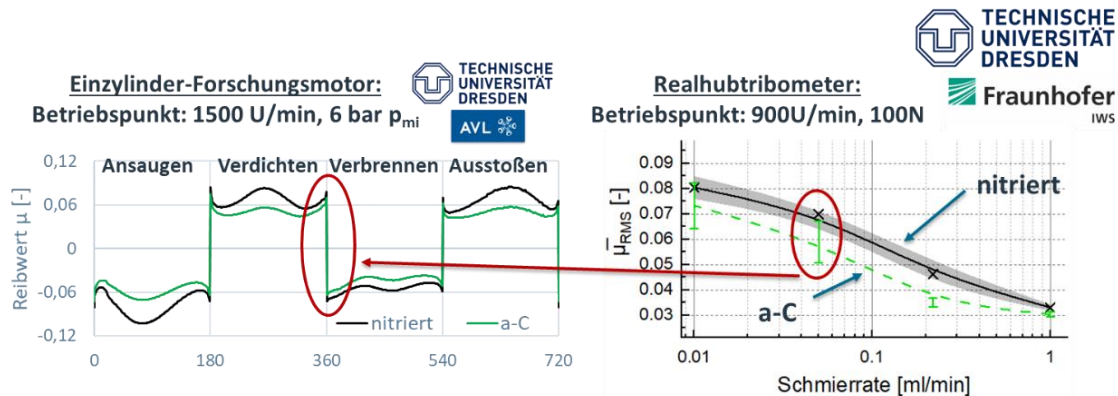


Abbildung 99: Abgleich der Prüfmethoden hinsichtlich Funktionalität und Energetik.

1.6.3.3 TP 7020 Bauformen der Komponenten und deren Proben für die ReibMind mit marktnotwendiger Haltbarkeit

A) Kompressionsringe nitriert / taCisiert / taCisiert + dotiert / taCisiert + strukturiert:

Sowohl die TaCisierung für sich selbst, als auch deren Dotierung (insbesondere mit B und Mo) und Strukturierung zeigten sowohl ReibMind- als auch haltbarkeitstechnische Vorteile, welche in den Ergebnisdokumentationen vom SIZ / STZ im Detail beschrieben und Messwert-technisch akribisch abgebildet / dokumentiert sind.

B) Kolbenschäfte mit Serienbeschichtung / ReibMind-Beschichtung / ReibMind-Strukturierung:

TENNECO Nürnberg hat hierzu sehr tiefgehende Wissensfundi aufgebaut.

C) Zylinderlaufbahn LDSisiert / LDSisiert + honoptimiert / LDSisiert + honoptimiert + mechan. dotier.:

Ergebnis der Atomphysik-Analyse vom KIT zur LDS Zylinderlaufbahn-Endausbaustufe (bilaterale Beauftragung von BMW): Bei der Honoptimierung wurde zunächst abgeprüft, ob die Komponenten aus dem Verschleißschutz, die normalerweise erst später über die Additivierung des Schmierstoffs in den dritten Körper gelangen, schon vor dem Einlauf der LDS-Schicht zugeführt werden können. Ein sehr wirksames und vielversprechendes Additiv, das schon sehr lange eingesetzt wird, ist ZnDTP/ZDDP. Dieses Additiv liefert die Elemente Schwefel, Phosphor und Zink, welche in den dritten Körper eingebaut werden. Um diesen tribologisch günstigen Schritt aus dem Motorbetrieb in den Fertigungsprozess zu verlagern, wurden die Honleisten vor dem Sintern mit Zusatzstoffen versetzt, die beim Honen mechanisch in die LDS-Laufbahn eingemischt werden.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

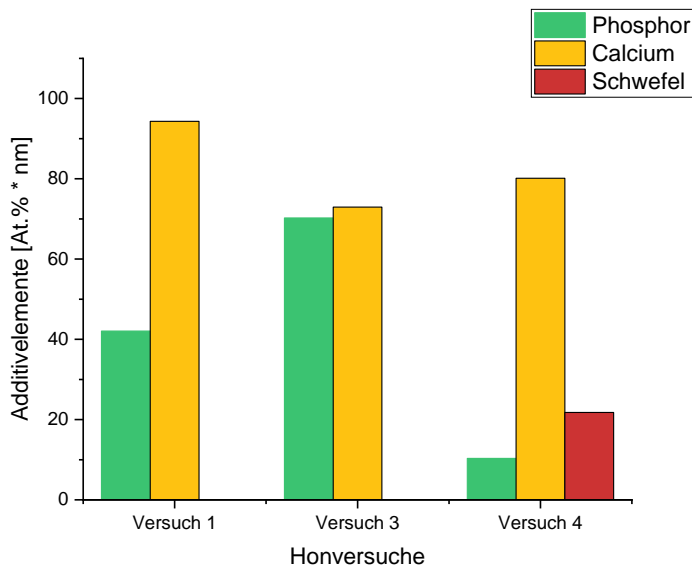


Abbildung 100: Elementkonzentration der honoptimierten LDS Zylinderlaufbahn

Mit Hilfe von oberflächensensitiver Elementanalytik (Röntgenphotoelektronen-Spektroskopie) konnte gezeigt werden, dass diese optimierte Honung tatsächlich zu einem ähnlichen dritten Körper führt, wie dieser bei gut eingelaufenen Motoren zu finden ist und damit die tribologische Optimierung sehr aussichtsreich ist.

1) Gefügeveränderungen bei einer tribologisch vorteilhaften Endbearbeitung wie z.B. Honen: Fremdelementaufnahme (Tribosorption) und chemische Reaktionen (Mechanochemie) u.a. durch Honöl-Additivierung → triboinduzierte Grenzschichten.

2) Nanokristallines Gefüge durch die Änderungen der Topographie als auch Modifikationen der chemischen und strukturellen Zusammensetzung des oberflächennahen Werkstoffvolumens direkt an der Reibfläche.

3) Vorkonditionierung von Triboflächen hinsichtlich chemischer Zusammensetzung und der Gitterstruktur des oberflächennahen Volumens samt Variation der Mikrotopographie via des Honprozesses. Die Adsorption von ReibMind-Kohlenwasserstoffen kann u.a. via ausreichend großem Energieeintrag beim Polymerläppen ermöglicht werden.

Aus der Perspektive von BMW würde ein vertiefendes / verbreiterndes F&E-Projekt zur Optimierung der tribologischen Eigenschaften von Reibflächen mittels energetisch gesteuerter Endbearbeitung große Chancen erschließen in Richtung Reibungsminderung (Stichwort: Ergänzungsprojekt zu PROMETHEUS).

1.6.3.4 HAP 7030 Reibwertverläufe Kompressionsring / Schmierstoff / Zylinder mit realitätsnäher Kinematik und Mechanik im Realhubtribometer

Erkenntnisse und Grundempfehlungen für die BMW PKW- und Motorrad-Motoren seitens BMW:

Die Motorbetriebsnahe Erprobung neuartiger ta-C-Schichten für Kolbenringanwendungen im Steinbeis Realhub-Tribometer hat BMW die Verständnisswelt für die Wirkung verschiedener Kolbenring-Oberflächen relativ zueinander stark verbreitert und insbesondere auch in umfassender Form vertieft.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Der wasserstofffreie tetraedrisch amorphe Industriediamant auf Basis Kohlenstoff (ta-C) besitzt auch unter widrigen Bedingungen erhöhte thermische Belastungs- und Mangelschmierungsfunctionalitäten sowie herausragende Reib- und Verschleißeigenschaften. Diese tribologischen Eigenschaften bieten ideale Voraussetzungen für die harschen Bedingungen im befeuerten Motor und begründen den zunehmenden Bedarf von ta-C als industrielle Kolbenringbeschichtung in modernen Verbrennungsmotoren. Eine Herausforderung bei der Entwicklung von ta-C-Schichten für Kolbenringanwendungen ist die Vorhersagbarkeit der tribologischen Wechselwirkungen unter den jeweiligen Randbedingungen. Eine systematische Bewertung im befeuerten Betrieb von Vollmotoren ist ja sehr zeit- und kostenintensiv.

Mit unserem realitätsnahen Versuchsaufbau wurden neuartige, im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderten Projekts PROMETHEUS vom FhG-IWS und von VTD (Tochterfirma von TENNECO) hergestellte ta-C-Beschichtungen für Kolbenringanwendungen systematisch bewertet. Neben der Modifikation des E-Moduls reiner ta-C-Schichten wurden diese unter anderem mit Bor, Eisen und Molybdän dotiert.

Es zeigte sich, dass der E-Modul der ta-C-Schicht in Kombination mit unterschiedlich additivierten Schmierstoffen das tribologische Verhalten signifikant beeinflussen kann. Bestimmte Kombinationen zeigten auffällig niedrige Reibwerte bei erhöhtem Verschleiß. In einer anderen Kombination mit gleicher ta-C-Schicht war das Verschleißverhalten unauffällig. Auch bei den untersuchten Dotierelementen konnten deutliche Unterschiede im Reib- und Verschleißverhalten beobachtet werden. B und Mo erwiesen sich in Richtung ReibMind als vorteilhaft. In Richtung Dauerhaltbarkeit waren sie de facto unauffällig.

Ein Abgleich der Ergebnisse aus den durchgeführten Realhubtribometer-Messungen zu motorischen Untersuchungen hat die hohe Aussagekraft bzgl. des tribologischen Verhaltens für den befeuerten Betrieb bestätigt.

HAP7030a Mit dem Realhubtribometer des SIZ / STZ diesbezüglich erarbeitete Ergebnisse:

In Abbildung 101 sind RHT Ergebnisse mit Schmierstoffvariation, DLIP-Strukturierungsvarianten und Beschichtungsvarianten auf Basis des BMW Pkw-Systems zusammengefasst. Innerhalb dieser Testserie zeigt sich, dass das System mit dem ta-C:Mo-Kolbenring die größten Reibwertvorteile aufzeigt.

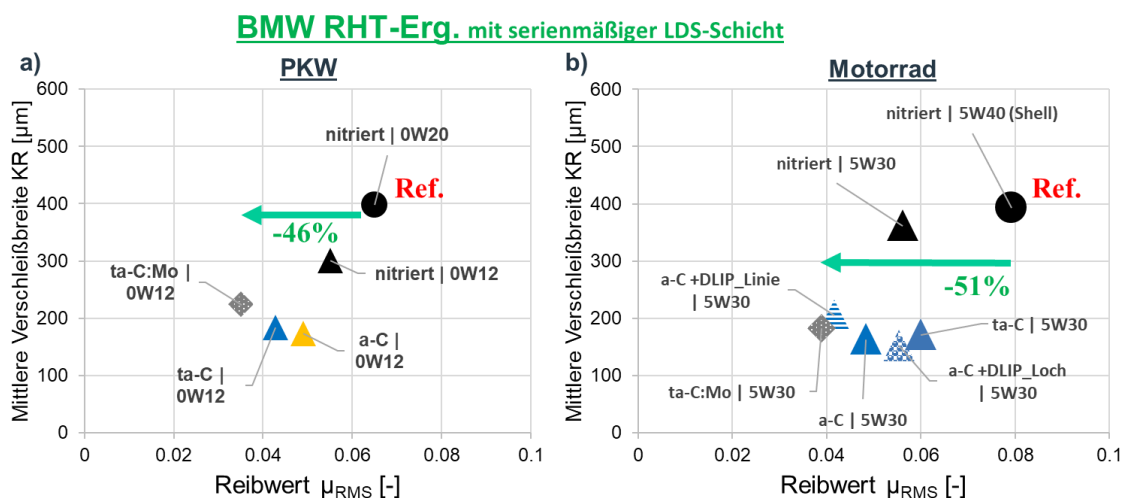


Abbildung 101: Vielversprechendste RHT-Ergebnisse der a) Pkw- und b) Motorrad-Versuchsreihe mit Schmierstoffvariation, DLIP-Strukturierungsvarianten und Beschichtungsvarianten (Dotierung).

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Dank der Voruntersuchungen bei den Projektpartnern Fraunhofer IWM, FUCHS und Tenneco konnte am Realhubtribometer lediglich eine reduzierte Anzahl an Tribosystemen geprüft werden. Die Versuchsreihen am Realhubtribometer zeigten, dass neuartige, niedrigviskose Motorenöle, Beschichtungssysteme der Kolbenringe – mit und ohne Dotierungen – sowie DLIP-Strukturierungen die Performance der Tribosysteme steigern konnten. Dabei konnte eine maximale Reibungsverbesserung um 46% am PKW-System und um 51% am Motorrad-System nachgewiesen werden. Zusätzlich zeigten die Ergebnisse weitere Potentiale durch eine DLIP-Strukturierung auf den Kolbenringen.

Untersuchungen mit mechanisch dotierten Zylinderlaufbahnen sind noch in Ausarbeitung.

Ausblick:

Dank neuartiger, niedrigviskoser Motorenöle (Pkw: 0W12/PROM-PC03, Motorrad: 0W30/PROM-MG10) und Kolbenring-Beschichtungen (ta-C, a-C) inkl. Dotierung (ta-C:Mo) konnte die serienmäßige Tribosystem-Performance prüfmethodenübergreifend signifikant gesteigert werden. DLIP-Strukturierungen weisen zusätzliche Potenziale aus, um gezielt hydrodynamische Effekte in tribologische Systeme einzubringen und auszunutzen. Auch hier konnten im TUD-IF und beim STZ bereits Verbesserungen aufgezeigt werden. Weitere DLIP-Strukturierungen wurden bisher nicht untersucht, weshalb hier de facto noch Handlungsbedarf besteht. Da es sich u.a. um tribologische Grundlagenversuche handelt, sollten die Optimierungsmaßnahmen nicht nur am Kolbenring, sondern auch bei anderen tribotechnischen Systemen Anwendung finden und ReibMind-Potentiale erschließen können. Weitere Maßnahmen - wie etwa die Wirkung eines gezielt initiierten dritten Körpers - wurden beim STZ bisher nicht betrachtet. Die Kombination verschiedener Maßnahmen wie etwa DLIP + Dritter Körper ebenfalls nicht. Durch Strukturierung könnte ein gezielter Kontaktdruck in der Mikroskala eingestellt werden, um den Einlaufkorridor zu treffen, um das Reibverhalten und den Verschleiß über der Lebensdauer weiter zu optimieren. Es wird daher empfohlen, weitere DLIP-Strukturierungen, Dotierungen, neuartige Schmierstoffe und Additive (u.a. auch Sternpolymere) und den gezielten Einlauf bzw. die Bildung eines dritten Körpers weiterführend zu untersuchen und auch auf andere Anwendungen zu übertragen.

HAP 7030b TUD-LVM: Versuche mit dem befeuerten 1-Zyl.

Am befeuerten Einzylindermotor der TU-Dresden wurden DLIP-strukturierte ta-C V2-Kompressionsringe untersucht und auf das Potential zur Reibverlustsenkung der Kolbengruppe hin analysiert. Die Potentialbewertung erfolgte anhand einer Messung des Motors im Referenzzustand (stahlnitrierte Kompressionsringe) sowie mit ta-C V2 beschichteten Kompressionsringen. Die Versuche wurden jeweils für ein Motoröl aus der Motorrad-Anwendung (MG-10, 5W-30) sowie dem PKW-Bereich (PC-03, 0W-12) durchgeführt. Abbildung 48 zeigt das Verhalten eines DLIP-strukturierten ta-C V2- Kompressionsrings im Vergleich zu einem unstrukturierten ta-C V2 Ring für zwei unterschiedliche Motoröle. Bei höherviskosem Öl (MG-10) zeigt die Kolbengruppe mit DLIP-strukturiertem Ring ein stark drehzahlabhängiges Verhalten, was auf eine Beeinflussung der hydrodynamischen Zustände schließen lässt. Beim PKW-Motoröl scheint ab einer gewissen Laststufe von $p_{mi}=10$ bar ein positiver Effekt einzutreten, wobei auch an dieser Stelle durch die zu diesem Zeitpunkt aktivierte Kolbenkühlöse eine hydrodynamische Beeinflussung als Hauptmechanismus möglich ist. Die Kombination von ta-C V2-Schicht und DLIP-Struktur ist mit Einsatz des niedrigviskosen Motoröls ein vielversprechender Ansatz zur Reibminderung, da die DLIP-Struktur die Schichtvorteile des ta-C V2 in einigen Kennfeldbereichen verstärken kann. Bei der Motorrad-Anwendung scheint das höherviskose Motoröl einen Vorteil der ta-C V2 – Schicht und damit auch der DLIP-Struktur zu verhindern.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

BMW Versuchsumfänge mit dem Schwerpunkt Kompressionsringbeschichtungen:

Im Fokus der Motorenversuche stand die Untersuchung harter Kohlenstoffbeschichtungen für Kolbenringanwendungen, d.h. den Kompressions- sowie Ölabbstreifring, und die Potentialbestätigung der vielversprechenden Ergebnisse aus den Modellexperimenten (SRV-Tribometer, Realhubtribometer) bei Projektpartnern (SIZ, FUCHS, Tenneco). Für die motorischen Untersuchungen wurden stahlnitrierte Kompressions- und Ölabbstreifringe mit einer harten (V1) sowie einer weichen (V2) ta-C-Beschichtung im Motor verbaut und mit dem jeweiligen Serienstand (stahlnitriert) verglichen.

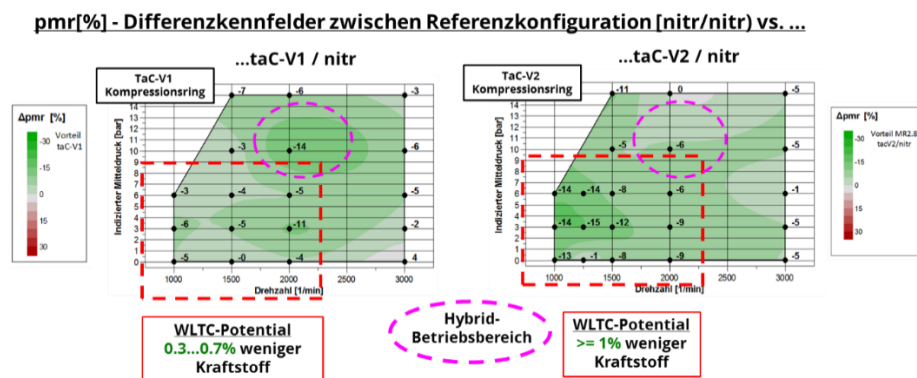


Abbildung 102: Reibvorteile der ta-C Kompressionsringe im befeuerten Motorbetrieb

Abbildung 102 zeigt die Resultate der Kennfeldvermessung für den Einsatz der beiden ta-C Schichten auf den Kompressionsringen. Aus den stationären Motorbetriebspunkten ergaben sich Reibvorteile von bis zu 15% für beide Beschichtungsvarianten auf dem 1. Kolbenring gegenüber dem stahlnitrierten Kolbenring aus der aktuellen Serienfertigung. Im zertifizierungsrelevanten Prüfzyklus des WLTP kann für einen Mittelklasse-Pkw mit einem BMW B48-Ottomotor von einer Kraftstoff- bzw. CO₂-Einsparung um ca. 0.5% (ta-C V1) bzw. 1% (ta-C V2) ausgegangen werden. Für den Endkunden kann unter gesteigerten Lasten durchaus ein noch höherer Verbrauchsvorteil eintreten. Bei Verbrennungsmotoren als Teil hybrider Antriebsstränge wird wegen der anderen Lastkollektive von einem Reibvorteil von 6-14 % ausgegangen.

BMW Versuchsumfänge, Schwerpunkt: Kolbenringbeschichtungen auf Ölabbstreifringen

Die Ölabbstreifringe erzeugen durch vergleichsweise hohe Anpressdrücke ein gewolltes Ölabbstreifverhalten, jedoch auch Reibverluste. Die Anwendung der ta-C Schicht wurde auf den Stahllamellen des Ölabbstreifrings zunächst einzeln (Ringpaket ansonsten im Serienzustand) und später in Kombination mit ta-C beschichteten Kompressionsringen untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass in weiten Kennfeldbereichen ein Nachteil durch die harte ta-C Schicht entsteht. Da Ölabbstreifringe keine ausgewiesene Lastabhängigkeit besitzen, ist eine Beeinflussung des Reibverhaltens des gesamten Ringpakets – und somit auch der lastabhängigen Reibung des Kompressionsrings – zu vermuten. Anhand von Schleppversuchen am Einzylindermotor ohne Kompressionsringe konnte festgestellt werden, dass die eigentliche Reibkraftzunahme durch die ta-C beschichteten Ölabbstreifringe nicht durch die Ölringe selbst verursacht wird. Als wichtige Erkenntnis wurde geschlussfolgert, dass vielmehr eine veränderte Abstreifwirkung der Ölringe negative Auswirkungen auf den Schmierhaushalt der Kolbengruppe – darunter insbesondere der Kompressionsringe – zu haben scheint.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

BMW Versuchsumfänge, Schwerpunkt: zinkfreies Motoröl

Mit dem Einsatz des PC-16 Motoröls wurden durch die zinkfreie Zusammensetzung vergleichbare Reibverluste zum Referenzöl PC-03 (mit zinkhaltiger Additivierung) gemessen, d.h. es konnten keinerlei Nachteile festgestellt werden. Mit Verwendung der ta-C beschichteten Kompressionsringe konnten bei der weicheren V2-Variante im Zusammenhang mit dem PC-16 Öl lediglich in einem Betriebspunkt nennenswerte Reibminderungspotentiale festgestellt werden. Dagegen zeigt die harte ta-C V1-Variante zusätzlich auch in breiten Kennfeldbereichen leichte Vorteile (3 – 5%), die oberhalb der Wiederholgenauigkeit des Einzylinderprüfstands liegen.

BMW Versuchsumfänge, Schwerpunkt: Kolbenhemdbeschichtung

Im Rahmen der BMW Umfänge wurden abschließend strukturierte Kolbenhemdvarianten untersucht, diese wurden zu Zwecken der längeren Mess- und Haltbarkeit in eine aus dem Nutzfahrzeugbereich übliche Kolbenhemdschicht „AV21“ eingebracht. In Abbildung 103 sind die dazu vermessenen Strukturvarianten „U“ sowie „Strich“ des Kolbenhemds gezeigt.



Abbildung 103: Vermessene Kolbenhemdvarianten inkl. strukturierter Ausführungen

Im direkten Vergleich der beiden Strukturvarianten konnte für die Strich-Variante ein drehzahlabhängiger Effekt festgestellt werden. Vermutlich wird durch die Strichstruktur bei geringen Drehzahlen die Hydrodynamik noch besser unterstützt, als es bei der „U“-Struktur der Fall ist.

Zusammenfassung und Nutzwertanalyse der vermessenen Varianten:

Mit Einsatz der ta-C V1/V2 Schichtvarianten auf dem Kompressionsring konnten im BMW Anwendungsfall bei gleichbleibenden Randbedingungen (PC03-Motoröl, LDS-Liner) Reibvorteile von bis zu 14% gegenüber der stahlnitrierten Ringvariante aus dem Serienbetrieb ermittelt und daraus ein Verbrauchsvorteil von 0.5 – 1% weniger Kraftstoff im Betriebsbereich des WLTC abgeschätzt werden. Die Kombination mit zinkfreiem Motoröl zeigte vergleichbare Ergebnisse. Der Wegfall von zinkhaltigen Additiven kann in Zukunft eine Passivierung von Abgasnachbehandlungssystemen (Katalysator, Partikelfilter) entscheidend mindern, was, entscheidend zu einem verbesserten Konvertierungs-/Abscheideverhalten der Nachbehandlungssysteme und damit zur Emissionsminderung (Stickoxide, Partikel) und Lebensdauererlängerung von Abgasanlagen beiträgt. Darauf aufbauend konnten ta-C V2 basierte, strukturierte DLIP-Kompressionsringe zu einer weiteren Steigerung des Potentials in breiten Kennfeldbereichen um 5 – 10 % mit dem niedrigviskosen Versuchsöl beitragen (siehe HAP 4100). Diese Kombination bietet für zukünftige, hybride und elektrifizierte Antriebskonzepte durch optimiertes Hydrodynamikverhalten ein hohes Potential zur Minderung von CO₂-Emissionen, insbesondere im Rahmen der gesteigerten Kaltstartanteile. Durch die hohe Robustheit der ta-C Schichten ist zudem für den zukünftigen Einsatz von synthetischen Kraftstoffen (z.B. Methanol: Schmierstoffverdünnung durch erhöhten Kraftstoffeintrag) mit einer gesteigerten Verschleißsicherheit zu rechnen.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

1.6.3.8.1 MAN Versuchsumfang

Im Projektzeitraum wurden umfangreiche Untersuchungen für die MAN Endanwendung durchgeführt, die sich thematisch insbesondere auf das Verhalten der Kolbenringbeschichtungen bei Betrachtung unterschiedlicher Randbedingungen, d.h. bei Variation von Motorölen und/oder der Zylinderlaufbahnen, fokussierten. Konkret kamen neben den seriennahen Komponenten ein zinkfreies, viskositätsreduziertes Motoröl (HD-07) des Projektpartners FUCHS sowie eine APS-Laufbahnvariante zum Einsatz.

MAN Versuchsumfänge mit Serien-Motoröl HD-01

In Analogie zu BMW-Versuchen (BMW-LDS-Liner mit bis zu 15% Reibvorteilen), zeigen die Versuche auch für das MAN-Technologieumfeld (GJL-Liner, GDC50-Kompressionsring) Reibminderungspotentiale. Letztgenannte sind stark abhängig von der verwendeten ta-C Schicht, betragen aber punktuell bis zu 14 % unter hohen Lasten. Insbesondere die harte ta-C V1-Schicht ist an dieser Stelle positiv zu bewerten. Auf APS- Zylinderlaufbahnen sind die gemessenen ta-C Potentiale gegenüber dem Serienkompressionsring höher als auf GJL und betragen punktweise mehr als 20% der Reibarbeit. Weiterhin erwähnenswert ist das entgegengesetzte Verhalten der ta-C Ringe, bei welchem nur der ta-C V2 Kolbenring (identisch zu den BMW Versuchen) ein besseres Verhalten als der ta-C V1-Ring auf der Spritzschicht über dem Kennfeld aufweist.

MAN-Versuchsumfänge mit zinkfreiem Motoröl HD-07

Die zinkfreie Motorölvariante HD-07 besitzt ggü. dem Standardöl HD-01 eine abgesenkte Viskosität, was im Bereich der Kolbenringe das Risiko gesteigerter Kontaktreibung erhöht. Beide ta-C Varianten zeigen ein grundsätzlich positives Verhalten in Kombination mit der zinkfreien Ölvariante HD07 auf GJL. Insbesondere bei hoher Motorlast wurden Reibavorteile von bis zu 11% gemessen, kurbelwinkel aufgelöste Reibkraftanalysen zeigen dabei Vorteile mit eindeutigem Schwerpunkt im Arbeitstakt. In Richtung höherer Drehzahlen (=höherer Gleitgeschwindigkeiten) tendieren die ta-C Kompressionsringe im Kennfeld zu einem neutralen (GDC50) Verhalten. Ein gesteigertes Potential durch Vorteile des ta-C im Bereich des durch die Viskositätsabsenkung begünstigten Kennfeldbereichs mit hohen Kontaktreibungsanteilen ist mit APS-Oberflächen nicht zu erkennen.

MAN-Versuchsumfänge mit Bor-dotiertem DLC

In Ergänzung zu den ta-C-V1/V2 – Schichten wurden in der MAN Anwendung bordotierte a-C-Kompressionsringe mit den zinkfreien HD-07 Motoröl auf GJL sowie APS-Zylinderlaufbahnen vermessen. Demnach ist auf GJL ein hohes Reibminderungspotential bei niedrigen Drehzahlen im befeuerten Betrieb z.T. bis 20% vorhanden.

Auf APS-Linern konnten lediglich punktweise Vorteile erzielt werden.

Nutzwertanalyse der vermessenen Varianten:

Mit Einsatz der ta-C-Ringe konnten in der MAN-Anwendung auf dem GJL-Liner in Kombination mit dem zinkfreien HD07-Motoröl Vorteile in zyklusrelevanten Betriebspunkten von bis zu 10% gemessen werden. Mit dem Einsatz der zinkfreien Motorölzusammensetzung werden analog zu der PKW-Anwendung (siehe Kapitel 1.6.3.8) ähnliche Vorteile erschlossen. Durch Einsatz der bordotierten Schichtvariante konnten die Vorteile, insbesondere auf der GJL-Oberfläche, weiter gesteigert werden.

Steinbeis:

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

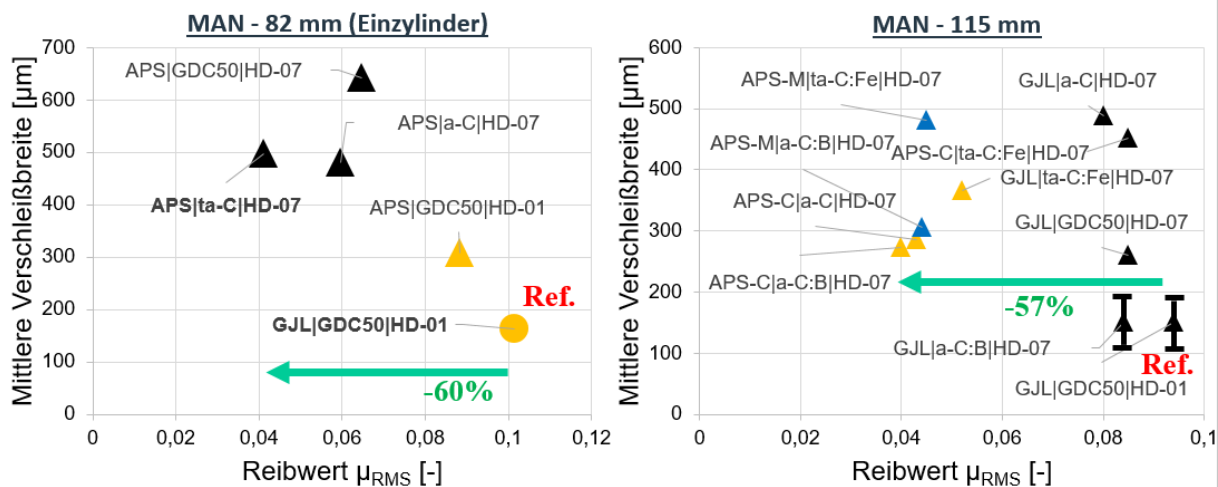


Abbildung 104: Vielversprechendste Varianten für MAN, gemessen auf dem RHT

Dank der Voruntersuchungen bei den Projektpartner FUCHS und Tenneco konnten am Realhubtribometer eine reduzierte Anzahl an Variationen geprüft werden. Die Versuchsreihen am Realhubtribometer zeigten, dass neuartige, niedrigviskose Motorenöle, Beschichtungssysteme der Kolbenringe – mit und ohne Dotierungen – und der Zylinderwerkstoff die Performance der Tribosysteme steigern. Dabei konnte eine Reibungsverbesserung um 60% am System mit einem Kolbendurchmesser von 82 mm und um 57% am System mit einem Kolbendurchmesser von 115 mm nachgewiesen werden. (siehe Abbildung 104)

Tenneco: Plint-Tribometer Ergebnisse für das MAN-Tribosystem:

Im Rahmen der außermotorischen Untersuchung des MAN-Tribosystems konnte durch den Einsatz von ta-C-Beschichtungen eine deutliche Verschleißreduktion in Kombination mit dem Serienöl HD-01 festgestellt werden. Gleichzeitig wurden leichte Reibvorteile gemessen. Durch den Einsatz des HD-07 Öl konnte hingegen eine signifikante Reibreduktion erzielt werden. Gleichzeitig wurde hierbei jedoch ein deutlich erhöhter Ring- als auch Linerverschleiß festgestellt, siehe Abbildung 105:.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Ring-Ø82mm zu Liner-D15 GG=Ø115mm_HD-01/HD-07

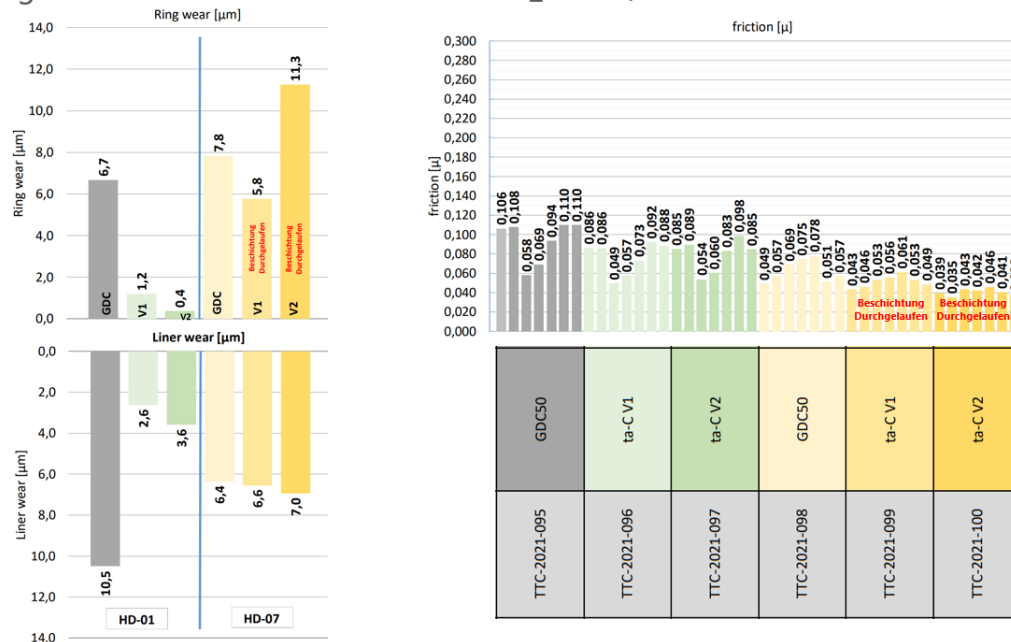


Abbildung 105: Reib- und Verschleißverhalten von HD-01 und HD-07 mit unterschiedlichen Schichtvarianten

Im weiteren Verlauf der außermotorischen Untersuchung lag der Fokus auf der Nutzung der positiven Reibpotentiale des HD-07 Öls bei gleichzeitiger Absenkung des Verschleißes, siehe Abbildung 106:.

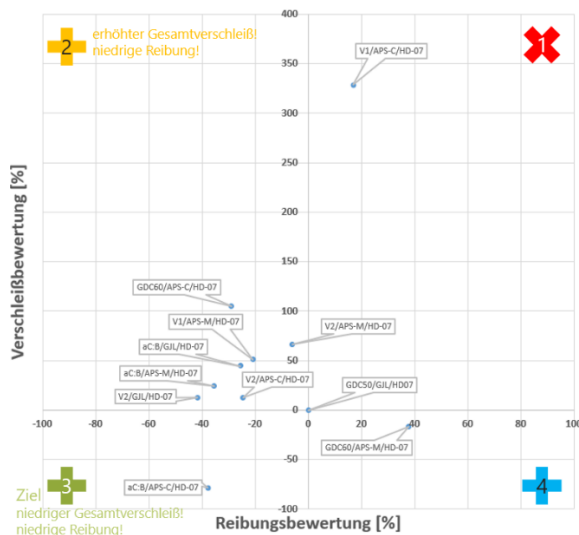


Abbildung 106: Quadrantendarstellung der für MAN untersuchten Tribosysteme mit HD-07 Öl

Als eine äußerst vielversprechende Variante stellte sich dabei die a-C:B Variante in Kombination mit dem APS-Liner und dem HD-07 Öl heraus, die gegenüber der Referenz deutliche Reib- und Verschleißvorteile aufgezeigt hat.

1.6.3.8.2 Rolls-Royce-Versuchsumfang beim TUD-LVM

Im Projektzeitraum wurden umfangreiche Untersuchungen für die Rolls-RoyceEndanwendung durchgeführt, die zunächst das Reibverhalten der undotierten ta-C – Ringbeschichtungen in Abhängigkeit

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

der beiden in Serie befindlichen Motoröle (HI-03 G für Gasmotoren; HI-01-D für dieselmotorische Anwendungen) fokussierten, weiterhin wurde der Einfluss von PTWA-Zylinderlaufbahnen und feingehonten Graugussoberflächen untersucht. Das Zusammenwirken von Esterölen in Kombination mit bordotierten a/ta-C Schichten stellte den Abschluss der Rolls-Royce-Versuchsumfänge dar.

Rolls-Royce-Versuchsumfänge mit Serien-Motorölen

Im Gegensatz zu den Versuchen aus den Anwendungen BMW sowie MAN konnten bei den Rolls-Royce-Umfängen mit einem reinen Austausch der Kompressionsringe mit ta-C Schichten zunächst keine nennenswerten Potentiale gegenüber den Serienringen ermittelt werden. Ebenso konnte durch die Verwendung eines viskositätsabgesenkten Motoröls HI-05-G (und einer damit verbundenen Erhöhung der Kontaktreibanteile) kein Vorteil durch die ta-C Ringe auf den GG-Zylinderlaufbahnen ermittelt werden. Für die Vermessung auf PTWA-Laufschichten wurden eine Ringvarianten „GDC60“ und „ta-C V1“ dem Serienstand „CKS36“ gegenübergestellt. Mit dieser Kombination konnte auf den PTWA-Linern lediglich in vereinzelt Betriebspunkten eine geringe Reibverlustminderung von 4% beobachtet werden.

Rolls-Royce-Versuchsumfänge mit feingehonter GG-Laufbahn

Die Versuchsläufe der ta-C Ringvarianten wurden auf einer feingehonten GG-Laufbahn (identischer Werkstoff) wiederholt und den Referenzmessungen mit CKS36-Kompressionsringen gegenübergestellt. Dabei ist ein grundsätzlich positives Verhalten der ta-C beschichteten Ringe festzustellen, wobei die weichere V2-Beschichtung einen höheren Reibvorteil besitzt.

Rolls-Royce-Versuchsumfänge mit esterbasierten Motorölen

Im Rahmen von Voruntersuchungen wurde für den kombinierten Einsatz einiger a/ta-C Schichten mit esterbasierten Schmierstoffen ein hohes Potential zur Reibminderung identifiziert. Im Versuch zweier Motoröle mit identischer Viskositätseinstufung (HI-03-G sowie HI-10) konnte für das esterbasierte Motoröl in Kombination mit einer a-C:B Schichtvariante auf GJL ein neutrales Verhalten, d.h. kein Vorteil, am Prüfstand ermittelt werden. Weitere Versuche mit V1/V2 ta-C Varianten auf Kompressionsringen kamen zu vergleichbaren Tendenzen wie in Versuchsblöcken mit dem Standardöl HI-03-G, weshalb ein esterbasierter Effekt für Versuche auf GJL nicht festgestellt werden konnte.

Zusammenfassung der vermessenen Rolls-Royce-Varianten:

Mit Einsatz der ta-C V1/V2 Varianten konnte bei Verwendung der Serien-Motoröle weder auf den GJL noch PTWA-Laufbahnen ein über die Wiederholgenauigkeit messbares Potential ermittelt werden. Erst durch Einsatz der feingehonten GG-Zylinderlaufbahn wurden mit den ta-C Varianten einige Kennfeldbereiche mit leichten Potentialen identifiziert. Durch Verwendung einer esterbasierten Motorölvariante in Verbindung mit Einsatz eines PTWA-Liners konnte für alle drei Schichtvarianten auf den Kompressionsringen (ta-C V1/V2; a-C:B) ein Potential in gleicher Größenordnung ggü. dem Standard-Kompressionsring von bis zu 11% ermittelt werden, durch Einsatz einer weiteren Estervariante konnte für ta-C V1 und V2 das Potential noch einmal gesteigert werden.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Rolls-Royce-Ergebnisse beim SZ:

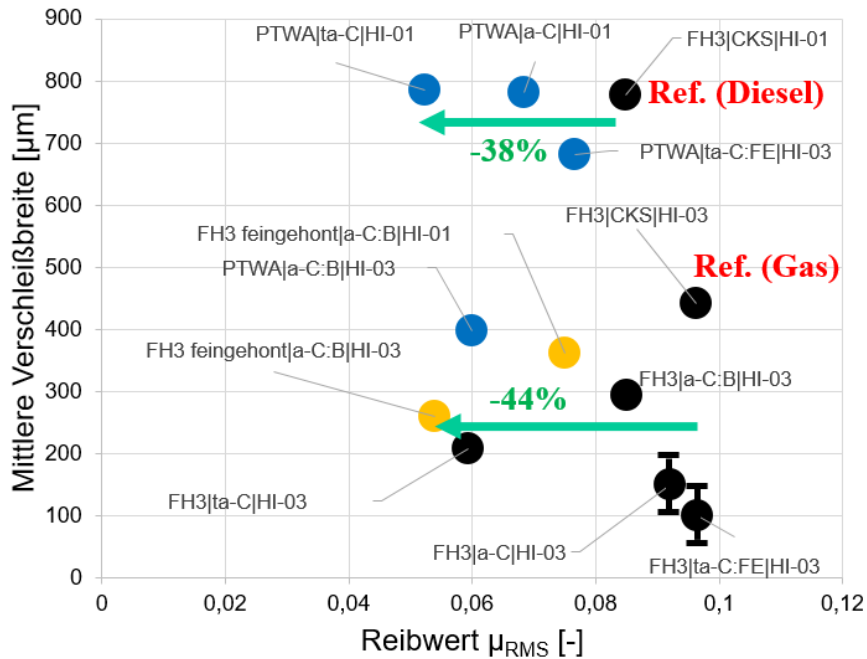


Abbildung 107: Vielversprechendste Varianten für Rolls-Royce, gemessen auf dem RHT

Dank der Voruntersuchungen bei den Projektpartner FUCHS und Tenneco konnten am Realhubtribometer eine reduzierte Anzahl an Variationen geprüft werden. Die Versuchsreihen am Realhubtribometer zeigten, dass neuartige Beschichtungssysteme der Kolbenringe – mit und ohne Dotierungen – und der Zylinderwerkstoff mit entsprechender Honung die Performance der Tribosysteme steigern. Dabei konnte eine Reibungsverbesserung um 49% gegenüber den Referenzsystemen nachgewiesen werden.

Tenneco: Plint-Tribometer Ergebnisse für das Rolls-Royce-Tribosystem:

Für die außermotorische Untersuchung für Rolls-Royce auf dem Plint-Tribometer bei Tenneco standen der GJL-Liner als auch der PTWA-Liner im Fokus. Mit beiden Liner-Varianten wurde eine Vielzahl an Schicht-Öl-Kombinationen untersucht. Die jeweiligen Favoriten im Hinblick auf ein ausgewogenes Reib- und Verschleißverhalten sind den Quadratendarstellungen in Abbildung 108: zu entnehmen.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

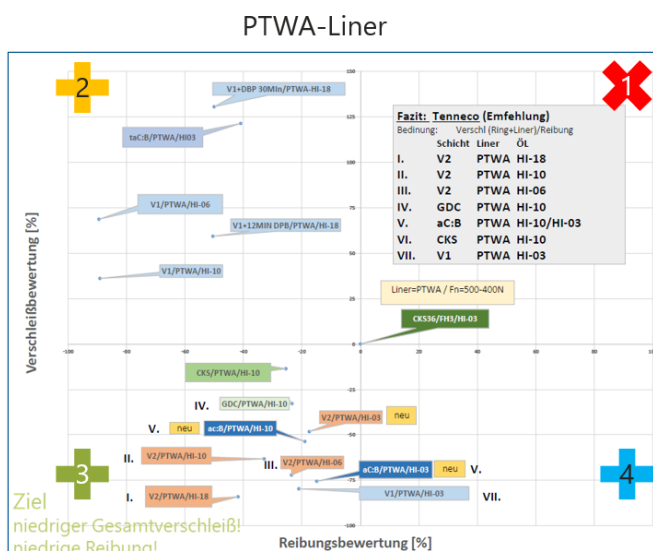
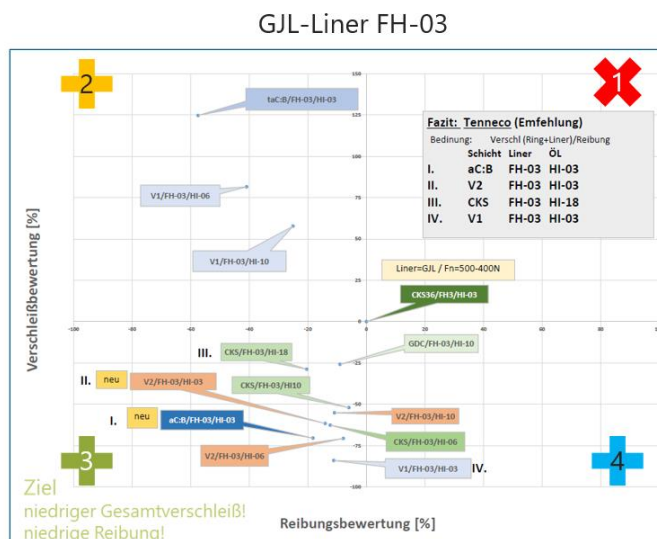


Abbildung 108: Quadrantendarstellung der für Rolls-Royce auf dem Plint-Tribometer untersuchten Tribosysteme

1.6.3.9 HAP 7070 Versuche mit BMW B48OL Vollmotoren bei TENNECO

Zur Validierung der sowohl außermotorisch (Realhub- und Plint-Tribometer) als auch auf dem Einzylinderprüfstand der TU Dresden nachgewiesenen Schichtperformance wurden vollmotorische befeuerte Untersuchungen ausgewählter Varianten angeschlossen. Hierzu wurde ein von BMW bereitgestellter B48OL 4-Zylindermotor am Motorenprüfstand von Tenneco eingesetzt. Die geometrischen Randbedingungen sind dabei identisch zu den außermotorischen genutzten Prüfbedingungen.

Zu Beginn der vollmotorischen Untersuchungen wurden mögliche Quereinflüsse auf das Reibergebnis untersucht. Hierzu wurden u.a. Einflüsse der Demontage und Montage des Motors auf die Streuung des Reibergebnisses, der Einfluss einer neuen externen Ölpumpe zur Förderung des niedrigviskosen 0W12 Öls, als auch der Einfluss des 0W12 Öls an sich untersucht.

Im Rahmen der 3-mal pro Variante wiederholten Kennfelduntersuchungen fielen die gemessenen Abweichungen zwischen den einzelnen Varianten gering aus, siehe Abbildung 109:.. Insbesondere konnten

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

für den Wechsel auf das 0W12 Öl, welcher ohne eine Demontage des Motors stattgefunden hat, keine messbaren Vorteile ermittelt werden.

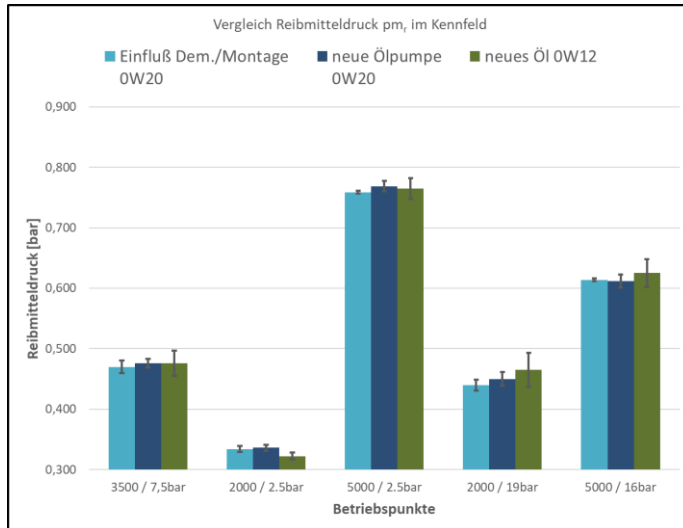


Abbildung 109: Vergleich des Reibmitteldrucks im Kennfeld auf verschiedene Quereinflüsse

Es wurden folgende Varianten vollmotorisch erprobt:

Tabelle 4: Versuchsumfang am BMW B48 Vollmotor bei Tenneco

Motorlauf	1. Nut	3. Nut	Öl
V02 (Referenz)	Serie (nitriert)	Serie (nitriert)	0W20
V03	ta-C V2	Serie (nitriert)	0W20
V04	ta-C V2	Serie (nitriert)	0W12
V05	ta-C:Mo	ta-C V2 reduzierte Tangentialkraft	0W12

Die vollmotorische Erprobung mit dem ta-C V2 Ring in der ersten Nut (V03) zeigte sowohl im Kennfeld als auch im WLTC-Zyklus zusammen mit dem 0W20 Öl tendenziell eine Erhöhung des Reibmitteldrucks. Im anschließenden Motorlauf wurde ohne Demontage des Motors auf das 0W12 umgeölt (V04). Die dabei gemessenen Reibmitteldrücke lagen in einigen Kennfeldpunkten deutlich unter den Referenzwerten. Mit dem Umbau auf die ta-C:Mo Variante in der ersten Nut zusammen mit dem ta-C:V2 beschichteten Örling mit reduzierter Tangentialkraftabsenkung (V05) konnten nochmals signifikant reduzierte Reibmitteldrücke in allen Kennfeldpunkten gegenüber der Referenz gemessen werden.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

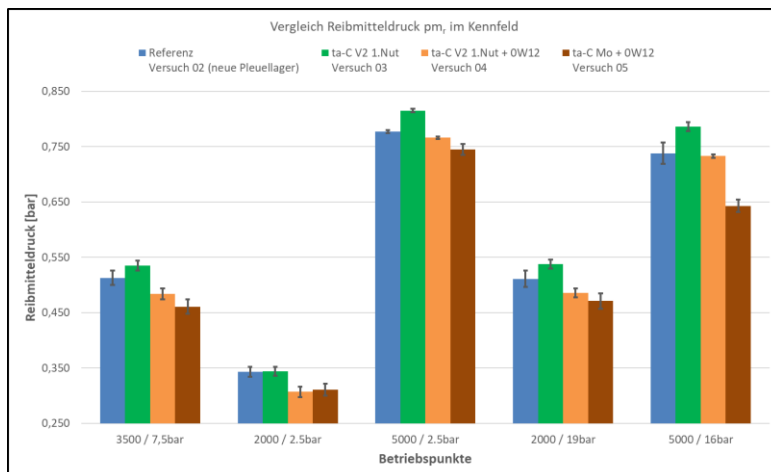


Abbildung 110: Reibmitteldrücke in charakteristischen Kennfeldpunkten der getesteten PROMETHEUS-Varianten

In der Grafik Abbildung 111: finden sich die Reibmitteldrücke für die einzelnen Kennfeldpunkte der jeweilig getesteten Varianten. Die dargestellte Messabweichung ergibt sich aus den mindestens 3 Wiederholungen pro Kennfeldpunkt.

Bei der Betrachtung der mittleren Reibmomentenverläufe im WLTC bestätigt sich die bereits im Kennfeld beobachtete Tendenz der einzelnen Varianten zueinander, siehe Abbildung 111:.

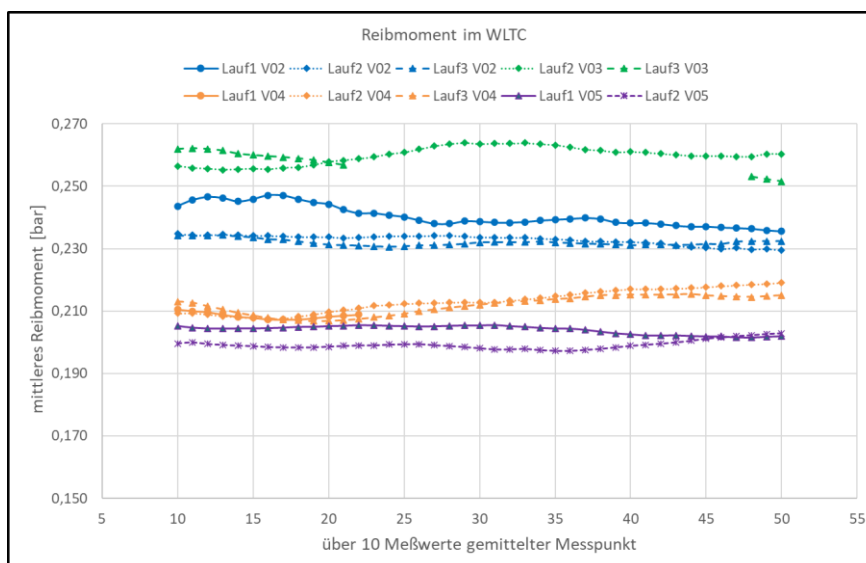


Abbildung 111: Mittleres Reibmoment der getesteten PROMETHEUS-Varianten im WLTC

Die geringsten Reibmomente konnten für die beiden Motorläufe V04 und V05 analog zum Kennfeldprogramm gemessen werden. Auch im WLTC ergeben sich für die ta-C V2 in der ersten Nut mit 0W20 (V03) die höchsten Reibmomente.

Ausgehend von den gemessenen Vorteilen des mittleren Reibmoments im WLTC ergeben sich nachgewiesene Kraftstoffeinsparpotentiale für die Variante V04 (1.Nut: ta-C V2 mit 0W12 Öl) von 0,8 % und für die Variante V05 (1.Nut ta-C:Mo, 2. Nut: ta-C V2 mit reduzierter Tangentialkraft und 0W12 Öl) von 1,2 % gegenüber der Referenz.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Tabelle 5: Ermittelte Reibleistungsgewinne und Kraftstoffeinsparpotentiale am Vollmotor

Motorlauf	1. Nut	3. Nut	Öl	Reibleistungsgewinn	Kraftstoffeinsparpotential im WLTC
V02 (Referenz)	Serie (nitriert)	Serie (nitriert)	0W20	-	-
V03	ta-C V2	Serie (nitriert)	0W20	-5,4 %	-0,4 %
V04	ta-C V2	Serie (nitriert)	0W12	9,8 %	0,8 %
V05	ta-C:Mo	ta-C V2 mit reduzierter Tangentialkraft	0W12	14,2 %	1,2 %

Der ta-C V2 Topring hat in Kombination mit dem 0W12 Öl deutliche Reibleistungsvorteile erzielt. Mit der weiteren Ausbaustufe (V05) konnte in nahezu allen Kennfeldpunkten sowie im WLTC signifikante Reibleistungsvorteile sowie Kraftstoffeinsparpotentiale (1,2 %) gegenüber dem aktuellen Serienzustand nachgewiesen werden.

Zusammenfassung des Effizienznachweises am BMW Vollmotor bei Tenneco

Die Voruntersuchungen am Vollmotor haben gezeigt, dass der Versuchsmotor gegenüber Quereinflüssen, wie einer Demontage mit anschließender Montage des Motors, eine geringe Streuung aufweist. Der erlittene Pleuellagerschaden nach Abschluss der Voruntersuchungen hat das Herausfahren einer neuen Referenz notwendig gemacht. Ein Vergleich zwischen beiden Zuständen (vor und nach Pleuellagertausch) ist nicht sinnvoll, da beim Tausch der Pleuellager massiv in das Tribosystem eingegriffen wurde, was zu einem Offset der Reibmomente geführt hat.

In den Voruntersuchungen konnte kein messbarer Effekt bei der Umölung von 0W20 auf 0W12 gemessen werden. Ob dies über einen beginnenden Pleuellagerschaden zu erklären ist, konnte nicht sicher beantwortet werden. Die Umölung auf 0W12 in Kombination mit dem ta-C V2 Topring hat hingegen deutliche Reibleistungsvorteile erbracht. Mit der weiteren Ausbaustufe (V05) konnte in nahezu allen Kennfeldpunkten sowie im WLTC signifikante Reibleistungsvorteile sowie Kraftstoffeinsparpotentiale (1,2 %) gegenüber dem aktuellen Serienzustand nachgewiesen werden.

1.6.3.10 HAP 7080 Versuche an MAN Nutzfahrzeugmotoren

Im Zeitraum von März bis Juli 2021 sowie von Mai bis Juni 2022 wurden in insgesamt über 800 Betriebsstunden umfangreiche Reibungsuntersuchungen an einem MAN D15 Nutzfahrzeugvollmotor mit 9l Hubvolumen durchgeführt. Die Performance des PROMETHEUS Versuchsöls PROM-HD-07 wurde an einem MAN D26 mit 12l Hubvolumen bewertet, da dieser das Hauptvolumen der MAN Produktpalette darstellt. Zusätzlich wurden in 2022 an einem D15 Einzylindermotor zur Verschleißbewertung der PROMETHEUS-Komponenten Kurz-Dauerläufe gefahren. Der Einzylindermotor wurde hierbei insgesamt über mehr als 1000 Betriebsstunden betrieben, d.h. es erfolgte eine systematische Bewertung unter Berücksichtigung des Einlaufverhaltens.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

1.6.3.10.1 Messungen am 9l MAN D1556

An diesem Motor wurden die Kompressionsringe GDC50 (Referenz), ta-CV1- und ta-CV2- beschichtete Kompressionsringe gegen GJL-Liner sowie die Kombination ta-CV1 und APS-m Liner untersucht. Es wurden das Referenzöl PROM-HD-01 sowie das zinkfreie Öl PROM HD 07 verwendet.

Abbildung 112 zeigt die technischen Daten des Motors.

Versuchsmotor MAN D15 für Kolbenring/Liner-Untersuchungen

D1556 LOH10	
Hauptabmessungen	<ul style="list-style-type: none"> Bohrung 115 mm Hubvolumen 9 l
Leistungseinstellung	<ul style="list-style-type: none"> 294 kW / 400 PS 1800 Nm @ 1000-1500 1/min
EDC	<ul style="list-style-type: none"> EDC17 P1511 1.6.1 Synthetischer Datensatz
Aufladung	<ul style="list-style-type: none"> 1-stufig, WG
Indizierung	<ul style="list-style-type: none"> 6-fach, Dewetron
Besonderheiten	<ul style="list-style-type: none"> mit Abgaskabelbaum, leerer Schalldämpfer, TSD von BST2.2 (-0202)

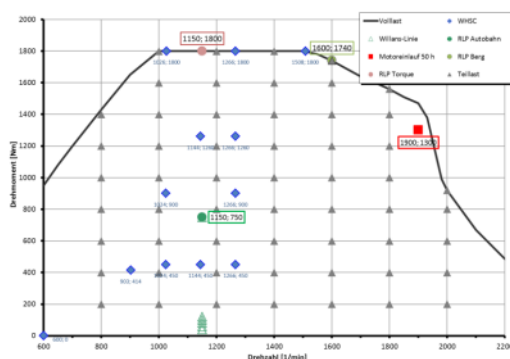
Abbildung 112: Daten 9l D1556

Der Motor wird sowohl im LKW als auch in Stadtbusanwendungen eingesetzt. Es wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm definiert, welches Untersuchungen sowohl im stationären als auch im dynamischen Motorbetrieb beinhaltet.

Abbildung 113 zeigt die Motorbetriebspunkte.

Stationärer Motorbetrieb

- Betriebspunkte im stationären WHSC-Test
- Road-Load-Punkte:
Autobahn: 1150 U/min/750 Nm
Torque: 1150 U/min / 1800 Nm
Berg: 1600 U/min / 1740 Nm
- Einlauf: 1900 U/min / 1300 Nm



Dynamischer Motorbetrieb (WHTC-Zyklus)

- Änderung von Drehzahl und Drehmoment von Sekunde zu Sekunde
- Annäherung an den realen Fahrbetriebs

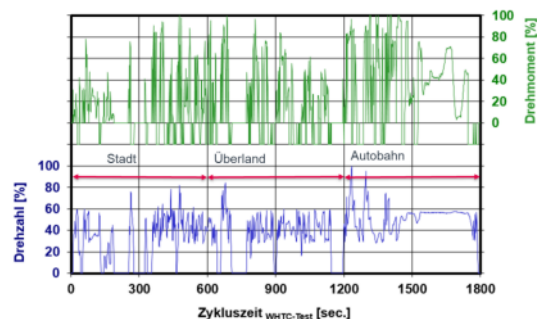


Abbildung 113: Motorbetriebspunkte für Verbrauchs- und Reibungsuntersuchungen

Neben dem für schwere Nutzfahrzeugmotoren zur Emissionsermittlung vorgeschriebenen WHSC- und WHTC-Tests wurden Vollastbetriebspunkte, Schlepptrieb und sogenannte Road-Load- Punkte

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

gefahren. Bei den Road-Load-Punkten handelt es sich um für den Nutzfahrzeugbetrieb typische und repräsentative Motorbetriebspunkte.

Abbildung 114 zeigt die in 2021 und 2022 gefahrenen Messprogramme.

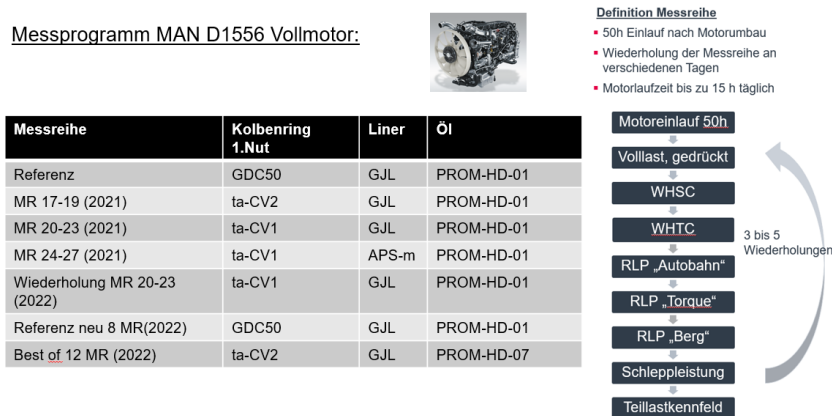


Abbildung 114: Messprogramm D15 in den Jahren 2021 und 2022

Insgesamt wurden 56 Messreihen gefahren. Eine Messreihe setzt sich aus folgenden Messungen zusammen: Volllast, WHSC, WHTC, Road Load Punkte, Schleppleistung und Kennfeld. Zu jeder Konfiguration Kolbenring/Liner wurden die Messreihen 2-12-mal wiederholt. Nach jedem Umbau auf eine neue Konfiguration erfolgte zunächst ein Einlauf über 50 h.

Bei den in der ersten Messkampagne in 2021 durchgeführten Messungen konnte kein Vorteil für die Kolbenringbeschichtung ta-CV1 bzw. die Kombination ta-CV1 mit APS-m Liner gemessen werden.

Im Rahmen der Messkampagne 2022 wurde der Motor zur Wiederholung der Messreihe MR 20-23 (ta-CV1-beschichtete Topringe und GJL-Linern) noch einmal mit diesen Komponenten aufgebaut und vermessen. Anschließend erfolgte der Umbau auf Serien-Ringe und -liner als Referenz.

Als „Best of“ wurde die Kombination aus ta-CV2-beschichteten Topringen, GJL-Serienlinern und dem molybdänhaltigen, viskositätsoptimierten Öl PROM-HD-07 (5W-20) ausgewählt. Diese Kombination zeigte in den vorgelagerten Komponentenversuchen der Projektpartner (Plint, RHT und Einzylinder der TU Dresden) besonders günstige Werte hinsichtlich Reibung (30-40 % geringere Ringreibung). Ein wichtiger Aspekt ist die Industrialisierbarkeit dieser Konfiguration, die durch das Beibehalten der serienmäßigen GJL-Liner deutlich einfacher und auch wirtschaftlicher ist.

Im Folgenden wird auf diese in 2022 durchgeführten Messungen eingegangen.

Abbildung 115 zeigt die Schleppkurven der Serienkonfiguration im Vergleich zu ta-CV1-beschichteten Topringen, beide mit Serienöl PROM-HD-01 (5W-30). Für ta-CV1 ergibt sich ein leichter Vorteil, insbesondere bei niedrigen Drehzahlen. Die „Best of“ Kombination ta-CV2/HD07 zeigt deutlich niedrigere Schleppmomente (= weniger negativ), und bestätigt die Auswahl.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

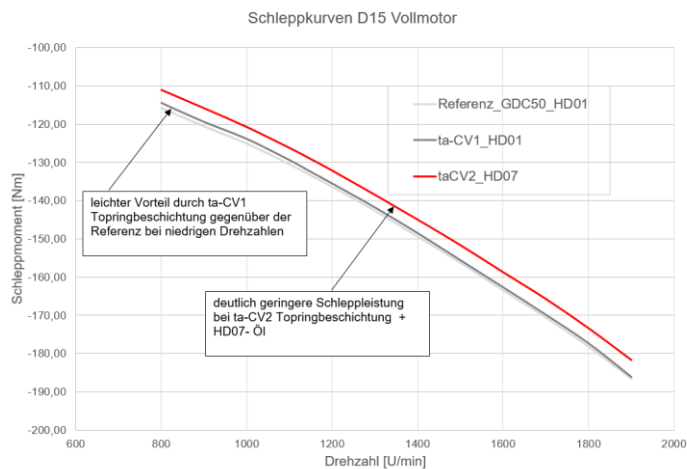


Abbildung 115: Schleppkurven D15 Vollmotor

Abbildung 116 zeigt die Werte des relativen Verbrauchs und des Reibmitteldrucks (Gesamtmotor) der drei untersuchten Topping/ Liner Konfigurationen. Es handelt sich hierbei um den Mittelwert der verschiedenen Messreihen die zu der jeweiligen Konfiguration gefahren wurden.

Es zeigt sich, dass der Fehler der Reibmitteldruckbestimmung relativ hoch ist, und in der Größenordnung der Reibvorteile liegt die allein durch eine Änderung der Kolbenringbeschichtung bei diesem Motor erwartbar sind (0,1 bar). Daher ist hier die Messung des Kraftstoffverbrauchs verlässlicher und valide.

Grundsätzlich haben die ta-CV2-beschichtete Ringe Verbrauchsvorteile gegenüber dem Serienring.

Die Kombination ta-CV2/HD07 zeigt in den eher niedriglastigen Emissionszyklen WHSC und WHTC sowie im Autobahnbetrieb Verbrauchsvorteile von 0,5 bis 0,6 %.

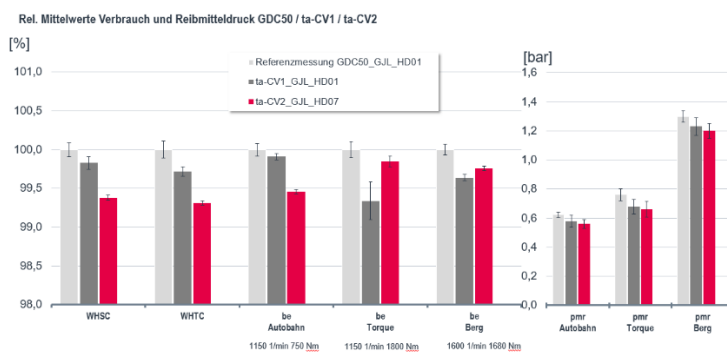


Abbildung 116: relativer Verbrauch und Reibmitteldruck der verschiedenen Konfigurationen

Untersuchung ÖI PROM-HD07 am D26

Das PROMETHEUS-ÖI Prom-HD-07 wurde zudem an einem 12 l D2676 Motor in Kombination mit dem serienmäßigen GJL Liner und den serienmäßigen mit PVD-beschichteten Kolbenringen gefahren.

Abbildung 117 zeigt die Motordaten. Es handelt sich hierbei um einen typischen Nutzfahrzeugdieselmotor für den Fernverkehrseinsatz.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Versuchsmotor D26 für Öluntersuchungen

D2676 LF78	
Hauptabmessungen	<ul style="list-style-type: none"> Bohrung : 126 mm Hubvolumen : 12,4 l
Leistungseinstellung	<ul style="list-style-type: none"> 375 kW / 510 PS 2600 Nm @930-1350 1/min
Emissionsstufe	<ul style="list-style-type: none"> EuroVI D
Aufladung	<ul style="list-style-type: none"> 1-stufig



Abbildung 117: Daten 12l D2676

Für die Öluntersuchungen wurde der Motor im Dauerlauf bis zu 500 h betrieben. Während des Dauerlaufs erfolgten Zwischenmessungen nach 200, 250 und 350h. Abbildung 118 zeigt das Messprogramm:

Messreihenablauf Öluntersuchungen am D26

- Zwischenmessungen WHSC, WHTC Neumarkter Rundstrecke während des Dauerlaufs
- Für jede Ölvariante wurde eine neue PLU verwendet
- Spüllauf vor Beginn der Messungen

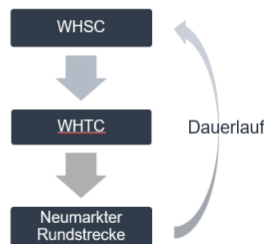


Abbildung 118: Messprogramm D26 Öluntersuchungen

Abbildung 119 zeigt die relativen Kraftstoffverbräuche in den verschiedenen Zyklen über der Laufzeit für das Referenzöl (Grau) und PROM-HD-07 (Rot).

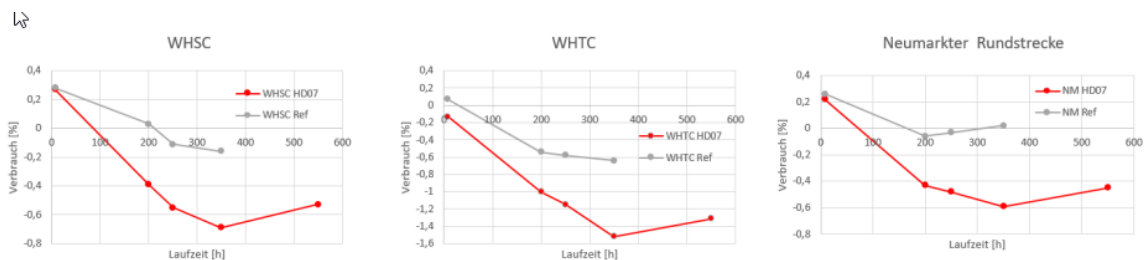


Abbildung 119: Messprogramm D26 Öluntersuchungen

Bei beiden Ölen nimmt der Verbrauch aufgrund von Einlaufeffekten mit zunehmender Laufzeit ab. Durch die Ausbildung eines ölspezifischen, reibungsreduzierenden dritten Körpers ist die Verbrauchsreduzierung bei PROM-HD-07 jedoch deutlich größer. Es zeigt sich eindeutig der Vorteil der Additivierung mit Molybdän.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

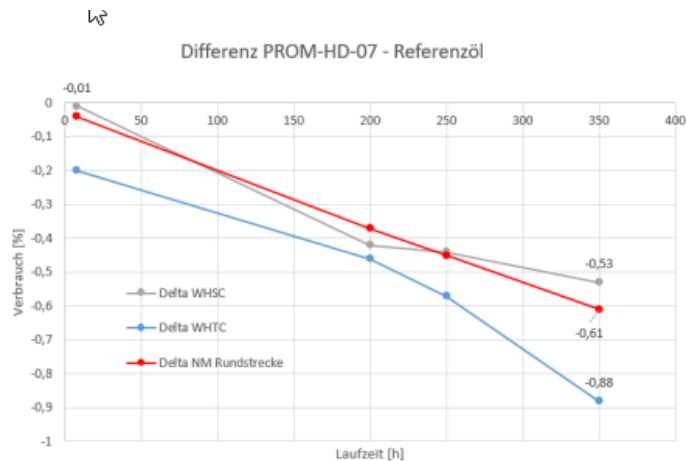


Abbildung 120: Verbrauchsvorteil PROM-HD-07 gegenüber Referenzöl

Abbildung 120 zeigt noch einmal die Vorteile von PROM-HD 07. Abhängig vom Messzyklus ist eine Kraftstoff- und damit **CO₂-Ersparnis von 0,5 bis 0,8 %** möglich. Im Zyklus Neumarkter Rundstrecke wurde ein Verbrauchsvorteil von **0,6 %** ermittelt. Es handelt sich hierbei um eine am Prüfstand nachgefahrte **reale Fahrstrecke**. Aufgrund der bisherigen MAN-Erfahrungen hinsichtlich der Übertragbarkeit dieser Nachfahrversuche ist zu erwarten, dass sich die am Prüfstand ermittelten Vorteile in der gleichen Größenordnung auch im realen Straßenbetrieb zeigen werden und damit ein erhebliches Potential zur CO₂-Reduzierung darstellen.

1.6.3.10.2 Untersuchungen am D15 Einzylindermotor

Am MAN D15 Einzylindermotor wurde ein umfangreiches Messprogramm insbesondere zur Verschleißbewertung von Kolbenringen und Linern durchgeführt. Es ist anzumerken, dass bei diesem Motor lediglich der Reibmitteldruck des gesamten Motors bestimmt werden kann. Der Beitrag der Kolbengruppe kann hier nicht separat ausgewiesen werden, wie dies bei einem Floating-Liner oder durch Pleuelkraftmessung möglich ist. Die gewonnenen Ergebnisse hinsichtlich Verbrauch und Reibmitteldruck sind mit relativ großen Fehlern behaftet und können nur Tendenzen aufweisen. Gut geeignet ist der Prüfstand jedoch zur Durchführung von Kurzdauerläufen zur relativen Verschleißbewertung (geringer Kraftstoffverbrauch und Umbauaufwand). Der Motor wurde insgesamt in über 1200 Stunden betrieben. Zusätzlich zu der im Vollmotor untersuchten, eher konservativen, „Best of“ Kombination wurde der Einzylindermotor genutzt, um mit a-C:B Ringen und APS-c Linern die innovativsten PROMETHEUS-Komponenten zu bewerten. Abbildung 121 zeigt das Messprogramm (Versuchsmatrix).

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

MAN Messprogramm am Einzylinder D1551

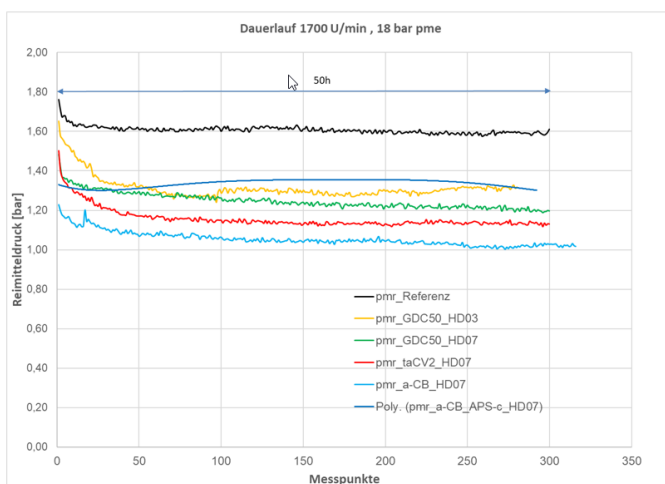
Messreihe	Kolbenring 1. Nut	Liner	Öl
Referenz	GDC50	GJL	PROM-HD-01 (5W 30)
Einfluß Viskosität	GDC50	GJL	PROM-HD-03 (5W 20)
Einfluß Visk. + Add.	GDC50	GJL	PROM-HD-07 (5W 20)
Einfluß besch. Topring	ta-CV2	GJL	PROM-HD-07
Einfluß Bor-Dotierung	a-CB	GJL	PROM-HD-07
Einfluß Bor-Dot. + Liner	a-CB oder ta-CV2	APS-c	PROM-HD07

- Untersuchung vorrangig Verschleiß
- Pro Messreihe 200h Betrieb zur Verschleißbewertung
- Vermessung der Kolbenringe und Liner vor und nach den Läufen



Abbildung 121: Messprogramm D15 Einzylinder

Abbildung 122 zeigt den Reibmitteldruckverlauf während der ersten 50 h des Dauerlaufs. Die Kombinationen ta-CV2/HD07 sowie a-C:B/HD07 zeigen die niedrigsten Reibwerte, was auch die Ergebnisse der vorgelagerten Versuche bestätigt. Zur Bewertung der Variante a-C:B/APS-c ist eine Trendlinie angegeben. Die Reibmitteldruckmessung wies aufgrund eines notwendigen Wechsel auf ein anderes Indiziersystem sehr große Schwankungen auf. Die relativ hohen Reibwerte konnten jedoch anhand anderer Messdaten plausibilisiert werden.



- ta-CV2 zeigt Vorteile gegenüber GDC50 bei HD07
- a-CB nochmals niedrigere Reibwerte in den ersten 100h
- PROM-HD-03 zeigt aufgrund der niedrigeren Viskosität anfangs ähnliche Reibvorteile wie PROM-HD-07
- a-CB mit APS-c (Trendlinie) zeigt keine Vorteile gegenüber ta-CV2 und GDC50

Abbildung 122: Reibmitteldruckverlauf während der ersten 50 h Dauerlauf am D15 Einzylinder

Wie eingangs erwähnt war der Hauptzweck der Einzylinderversuche die Verschleißermittlung der eingesetzten Komponenten. Abbildung 123 zeigt das Ergebnis.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Topring	Liner	Öl	Verschleiß Topring	Zwickelverschleiß
GDC50	GJL	PROM-HD-01 (5W 30)	2,2 µm	2µm
GDC50	GJL	PROM-HD-03 (5W 20)	1,5-2,0 µm	1µm
GDC50	GJL	PROM-HD-07 (5W 20)	2,0 µm	2µm
ta-CV2	GJL	PROM-HD-07	0,7 µm	< 0,1 µm
a-CB	GJL	PROM-HD-07	1,0 µm	< 0,1 µm
a-CB	APS-c	PROM-HD07	0,5-1,0 µm	< 0,1 µm

Abbildung 123: Übersicht Verschleißmessungen aus Dauerlauf D15 Einzylinder

Im Detail untersucht wurde die Ringkontur sowie der Zwickelverschleiß im Umkehrpunkt des Toprings.

Bemerkenswert ist, dass die Varianten mit ta-CV2 und a-C:B Beschichtung praktisch keinen Zwickelverschleiß aufweisen. Abbildung 124 zeigt hierzu die beispielhaft die Liner und Ringkonturen. Wie die Darstellung zeigt, entspricht die Kontur des mit ta-CV2 gelaufenen Liners derjenigen eines Neuteils.

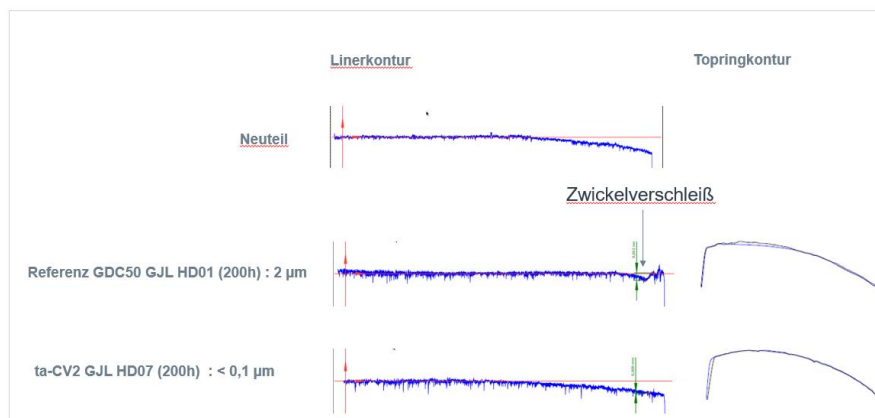


Abbildung 124: Liner und Topringverschleiß nach 200 h Dauerlauf

1.6.3.10.3 Fazit der Messungen an MAN Motoren

Ziel des Projektes für MAN ist eine Verbrauchsreduktion um 0,5 bis 1,5 % am Vollmotor.

Theoretisch kann durch Reduzierung der Kolbenringreibung um 30 bis 50 % eine Verbrauchsreduzierung in der Größenordnung von 0,1 bis 0,3 % erreicht werden. Reibungsreduzierungen in dieser Größenordnung konnten in den vorgelagerten Versuchen am Plint-Tribometer sowie am Realhubtribometer und am Einzylinder-Motor der TUD erreicht werden. Am Vollmotor und am Einzylindermotor haben sich in den jüngsten Versuchen Vorteile für ta-CVx -sowie die a-C:B Beschichtung am Topring gezeigt. Die „Best of“ Kombination aus ta-CV2 und PROM-HD-07 zeigt am Vollmotor Verbrauchsvorteile in der Größenordnung um 0,5 %. Am Einzylindermotor zeigte diese Variante nach 200h praktisch keinen Verschleiß. Auch im Vollmotor weisen die Liner keinen Zwickelverschleiß auf, die Vermessung der Kolbenringe aus dem Vollmotor steht noch aus.

Ein wichtiger Baustein zur Erfüllung des Verbrauchsreduktionsziels ist das zinkfreie Öl PROM-HD-07. Die Reibvorteile, welche dieses Öl aufweist, konnten bereits in den Laborversuchen und am Einzylindermotor der TUD gezeigt werden. **Am Realmotor konnte dies mit Verbrauchsverbesserungen um 0,6 % voll**

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

bestätigt werden. Wird der geringe Verschleiß der Komponenten noch final bestätigt ist damit die Basis für weitere Entwicklungsarbeiten und die industrielle Skalierbarkeit gelegt.

Basierend auf einer geschätzten Verbrauchseinsparung von 0,5 % ergäbe sich bei Serieneinführung der im Projekt PROMETHEUS gewonnenen Erkenntnisse und Komponenten in die stückzahlstärksten MAN-Motoren eine jährliche Ersparnis von ca. 17.000 t CO₂.

1.6.3.11 HAP 7090 Versuche mit Rolls-Royce mtu-Motoren

Zur finalen Funktionserprobung und Validierung der Tribosysteme wurden bei Rolls-Royce projektbegleitend SRV-Versuche und im letzten Projekthalbjahr Einzylinderversuche durchgeführt. Basierend auf den Ergebnissen der SRV-Versuche in Kombinationen mit den Ergebnissen der Partner wurden die vielversprechendsten Systeme für die Einzylindereprobung ausgewählt.

Nachfolgend sind in Tabelle 6 die Versuchsparameter der beiden am SRV durchgeführten Versuchstypen zusammengefasst. Zur systematischen Erprobung der Systeme wurde jeweils ein Konstantlastversuch zur Bestimmung des Reibungsverhaltens und ein Ölabbstellversuch zur Ermittlung der Robustheit des Systems gefahren. Dabei erfolgten für jeden Versuchstyp jeweils drei Wiederholversuche.

Tabelle 6: SRV-Prüfparameter für Konstantlast- und Ölabbstellversuch

	Konstantlastversuch	Ölabstellversuch
Betrachtete Eigenschaft	Reibungs- und Verschleißverhalten im ZOT-Bereich	Notlaufeigenschaften / Robustheit gegen Mangelschmierung
Normalkraft	400 N	400 N
SRV-Temperatur	210 °C	235 °C
Ölvolumenstrom	Kontinuierliche Schmierung 0,1 µl/min	Initialschmierung
Versuchsdauer	20 h	≤ 100 h
Anzahl Versuche	3	3
Für beide Versuchstypen gilt: <ul style="list-style-type: none"> - Versuchsende bei Überschreitung einer Reibungszahl $\mu = 0,3$ - Schwingweg $s = 5 \text{ mm}$ - Prüffrequenz $f = 25 \text{ Hz}$ 		

Versuchsumfänge

Der Schwerpunkt der Entwicklung lag in IP1 auf der taC-Beschichtungsentwicklung in Kombination mit einer gehonten Graugussoberfläche sowie einer beschichteten Buchsenoberfläche. Diese Versuche wurden mit einem konventionellen Gasmotoröl der Viskositätsklasse SAE40 gefahren. Im weiteren Projektverlauf wurde dann der Fokus auf die parallele Schmierstoffentwicklung hin zu einem Esteröl gelegt. Am SRV wurden so insgesamt 4 Esterölformulierungen gefahren.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Versuchsergebnisse SRV

Im Folgenden werden die Versuchsergebnisse veranschaulicht und Kernaussagen bezüglich der Tribokomponenten getroffen.

Konstantlastversuche

In Abbildung 125 sind die erzielten, über definierte Zeiträume von 2 bis 5 h bzw. 5 bis 20 h gemittelten Reibungszahlen der aufgeführten Tribosysteme veranschaulicht. Differenziert werden die Reibungszahlen eines Tribosystems über die Prüfabschnitte, um eine Aussage über ein mögliches Einlaufverhalten zu treffen. Die Versuche mit alter und neuer Kolbenringcharge sind dementsprechend benannt.

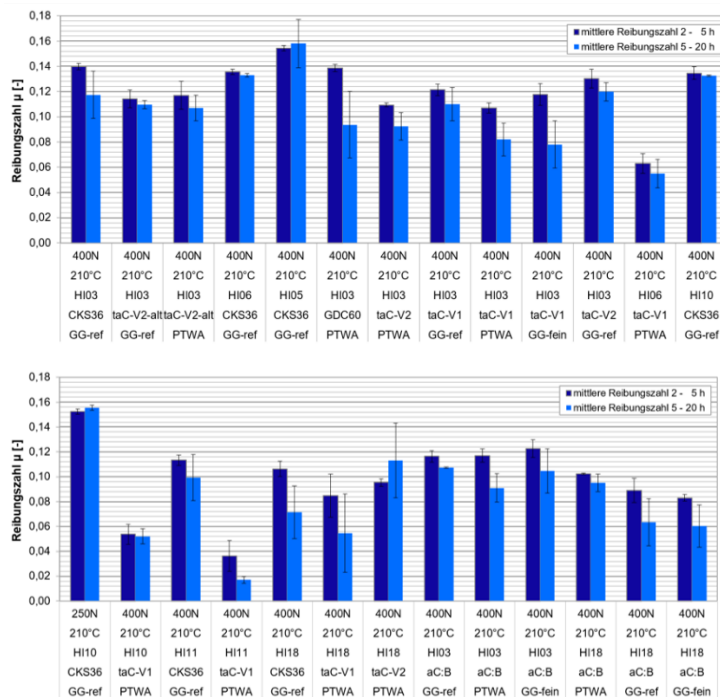


Abbildung 125: Im Konstantlastversuch ermitteltes Reibverhalten in den Prüfabschnitten 2 - 5 h und 5 - 20 h

Die zentralen Erkenntnisse zum Reibverhalten werden im Folgenden beschrieben:

- 22 von 25 Tribosysteme zeigen ein typisches, positives Einlaufverhalten, d.h. die mittlere Reibungszahl μ_{5-20h} nimmt einen kleineren Wert an als μ_{2-5h} . Hierzu zählen alle 12 Tribosysteme mit dem Gasmotorenöl Prom-HI03.
- Ein umgekehrtes Verhalten zeigen die Tribosysteme GG-ref – CKS36 mit dem SAE20-Öl Prom-HI05 und dem Esteröl Prom-HI10, sowie das Tribosystem PTWA – taC-V1(SF+25%DBP) – Prom-HI18.
- Insgesamt zeigen alle drei Versuchsreihen mit Prom-HI10 nur sehr geringe Unterschiede zwischen μ_{2-5h} und μ_{5-20h} .
- Tribosysteme mit spritzbeschichteten Zylinderlaufbuchsen weisen geringere Reibungszahlen auf als Tribosysteme mit referenzgehohten Zylinderlaufbuchsen. Ausnahmen bilden hier die Tribosysteme GG-ref – CKS36 – Prom-HI18 und GG-ref – aC:B – Prom-HI18.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

- Auch durch den Einsatz von feingehonten Zylinderlaufbuchsen GG-fein können die Reibungszahlen im Vergleich zu Tribosystemen mit referenzgehonten Zylinderlaufbuchsen gesenkt werden.
- Ebenso verringern sich die Reibungszahlen durch die Verwendung von Kolbenringen mit taC-V2(SF+25%DBP) -Beschichtung im Vergleich zu den Serien-Ringen CKS36 bzw. GDC60. Durch den Einsatz von Kolbenringen mit taC-V1(SF+25%DBP) -Beschichtungen lässt sich die Reibungszahl noch weiter senken.
- Der Einsatz von aC:B(SF+25%DBP) beschichteten Kolbenringen zeigt gegenüber den Serien-Ringen generell eine Reduktion der Reibungszahl. Tribosysteme mit gehonter Zylinderlaufbuchse und Esteröl Prom-HI18 zeigen geringere Reibungszahlen als mit dem Gasmotorenöl Prom-HI03.
- Der Einsatz einer neuen Produktionscharge des Kolbenringes taC-V2(SF+25%DBP) zeigt nur geringe Auswirkungen auf das Verhalten der Reibungszahl.
- Das Tribosystem mit dem Gasmotorenöl mit reduzierter Viskosität (SAE20) Prom-HI05 zeigt gegenüber dem Referenzsystem ein ungünstiges Reibverhalten.

Ölabstellversuche

Zur Beurteilung der Robustheit gegen Mangelschmierung wurden im Rahmen dieses Projektes auch Ölabstellversuche durchgeführt. Zu Versuchsbeginn erfolgt eine Initialschmierung des zu prüfenden Tribosystems, bevor die Ölversorgung abgestellt wird. Die dann bis zum Versagen erzielten Versuchsdauern sind Gegenstand der Abbildung 126.

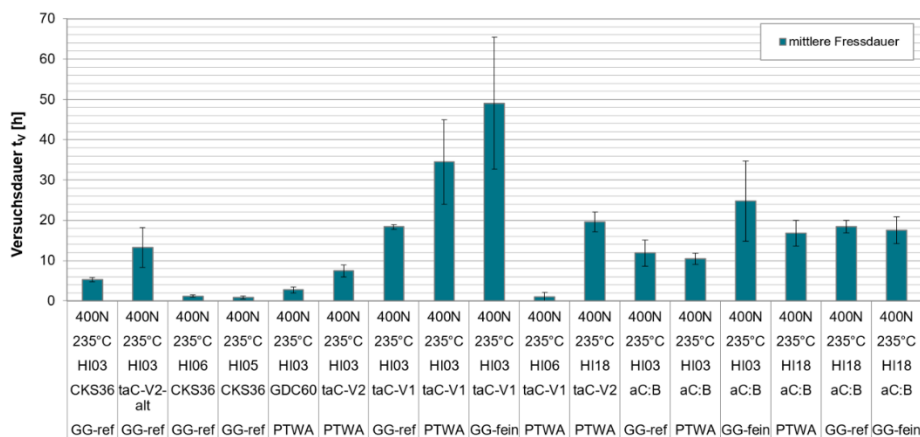


Abbildung 126: Im Ölabstellversuch ermittelte Versuchsdauer bis zum Versagen

Die wichtigsten Erkenntnisse aus den Ölabstellversuchen werden im Folgenden beschrieben:

- DLC-Ring taC-V2(SF+25%DBP) zeigt Robustheitsvorteile gegenüber den Serien-Ringen CKS36 und GDC60.
- Tribosysteme mit dem Esteröl Prom-HI06 erreichen eine durchschnittliche Versuchsdauer von lediglich 1h, wohingegen Esteröl Prom-HI18 durchschnittlich 18h erreichen.
- Versuchsdauern von Tribosystemen mit aC:B(SF+25%DBP) beschichteten Kolbenringen liegen durchweg oberhalb von 10h.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

- Tribosysteme mit taC-V1(SF+25%DBP) beschichteten Kolbenringen in Kombination mit Prom-HI03 zeigen eine hohe Fressdauer. Besonders die feingehonte und die mit PTWA beschichtete Zylinderlaufbuchsen weisen mit einer mittleren Versuchsdauer von 50h (GG-fein) und 35h (PTWA) einen deutlichen Robustheitsvorteil auf.

Fazit:

Innerhalb IP1 zeigen die Kombinationen von taC-V1 mit GG-fein und PTWA das größte Potential zur Reibleistungsreduktion. In IP2/3 zeigen diese Kombinationen in Verbindung mit den Esterölen Prom-HI10 oder Prom-HI18 nochmals Potential zur weiteren Reibleistungssenkung. Mit den Ergebnissen des SRV, des Realhubtribometer und PLINT wurden so die folgenden Versuche für die Einzylindervalidierung bei Rolls-Royce ausgewählt. In der Versuchsmatrix sind jeweils die Favoriten der einzelnen Komponentenprüfstände der Projektpartner enthalten.

Tabelle 7: Versuchsmatrix der am Einzylinder gefahrenen Varianten

Tabelle XX:	Zylinderlaufbuchse	Kolbenschaft	Kolbenring	Ölsorte
V00	GG-ref	AV19	CKS36	Prom-HI03
V01	GG-ref	AV19	taC-V1	Prom-HI03
V02	PTWA	AV19	taC-V1	Prom-HI03
V03	GG-fein	AV19	taC-V1	Prom-HI03
V04	GG-fein	AV21-Strukt.	taC-V1	Prom-HI03
V05	GG-ref	AV19	taC-V1	Prom-HI10
V06	PTWA	AV19	taC-V1	Prom-HI10
V07	PTWA	AV19	taC-V2	Prom-HI10
V08	PTWA	AV19	taC-V2	Prom-HI18
V09	GG-fein	AV19	taC-V1	Prom-HI18

Einzylinderversuch am stationären Gasmotor der *mtu-Baureihe 4000*

Prüfstands Aufbau:

Der Versuchsmotor basiert auf einem Einzylinder-Forschungsmotor der Rolls-Royce *mtu*-Baureihe 4000, der mit nur einer Verbrennungsausrüstung und den daran adaptierten Motorbauteilen ausgestattet ist. Die Medienversorgung wird extern durch den Prüfstand konditioniert dem Motor zugeführt. Dadurch werden gegenseitige Einflüsse, wie sie am Vollmotor vorherrschen, umgangen. Die im Versuch verwendete doppelte Indizierung lässt über den Brennraumdruck Rückschlüsse auf die Reibleistung schließen. Um einen Fehlerfall eines einzelnen Druckaufnehmer feststellen zu können, wird ein redundanter Druckaufnehmer eingesetzt.

Das PMR als zu bewertende Messgröße wurde mittels Differenzmethode aus PMI und PME bestimmt.

Versuchsdurchführung:

- Einlaufprogramm

Um eine Vergleichsbasis für die zu fahrenden Tribovarianten zu schaffen, wurden alle Systeme vor dem eigentlichen Messlauf unter konstanten Randbedingungen eingefahren. Bei Stationärbetrieb bei Nennlast wurde der Motor mindestens 10h betrieben und das Einlaufverhalten des PMR-Wertes über Zeit beobachtet.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

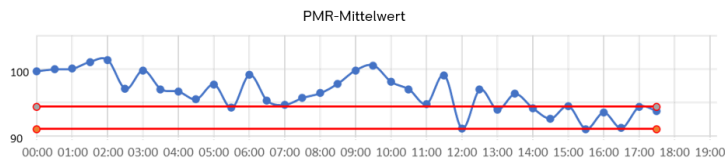


Abbildung 127: Reibleistung während des Einlaufprogrammes

Wie in Abbildung 127 gezeigt wurde über die gesamte Einlaufzeit das aufgenommene PMR bewertet und der Vorgang so lange fortgesetzt, bis die PMR-Schwankung von Messpunkt zu Messpunkt kleiner $\pm 0,1\%$ wurde. Jeder Messpunkt wurde im Abstand von 10min drei Mal hintereinander angefahren und aus 250 Einzelzyklen gemittelt. Die roten Linien zeigen die erlaubten Grenzen von $\pm 0,1\%$ des gleitenden Mittelwertes um die letzten 5 gemittelten Messwerte. Durch dieses Vorgehen wird eine starr vorgegebene Einlaufzeit umgangen und es konnte individuell auf das Einlaufverhalten der einzelnen Tribokombinationen eingegangen werden.

- Messprogramm:

Da beim Gasmotor zwischen den einzelnen Zyklen die Reibleistung um bis zu 0,4 bar schwanken kann, waren mehrere Messungen notwendig. Mit neun Messungen pro Betriebspunkt bei 250 Zyklen pro Messung mit zwei Brennraumquarzen sind die arbeitsspielzyklischen Verbrennungsunregelmäßigkeiten statistisch abgesichert und die Unsicherheit reduziert sich auf 0,04 bar. Mit diesem Vorgehen wurde im Messprogramm für 3 geschleppte und 4 gefeuerte Lastpunkte das PMR bestimmt. Abbildung 128 zeigt die gefahrenen Randbedingungen, Leistung und Drehzahl bzw. Spitzendruck und mittlere Kolbengeschwindigkeit, der ausgewählten Lastpunkte.

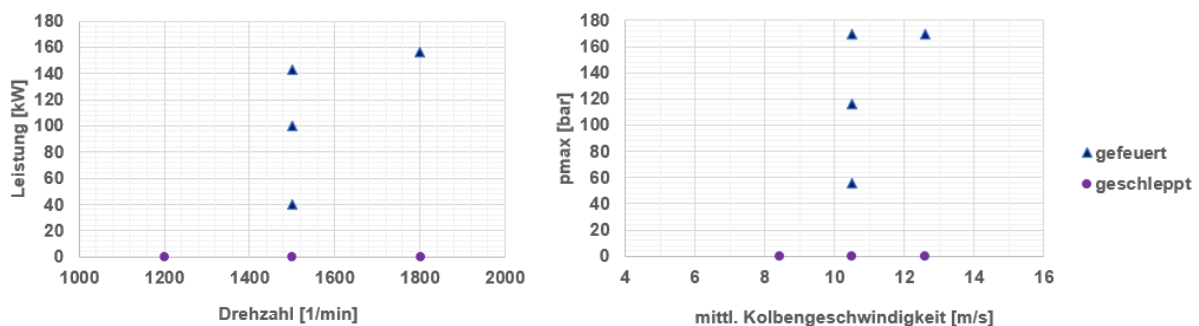


Abbildung 128: Gefahrene Lastpunkte im Kennfeld, links: Leistung/Drehzahl, rechts: zugehöriger Spitzendruck/mittlere Kolbengeschwindigkeit

In Abbildung 129 werden die Ergebnisse der Reibleistungsuntersuchung in normierter Form für die vier gefeuerten Lastpunkte dargestellt. Der erste Ergebnisblock von V00 bildet die Referenz. Erste leichte PMR-Vorteile von 1-2% können bereits durch den Übergang von CKS36 (V00) auf taC-V1 (V01) erzielt werden. Weitere deutliche Vorteile von insgesamt 4-5% werden durch die Verwendung der beschichteten Laufbuchse mit PTWA (V02) oder die Verwendung der sehr fein gehonten Laufbuchse GG-fein (V03) erreicht. Diese Variante zeigt insgesamt das größte Potential zur PMR-Reduktion.

Bei der Verwendung der beiden Esteröle Prom-HI10 (V05-V07) und Prom-HI18 (V08/V09) lassen sich die an den Tribometern gefunden PMR-Vorteile am Einzylinder nicht nachweisen. Beide Öle zeigen in allen Lastpunkten PMR-Nachteile gegenüber der jeweiligen Referenz mit Prom-HI03.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die positiven Ergebnisse aus den Vorversuchen an den Tribometern ließen sich somit am Einzylinder nicht gänzlich reproduzieren.

Ebenso zeigt die Schafftbeschichtung AV-21 in Kombination mit der Linienstruktur (V05) gegenüber deren Referenz (V04) keine Reibleistungsvorteile.

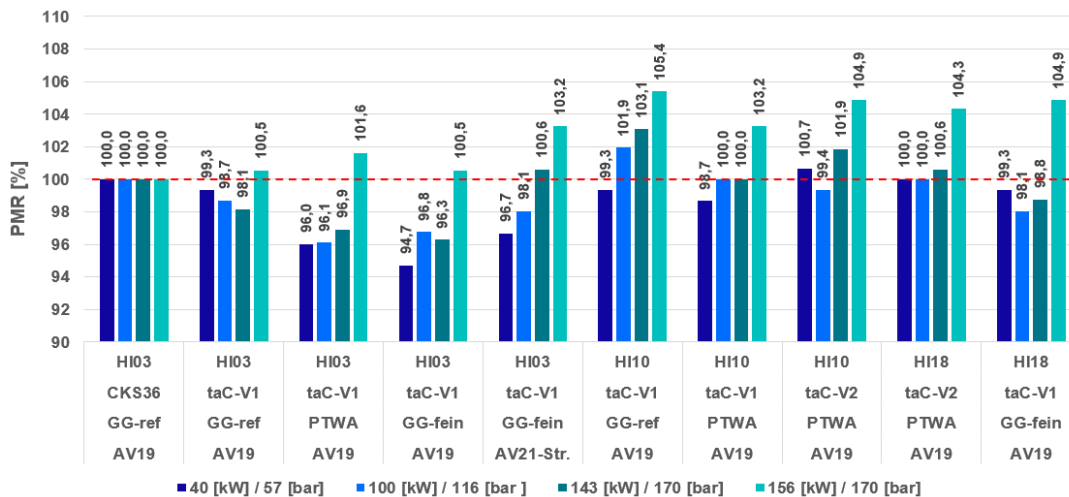


Abbildung 129: Darstellung PMR-Vorteil [%] im Vergleich zur Referenz für Teillast und Nennlast

Eine quantitative Verschleißbewertung für die Ringlaufflächen und die Laubuchsenoberflächen konnte einerseits auf Grund der geringen Laufzeit und andererseits auf Grund der Mehrfachverwendung der Tribosysteme nicht durchgeführt werden. Tabelle 8 zeigt beispielhaft den Tragspiegel der gelaufenen Kompressionsringe ggü. dem Ringstoß. Auch bei Mehrfachverwendung zeigt sich an den taC-beschichteten Ringen eine deutlich reduzierte Tragspiegelbreite und somit auch ein deutlich reduziertes Verschleißvolumen ggü. dem Referenzsystem mit CKS36.

Tabelle 8: Tragspiel der gefahrenen Kompressionsringe (Position: ggü. Ringstoß)

V00	V01/V05	V02/V06	V03/V04/V09	V07/V08
CKS36	taC-V1 (SF+DBP)	taC-V1 (SF+DBP)	taC-V1 (SF+DBP)	taC-V2 (SF+DBP)
GG-ref	GG-ref	PTWA	GG-fein	PTWA
Prom-HI03	Prom-HI03/HI10	Prom-HI03/HI10	Prom-HI03/HI18	Prom-HI10/HI18

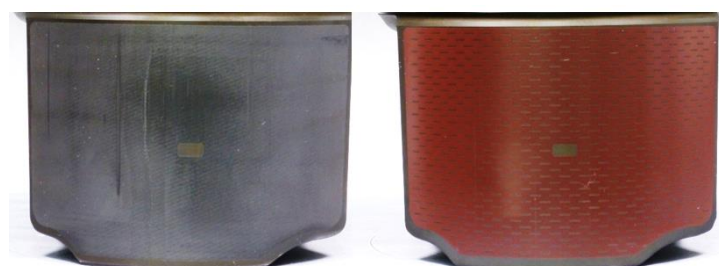


Abbildung 130: Schafftrag nach Motorlauf, links: AV19, rechts: AV21 mit Linienstrukturierung

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Fazit:

Im Gesamtvergleich zeigt die Tribovariante taC-V1 (SF+25%DBP) in Kombination mit GG-fein und Prom-HI03 mit einer PMR-Reduktion von 3,7 % ggü. der Referenz das größte Potential. In den Teillastpunkten erhöht sich dieser Vorteil nochmals auf bis zu 5,3 %. Für die Variante mit PTWA ergibt sich ein ähnliches Einsparpotential. Mit einem PMR-Vorteil von 5 % ergibt sich ein Anstieg des Wirkungsgrades von ca. 0,16 %P. Durch die zusätzliche Ergänzung der Schaftbeschichtung oder des Esteröls wird auf Basis der vorliegenden Ergebnisse kein weiteres Einsparpotential identifiziert.

Bezüglich Verschleißverhalten zeigen alle gefahrenen taC-Kolbenringbeschichtungen ein positives Befundbild bzw. eine deutlich reduzierte Tragspiegelbreite und somit höhere Verschleißbeständigkeit.

Das Emissionsniveau bzw. der Ölverbrauchsanteil aus der Kolbengruppe war für alle untersuchten Varianten vergleichbar und alle Systeme konnten ohne Verbrennungsstörungen gefahren werden.

Wechselwirkung AGN – Ölasche

Im Rahmen vom TP7000 wurden im Arbeitspaket „Wechselwirkung AGN mit Ölaschen“ verschiedene AGN-Konfigurationen für Diesel- und H₂-Gasmotoren mit Hilfe von Schnellalterungsprotokollen mit verschiedenen Motorölen aus dem Projekt gealtert. Im Anschluss folgte die Vermessung der katalytischen Aktivität und teilweise auch eine chemische Analyse.

Bei Dieselanwendung zeigte ein Motoröl mit einem um 60% reduzierten Sulfataschegehalt erwartungsgemäß besondere Vorteile gegenüber einem Referenzöl, sobald ein DPF verbaut ist. Durch den verringerten Anfall an Asche und einer höheren Dichte kann die Standzeit eines DPF deutlich verlängert werden. Kein positiver Nutzen ergibt sich aber für Anwendungen, bei denen kein DPF verbaut ist, so dass nur eine eingeschränkte Einsatzempfehlung abgegeben werden kann.

Bei möglichen AGN-Konfigurationen für einen H₂-Motor ergaben die Alterungsuntersuchungen eine vorläufige Empfehlung für ein spezielles H₂-Motoröl (FUCHS PROM-HI06) gegenüber einem Gasmotorenöl (FUCHS PROM-HI03). Bei einem DOC und einem SCR-Katalysator auf Fe-Basis zeigten beide Öle vergleichbare, sehr geringe Alterung. Einzig bei einem SCR-Katalysator auf VWT-Basis ergaben sich deutliche Unterschiede zwischen den beiden Ölen, bei der die chemische Analyse vorerst nur ein Indiz für die Ursache geben kann. Die Alterung mit PROM-HI03 führte zu einer deutlichen Verringerung des NO_x-Umsatzes über den gesamten T-Bereich, während sich beim PROM-HI06 nur eine leichte Verschiebung des T-Bereiches zeigte. Auffällig bei der SCR-Probe mit PROM-HI03 war eine deutliche Anreicherung von Phosphor an der Oberfläche, die so bei der Probe PROM-HI06 nicht zu beobachten war. Zur Absicherung der Ergebnisse müssten weiterführende Untersuchungen das Verhalten und die Ursachen im Detail klären.

Kraftstoffeinsparpotential

Mit einem Wirkungsgradvorteil von ca. 0,16 %P lässt sich beim Übertrag auf einen Vollmotor eine Kraftstoffeinsparung von ca. 0,3 % erzielen. Für einen stationären Gasmotor der *mtu*-Baureihe 4000 zur Stromerzeugung mit einer jährlichen Laufleistung von bis zu 8000h ergibt sich bei einem zu Grunde liegenden Gaspreis von 0,12 €/kWh eine Kostenersparnis von bis zu 65T€ für einen Zwölfzylinder bzw. 109T€ für einen 20-Zylinder bei einer Betriebsdauer von durchschnittlich 6,5 Jahren. Zusätzlich kann davon ausgegangen werden, dass durch die einhergehende Erhöhung der Systemrobustheit auch die Standzeit der Tribosysteme bis zum Tausch signifikant verlängert werden kann.

Verwendung der Zuwendung und des Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Zusammenfassung der TP7000-Ergebnisse in Bezug auf die CO₂-Wirkung der PROMETHEUS ReibMind-Innovationen im Straßenverkehr der EU:

Bei den BMW Motoren wurden mit den um ca. 50 % abgesenkten Reibwerten der Kolbenringe über die jeweiligen Messzyklen der Europäischen Union Kraftstoffeinsparpotentiale von in praxi mehr als 1 % erschlossen. Am Bsp. der PKW Anwendungen (BMW) bedeutet das eine Reduzierung von um die 1,5 g CO₂/km für die in der EU aktuell abgesetzten Automobilflotte.

Ein anderes Bsp.: Für die BMW EU Supersport-Motorradflotte können gemäß der AVL Simulationsrechnung mittels der PROMETHEUS-Ergebnisse ca. 5,4 g CO₂/km an CO₂-Reduzierung erreicht werden.

Daraus ergeben sich nominal signifikante CO₂-Einsparungen. Am Beispiel der PKW-Fahrzeugflotte von BMW von CO₂-Reduzierungsabsolutwerten: z.B. 10 Mio. BMW Fahrzeuge und 20 tkm/a ergibt das $10.000.000 * 20.000 * 1,5 \text{ g/km} = 3 * 10^{11} \text{ g/s}$ bzw. $3 * 10^5 \text{ to/a} = 300.000 \text{ to/a}$ an CO₂-Reduzierung.

2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die in PROMETHEUS gesetzten Projektziele waren aufgrund der Komplexität des Projektrahmens nur durch intensive Entwicklungsarbeiten auf den Gebieten der experimentellen Forschung in Beschichtungstechnologie, Lasertechnologie, Schmierstofftechnologie, Tribologie, Komponentendesign sowie motorischer Reibungsmessung gepaart mit umfassender Nutzung grundlagen- sowie anwendungsbasierter Simulation erreichbar. Zusätzlich erforderte die große Bandbreite der Demonstration der Ergebnisse dieser Forschungsarbeiten auf verschiedene Tribosysteme in unterschiedlichen Anwendungen (PKW, LKW, Industrieanwendungen) einen hohen Arbeitsaufwand in der industriellen Forschung der Projektpartner.

Für diese Entwicklungsarbeiten wurde der weitaus größte Teil der Projektmittel für Personalkosten aufgewendet. Ein weiterer kostenseitig umfassender Anteil der Projektkosten wurde für die Herstellung von Beschichtungen, Komponenten sowie Schmiermittel für Materialkosten verwendet.

Im Rahmen der experimentellen Forschung wurden die in Tabelle 9 genannten Versuchseinrichtungen beschafft.

Tabelle 9: Übersicht beschaffte Versuchseinrichtungen

Nr.	Projektpartner	Versuchseinrichtung	Zweck der Versuchseinrichtung
1	Tenneco	Tribometer RRV	Tribologische Bewertung / Abbildung Stribeck
2	TU Dresden	Messpleuel Messquarze Kurbelwinkelmarkengeber Drehmomentmessnabe Messwerterfassungskarte	Tribologischer Effizienznachweis am Einzylindermotor
3	VTD	Demonstrator- Beschichtungsanlage	Entwicklung Beschichtungsprozess auf Basis der ausgewählten Beschichtungsvarianten IWS Dresden
4	VTD	Lasertopographiemikroskop, Keyence Emicon Plasmamonitor, Plasus Gegenfeldanalysator, CCR Langmuirsonde, Impedans	Oberflächencharakterisierung von Musterteilen und Beschichtungen Optische Emissionsspektroskopie zur Charakterisierung des Kohlenstofflichtbogenplasmas Charakterisierung des Kohlenstofflichtbogenplasmas (Ionenenergieverteilungsfunktion) Charakterisierung des Kohlenstofflichtbogenplasmas (Elektronenenergieverteilungsfunktion)

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Projekt PROMETHEUS durchgeführten Arbeiten entsprachen weitgehend den im Projektantrag beschriebenen Planungen. Wie geplant wurde eine ganzheitliche Betrachtung der Reibstellen eines Verbrennungsmotors umgesetzt um somit durch geeignete Kombination verschiedener tribologischer Maßnahmen nochmals deutliche Fortschritte bei der Effizienz von Motoren zu erreichen. Mit dieser Herangehensweise konnten Weiterentwicklungen von Beschichtungen und Schmierstoffen, insbesondere deren chemische Modifizierung für eine optimale Wechselwirkung miteinander, erzielt werden. Wertvolle Hinweise für die Modifizierung der Schmierstoffe als auch Beschichtungen wurden durch die atomistische Simulation der Reibungsvorgänge gegeben. Mit dieser breiten und grundlegenden Herangehensweise konnten eine Vielzahl von tribologischen Zusammenhängen und Wirkmechanismen aufgeklärt werden sowie Lösungsansätze durch gezielte Auslegung von Oberflächenbearbeitungen und Beschichtungen sowie Schmierstoffformulierungen erarbeitet werden. Die Auswirkungen der einzelnen Reibstellen konnten ausgehend von Reibungs- und Verschleißmodellen für einzelne Kontakte in einer Gesamtsystemsimulation zusammengeführt werden. Entscheidend für den Projekterfolg war eine ganzheitlich abgestimmte Bewertung der Reibungsvorteile in den verschiedenen Tribosystemen inklusive der messtechnischen Erfassung von Effizienzvorteilen. Insofern kann zusammenfassend festgehalten werden, dass alle in PROMETHEUS geleisteten Arbeiten sowohl notwendig als auch angemessen waren.

4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Das Projekt PROMETHEUS hat einen wesentlichen Beitrag zur Weiterentwicklung im Sachgebiet Tribologie von geschmierten Tribosystemen geleistet. Es wird eine umfassende Nutzung und Verwertbarkeit der erarbeiteten Forschungsergebnisse erwartet. Im Einzelnen wird der Nutzen der Projektergebnisse aus folgenden Verwertungen abgeleitet:

- Die Forschungsergebnisse, insbesondere im Rahmen der atomaren Simulation und Ableitung von Tribomodellen als auch der Entwicklung von Dotierungen für DLC-Beschichtungen und der Entwicklung von polymeren Schmierstoffen, bilden eine wesentliche Grundlage weiterer Forschungsarbeiten der Fraunhofer Institute IWM, IWS und LBF.
- Die Entwicklungsergebnisse bezüglich vorteilhafter Beschichtungen und Schmierstoffe im Rahmen der Komponenten Kolben, Kolbenringe, Zylinder sowie Ventiltriebskomponenten werden im Rahmen der Zielstellungen zu CO₂-Einsparungen im Transportsektor in den einzelnen Marktsegmenten proaktiv und entsprechend der Marktbedarfe verwertet.
- Die Erkenntnisse vorteilhafter Beschichtungs- und Schmiermittelkombinationen in geschmierten Tribosystem werden zukünftig auch eine wichtige Grundlage in industriellen Anwendungen außerhalb des Verbrennungsmotors bzw. Antriebsstranges, wie zum Beispiel in Kompressoranwendungen, haben.

Mit der Demonstratoranlage konnten die für die Industrialisierung notwendigen Kriterien hinsichtlich Prozessstabilität und Wirtschaftlichkeit (Kapazität) gezeigt werden. Die partikelarme Beschichtungstechnologie kann somit auf eine Reihe weiterer inner- und außermotorischer Tribokomponenten (z.B. Kolbenbolzen, Schlepphebel, Dämpferkomponenten u.v.m.) mit voraussichtlich niederschwelliger

Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Prozessadaptionen zur Berücksichtigung der jeweiligen Beschichtungsgeometrie und Materialspezifika erweitert werden.

Die Umsetzung der vom Projektpartner Fraunhofer IWS entwickelten dotierten Schichtvarianten ist technologisch ohne wesentliche Änderungen des Demonstrators möglich, setzt aber die Erarbeitung eines kosteneffizienten Herstellungsprozesses mit kooperationsbereiten Targetspezialisten oder die Erprobung der im Antrag vorgeschlagenen technologischen Alternativen hinsichtlich In-situ-Dotierung voraus. Beide Ansätze müssten in weiterführenden Entwicklungsprojekten verfolgt werden. Bei der derzeitigen Kostensituation dotierter Targets ist eine direkte Industrialisierungsstufe wirtschaftlich nicht vertretbar.

Die weiterentwickelte Plasmasondentechnik zur zeitaufgelösten Bestimmung von Elektronen- und Ionenenergieverteilungsfunktion gepulster, dichter Plasmen kann über das hier untersuchte Kohlenstofflichtbogenplasma hinaus Anwendung für HiPIMS- oder allgemein gepulster Lichtbogenplasmen finden. Von besonderem Interesse im Kontext des Projektes wäre zunächst die Anwendung der erarbeiteten Diagnostikmethoden zur Charakterisierung dotierter Kohlenstoffplasmen.

5 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Durchführung des Vorhabens sind keine Entwicklungsergebnisse bzw. Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen bekannt geworden.

6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Nachfolgende Tabelle zeigt die PROMETHEUS Veröffentlichungen in Form von Vorträgen auf Konferenzen und Tagungen sowie sonstige Publikationen.

Ort/ Zeit	Thema	Titel der Veröffentlichung	Projekt-partner	Autor(en)
Lubricants (open access journal of tribology) Published: 31 August 2020	Veröffentlichung	„Identification of an Adequate Stressing Level for Running-In of a Lubricated DLC-Metal-System	FhG IWM	M. Scherge, J. Faller
Tribologie-Fachtagung 2020 28.-30.09.2020	Vortrag für die Sondersession „BMW-Forschungsfeld-Tribologie“	Optimierung tribologischer Eigenschaften von ta-C-Schichten durch Dotierung	FhG IWS	V. Weihnacht, F. Kaulfuß, F. Hofmann, S. Makowski, M. Zawischa, A. Leson
Tribologie-Fachtagung 2020 28.-30.09.2020	Vortrag für die Sondersession „BMW-Forschungsfeld-Tribologie“	Atomistisches Design von Schmierstoffen: von der Tribochemie zur Nanorheologie	FhG IWM	K. Falk, T. Kuwahara, G. Moras, M. Moseler
Veröffentlichung in Tribology International	Veröffentlichung	Improved investigation with combined measurement and simulation of piston ring liner contacts with	Steinbeis, AVL, FhG IWS, TU Dresden	B. Michelberger, D. Jaitner, A. Leson, A.F. Lasagni

Erfolge und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Ort/ Zeit	Thema	Titel der Veröffentlichung	Projekt-partner	Autor(en)
		a reciprocating long-stroke tribometer		
Energieforschungsportal 23.09.2021	Präsentation PROMETHEUS auf dem Fachportal www.industrie-energieforschung.de zzgl. Newsletter	Projekt zur Reibungs-Optimierung von Motoren durch Einsatz von triboaktiven Hochleistungskohlenstoff- sowie Eisenbasisschichten und Schmierstoffen	alle	V. Weihnacht (Lead) mit allen Partnern
Emission Control am 22.-23.06.21	PROMETHEUS-Vortrag	PROMETHEUS-Vortrag Effekte von taC-Schichten zur Reibungsreduzierung im Verbrennungsmotor	alle, vorgetragen durch BMW	F. Wetzel
Nature Communications 12, 4550 (2021)	Verschleißverhalten von DLC in Kontakt mit Motorenöl	Interplay of mechanics and chemistry governs wear of diamond-like carbon coatings interacting with ZDDP-additivated lubricants.	FhG IWM	V.R. Salinas Ruiz, T. Kuwahara, J. Galipaud, K. Masenelli-Varlot, Mohamed Ben Hassine, C. Héau, M. Stoll, L. Mayrhofer, G. Moras, J. M. Martin, M. Moseler, M.-I. de Barros Bouchet,
15.09.2021 EUROMAT 2021	EUROMAT 2021 - Tagung: Vortrag zum gleichnamigen Artikel	Combined measurement and simulation of piston ring liner contacts with a reciprocating long-stroke tribometer	Steinbeis, AVL, FhG-IWS	B. Michelberger, A. Hagel, P. Striemann, D. Jaitner, B. Kröger, A. Leson, A.F. Lasagni
62. Tribologie-Fachtagung 2021 (GFT) 27.-29.09.2021	Vortrag bei der Sondersession „BMW-Forschungsfeld-Tribologie“	Der Griff nach den Sternen: Neuartige Additive für die Grenzreibung	FHG LBF&IWM FUCHS	D. Markert, R. Klein, L. Kruse, K. Falk, M. Moseler, J. Rausch, R. Luther
62. Tribologie-Fachtagung 2021 (GFT) 27.-29.09.2021	Vortrag zur Sondersession Forschungsfeld Tribologie	Advanced ta-C based coatings systems for low-friction engine components	FhG IWS/TENN ECO, FhG IWM/FhG LBF/FUCHS und Schaeffler	V. Weihnacht, F. Kaulfuß, F. Hofmann, S. Makowski, M. Zawischa, T. Krülle, M. Zinnabold, A. Wurth, M.

Erfolge und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Ort/ Zeit	Thema	Titel der Veröffentlichung	Projekt-partner	Autor(en)
				Kennedy, G. Englberger
62. Tribologie-Fachtagung 2021 (GFT) 27.-29.09.2021		Einfluss von Dotierungselementen in ta-C Beschichtungen auf Reibungs- und Verschleißeigenschaften im geschmierten Tribokontakt	FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Konstruktionstechnik	M. Polzer, S. Wartzack, M. Bartz, E. Schulz, J. Procelewska
AEPSE2021 (26.-30.09.2021)	Abstrakt Vortrag AEPSE 2021	Time Resolved Determination of Plasma Parameters, Ionization and Macroparticles in an Industrial Scale ta-C Laser-Arc Coating System	VTD	M. Kopte, W. Fukarek (VTD) and M. Klette, Holger Kersten (Kiel University)
CECAM Flagship-Workshop "Constructing Digital Twins in Tribology", 11th Oct. 2021	Digitaler Zwilling eines DLC Reibsystems	Digital Twin or Digital Cartoon: Can we Master Mechanochemical Complexity in Applied Tribology?	FhG IWM	M. Moseler
V2021 - Vakuum & Plasma – Fachtagung 12. – 14.10.2021	Energetik-optimierung im Antriebstrang mittels ta-C-Beschichtung PROM ETHEUS	Beschichtung von Ketten und weiteren Motorradkomponenten)	BMW, Steinbeis, IWS	F. Wetzel B. Michelberger, F. Kaulfuß
mdr WISSEN 15.10.2021	Presseartikel	DRESDNER SUPRASCHMIERUNG SOLL REIBUNG AUS MOTOREN VERBANNEN	IWS	V. Weihnacht, S. Makowski
Steinbeis Transfermagazin „STRATEGIEN FÜR EINE NACHHALTIGE WIRTSCHAFT UND GESELLSCHAFT“	Steinbeis - Veröffentlichung im Transfermagazin	WENIGER REIBUNG, MEHR EFFIZIENZ	Steinbeis	B. Kröger
Special Issue "Tribology and Mechanical Behavior of Amorphous Carbon Coatings" (December 22)	Gasteditorenschaft für Journal (special editon)	Beitrag zur Herstellung und Charakterisierung von (t)a-C:X	IWS	T. Krülle, F. Kaulfuß, V. Weihnacht
Jahrbuch Oberflächentechnik	Veröffentlichung	Investigation of surface defects on doped and undoped carbon	IWS	T. Krülle, F. Kaulfuß, V. Weihnacht

Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Ort/ Zeit	Thema	Titel der Veröffentlichung	Projekt-partner	Autor(en)
		coatings deposited by Laser Arc Technology using an optical surface quantification method		
27.05.22, Coatings 2022	Presseartikel	Friction Response of Piston Rings for Application-like Starvation and Benefit of Amorphous Carbon Coatings	Steinbeis, AVL, FhG-IWS, BMW	B. Michelberger, D. Jaitner, A. Hagel, P. Striemann, B. Kröger, F-J. Wetzel, A. Leson, A.F. Lasagni
Veröffentlichung Zeitschrift „Surface and coatings technology“	Presseartikel	Comparison of fracture properties of different amorphous carbon coatings using the scratch test and indentation failure method	IWS, TUD	M. Zawischa, S. Makowski, M. Kuczyk, V. Weihnacht
TAE Tagung 25.-27.01.2022 (online)	Tagung TAE 2022	„Identification of an Adequate Stressing Level for Running-In of a Lubricated DLC-Metal-System	FhG IWM	M. Scherge, Hr. Faller (Hinweis: Wiederholung gleichnamiges Paper 2020)
April 30 - May 5, 2022	Konferenz SVC	Dotierte Kohlenstoffschichten mit Schwerpunkt Tribologie	FhG IWS	V. Weihnacht, S. Makowski, F. Kaulfuß
May 22-27 2022	Konferenz ICMCTF	Dotierte Kohlenstoffschichten mit Schwerpunkt Herstellung	FhG IWS	F. Kaulfuß, V. Weihnacht
May 22-27 2022	Konferenz ICMCTF	Running-In of DLC and its nanoscale footprint	FhG IWM	J. Faller, D. Linsler, M. Scherge
April 2022	MDPI-Special Issue	"Tribology and Mechanical Behavior of Amorphous Carbon Coatings"	FhG IWS	V. Weihnacht
Automotive and Engine Technology (AAET)	Veröffentlichung	Combined experimental and simulative approach for friction loss optimization of DLC coated piston rings	TUD, AVL	A. Götze, D. Jaitner
14.03. – 18.03.2022 in Mühlleithen	XXVII. Erfahrungsaustausch, Oberflächen-technologien mit Plasma- und Ionenstrahlprozessen	„Gefiltertes Kohlenstofflichtbogenplasma	VTD	M. Kopte, W. Fukarek

Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Ort/ Zeit	Thema	Titel der Veröffentlichung	Projekt-partner	Autor(en)
14.03. – 18.03.2022 in Mühlleithen	XXVII. Erfahrungsaustausch, Oberflächentechnologien mit Plasma- und Ionenstrahlprozessen	Plasma diagnostics at laser-enhanced carbon arc discharges	VTD und andere	M. Klette (Kiel University), M. Kopte (VTD), W. Fukarek (VTD) and H. Kersten (Kiel University)
22.-27.5.2022 in San Diego	48. ICMCTF	Time Resolved Determination of Plasma Parameters, Ionization and Macroparticles in an Industrial Scale ta-C Laser-Arc Coating System	VTD und andere	M. Klette (Kiel University), M. Kopte (VTD), W. Fukarek (VTD) and H. Kersten (Kiel University)
17. – 18. Mai 2022 in Karlsruhe Vortrag	Workshop Nachhaltigkeit durch Tribologische Schichten	Anwendungsnahe Bewertung effizienzsteigernder Kohlenstoffschichten auf Kompressionsringen mittels Realhubtribometer	Steinbeis, AVL, TUD, FhG IWS	B. Michelberger, D. Jaitner, A. Götze, B. Kröger, A. Leson, A. Lasagni
26. – 28.09.2022 GfT-Tagung	GfT-Tagung Vortrag	Motornahe Erprobung neuartiger ta-C-Schichten für Kolbenringanwendungen	Federal-Mogul	A. Wurth, M. Zinnabold, M. Kennedy, G. Englberger, S. Hoppe
26. – 28.09.2022 GfT-Tagung	GfT-Tagung Vortrag	Pushing the limits with boron-doped ta-C	FhG IWS, FhG IWM	J. Faller, F. Kaufuss, M. Scherge, V. Weihnacht
17. – 18. Mai 2022 in Karlsruhe Vortrag	Workshop Nachhaltigkeit durch Tribologische Schichten	High-end Beschichtungen für Kolbenringe als Beitrag zu klimaneutralen Antriebstechnologien	Federal-Mogul Burscheid GmbH, Burscheid	M. Kennedy, A. Wurth, M. Zinnabold, G. Englberger (alle Federal-Mogul Burscheid GmbH, Burscheid)
17. – 18. Mai 2022 in Karlsruhe Vortrag	Workshop Nachhaltigkeit durch Tribologische Schichten	Nachhaltigkeit durch Schmierstoffe – nachhaltige Schmierstoffe	FUCHS	R. Luther
20.06.2022, Einreichung geplant in nächsten 3 - 6 Monaten an TU Dresden	Dissertation Björn Michelberger	Hybride Modellprüfmethodik zur anwendungsnahen tribologischen Charakterisierung oberflächenfunktionalisierter Topringe	TUD, FhG IWS, BMW	B. Michelberger
Zeitschrift: Advanced	Veröffentlichung im Rahmen der	Positive effect of periodic micropatterns	Steinbeis, TUD, AVL,	B. Michelberger, Fr. Schell, A.

Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Ort/ Zeit	Thema	Titel der Veröffentlichung	Projekt-partner	Autor(en)
Functional Materials oder Advanced Engineering Materials	Promotion von Björn Michelberger	on compression ring friction	BMW, FhG IWS	Götze, D. Jaitner, B. Leupolt, F-J. Wetzel, A. Leson, A. F. Lasagni
Surface & Coatings Technology (Februar 2022)	Veröffentlichung	Comparison of fracture properties of different amorphous carbon coatings using the scratch test and indentation failure method	FhG IWS	M. Zawischa, S. Makowski, M. Kuczyk, V. Weihnacht
Materials Science & Engineering A (Oktober 2022)	Veröffentlichung	Effect of doping elements to hydrogen-free amorphous carbon coatings on structure and mechanical properties with special focus on crack resistance	FhG IWS	M. Zawischa, V. Weihnacht, J. Kaspar, M. Zimmermann
MDPI Materials (Februar 2022)	Veröffentlichung	Amorphous Carbon Coatings with Different Metal and Nonmetal Dopants: Influence of Cathode Modification on Laser-Arc Evaporation and Film Deposition	FhG IWS	T. Krülle, F. Kaulfuß, V. Weihnacht, F. Hofmann, F. Kirsten
MDPI Materials (April 2021)	Veröffentlichung	Effect of Energy and Temperature on Tetrahedral Amorphous Carbon Coatings Deposited by Filtered Laser-Arc	FhG IWS	F. Kaulfuß, V. Weihnacht, M. Zawischa, L. Lorenz, S. Makowski, F. Hofmann, A. Leson

Referenzen

7 Referenzen

- ¹ M. Scherge, D. Shakhvorostov, K. Pöhlmann, Fundamental wear mechanism of metals, *Wear*. 255, 395-400 (2003)
- ² M. Godet, Third-bodies in tribology. *Wear*. **136**, 29–45 (1990)
- ³ P. A. Thiessen, K. Meyer, G. Heinicke. Grundlagen der Tribochemie Abhandlungen der DAW zu Berlin, Lasse für Chemie, Geologie und Biologie, Jahrgang 1966
- ⁴ J.P. Hirth, D.A. Rigney, Microstructural Models for Friction and Wear, *Strength of Metals and Alloys*, 3, 11483-1502 (1979)
- ⁵ D. Shakhvorostov, B. Gleising, R. Büscher, W. Dudzinski, M. Scherge, Microstructure of tribologically induced nanolayers produced at ultra-low wear rates, *Wear*, 263, 1259-1265 (2007)
- ⁶ M. Dienwiebel, K. Pöhlmann, M. Scherge Origins of the wear resistance of AISi cylinder bore surfaces studies by surface analytical tools, *Tribology International*, 40, 1597-1602 (2007)
- ⁷ K. Ito, J.-M. Martin, C. Minfray, K. Kato, Low-friction tribofilm formed by the reaction of ZDDP on iron oxide, *Tribology International*, Volume 39, Is-sue 12, 2006
- ⁸ A. Tonck, S. Bec, J.M. Georges, R.C. Coy, G.W. Roper, Structure and mechanical properties of ZDTP films in oil. *Tribology Series*, 36, 39-47 (1999)
- ⁹ A. Erdemir und J.-M. Michel (eds.), *Superlubricity* (Elsevier, Amsterdam, 2007)
- ¹⁰ F. Honda und M. Goto, *Wear* 259, 730 (2005)
- ¹¹ Etsion I, Sher E. Improving fuel efficiency with laser surface textured piston rings. *Tribology International*. 2009;42:542-7
- ¹² Lu X, Khonsari MM. An experimental investigation of dimple effect on the stribeck curve of journal bearings. *Tribology Letters*. 2007;27:169-76
- ¹³ Pettersson U, Jacobson S. Tribological texturing of steel surfaces with a novel diamond embossing tool technique. *Tribology International*. 2006;39:695-700
- ¹⁴ Pettersson U, Jacobson S. Textured surfaces for improved lubrication at high pressure and low sliding speed of roller/piston in hydraulic motors. *Tribology International*. 2007;40:355-9
- ¹⁵ Biermann D, Zabel A, Ungemach E, Rautenberg J. Gezielte Strukturierung von Bauteiloberflächen mittels simultan fünfschiger Fräsbearbeitung. *Wt Werkstattstechnik online*. 2009
- ¹⁶ Chae YH. Effect of size for micro-scale dimples on surface under lubricated sliding contact. *Key Engineering Materials*. 2007;345-346
- ¹⁷ Wang X, Kato K, Adachi K, Aizawa K. Loads carrying capacity map for the surface texture design of SiC thrust bearing sliding in water. *Tribology International* 2003;36:189-97
- ¹⁸ Etsion I, Klingerman Y, Halperin G. Analytical and experimental investigation of laser-textured mechanical seal faces. *Tribol Trans*. 1999;42:511-6
- ¹⁹ Wang XL, Kato K, Adachi K, Aizawa K. The effect of laser texturing of SiC surface on the critical load for transition of water lubrication mode from hydrodynamic to mixed. *Tribology International*. 2001;34:703-11
- ²⁰ Abschlussbericht Pegasus II FKZ 03ET1187
- ²¹ J. Becker, alternatives to carbon-based coatings in automotive applications, 20th International Colloquium Tribology, TAE Ostfildern, 2016
- ²² Design von Tribokontakten via Multiskalensimulation: Konstruktion, (2005), No.5, pp.70-73
- ²³ Coy, R. C. (1999), "Practical Applications of Lubrication Models in Engines," *Tribology International*, 31(10), pp 563–571.

Referenzen

- 24 Taylor, R. I. and Coy, R. C. (2000), "Improved Fuel Efficiency by Lubricant Design: A Review," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers - Part J: Journal of Engineering Tribology, 214, pp 1–15.
- 25 Taylor, R. I. (2002), "Lubrication, Tribology & Motorsport," SAE Paper, 2002-01-3355.
- 26 Daniels, C. C. and Braun, M. J. (2006), "The Friction Behavior of Individual Components of a Spark-Ignition Engine during Warm-Up," Tribology Transactions, 49, pp 166–173.
- 27 Mufti, R. A. and Priest, M. (2009), "Effect of Engine Operating Conditions and Lubricant Rheology on the Distribution of Losses in an Internal Combustion Engines," Journal of Tribology, 131(4), 04110.
- 28 Offner, G.; Knaus, O. (2015), "A Generic Friction Model for Radial Slider Bearings Simulation," Tribologie + Schmierungstechnik, 62. Jahrgang, 6/2015.
- 29 Offner G.: Friction Power Loss Simulation of Internal Combustion Engines Considering Mixed Lubricated Radial Slider, Axial Slider and Piston to Liner Contacts, Tribology Transactions, 56: 503–515, 2013.
- 30 Allmaier H., Priestner, C., Reich, F.M., Pribsch, H.H., Forstner, C., Novotny-Farkas, F., (2012), "Predicting friction reliably and accurately in journal bearings—The importance of extensive oil-models", Tribology International 48(2012)93–101.
- 31 Priestner, C., Allmaier, H., Pribsch, H. H., and Forstner, C. (2012), "Refined Simulation of Friction Power Loss in Crank Shaft Slider Bearings. Considering Wear in the Mixed Lubrication Regime," Tribology International, 46(1), pp 200–207.
- 32 Bewsher, S.R., Turnbull, R., Mohammadpour, M., Rahmani, R., Rahnekat, Offner, G.; Knaus, O. (2015), "Effect of cylinder de-activation on the tribological performance of compression ring conjunction.
- 33 Y. Mishin, M. J. Mehl, D. A. Papaconstantopoulos, A. F. Voter, J. D. Kress, *Structural stability and lattice defects in copper: Ab initio, tight binding and embedded-atom calculations*, Physical Review B 63, 224106
- 34 L. Pastewka, P. Pou, R. Perez, P. Gumbsch, M. Moseler, Describing bond-breaking processes by reactive potentials: Importance of an environment-dependent interaction range, Physical Review B 78, 616402(R) (2006)
- 35 L. Pastewka, M. Mrovec, M. Moseler, P. Gumbsch, *Bond order potentials for fracture, wear, and plasticity*, MRS Bulletin 37, 493 (2012)
- 36 L. Pastewka, A. Klemenz, P. Gumbsch, M. Moseler, *Screened empirical bond-order potentials for Si-C*, Physical Review B 87, 205410 (2013)
- 37 T. Kunze, M. Posselt, S. Gemming, G. Seifert, A. R. Konicek, R. W. Carpick, L. Pastewka, M. Moseler, *Wear, Plasticity, and Rehybridization in Tetrahedral Amorphous Carbon*, Tribology Letters 53, 119 (2014)
- 38 L. Pastewka, S. Moser, P. Gumbsch, M. Moseler, Atomistic Insights into the Running-in, Lubrication, and Failure of Hydrogenated Diamond-Like Carbon Coatings, Tribology Letters 39, 49 (2010)
- 39 S. Hoppe, R. Mittler, F. T.H. Dörnenburg, R. Meske, Contribution of Advanced Piston and Ring Design and Coatings on Friction Reduction in Future Diesel Engines, 22nd Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2013
- 40 R. Mittler, F. Ruch, Friction Tool Development and Validation on the Basis of DuroGlide, Design Changes and their Secondary Physical Effects to Leverage the Highest Friction Potential, 24th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology 2015
- 41 M. Kennedy, S. Hoppe, J. Esser, Kolbenringbeschichtung zur Reibungssenkung im Ottomotor, MTZ, 73, 2012
- 42 Branchenüblich werden die Zylinderlaufflächen durch eine schwere Graugussbuchse dargestellt.
- 43 C.-F. Meyer, H.-J. Scheibe, (2008) Filtered laser-arc: a new technology for deposition of smooth ta-C films, in ICMCTF, San Diego, 2008

Referenzen

- ⁴⁴ H. Kersten, H. R. (2001) On the determination of energy fluxes at plasma–surface processes. *Appl Phys A* 72, 531–540
- ⁴⁵ M. Klette, M. M. (2020) Directionally resolved measurements of momentum transport in sputter plumes as a critical test for simulations, *Journal of Vacuum Science & Technology A* 38, S. 033013
- ⁴⁶ Sánchez-López, J. C. ; Fernández, A.: Doping and Alloying Effects on DLC Coatings. In: Donnet, Christophe; Erdemir, Ali (Hrsg.): *Tribology of Diamond-Like Carbon Films*. Boston, MA : Springer US, 2008, S. 311–338
- ⁴⁷ Leyland, A. ; Matthews, A.: On the significance of the H/E ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimised tribological behaviour. In: *Wear* 246 (2000), 1-2, S. 1–11
- ⁴⁸ Leyland, A. ; Matthews, A.: On the significance of the H/E ratio in wear control: a nanocomposite coating approach to optimised tribological behaviour. In: *Wear* 246 (2000), 1-2, S. 1–11
- ⁴⁹ Ferrari, A. C. ; Robertson, J.: Resonant Raman spectroscopy of disordered, amorphous, and diamondlike carbon. In: *Physical Review B* 64 (2001), Nr. 7, S. 199
- ⁵⁰ Ferrari, A. C. ; Robertson, J.: Resonant Raman spectroscopy of disordered, amorphous, and diamondlike carbon. In: *Physical Review B* 64 (2001), Nr. 7, S. 199
- ⁵¹ Ferrari, A. C. ; Robertson, J.: Resonant Raman spectroscopy of disordered, amorphous, and diamondlike carbon. In: *Physical Review B* 64 (2001), Nr. 7, S. 199