

Gemeinsamer Abschlussbericht

Verbundprojekt CHEPHREN (Phase 1 + 2)

CHEmisch-PHysikalische Reduzierung der ReibungsENERgie



Laufzeit des Förderprojekts:

01.09.2021 – 28.02.2025

Berichtszeitraum:

Gesamte Projektlaufzeit

Zuwendungsempfänger:

TU München (FZG)

BMW

CEROBEAR

Evonik

Fraunhofer IWM + IWS

FUCHS

hGears

iwis mobility systems

iwis antriebssysteme

IOT RWTH

VON ARDENNE

WITTENSTEIN

Förderkennzeichen Phase 1:

03EN4005A

03EN4005B

03EN4005C

03EN4005D

03EN4005E

03EN4005F

03EN4005G

03EN4005H

03EN4005I

03EN4005J

03EN4005L

03EN4005M

Förderkennzeichen Phase 2:

03EN4029A

03EN4029B

03EN4029C

03EN4029D

03EN4029E

03EN4029F

03EN4029G

03EN4029H

03EN4029I

03EN4029J

03EN4029L

03EN4029M

Erstellt am:

23.07.2025

Ansprechpartner:

Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl, Technische Universität München

Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Liste der Autoren und Autorinnen

Organisation	Name
Lehrstuhl für Maschinenelemente an der Technischen Universität München	Stefan Hofmann, Ferdinand Schmid, Thomas Lohner, Karsten Stahl
Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft	Steffen Haberland, Philipp Ludwig
CEROBEAR GmbH	Beate Bergrath, Peer Kruse, Gero Burghardt
Evonik Operations GmbH	Dmitriy Shakvorostov, Philipp Kilian
Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. für das Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik IWS und das Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM	Volker Weihnacht, Frank Kaulfuß Kerstin Falk
FUCHS LUBRICANTS GERMANY GmbH	Jürgen Rausch, Torben Fruth
hGears Schramberg GmbH	Felix Hildbrand
iwis mobility systems GmbH & Co. KG	Jörg Pantförder
iwis antriebssysteme GmbH & Co. KG	Florian Wimmer, Dr. Thomas Wolf
Institut für Oberflächentechnik (IOT) an der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen	Jessica Borowy, Max Möbius, Kirsten Bobzin
VON ARDENNE GmbH	Marc Tobias Wenzel, Martin Holzherr, Dr. Barbara Gebhardt
WITTENSTEIN SE	Michael Schmidt

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren und Autorinnen.



Inhalt

Abkürzungsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	11
Kurzzusammenfassung/Abstract	12
I Kurzdarstellung	13
1 Aufgabenstellung	13
2 Voraussetzungen des Vorhabens	14
3 Planung und Ablauf des Vorhabens	14
4 Wissenschaftlich-technischer Stand	15
5 Zusammenarbeit der Partner	19
II Eingehende Darstellung	20
1 Erzielte Ergebnisse im Projekt	20
1.1 Grundlagenebene (TP 2000)	20
1.2 Anwendungsebene (TP 3000)	48
1.2.1 Anwendungsfall Zahnradgetriebe	48
1.2.2 Anwendungsfall Sondergetriebe	53
1.2.3 Anwendungsfall Förderkettentriebe	57
1.2.4 Anwendungsfall Riemenrad in Kunststoff	61
1.2.5 Anwendungsfall Steuerketten-Zahnradritzel in Kunststoff	67
1.2.6 Anwendungsfall E-Bike-Getriebe	72
1.2.7 Anwendungsfall E-Achse	80
1.2.8 Anwendungsfall Wälzlager	86
1.3 Systemebene (TP 4000)	92
2 Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse	101
3 Veröffentlichungen	104
Literaturverzeichnis	107
Anhang	109

Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
AWF	Anwendungsfall
BMW	Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft
C+	Kohlenstoffionen
CF	Kohlefaser (Kohlenstofffaser)
CHEPHREN	Chemisch-Physikalische Reduzierung der Reibungsenergie
CLSM	Confocal laser scanning microscopy
DLC	Diamond-like Carbon
EHD	elastohydrodynamisch
EHL	elastrohydrodynamic lubrication
EW	Entwicklungsstrang
FZG	Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebesysteme
GF	Glasfaser
GfT	Gesellschaft für Tribologie
HAP	Hauptarbeitspaket (übergeordnetes Arbeitspaket)
HCM	Hot Compression Molding
IOT	Institut für Oberflächentechnik der RWTH Aachen
LAM	Laser-Arc-Modul
MD	Molekulardynamik
MoS ₂	Molybdän-Disulfid
MS	Magnetronsputtering
MTM	Mini Traction Machine
NVH	Noise-Vibration-Harshness
OES	Optische Emissionsspektroskopie
PA12	Polyamid 12
PAG	Polyalkyleneglykol
PAMA	Polyalkylmethakrylat
PAO	Polyalphaolefin
PEEK	Polyetheretherketon
PEG	Polyethylenglycol
PG	Prüfgetriebe
POM	Polyoxymethylen
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVD	Physical Vapour Deposition
PVDF	Polyvinylidenfluorid
REM	Rasterelektronenmikroskopie
RWTH	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule
SL	Superlubricity

SLS	Selektives Lasersintern
SRR	Slide-to-Roll Ratio
SRV	Schwing-Reib-Verschleiß
ta-C	Tetrahedral amorphous carbon
TEHD	Thermo-Elastohydrodynamik
TP	Teilprojekt
TRL	Technology Readiness Level
TUM	Technische Universität München
VA	VON ARDENNE
WGP	Wirkungsgradprüfstand
WLTP	World Harmonized Light Duty Testing Procedure
ZST	Zweischeibentribometer

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Übersicht zum Forschungsprojekt CHEPHREN	12
Abbildung 2:	Übersicht der betrachteten Anwendungsfälle (AWF)	13
Abbildung 3:	Projektstruktur mit Arbeitsebene und Anwendungsfällen	15
Abbildung 4:	Schematische Darstellung eines Tribosystems mit Input und Output Systemgrößen	15
Abbildung 5:	Mittlere Verzahnungsreibungszahl und Zahnmassentemperatur über der Umfangsgeschwindigkeit bei Schmierung mit konventionellen (MIN, PAO) und wasserhaltigen Polyalkyleneglykolen (PAGW) ²	16
Abbildung 6:	Gemessene Reibungskurven am Zweischeibentribometer der Paarung PEEK+GF30/Stahl bei Einspritzschmierung (links) und berechnete Temperaturverteilung in einem EHD-Kontakt der Paarung Stahl gegen Polyoxymethylen (POM) (rechts) ⁶	17
Abbildung 7:	Vergleichende Stribeck-Darstellung der potenziell möglichen Reibwertabsenkung (rote Kurve) durch die drei „Superlubricity-Mechanismen“ mit dem Potenzial durch ta-C-Schichten im Bereich der Mischreibung (MR)	18
Abbildung 8:	Reibungskoeffizienten in Zweischeibenversuchen mit unbeschichteten, (Cr,Al)N- und (Cr,Al,Mo)N-beschichteten Scheiben ¹⁰	18
Abbildung 9:	Beschichtungsanlage mit 90°-Filtermodul Modell (links), Schema (Mitte) und Plasmaenergieverteilung für C+ bei Direktausbreitung und Filterung (rechts)	20
Abbildung 10:	Vergleich 1 µm ta-C ungefiltert (links) mit 18,9 % defektbehafteter Oberfläche vs. 1,3 % bei 90° gefilterter ta-C-Schicht (rechts)	21
Abbildung 11:	REM-Abbildung an Bruchkanten von ca. 2 µm dicken ta-C-Schichten ungefiltert (links) und 90° gefiltert (rechts)	21
Abbildung 12:	Einlaufverhalten der Gegenkörper-Verschleißrate (links) und Verschleißspuren auf den ta-C-Schichten nach 10 min Versuchsdauer (rechts)	22
Abbildung 13:	Ritztest auf PA12 mit 50 nm Cr + 500 nm ta-C mit Schollenstruktur	22
Abbildung 14:	Oberflächen von 100Cr6-Referenz und PEEK im Vergleich ohne und mit 1 µm Beschichtung (links); Kennwerte der Oberflächen für alle Kunststoffsubstrate und undotiertes und dotiertes ta-C (rechts)	23
Abbildung 15:	Reibungsverläufe (links) und Schicht-Verschleißbilder (rechts) nach SRV-Tests mit 10 mm 100Cr6-Kugel gegen Flachprobe aus PEEK, PEEK + ta-C:N und 100Cr6 + ta-C:N (ungeschmiert)	23
Abbildung 16:	Verschleißspuren auf Schicht (links oben) und auf Stahlkugel-Gegenkörper (links unten) für ta-C as-deposited, ta-C-Einlaufschicht, ta-C:N-Einlaufschicht und ta-C-geläppt (v.l.n.r.) nach SRV-Tests und beschichtete Zahnräder vor (Mitte) und nach Prüfstandlauf (rechts)	24
Abbildung 17:	Reibwertverlauf über 1 h bei verschiedenen ta-C-Schichtvarianten	24
Abbildung 18:	ta-C/MoS ₂ -Hybridschicht auf Lagerscheiben und MoS ₂ -Schicht auf Lagerscheiben und Ringen	25
Abbildung 19:	Reibwerte (links) im Vakuumtribometertest mit 10 mm 100Cr6-Kugel gegen mit MoS ₂ -beschichtete Platte. Verschleißabrieb vom Stahlkugel-Gegenkörper (Mitte) und auf der MoS ₂ -Schicht (rechts)	25
Abbildung 20:	Anzahl N und Anteil A der Droplets an der Gesamtheit der Droplets auf einer Fläche $O = 214 \mu\text{m}^2$ unter Variation des Pulsstromes I_P	26
Abbildung 21:	Reibungskoeffizient μ unter Variation von Slide-to-Roll Ratio SRR und mittlerer Geschwindigkeit v_m aus Versuchen an der Mini Traction Machine (MTM)	27

Abbildung 22:	Aufnahmen verschiedener Kunststoffzahnäder der Projektpartner hGears und Evonik, beschichtet mit CrAlMoN-Schichten	28
Abbildung 23:	Anwendungsspezifische Schmierstoffzuordnung	28
Abbildung 24:	Übersicht der unterschiedlichen Entwicklungslinien für Sondergetriebe und Modelluntersuchungen	29
Abbildung 25:	MTM-Tribometer – Reibungskennfelder Schmierstoffe Sondergetriebe	30
Abbildung 26:	MTM Vorvalidierung polymere Additive	31
Abbildung 27:	MTM – Reibungsbewertung Entwicklungslinie A	31
Abbildung 28:	Riemenäder aus PA12 mit Gleitlackbeschichtung	32
Abbildung 29:	Übersicht der Effekte von Evonik-Polymeren anhand der Stribeck-Kurve	33
Abbildung 30:	Exemplarische Reibungszahlen und Schmierfilmdicken der untersuchten wasserhaltigen Schmierstoffe und der Referenzschmierstoffe PEG400 und PAO-05	34
Abbildung 31:	Mittlere Reibungszahl μ und mittlere Schmierfilmdicke h_c über dem verdampften Wasseranteil $\Delta\xi$ von CWIG100_001, CWIG100_002 und CWIG100_003 basierend auf Hofmann et al. ¹³	35
Abbildung 32:	Reibungskurven für unbeschichtete und ta-C beschichtete Prüfkörper am MTM2 Tribometer mit den wasserhaltigen Schmierstoffen CWIG22_001, CWIG22_002 und CWIG22_003	36
Abbildung 33:	Gemessene gesamte Reibungszahl (Roll- und Gleitreibung) der Kunststoff-Stahl-Paarungen 100Cr6/PEEK, 100Cr6/POM, 100Cr6/PA46 und 100Cr6/PA12 für MIN100 und $\vartheta_{0l} = 40^\circ\text{C}$ basierend auf Schmid et al. ¹⁴	37
Abbildung 34:	Verschleiß (a), Oberflächenaufnahmen (b) und Rauheitsveränderung (c) von unbeschichteten und ta-C beschichteten PEEK-Scheiben bei Paarung mit unbeschichteten Stahlscheiben am FZG-Zweischeibentribometer	37
Abbildung 35:	a) Einfluss der ta-C Beschichtungsvarianten auf Rauheit; b) Gemessene Reibungszahlen an der MTM2 für Beschichtungsvarianten bei Schmierung mit MIN100; c) Gemessene Reibungszahlen an der MTM2 für Schmierstoffvarianten und der Beschichtungsvariante PEEK + ta-C:N	38
Abbildung 36:	Lichtmikroskopische Aufnahmen (a) und REM-Aufnahmen (b, c) der Laufspur einer polierten und ta-C-beschichteten PEEK-Scheibe nach Versuch	39
Abbildung 37:	CLSM-Aufnahme einer Kalotte in der nitridischen Sensorschicht hergestellt mittels gepulster Lichtbogenverdampfung	39
Abbildung 38:	Im Lagerprüfstand (links) gemessene Temperatur und Reibkraft sowie durch die Sensorschicht bestimmte Temperatur (rechts)	40
Abbildung 39:	Dünnschichtsensortechnik zur Messung des Druck- und Temperaturverlaufs am Zweischeibentribometer für die Kontaktpaarungen ZrO_2/POM , $\text{ZrO}_2/\text{PA66}$, $\text{ZrO}_2/\text{PA12}$	41
Abbildung 40:	Gemessener Kontaktdruck- und Temperaturverlauf am Zweischeibentribometer für die Paarungen ZrO_2/POM (Delrin® 100 NC010), $\text{ZrO}_2/\text{PA66}$ (PTS–Creamid-A4H9), $\text{ZrO}_2/\text{PA12}$ (VESTAMID® L1940)	41
Abbildung 41:	TEHD-Simulationsergebnisse eines hochbelasteten Linienwälzkontakts der Paarung Stahl/Stahl bei Vollschmierung mit einem wasserhaltigen Polyglykol (WAT22) und Polyalphaolefin (PAO22) mit und ohne ta-C Beschichtung.	42
Abbildung 42:	Multiskalen- und Multimethodenbetrachtung des Modellfluids PEG400	43
Abbildung 43:	Zentrale und minimale Schmierfilmdicke (a) und Reibungszahl (b) für reines PEG400; Relative zentrale Schmierfilmdicke (c) und relative Reibungszahl (d) von PEG400+10 wt%H ₂ O im Vergleich zu reinem PEG400	44

Abbildung 44:	Berechnung von PEG Scherverdünnungskurven aus MD Simulationen.	45
Abbildung 45:	Scherverdünnung von PEG400 und PEG400+10 wt% H ₂ O.	45
Abbildung 46:	Korrelation der Fit-Parameter n , γ und ηN der Einzelfits (siehe Abbildung 45), für reines PEG400 und PEG400+10 wt% H ₂ O (gefüllte / leere Symbole).....	46
Abbildung 47:	Abhängigkeit der Newtonschen Viskosität ηN von Druck und Temperatur mit Gesamtbeschreibung basierend auf der Doolittle-Formel.....	46
Abbildung 48:	Nachschmierung eines Trockenkontakts aus einer Schmier Tasche für unterschiedlich starke Oberflächen/Schmierstoff Wechselwirkungen (charakterisiert durch den Kontaktwinkel θ).	47
Abbildung 49:	Ermittlung von Konstitutivgleichungen für das Reynolds-Modell aus MD Simulationen.	48
Abbildung 50:	Gemessenes Gesamtverlustmoment T_V mit wasserhaltigen Schmierstoffen für Kraftstufe 7, Umfangsgeschwindigkeit $v_{t,C} = 8,3$ m/s und Öltemperatur $\vartheta_{Öl} = 60$ °C	49
Abbildung 51:	Gemessenes Gesamtverlustmoment T_L über der Umfangsgeschwindigkeit $v_{t,C}$ und unterschiedlichen Anteil an verdampftem Wasser $\Delta\xi$ für KS7 ($p_{H,C} = 1343$ (N/mm ²) und Öltemperatur $\vartheta_{Öl} = 60$ °C für CWIG22_002 und CWIG22_003 ¹⁹	50
Abbildung 52:	Mittlere Verzahnungsreibungszahl μ_{mz} über Umfangsgeschwindigkeit $v_{t,C}$ für eine Öltemperatur $\vartheta_{Öl} = 60$ °C und Kraftstufe 7 ($p_{H,C} = 1343$ N/mm ²) mit beschichteten und unbeschichteten Zahnrädern	51
Abbildung 53:	Gemessenes Gesamtverlustmoment $T_{V,PG}$ des Prüfgetriebes (PG) der Zahnradpaarungen Stahl/Stahl, Stahl/PEEK und Stahl/POM (a); Reduzierung des Verlustmoments des Prüfgetriebes bei Verwendung eines Kunststoffzahnrad im Vergleich zur Zahnradpaarung Stahl/Stahl (b); Gemessene Zahnmassentemperatur ϑ_M im Zahnfußbereich des Rads (c).....	52
Abbildung 54:	Hertz'sche Pressung (a), Linienlast (b), Reibungszahl (c) und Gleitgeschwindigkeit (d) über der Eingriffsstrecke für die Paarungen Stahl/Stahl, Stahl/PEEK und Stahl/POM	53
Abbildung 55:	ta-C-beschichtete Rundzähne und Polygonwelle.....	54
Abbildung 56:	Reibwertverlauf bei Verwendung verschiedener Schmierstoffe	55
Abbildung 57:	Schmierstoff Sondergetriebe - MTM Screening Reibungskennfeld	55
Abbildung 58:	Low-cost-Tribometer – Aufbau im Prüffeld und Reibwertkurve.....	56
Abbildung 59:	Messreihen Low-cost-Tribometer	56
Abbildung 60:	Versuchsaufbau und Temperaturen eines Versuchsgetriebes	57
Abbildung 61:	Konzept Einzelteilversuche am Tribometer	58
Abbildung 62:	Konstruktionsdarstellung des neuen Applikationsprüfstandes	59
Abbildung 63:	Oberflächen der Bauteile aus den verschiedenen Kunststoffen	60
Abbildung 64:	BMW CE04 mit Riemenrad.....	62
Abbildung 65:	CO ₂ Reduktion durch Gewichtseinsparung	63
Abbildung 66:	Vergleich CO ₂ -Footprint von unterschiedlichen Riemenradvarianten	63
Abbildung 67:	Klimatische und belastungsrelevante Anforderungen an ein Gesamtfahrzeug	64
Abbildung 68:	Definierte Versuchsreihen zur Erprobung und Analyse alternativer Riemenräder.	65
Abbildung 69:	Riemenräder nach den Versuchsreihen, grün = Tests bestanden, rot = Tests nicht bestanden	65
Abbildung 70:	Riemenrad-Proben nach Straßenverschmutzungstest	66

Abbildung 71:	Berechnung der Herstellungskosten bei 4000 Stück pro Jahr	67
Abbildung 72:	Kettenräder für die Versuche am Multifunktionsreibprüfstand	68
Abbildung 73:	Versuchsaufbau des Multifunktionsreibprüfstands	68
Abbildung 74:	Vergleich der Reibmessungen bei unterschiedlichen Drehzahlen von Kettenrädern aus Stahl (rot), PEEK-CF (blau) und PEEK (grün)	69
Abbildung 75:	Verspann-Prüfstand (Links und Mitte), sowie Kettenräder aus PEEK (Rechts oben) und PEEK-CF (Rechts unten)	70
Abbildung 76:	Zylinderkopfprüfstand unter Verwendung des Bx8 Steuertriebs-Layout	71
Abbildung 77:	Kettenrad nach 200 h Versuchslauf auf dem Zylinderkopfprüfstand	72
Abbildung 78:	Aufbau des ausgelegten E-Bike-Getriebes	72
Abbildung 79:	Getriebeprüfstand	73
Abbildung 80:	Verwendetes Lastkollektiv für den Getriebeprüfstand	74
Abbildung 81:	E-Bike-Gehäuse	75
Abbildung 82:	Auslegung Mikrogeometrie	75
Abbildung 83:	Auslegung und Nachrechnung des E-Bike-Getriebes mit Kunststoffzahnradern hinsichtlich Tragfähigkeit und lastabhängiger Verlustleistung	76
Abbildung 84:	E-Bike-Getriebe: Auswertung aus Stahl mit 2 g Schmierstoff pro Getriebeaufbau	78
Abbildung 85:	E-Bike-Getriebe: Auswertung Kunststoff-Getriebe (Rad 2)	79
Abbildung 86:	E-Bike-Getriebe: Vergleich Stahlradgetriebe zu Kunststoff-Getriebe	79
Abbildung 87:	E-Maschinenprüfstand zur Messung aller in der Achse entstehenden Verluste	81
Abbildung 88:	WLTP-Fahrzyklus über Drehzahl und Drehmoment mit Sollwert (schwarz) und Istwert (lila)	82
Abbildung 89:	Ergebnisse zu Effizienzverbesserung der Entwicklungsschmierstoffe im WLTP-Zyklus	83
Abbildung 90:	Effizienzvergleich im Kennfeldbetrieb zwischen Referenzschmierstoff und Entwicklungsschmierstoffen	84
Abbildung 91:	Ergebnisse Grundlagenversuche an MTM; Stahl/Stahl vs. ta-C-a-C/ta-C-a-C Beschichtung in Verbindung mit unterschiedlichen Schmierstoffen	85
Abbildung 92:	Effizienzverbesserungen mit beschichtetem Getriebe im WLTP-Zyklus	85
Abbildung 93:	Definierte Entwicklungsstränge	87
Abbildung 94:	Ergebnisse Schichtcharakterisierung – Belastung	88
Abbildung 95:	Weibull-Analyse	89
Abbildung 96:	Käfigwerkstoffe	89
Abbildung 97:	Run In (links) und Reibmomentmessung (rechts) kommerzielle MoS ₂ -Schicht	90
Abbildung 98:	Run In (links) und Reibmomentmessung (rechts), Projektschicht Charge 230808P1	90
Abbildung 99:	Proben Dünnschichtsensorik Wälzlager	91
Abbildung 100:	Dünnschichtsensorik Prüfaufbau	92
Abbildung 101:	Links: VON ARDENNE ta-C- Beschichtungsanlage DREVA 900; rechts: verwendete Halterungsoptionen Sechseckprisma, „V-Halter“ und Kassette mit Kicker für eine weitere Rotationsachse	93
Abbildung 102:	Links: Verschleißtestung mittels Taber-Abraser-Testung; Massenverlust/mg; rechts oben: PEEK-Substrat nach 1000 Zyklen (max. Erosionstiefe: 60 µm); rechts unten:	

ta-C-Beschichtung (d ta-c = ca. 2 µm) nach 1000 Zyklen (max. Erosionstiefe: 5 µm)	94
Abbildung 103: Links: Zahnräder (Evonik, hGears) und Probekörper aus PEEK nach der ta-C-Beschichtung; rechts oben: zwei ta-C-beschichtete Zahnräder von hGears; rechts unten: ta-C-beschichtete Kugellagerkäfige von CEROBear	95
Abbildung 104: Anordnung des neuen Laser-Arc-Moduls LAM1100 in verschiedenen Einbaulagen.	96
Abbildung 105: Fotografische Ansicht und Modellabbildung des Demonstrators des horizontalen Beschichtungsmoduls LAM1100.	97
Abbildung 106: Stabilität des Verlaufes der Zündrate des Bogenverdampfung bei der Langzeiterprobung des Demonstrators des horizontalen Beschichtungsmoduls LAM1100	98
Abbildung 107: Ergebnisse LC1 (niedrige Last)	110
Abbildung 108: Ergebnisse LC4 (hohe Last)	111
Abbildung 109: Ergebnisse Stribeck-Messungen	112

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht über die Polymere am Beispiel einer Ölformulierung mit der kinematischen Viskosität von 6 cSt bei 100°C	33
Tabelle 2:	Wesentliche Eigenschaften der untersuchten wasserhaltigen Schmierstoffe und der Referenzschmierstoffe PEG400 und PAO-05	34
Tabelle 3:	Reibwerte bei unterschiedlichen Lastfällen	59
Tabelle 4:	Versuchsdurchführung.....	71
Tabelle 5:	Untersuchte Getriebevarianten und Ergebnisse während der Projektlaufzeit.....	80
Tabelle 6:	Dünnschichtsensorik – Übersicht Messkampagnen 1	92
Tabelle 7:	Jährliche relative Beschichtungskapazitäten für Riemenräder.....	98
Tabelle 8:	Relative Beschichtungskosten und Energieaufwand zur Beschichtung für Riemenräder	99
Tabelle 9:	Abgeschätztes Energie- und Emissionseinsparpotential ausgewählter Technologien und Anwendungsfälle.	102
Tabelle 10:	Erreichte TRLs ausgewählter Anwendungsfälle und Technologien	103
Tabelle 11:	Auswahl an Entwicklungsschmierstoffe für Systemprüfstand	109

Kurzzusammenfassung/Abstract

Im Rahmen des Forschungsprojekts zur **Chemisch-Physikalischen Reduzierung der ReibungsEnergie** (CHEPHREN) erfolgten systematische Untersuchungen von Superlubricity-Phänomenen und deren Erschließung für weite Anwendungsfelder und die Integration von Tribosystemen mit neuartigen Materialien und Schmierstoffen. Hierzu wurden insgesamt acht verschiedene Anwendungen betrachtet und ein skalenübergreifender Ansatz zur Erforschung der jeweils betrachteten Technologien verfolgt. Dies umfasste sowohl experimentelle als auch simulationstechnische Untersuchungen an dedizierten Modellen auf Grundlagenebene über die Komponentenebene bis hin zu Analysen auf Systemebene, inklusive der Betrachtung des Gesamtpotentials zur Energieverbrauchs- und Emissionsreduzierung. Eine Übersicht zum Forschungsprojekt CHEPHREN mit dessen Anwendungen, beteiligten Projektpartnern und Technologien zeigt Abbildung 1. Dabei können die betrachteten Technologien übergeordnet in Tribokörper, Schmierstoffe und Tribokonzepte eingeteilt werden.

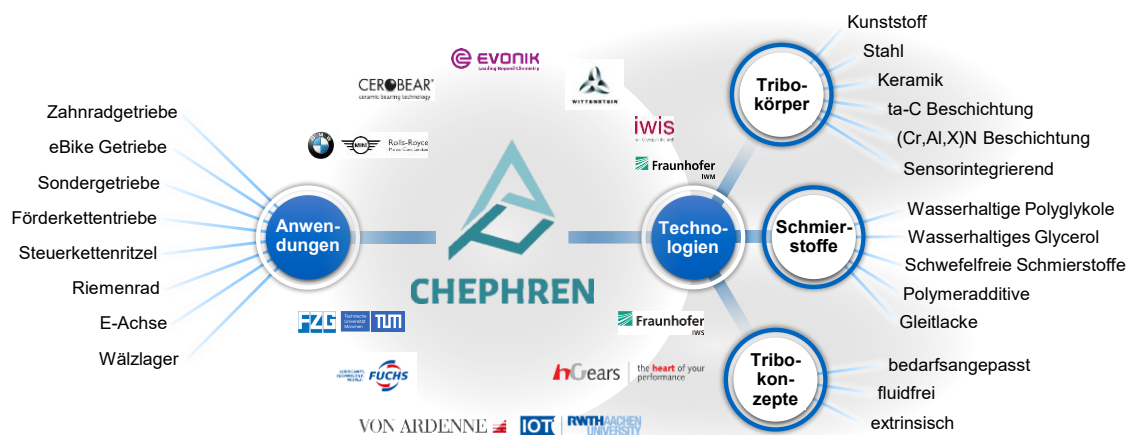


Abbildung 1: Übersicht zum Forschungsprojekt CHEPHREN

Aus den unterschiedlichen Anwendungen resultieren systemspezifische Randbedingungen, welche mittels bedarfsorientierter Technologien untersucht wurden. Bzgl. der Tribokörper wurde vor allem der Einsatz technischer Kunststoffe sowie Beschichtungen fokussiert, während bei den Schmierstoffen insbesondere wasserhaltige Schmierstoffe und schwefelfreie Schmierstoffe betrachtet wurden. Die eingesetzten Tribokonzepte zeigten dabei eine hohe Variabilität von fluidfreier Schmierung bis hin zu bedarfsangepassten Verfahren. Hinsichtlich der betrachteten Schmierstoffe zeigten insbesondere wasserhaltige Schmierstoffe enormes Potential zur Reibungsreduzierung mit Reibungszahlen im Bereich der Superlubricity $\mu < 0,01$. Die Schmiermechanismen und Effizienzvorteile wurden hierbei beginnend von der molekularen Ebene bis hin zu Systemtests an ausgewählten Getriebetopologien analysiert und bewertet. Weiterhin verdeutlichen die Projektergebnisse Effizienzvorteile durch die gezielte Optimierung konventioneller Schmierstoffe in elektrifizierten Antriebssträngen. Die Anwendung von Kunststoffen in tribologischen Kontakten zeigen deutliches Potential zur Reibungsreduzierung, welches in Modelluntersuchungen aber auch an Komponenten- und Systemprüfständen validiert werden konnte. An Tribometern wurden zudem Reibungszahlen im Bereich der Superlubricity $\mu < 0,01$ ermittelt. Die Projektergebnisse verdeutlichen die prinzipielle Eignung von Kunststoffkomponenten in leistungsübertragenden Maschinenelementen wie Zahnradern, Stauförderketten, Steuerkettenritzeln oder Riemenrädern. Weiterhin wurden vielversprechende Ergebnisse für den Einsatz von Beschichtungen erreicht, auf Kunststoffen und metallischen Oberflächen. Diese weisen günstige tribologische Eigenschaften für eine Vielzahl von Anwendungen auf, insbesondere auch für solche unter extremen Umgebungsbedingungen, bspw. in trockengeschmierten Wälzlagern. Das Forschungsprojekt verfolgte einen interdisziplinären Ansatz mit Projektmitgliedern aus Industrie und Forschungseinrichtungen, bestehend aus unterschiedlichen Branchen und Fachgruppen. Dies ermöglichte einen anwendungsübergreifenden Ergebnistransfer der betrachteten Technologien und erschließt perspektivisch weitere Anwendungsfelder. Die abgeleiteten Energie- und Emissionseinsparpotentiale unterstützen nationale sowie internationale klimapolitische Ziele und stärken zudem die technologische Innovationskraft des Wirtschaftsstandorts Deutschland.

I Kurzdarstellung

Im Folgenden werden die Aufgabenstellung, die Voraussetzungen, die Planung und der Ablauf des Forschungsprojekts, der wissenschaftlich-technische Stand und die Zusammenarbeit der Partner dargestellt.

1 Aufgabenstellung

Das übergeordnete Ziel von CHEPHREN war die konsequente Erschließung supraniedriger Reibungszustände für weite Anwendungsfelder und die Integration neuartiger Schmierstoffe und Werkstoffe, insbesondere technische Kunststoffe, in verschiedensten mechanischen Antriebssystemen auf Basis von systemübergreifenden tribologischen Lösungsansätzen. Diese Lösungsansätze wurden anhand von acht Anwendungsfällen (AWF) analysiert und bewertet, welche in Abbildung 2 dargestellt sind.

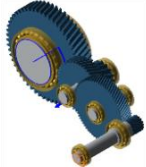
► Zahnradgetriebe  AWF-Leitung: FZL, TUM	► E-Bike-Getriebe  AWF-Leitung: hGears, the heart of your performance	► Sondergetriebe  AWF-Leitung: WITTENSTEIN	► Förderkettentriebe  AWF-Leitung: iwis, wir bewegen Sie weit
► Steuerkettenritzel  AWF-Leitung: BMW, Rolls-Royce Power Systems	► Riemenrad  AWF-Leitung: BMW, Rolls-Royce Power Systems	► E-Achse  AWF-Leitung: BMW, Rolls-Royce Power Systems	► Wälzlager  AWF-Leitung: CEROBEAR, ceramic bearing technology

Abbildung 2: Übersicht der betrachteten Anwendungsfälle (AWF)

Abhängig vom betrachteten AWF wurden spezifische Aufgabenstellungen definiert.

- Zahnradgetriebe: Untersuchung des Verlustleistungsverhaltens und der Temperaturreduktion mit wasserhaltigen Schmierstoffen und Beschichtungen sowie zum Einsatz von technischen Kunststoffen als Zahnradwerkstoff
- Sondergetriebe: Untersuchungen zur Effizienzsteigerung mit wasserhaltigen Schmierstoffen, zum Einsatz von Beschichtungen sowie zu Geometrieoptimierungen
- Förderkettentriebe: Untersuchungen zur Effizienzsteigerung von Stauförderketten durch Einsatz von technischen Kunststoffen sowie zu bedarfsgerechten Nachschmierv Verfahren
- Riemenrad: Untersuchungen zu Effizienz- und Leichtbaupotentialen durch Substitution von Aluminium durch technische Kunststoffe
- Steuerkettenritzel: Untersuchungen zur Effizienzsteigerung durch Einsatz von technischen Kunststoffen
- E-Bike-Getriebe: Untersuchungen zu Effizienz- und Leichtbaupotentialen durch Substitution von Stahlzahnradern durch Kunststoffzahnradern und Einsatz von Beschichtungen
- E-Achse: Untersuchung des Effizienzpotentials neuartiger schwefelfreier Schmierstoffe an dediziert aufgebauten Systemprüfständen
- Wälzlager: Untersuchungen zum Einsatz von technischen Kunststoffen als Käfigwerkstoff, wasserhaltigen Schmierstoffen sowie Beschichtungen

Die Aufgabenstellungen wurden durch anwendungsfallübergreifende Untersuchungen auf Grundlagenebene begleitet, welche sowohl experimentelle als auch simulationstechnische Betrachtungen einschlossen:

- Experimentelle Betrachtungen: Grundlagenuntersuchungen an Modellsystemen mit Tribometern und anwendungsspezifischen Randbedingungen hinsichtlich Beanspruchung. Grundcharakterisierung von Beschichtungen auf unterschiedlichen Substratwerkstoffen.
- Simulationstechnische Betrachtungen: Numerische Modellierung von Tribokontakten und atomistische Betrachtungen auf molekulardynamischer Skala.

Parallel zu den Arbeiten auf Grundlagenebene und den jeweiligen AWF erfolgten Untersuchungen u.a. zum Aufbau der Wertschöpfungskette, aber auch zur Auslegung von Beschichtungsanlagen.

2 Voraussetzungen des Vorhabens

Für die erfolgreiche Durchführung des Forschungsprojekts CHEPHREN waren spezifische fachliche Voraussetzungen erforderlich, die sowohl theoretische als auch praktische Expertise umfassten. Dazu zählten insbesondere fundierte Kenntnisse in den jeweiligen Fachgebieten, wie Beschichtungs- und Schmierstofftechnik, Materialwissenschaften und Antriebssystemtechnik sowie die Fähigkeit wissenschaftliche Methoden zielgerichtet anzuwenden. Ein vertieftes Verständnis der relevanten Modellvorstellungen und Forschungsansätze war ebenso notwendig wie die Kompetenz im Umgang mit fachspezifischen Untersuchungsmethoden. Darüber hinaus war eine wissenschaftliche Arbeitsweise der beteiligten Projektpartner erforderlich.

Das Forschungsprojekt CHEPHREN setzte sich aufgrund oben genannter Anforderungen aus Projektmitgliedern sowohl aus Industrie als auch Forschungseinrichtungen zusammen. Hierdurch wurde eine skalenübergreifende Bearbeitung der wissenschaftlich-technologischen Fragestellungen ermöglicht. Während an den Forschungseinrichtungen vor allem Untersuchungen auf Grundlagenebene durchgeführt wurden, war ein Transfer der Erkenntnisse auf Komponenten- und Systemebene durch die enge Zusammenarbeit mit Industriepartnern gewährleistet.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt CHEPHREN umfasste eine Laufzeit von 42 Monaten mit einem Förderzeitraum vom 01.09.2021 bis zum 28.02.2025. Die Projektstruktur untergliederte sich neben einem administrativen in die drei in Abbildung 3 dargestellten übergeordneten technischen Teilprojekte (TP):

- TP 2000 Grundlagenebene
- TP 3000 Anwendungsebene
- TP 4000 Systemebene

Die Wechselwirkung der einzelnen TPs und Anwendungsfälle (AWF) ist in Abbildung 3 dargestellt.

Während zwischen den Ebenen TP 2000, TP 3000 und TP 4000 ein Skalentransfer von der Grundlagen- zur Systemebene erfolgte, stand ferner der Methodentransfer zwischen den AWF im Fokus des Forschungsprojekts. Die entsprechenden Eingangsgrößen bspw. Beanspruchungskollektiv der Anwendungs- und Grundlagenebene erfolgte durch die jeweilige Anwendung, während über die Ebenen hinweg Eingangsgrößen sowohl aus Simulationen und Experimenten erfolgten. Zur Erreichung der Projektziele wurden die TPs in Hauptarbeitspakete (HAP) aufgeteilt, welche in Teil II separat beschrieben sind. Die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt CHEPHREN werden im Folgenden entsprechend dieser Struktur aus TPs, AWFs und HAPs dargestellt.

Zur Steuerung und Kontrolle des Projektfortschritts erfolgten regelmäßige Abstimmungstermine und Projekttreffen auf unterschiedlicher administrativer Ebene.

Die Arbeitsfortschrittskontrolle erfolgte auf Basis von definierten Meilensteinen. Risiken, welche zu zeitlichen Verzögerungen oder inhaltlichen Abweichungen im Projekt führen konnten, wurden anhand einer Risikomatrix identifiziert und fortlaufend evaluiert.

Zur Projektsteuerung und zur Unterstützung organisatorischer Arbeiten wurde das Forschungsprojekt von einem Projektmanagementdienstleister begleitet. Hierüber erfolgte unter anderem die Einrichtung einer Cloud zum Informations- und Datenaustausch unter den Projektpartnern.

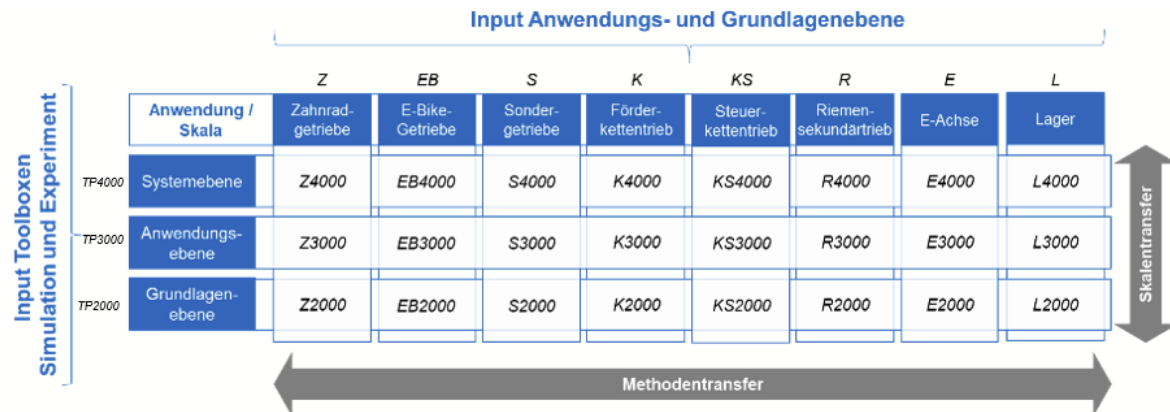


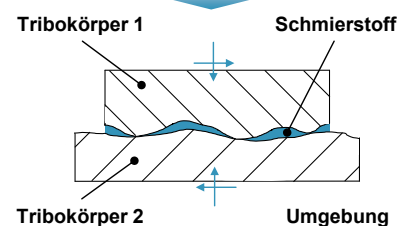
Abbildung 3: Projektstruktur mit Arbeitsebene und Anwendungsfällen

4 Wissenschaftlich-technischer Stand

Die Reduzierung dissipativer Energieverluste in mechanischen Antriebssystemen stellt eine Schlüsselrolle zur Gestaltung nachhaltiger Antriebslösungen dar. In mechanischen Antriebssystemen werden Schmierstoffe zur Reduktion von Reibung und Verschleiß eingesetzt. Für Antriebssysteme mit Zahnrädern und Wälzlager werden dabei meist Schmierfette bzw. Schmieröle eingesetzt. Die Reibung in diesen Maschinenelementen hängt stark von der Art des verwendeten Schmierstoffs ab und wird von Faktoren wie dem Grundöltyp und Additiven bestimmt. Aber auch die Eigenschaften der Tribokörper selbst spielen eine maßgebende Rolle. Erst das Zusammenspiel aus Tribokörpern (nach GfT Arbeitsblatt 7¹ als Grund- und Gegenkörper bezeichnet), Schmierstoff (Zwischenmedium) und Umgebung bildet dabei ein Tribosystem, wie in Abbildung 4 dargestellt. Abhängig vom betrachteten AWF wirken unterschiedliche tribologische Belastungen auf das Tribosystem ein, sodass eine bestimmte Systemfunktion wie beispielsweise eine Energieübertragung erfüllt werden kann. Daraus resultieren die Systemgrößen Reibung und Verschleiß.

Für Zahnräder zeigen frühere Untersuchungen bspw. im Vorgängerprojekt CHEOPS³ ein hohes Potential zur Reibungsreduzierung durch den Einsatz wasserhaltiger Schmierstoffe auf Basis von Polyalkylenglykol. Erste Untersuchungen an Tribometern, aber auch am Zahnradprüfstand zeigten Reibungszahlen im Bereich der Superlubricity $\mu < 0,01$. Abbildung 5 zeigt exemplarisch den Verlauf der mittleren Verzahnungsreibungszahl und Zahnmassentemperatur über der Umfangsgeschwindigkeit.

Input: Anwendungsfallspezifische Tribosysteme mit zugehöriger tribologischer Belastung zur Erfüllung einer Systemfunktion, z. B. Energieübertragung



Output Systemgrößen: Reibung und Verschleiß

Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Tribosystems mit Input und Output Systemgrößen

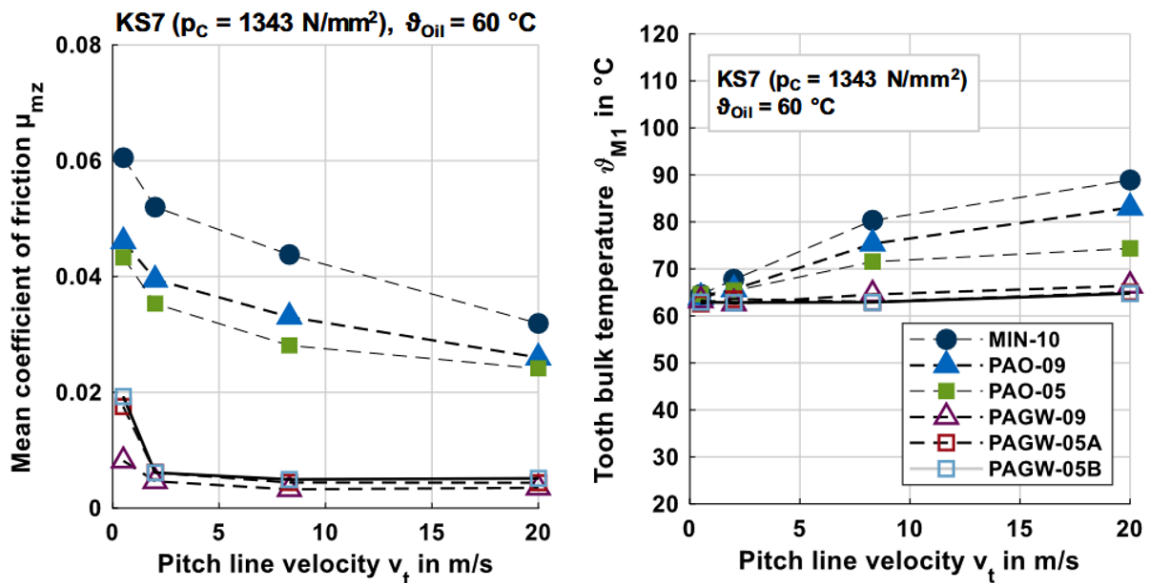


Abbildung 5: Mittlere Verzahnungsreibungszahl und Zahnmassentemperatur über der Umfangsgeschwindigkeit bei Schmierung mit konventionellen (MIN, PAO) und wasserhaltigen Polyalkyleneglykolen (PAGW)²

Über große Betriebsbereiche wurden mittlere Verzahnungsreibungszahlen im Bereich der Superlubricity $\mu < 0,01$ mit einer Reibungsreduktion von bis zu 90 % im Vergleich zu konventionellen Schmierstoffen ermittelt². Diese ultra-niedrige Reibung geht zudem mit einer deutlich niedrigeren Erwärmung einher, sodass selbst bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten nur geringe Erhöhungen der Massentemperatur gemessen wurden. Während vergleichbare Potentiale der Reibungsreduzierung auf Modellebene auch in der Fachliteratur publiziert wurden, sind die dahinterliegenden Mechanismen noch weitestgehend unerforscht. Insbesondere zwei Hypothesen für das Zustandekommen von ultra-niedriger Reibung beim Einsatz wasserhaltiger Schmierstoffe werden aktuell diskutiert. Zum einen die Ausbildung reibungsarmer Scherbänder durch vollständig hydrierte Molekülketten und Lagen von freiem (ungebundenen) Wasser^{3,4}. Zum anderen die niedrige Druckabhängigkeit der Newton'schen Viskosität⁵. Neben einem unzureichenden Mechanismenverständnis stellen Effekte wie Wasserverdampfung, Korrosion und Materialermüdung zentrale Herausforderungen für den Einsatz von wasserhaltigen Schmierstoffen in industriellen Anwendungen dar.

Neben dem Schmierstoff zeigen die Tribokörper bzw. eingesetzten Werkstoffe einen maßgebenden Einfluss auf Reibung und Verschleiß. In den letzten Jahren rückten verstärkt leistungsübertragende Kunststoffverzahnungen in den Fokus der Forschung. Im Allgemeinen weisen Kunststoffverzahnungen neben produktionstechnischen Vorteilen eine erhöhte Überdeckung gegenüber Stahlzahnradern auf, wodurch das Drehmoment auf mehrere Zähne verteilt wird. Durch die hohe Nachgiebigkeit von Kunststoff ergeben sich somit lokal niedrige Pressungen in den Tribokontakten der Zahnradpaare im Eingriff. Bei der für leistungsübertragende Kunststoffverzahnungen notwendigen Schmierung ist für solche sogenannten weichen EHD-Kontakte der im Vergleich zu harten EHD-Kontakten kleine Anstieg der Viskosität im Kontaktgebiet charakteristisch. Daraus resultiert sehr niedrige Flüssigkeitsreibung. Abbildung 6 (links) zeigt das Potential zur Reibungsreduzierung in Kunststoffkontakten anhand von am Zweischeibentribometer gemessenen Reibungskurven eines mit 30 Gew.% Glasfasern verstärkten Polyetheretherketons (PEEK+GF30) im geschmierten Wälzkontakt mit Stahl. Die spezifische Belastung des Kunststoffs ist dabei vergleichsweise hoch.

Selbst bei kleinen Summengeschwindigkeiten zeigen sich Reibungszahlen im Bereich der Superlubricity. Simulationstechnische Untersuchungen von Maier et al.⁶ bestätigen die niedrige Flüssigkeitsreibung im Bereich der Supraschmierung und haben gezeigt, dass geschmierte Wälzkontakte aus Kunststoff und Stahl unter Last lokal einen konformen EHD-Kontakt ausbilden. Entsprechend der niedrigen Flüssigkeitsreibung ist selbst bei hohen Gleitgeschwindigkeiten nur eine geringe lokale Temperaturerhöhung im EHD-Kontakt zu erwarten, wie Abbildung 6 (rechts) für die

Materialpaarung Polyoxymethylen und Stahl zeigt. Im Gegensatz zu geschmierten Wälzkontakten rein metallischer Paarung wird das mechanische Materialverhalten von Kunststoffen zusätzlich stark von der umgebenden Atmosphäre, der Temperatur, der Alterung und dem Belastungszyklus bestimmt. Das Deformationsverhalten von Kunststoffen kann vor allem auch durch Zugabe von Füllstoffen, wie Carbon- oder Glasfasern anisotrop und viskoelastisch sein. Dies beeinflusst sowohl die Energiedissipation durch Dämpfung als auch den Schmierzustand der Kontaktstelle und hat somit Auswirkungen auf die Reibung bzw. auf die lastabhängigen Verluste von Tribokontakten aus Kunststoff.

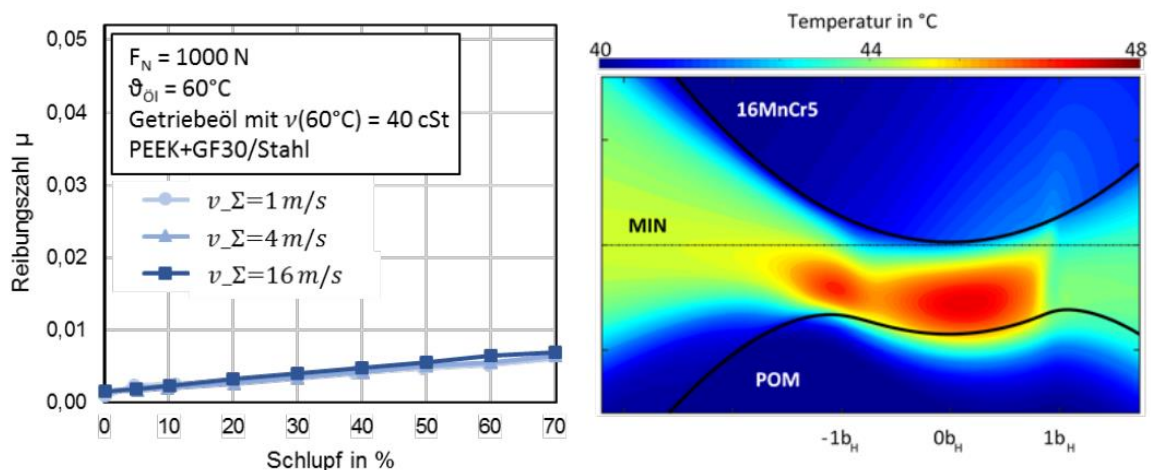


Abbildung 6: Gemessene Reibungskurven am Zweischiebentribometer der Paarung PEEK+GF30/Stahl bei Einspritzschmierung (links) und berechnete Temperaturverteilung in einem EHD-Kontakt der Paarung Stahl gegen Polyoxymethylen (POM) (rechts)⁶

Harte, diamantartige Kohlenstoffschichten gelten seit langem als prädestiniert für tribologische Anwendungen, bei denen es neben dem Verschleißschutzaspekt auch auf die Minderung der Reibung ankommt. Durch die Natur der Kohlenstoffschichten, insbesondere solcher mit einem hohen Anteil sp^3 -hybridisierter, also diamant-gebundener Kohlenstoffatome, weisen die Oberflächen geringe chemische Wechselwirkungen zu Reibpartnern auf. Verbunden mit dem Effekt, mit bestimmten Schmierstoffmolekülen besonders gut gleitfähige Oberflächenmodifikationen auszubilden (graphenartige Bereiche), können sogar supraschmierende Eigenschaften erreicht werden. Die Supraschmierung mit superharten tetraedrisch amorphen Kohlenstoffschichten (ta-C) gilt daher nahezu als eine tribologische Ideallösung, da bei diesem Material die niedrige Reibung und ein extrem kleiner Verschleiß Hand in Hand gehen. Dies trifft insbesondere für Betriebszustände zu, die im Bereich der Mischreibung laufen, d.h. bei denen die Reibpartner nur durch einen sehr dünnen Schmierfilm getrennt sind und einzelne Rauheitsspitzen sogar im direkten Festkörper-Reibkontakt stehen. In den Verbund-Forschungsprojekten PEGASUS, CHEOPS³ und PROMETHEUS wurden Ansätze sichtbar, wie das Supraschmierungspotenzial mit ta-C-Schichten zu erschließen ist.

Als wesentliches Hindernis stellt sich die Problematik der abscheidebedingten ta-C-Schichtrauheit dar, da die Glattheit der ta-C-Schichten eine wesentliche Voraussetzung für das Erreichen des extrem niedrigen Reibwertniveaus ist.

Mit der Laser-Arc-Technologie⁷ existiert eine bereits industriell etablierte Technologie zur Abscheidung von ta-C-Schichten u.a. auf tribologischen Komponenten für Verbrennungsmotoren (Kolbenringe, Kolbenbolzen, Ventiltriebskomponenten, etc.). Allerdings müssen die hiermit erzeugten Schichten vergleichsweise aufwendig nachpoliert werden, um die wachstumsbedingten Schichtdefekte zu entfernen und damit die erforderliche Glattheit zu erreichen. Mittels Plasmafilterung lassen sich die Defekte entfernen, wobei bisher noch keine industriell zufriedenstellende Lösung für eine effektive Plasmafilterung erreicht wurde.

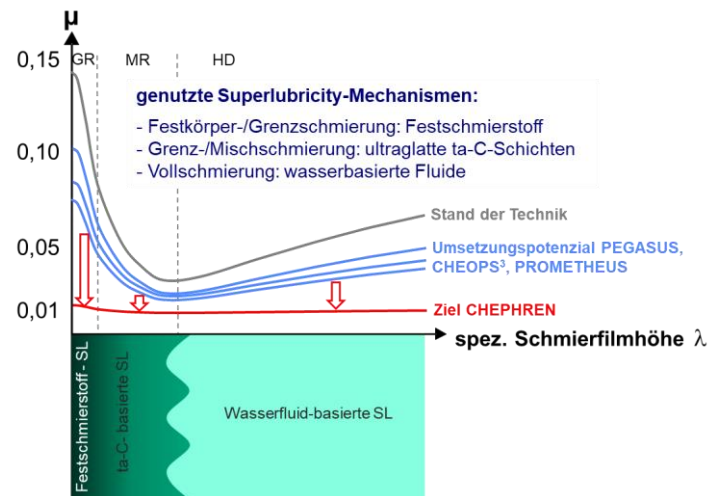
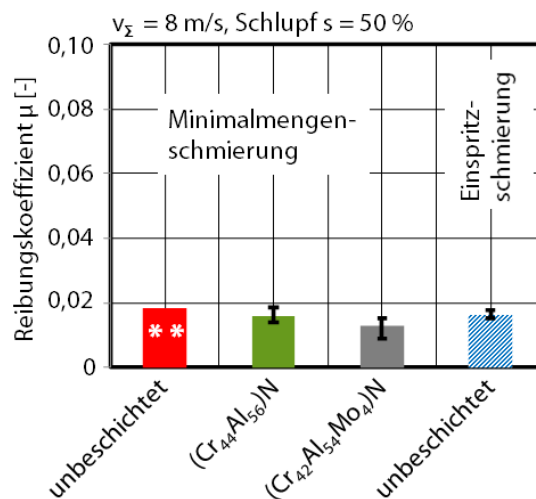


Abbildung 7: Vergleichende Stribeck-Darstellung der potenziell möglichen Reibwertabsenkung (rote Kurve) durch die drei „Superlubricity-Mechanismen“ mit dem Potenzial durch ta-C-Schichten im Bereich der Mischreibung (MR)

Parallel zu den Ansätzen zur Supraschmierung bei Verwendung von ta-C-Beschichtungen wurde in CHEPHREN am IOT der Ansatz aus CHEOPS³ zur Erzielung von Supraschmierung über triboaktive (Cr,Al,X)N-Beschichtungen^{8,9} weiterverfolgt. Dieser im Bereich der Grenz- und Mischreibung aktive Ansatz funktioniert über die chemische Verbindungsbildung von Festschmierstoffphasen durch tribochemische Wechselwirkungen zwischen den triboaktiven Elementen $X = (\text{Mo}, \text{Cu})$ und Schmierstoffadditiven. Zusätzlich deuten Untersuchungen im Projekt CHEOPS³, Abbildung 8, darauf hin, dass auch unter EHD-Bedingungen Reibungsreduktionen, die annähernd im Bereich der Supraschmierung liegen, durch triboaktive (Cr,Al,Mo)N-basierte Beschichtungen erzielt werden können¹⁰.

Versuche im Zweiseibenprüfstand mit
industriellem Versuchsöl



*: Versuchsabbruch

Abbildung 8: Reibungskoeffizienten in Zweiseibenversuchen mit unbeschichteten, (Cr,Al)N- und (Cr,Al,Mo)N-beschichteten Scheiben¹⁰

Dieses Potential soll auch auf die Beschichtung von Kunststoffen übertragen werden. Bedingt durch den gravierenden mechanischen Eigenschaftsunterschied der harten Beschichtung zu dem vergleichsweise weichen Kunststoff-Grundsubstrat stellt die Abscheidung belastungsstabiler Schichten eine besondere Herausforderung dar. Vorarbeiten am IOT zeigten, dass dies möglich ist,

jedoch je nach Kunststoffart und Bauteil sehr verschiedene Prozessabläufe voraussetzt. Insbesondere die Vorbehandlung, das Aktivieren bzw. Plasmaätzen mussten grundlegend untersucht werden. Aus dem Bereich der Grundlagenforschung liegen bereits erste Erkenntnisse zur Beschichtung von Kunststoffen mittels PVD-Beschichtungen am IOT vor. In tribologischen Untersuchungen konnte die Verschleißbeständigkeit von technischen Kunststoffen durch PVD-Beschichtungen erheblich gesteigert werden¹¹.

Zum tieferen Verständnis tribologischer Systeme sowie zur gezielten Überwachung des Betriebszustands sind tribologische Kenngrößen wie z.B. Kontakttemperatur und Pressung von zentraler Bedeutung. Diese Kenngrößen liegen jedoch nur innerhalb des tribologischen Kontaktes vor und sind damit äußeren Messmethoden nicht zugänglich. Einen Ansatz stellt daher die Dünnschichtsensorik. Dabei können Sensoren auf dem Substratmaterial appliziert, im Substratmaterial versenkt oder die Sensorfunktion in tribologische Beschichtungen integriert werden. Erste Ansätze zu Temperatursensorschichten des IOT¹² und Vorarbeiten zu Miniatur-Dünnschichtsensoren der FZG sind vielversprechend und sollen im Rahmen von CHEPHREN weiterentwickelt werden.

5 Zusammenarbeit der Partner

Das Konsortium des Forschungsprojekts CHEPHREN arbeitete auf unterschiedlichen administrativen und fachlichen Ebenen zusammen. Zur Projektsteuerung und Monitoring des Projektfortschritts wurden nachfolgende Abstimmungstermine und Projekttreffen abgehalten:

- Weekly: Wöchentlicher Online-Abstimmungstermin mit Statuspräsentation eines Projektpartners mit anschließender Diskussion und Abstimmung. Dadurch war ein breiter Wissenstransfer über die AWFs hinweg gewährleistet. Weiterhin erfolgte ein Austausch zu organisatorischen Fragestellungen, beispielsweise der Erstellung von Zwischenberichten oder zur Planung von Projekttreffen.
- Quartalsweise Steuerungstreffen: Abstimmungstermin zur Festhaltung des aktuellen Arbeitsfortschritts, der Meilensteine und zur Überwachung der Projektrisiken.
- Projekttreffen: Präsenztreffen zum persönlichen Austausch mit Präsentation der durchgeführten Projektarbeiten, Abhaltung von Workshops und organisatorische Koordination des Forschungsprojekts. Alle 6 Monate bei wechselnden Projektpartnern.

Neben den internen Abstimmungsterminen und Projekttreffen erfolgte ein breiter Wissenstransfer der aktuellen Projektergebnisse im Rahmen der jährlichen BMWK Sondersession auf der Tribologie-Fachtagung der Gesellschaft für Tribologie (GfT). Hierbei wurden sowohl Beiträge der beteiligten Forschungseinrichtungen als auch der Industriepartner präsentiert.

II Eingehende Darstellung

1 Erzielte Ergebnisse im Projekt

Die gewonnenen Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt CHEPHREN werden im Folgenden entsprechend der Struktur aus TPs, AWFs und HAPs dargestellt.

1.1 Grundlagenebene (TP 2000)

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Grundlagenebene von CHEPHREN dargestellt.

Anforderungsprofil und Randbedingungen (HAP 2100)

Auf Basis der Anwendungsfälle in TP 3000 wurden Anforderungsprofile an die jeweils betrachteten Tribosysteme abgeleitet.

Es wurden sechs Hauptentwicklungslinien gemeinschaftlich definiert, die das TP 2000 strukturieren:

1. Abstimmung der Beschichtungen, Schmierstoffe und Oberflächen zur Befähigung von Supraschmierung.
2. Befähigung und Charakterisierung der Supraschmierung durch wasserhaltige und unkonventionelle Schmierstoffe.
3. Anpassung der Beschichtungen und Applikationsprozesse für Komponentenkonturen.
4. Skalenübergreifende Modellierung und Berechnung von geschmierten Tribokontakten mit wasserhaltigen Schmierstoffen und Beschichtung.
5. Entwicklung von haftfesten Beschichtungen für tribologisch beanspruchte Kunststoffoberflächen.
6. Entwicklung bedarfsgerechter Schmierungssysteme.

Eine ausführliche Beschreibung zu oben genannten Punkten sind in den jeweiligen Abschnitten zu den HAPs enthalten.

Schichtentwicklung (HAP 2200)

Entwicklung gefilterter Schichten (IWS)

Im Rahmen des Projektes wurde eine neue Generation eines Filtermoduls für die ta-C-Beschichtung (Superfilter) aufgebaut und optimiert. Die umgesetzte 90°-Filterung hat dabei die Schichtqualität auf ein neues Level gehoben.

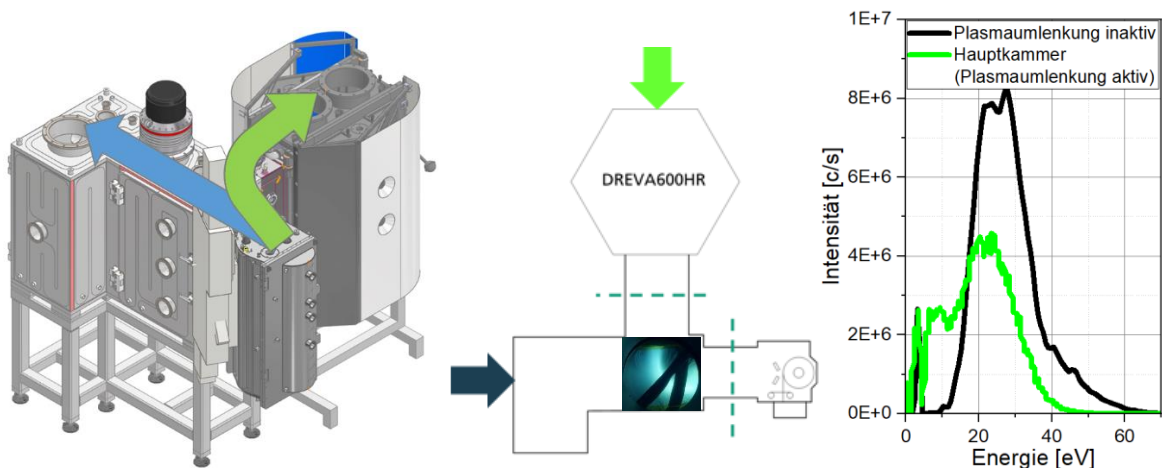


Abbildung 9: Beschichtungsanlage mit 90°-Filtermodul Modell (links), Schema (Mitte) und Plasmaenergieverteilung für C+ bei Direktausbreitung und Filterung (rechts)

Die magnetische Ablenkung transportiert einen hohen Anteil des emittierten Plasmas der Kohlenstoffquelle in die Beschichtungskammer. Dabei verschiebt sich die mittlere Energie der einfach geladenen Kohlenstoffionen (C^+) geringfügig zu niedrigeren Werten (Abbildung 9). Die 90° -Filterung verringert den Anteil der defektbehafteten Oberfläche ca. um Faktor 15 gegenüber ungefiltert bei $1\ \mu\text{m}$ dicken Schichten (Abbildung 10).

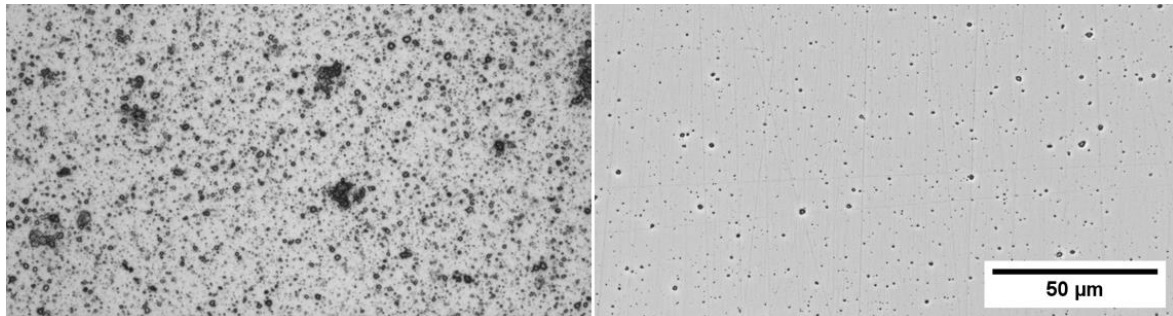


Abbildung 10: Vergleich $1\ \mu\text{m}$ ta-C ungefiltert (links) mit 18,9 % defektbehafteter Oberfläche vs. 1,3 % bei 90° gefilterter ta-C-Schicht (rechts)

Besonders deutlich wird der Effekt der Filterung im Querschnitt (Abbildung 11). Neben der wesentlich glatteren Oberfläche wird besonders die geringe Störungsdichte im Schichtvolumen deutlich. Das erklärt auch die hohen gemessenen Härtewerte der Schichten von $E > 650\ \text{GPa}$, $H > 63\ \text{GPa}$ trotz der etwas geringeren mittleren Ionenenergie.

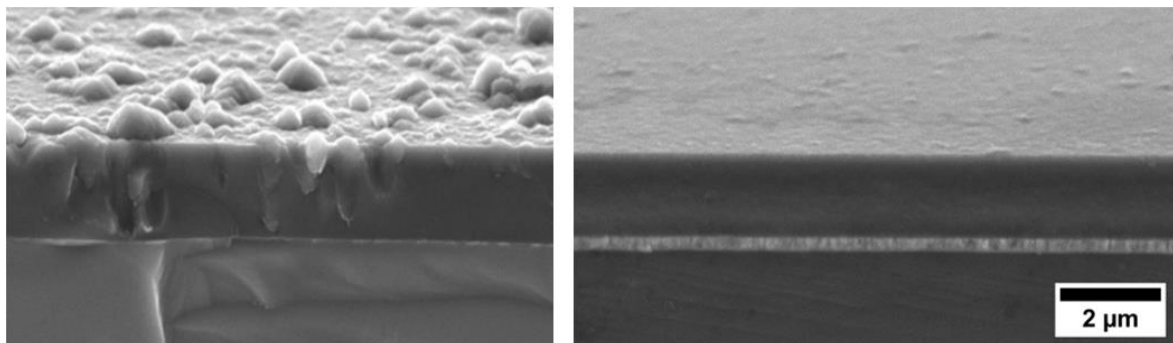


Abbildung 11: REM-Abbildung an Bruchkanten von ca. $2\ \mu\text{m}$ dicken ta-C-Schichten ungefiltert (links) und 90° gefiltert (rechts)

Verschleißratenuntersuchungen mit Stahlkugeln als Reibpartner ungeglätteter ta-C-Schichten zeigen die erfolgreiche Entwicklung der supergefilterten Schichten. Die geringe verbliebene Rauheit wird innerhalb der ersten 5 Minuten eingeebnet und es stellt sich ein stabiler Zustand ein (Abbildung 12). Optisch wirkt die Verschleißspur der supergefilterten Schichtvariante deutlich glatter als im geläpften Zustand. Trotzdem liegt der Verschleiß aufgrund der wenigen Rauspitzen höher. Der Verschleißabtrag an der Stahlkugel nimmt mit dem Grad der Filterung erheblich ab, auch wenn noch nicht das Niveau von geläpften ta-C-Schichten erreicht wird.

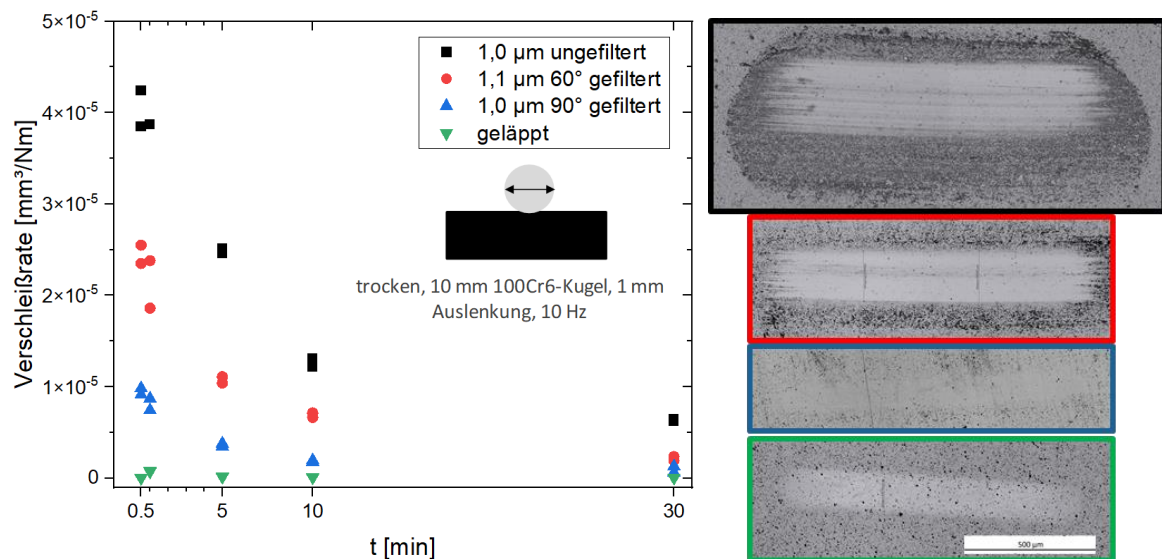


Abbildung 12: Einlaufverhalten der Gegenkörper-Verschleißrate (links) und Verschleißspuren auf den ta-C-Schichten nach 10 min Versuchsdauer (rechts)

Schichtentwicklung für Kunststoffe (IWS)

Die ta-C-Beschichtung von Kunststoffsubstraten aus PEEK und PA12 mit und ohne Verstärkerfasern konnte erfolgreich umgesetzt werden. Dabei zeigt sich eine sehr gute Schichtanbindung an alle Substratvarianten. Der hohe E-Modul- und Festigkeitsunterschied kann dabei für PA12 zur Ausbildung einer Schollenstruktur führen, wobei die Haftung davon nicht beeinträchtigt wird (Abbildung 13).



Abbildung 13: Ritztest auf PA12 mit 50 nm Cr + 500 nm ta-C mit Schollenstruktur

Die Ausbildung der Schichtoberfläche hängt direkt von der Oberfläche der Substrate ab. Die PEEK-Variante hebt sich da hervor und es können ta-C-Schichten aufgetragen werden, die sich kaum von Stahlreferenzkörpern unterscheiden. Die weichen PA12-Substrate verformen sich an der Oberfläche in Folge der Beschichtung, was die Rauheit dort deutlich erhöht (Abbildung 14).

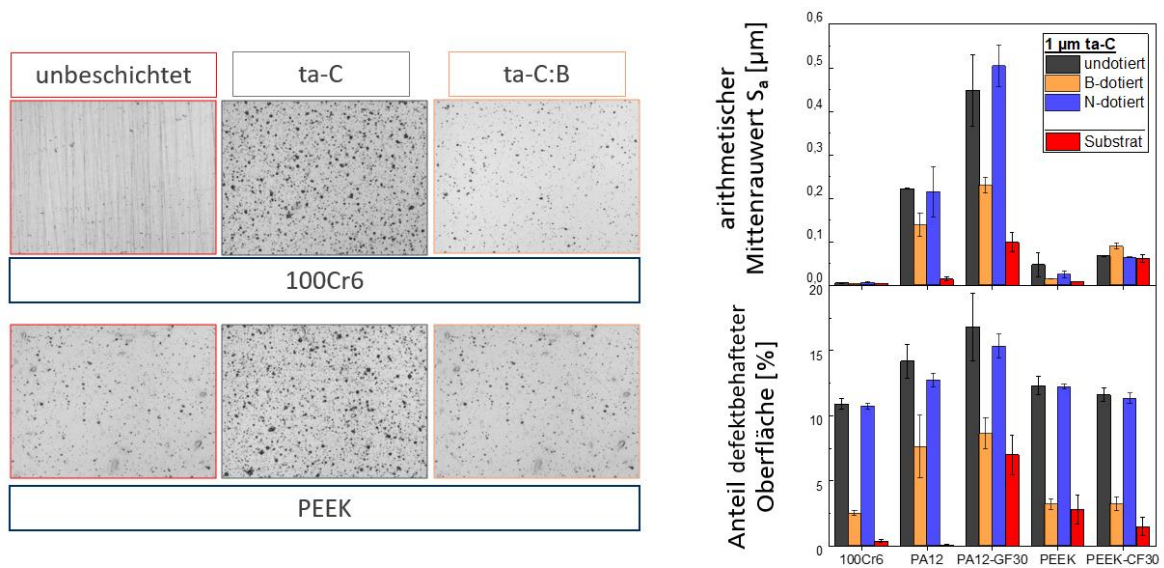


Abbildung 14: Oberflächen von 100Cr6-Referenz und PEEK im Vergleich ohne und mit 1 µm Beschichtung (links); Kennwerte der Oberflächen für alle Kunststoffsubstrate und undotiertes und dotiertes ta-C (rechts)

Bereits 1 µm dicke Schichten erhöhen die Verschleißbeständigkeit der Kunststoffoberflächen. Dabei werden für PEEK-Substrate sogar Reibwerte analog zu beschichteten Stahlprüfkörpern erreicht, wobei unbeschichtete PEEK-Substrate versagen (Abbildung 15).

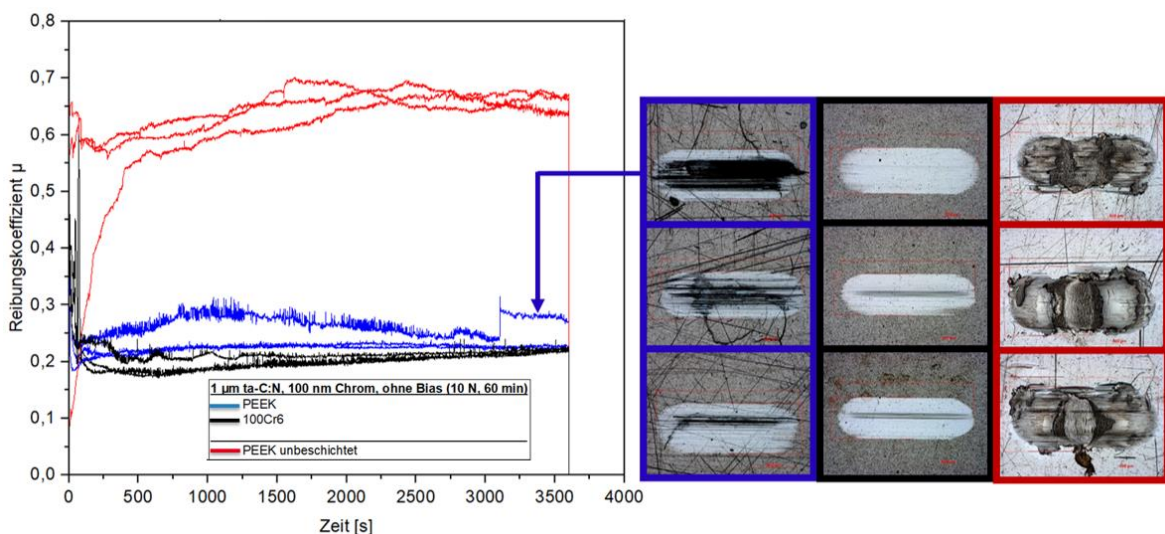


Abbildung 15: Reibungsverläufe (links) und Schicht-Verschleißbilder (rechts) nach SRV-Tests mit 10 mm 100Cr6-Kugel gegen Flachprobe aus PEEK, PEEK + ta-C:N und 100Cr6 + ta-C:N (ungeschmiert)

Bei einer Erhöhung der Schichtdicke auf 4 µm konnte dieser stabilisierende Effekt für die weicheren PA12-Substrate nachgewiesen werden. Ebenso wurden verschiedene Schichtvarianten auf Kunststoffriemenräder und Zahnräder aufgebracht.

Entwicklung einlaufoptimierter Schichten (IWS)

Die Beschichtung von Zahnrädern stellt aufgrund ihrer Geometrie eine große Herausforderung dar, die im Projekt mit neuen Schichtenvarianten und Haftschichtkonzepten adressiert wurde. Es wurden Einlaufschichten entwickelt, die ungefiltert und damit besonders produktiv hergestellt werden können und einen Härtegradienten an der Oberfläche haben. In tribologischen Untersuchungen wurde gezeigt, dass der Gegenkörperverschleiß um mehrere Größenordnungen reduziert ist und sich eine

glatte Oberfläche im Reibkontakt einstellt. Dieser Effekt wurde für beschichtete Zahnräder nachgewiesen. Diese zeigen nach der Beschichtung ein $R_a = 0,23 \mu\text{m}$, welches sich auf $0,09 \mu\text{m}$ nach dem Prüfstandlauf reduzierte (Abbildung 16).

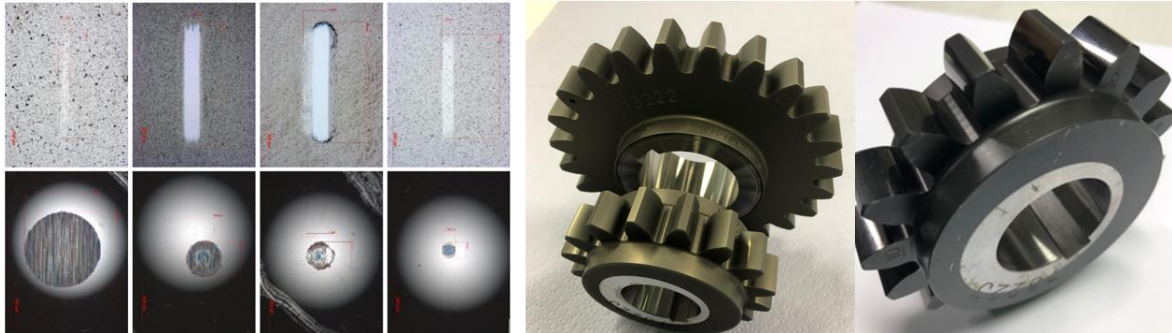


Abbildung 16: Verschleißspuren auf Schicht (links oben) und auf Stahlkugel-Gegenkörper (links unten) für ta-C as-deposited, ta-C-Einlaufschicht, ta-C:N-Einlaufschicht und ta-C-geläppt (v.l.n.r.) nach SRV-Tests und beschichtete Zahnräder vor (Mitte) und nach Prüfstandlauf (rechts)

Tribologische Messungen dieser Einlaufschichten zeigen das hohe Potential des Ansatzes. Die Schichtvariante ta-C:N erreicht hier mit dem neuen, vom Projektpartner FUCHS entwickelten wasserhaltigen Schmierstoff, nach einem kurzen Einlauf, Reibwerte von 0,011, also nahe an der Grenze zur Supraschmierung (0,01) – siehe (Abbildung 17).

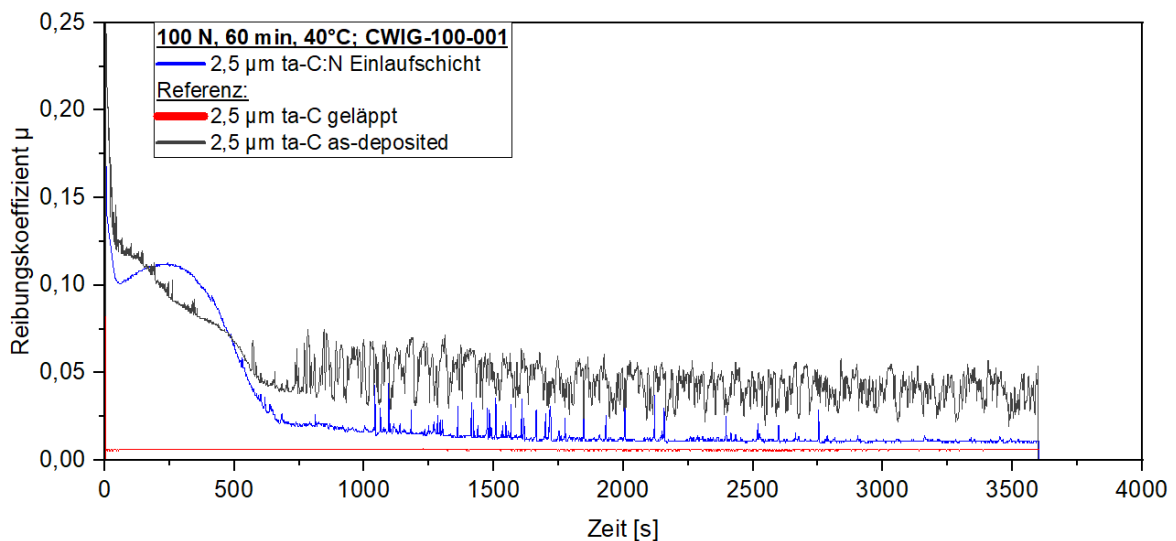


Abbildung 17: Reibwertverlauf über 1 h bei verschiedenen ta-C-Schichtvarianten

MoS₂-Schichten in Kombination mit ta-C für mangelgeschmierte Komponentenanwendungen (IWS)

Sogenannte Festschmierstoffe wie MoS₂ bieten eine Schmierwirkung unter sauerstofffreier Atmosphäre bis hin zu Hochvakuumbedingungen, wie sie z.B. an mechanischen Systemen wie in Satelliten oder Mars-Rovern benötigt werden. Zur Verbesserung der Einsatzeignung für sowohl Atmosphären sowie Vakuumanwendungen wurden Hybridschichten entwickelt, wo MoS₂ in einer ta-C-Matrix vorliegt. Die Verbundhärte verhält sich erwartungsgemäß und mit zunehmendem Anteil der weichen Phase sinkt auch die Härte deutlich (Abbildung 18).

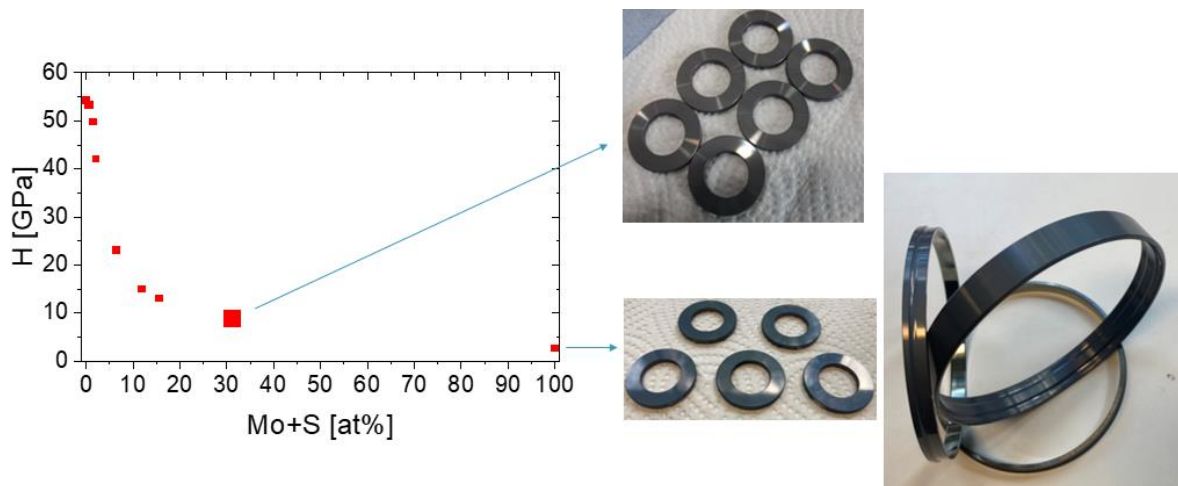


Abbildung 18: ta-C/MoS₂-Hybridschicht auf Lagerscheiben und MoS₂-Schicht auf Lagerscheiben und Ringen

Diese Hybridschichten wurden auf Lagerkomponenten und eigene Prüfkörper aufgebracht, wobei eigene tribologische Untersuchungen am Vakuumtribometer nur für die reine MoS₂-Schicht gut funktionieren. Bereits die Variante mit 30 % Mo+S zeigt den 5-fachen Reibwert. Der Reibwert der Laser-Arc MoS₂-Schicht liegt mit 0,02 auch deutlich unter dem marktüblichen MoS₂, welches mit Sputtern hergestellt wird (Abbildung 19).

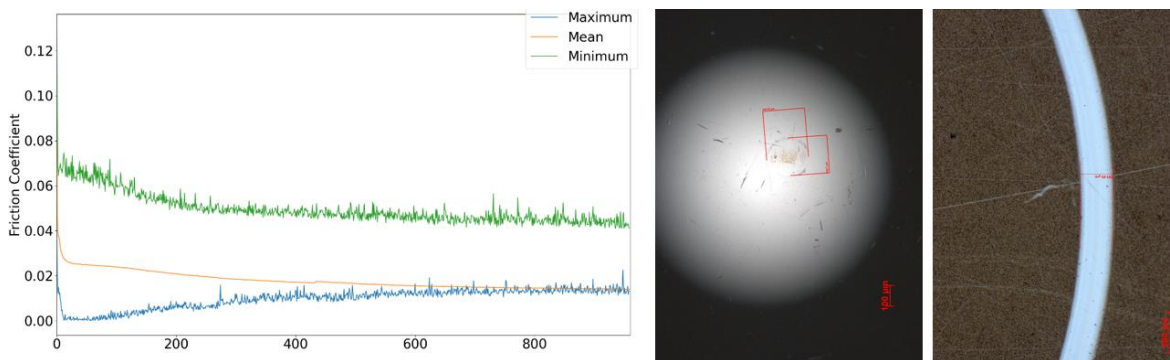


Abbildung 19: Reibwerte (links) im Vakuumtribometertest mit 10 mm 100Cr6-Kugel gegen mit MoS₂-beschichtete Platte. Verschleißabrieb vom Stahlkugel-Gegenkörper (Mitte) und auf der MoS₂-Schicht (rechts)

Triboaktive Schichten (IOT)

Das Institut für Oberflächentechnik (IOT) der RWTH Aachen verfolgte in seiner Arbeit das Ziel, triboaktive Beschichtungen auf Basis von (Cr,Al,X)N (X = Mo, Cu) und deren Beschichtungsprozesse weiterzuentwickeln. Die am IOT durchgeführten Untersuchungen betrachten alle relevanten Einflussgrößen von der Prozesstechnik über die Schichtentwicklung bis hin zur tribologischen Analyse. Die Schichtentwicklung am IOT gliederte sich in zwei Teilziele: Zum einen wurde an der Anpassung triboaktiver (Cr,Al,X)N-Beschichtungen gearbeitet, um unter tribologischer Beanspruchung mit additiven Schmierstoffen reibungs- und verschleißreduzierende tribochemische Reaktionsschichten zu bilden. Darüber hinaus wurden Hochleistungskunststoffe als Substratwerkstoff betrachtet. Hierbei wird eine Beschichtung eingesetzt, um dem erhöhten Verschleiß von Kunststoffkomponenten in anspruchsvollen Einsatzbereichen zu begegnen und somit die Leistungsfähigkeit dieser zu verbessern und die Lebensdauer zu verlängern.

Ein Verfahren von erheblicher industrieller Relevanz im Bereich der triboaktiven Beschichtungen ist das Gleichstromlichtbogenverdampfen mit konstanter Stromversorgung. Bei diesem Verfahren wird ein Lichtbogen auf dem zu verdampfenden Spendermaterial (Target) erzeugt, was zu extrem hohen Energiedichten im Fußpunkt des Lichtbogens führt und das Material verdampfen lässt. Allerdings

bringt dies auch Herausforderungen mit sich, insbesondere die Emission von Makropartikeln (Droplets), die während der Schichtherstellung entstehen. Um diesen Nachteil zu minimieren, werden bereits verschiedene Ansätze zur Reduktion der Dropletemissionen genutzt. Während neben dem Einsatz von Filtern auch die Anwendung magnetischer Felder bereits als Stand der Technik gilt und in industriellen Arc-Anlagen durch steuerbare elektromagnetische Spulen realisiert wird, ist die Nutzung gepulster Stromquellen bislang noch nicht in der Industrie etabliert. Daher wurden im Forschungsprojekt CHEPHREN sechs gepulste Leistungsverordnungen in die am IOT vorhandene industrielle Beschichtungsanlage Flexicoat 850, IHI Hauzer Techno Coating B.V., Venlo, Niederlande, integriert und in Betrieb genommen. Die Schichtentwicklung beinhaltete eine umfassende Variation der für das gepulste Lichtbogenverdampfen entscheidenden Prozessparameter Pulsstrom I_P und Zykluszeit t_Z . Die Ergebnisse in Abbildung 20 zeigen, dass insbesondere der Pulsstrom I_P zur Reduzierung von Dropletemissionen beitragen kann. Dabei nimmt insbesondere der Anteil an Droplets mit kleinerem Umfang ab. Die hier nicht dargestellten absoluten Werte der Messungen zeigen, dass die Anzahl der Droplets mit einem Umfang $U > 8 \mu\text{m}$ mit zunehmendem Pulsstrom I_P ansteigt. Bei Betrachtung des maximalen Umfangs der Droplets ist dagegen zu beobachten, dass dieser bei einem Pulsstrom $I_P = 120 \text{ A}$ am geringsten ausfällt. Somit kann durch gezieltes Einstellen der Pulsparameter neben einer Reduktion der Anzahl an Droplets auch eine Reduktion der Dropletgröße erreicht werden.

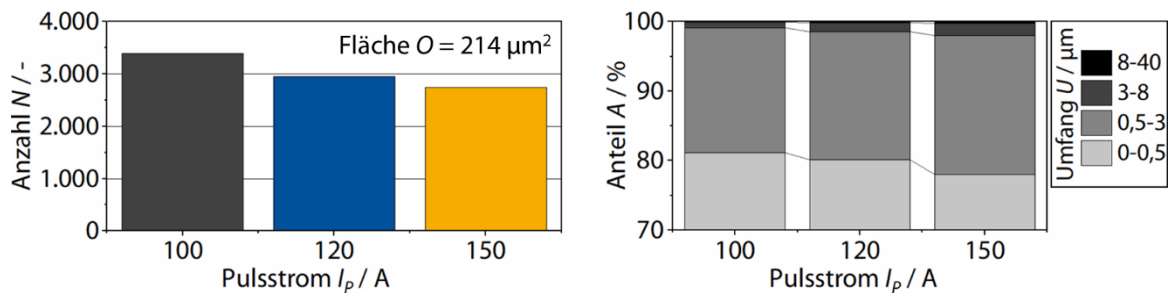


Abbildung 20: Anzahl N und Anteil A der Droplets an der Gesamtheit der Droplets auf einer Fläche $O = 214 \mu\text{m}^2$ unter Variation des Pulsstromes I_P

Begleitend zur Schichtentwicklung wurden auch plasmaanalytische Messungen mittels optischer Emissionsspektroskopie (OES) durchgeführt. Mit diesen lässt sich die Zusammensetzung der angeregten und ionisierten Teilchen im Plasma bestimmen, was wiederum mit der Schichtzusammensetzung korreliert werden kann. In den hier durchgeführten Untersuchungen zeigte sich, dass die betrachteten Prozessparameter Pulsstrom I_P und Zykluszeit t_Z keinen Einfluss auf die Zusammensetzung des metallischen Anteils der Schichten haben, was durch die OES-Messungen verifiziert wurde.

Die Anpassung der triboaktiven Beschichtungen durch gepulste Lichtbogenverdampfung zeigt, dass die Anzahl und Größe der Droplets und damit die Rauheit der Beschichtungen durch diese Technologie verringert werden kann. Dies soll dazu beitragen, ultra- und supraniedrige Reibungseigenschaften zu ermöglichen, wodurch sowohl Reibungsverluste als auch Verschleiß in tribologischen Anwendungen signifikant reduziert werden können. Zur umfassenden Bewertung des Reibungs- und Verschleißverhaltens kommen sowohl gleitende als auch wälzende Prüfmethoden zum Einsatz. Um die wälzende Prüfmethode zu ermöglichen, wurde am IOT im Forschungsprojekt CHEPHREN eine Mini Traction Machine (MTM) beschafft. Abbildung 21 zeigt in diesem Zusammenhang, dass durch die Steigerung des Pulsstroms I_P , die damit einhergehende verringerte Dropletemission im Beschichtungsprozess die Reibung im untersuchten MTM-System gesenkt werden kann. Bis zu einer Slide-to-Roll Ratio (SRR) $SRR \leq 20 \%$ konnte mit der besten entwickelten CrAlMoN-Schicht das Ziel der supraniedrigen Reibung im System mit $\mu < 0,01$ erreicht werden.

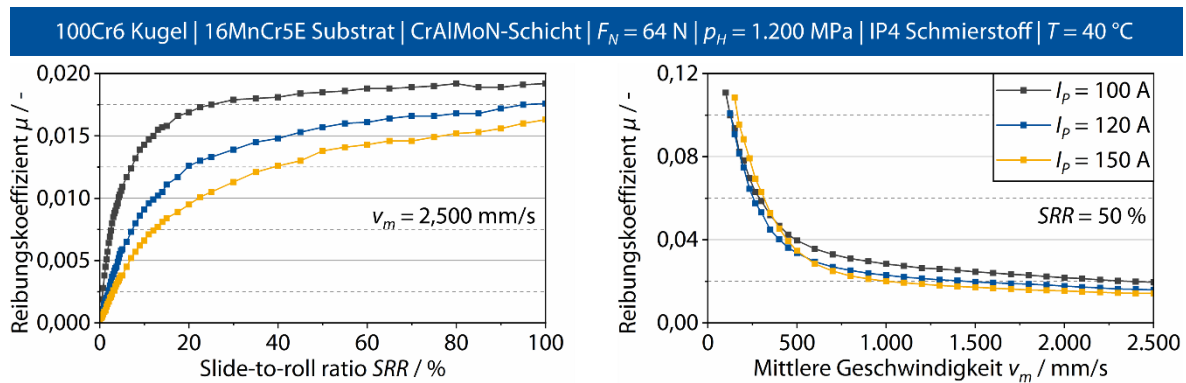


Abbildung 21: Reibungskoeffizient μ unter Variation von Slide-to-Roll Ratio SRR und mittlerer Geschwindigkeit v_m aus Versuchen an der Mini Traction Machine (MTM)

Vor der Durchführung der MTM-Versuche wurden sowohl eine mit einem Pulsstrom $I_p = 100 \text{ A}$ hergestellte als auch eine ungepulste CrAlMoN-Schicht zum Vergleich auf Kettenbolzen appliziert und beim Partner iwis mobility systems untersucht. Da das etablierte Gleitschleifverfahren zur Reduzierung der Rauheiten der Bolzen bei den ungepulsten Schichten bereits zu starken Ausbrüchen führte, wurde im Kettenprüfstand lediglich die gepulste Schicht getestet. Die Ergebnisse lassen auf ein hohes Potential der gepulsten CrAlMoN-Beschichtung schließen, da sie im Verschleißverhalten und der Kettenlängung trotz des frühen Entwicklungsstadiums bereits vergleichbare Ergebnisse mit der CrAlN-Serienschicht von iwis mobility systems liefert.

Die Erkenntnisse aus der Weiterentwicklung der triboaktiven Schichten auf Stahlsubstrat wurden parallel auch für die Schichtentwicklung auf Kunststoffen verwendet. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden dabei bedeutende Fortschritte bei der Abscheidung von CrAlMoN-Schichten auf Kunststoffsubstraten erzielt. Alle Untersuchungen wurden mit PEEK- und PA12-Substraten des Partners Evonik durchgeführt. Die Betrachtung verschiedener Einflussfaktoren auf die Haftung der Schichten ergab wertvolle Erkenntnisse. Hierbei wurden Aspekte wie die Verwendung von Interlayern, die Schichtdicke, Prozesstemperaturen sowie Ätzprozesse analysiert. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass ein Interlayer für tribologische Anwendungen unerlässlich ist, um eine sehr gute Verbundhaftung zu gewährleisten. Zudem wurde festgestellt, dass Schichten mit einer Dicke $t > 2 \mu\text{m}$ ein Rissmuster aufweisen, welches bei höheren Temperaturen verstärkt wird. Auch wenn die Erwartung war, dass ein solches Rissmuster für die tribologische Anwendung hinderlich ist, ließen die Untersuchungsergebnisse andere Schlüsse zu. Das Rissmuster führte in keiner Weise zu einer Verstärkung von Reibung und Verschleiß in den tribologischen Tests. Möglicherweise können diese als Schmierstoffaschen oder als Konzentrationsstellen der tribochemischen Reaktionsschichten dienen. Auch können durch die bereits vorhandenen Risse in der Schicht, die durch das vergleichsweise weiche Kunststoffsubstrat entstehenden, Verformungen im Kontaktbereich ausgeglichen werden. Ein Vergleich verschiedener Plasmaätzprozesse – darunter Argonätzen, Wasserstoffätzen und Sauerstoffätzen – zeigte, dass das Sauerstoffätzen die besten Ergebnisse hinsichtlich der Haftung und Oberflächenqualität erzielt.

Darüber hinaus wurden CrAlMoN-Schichten erfolgreich auf Zahnrädern der Partner hGears und Evonik abgeschieden, siehe Abbildung 22. Insbesondere in anwendungsnahen Tests beim Partner hGears konnte die Schicht zu einem niedrigen Antriebsverlust im System beitragen, ohne, dass ein Schichtversagen auftrat. Dies qualifiziert die CrAlMoN-Schicht für weitere Langzeittests. Die Ergebnisse dieser Tests werden im Berichtsteil zum Anwendungsfall E-Bike-Getriebe (siehe Abschnitt 1.2.6) detailliert dargestellt und belegen die industrielle Relevanz der entwickelten triboaktiven Beschichtungen auf Kunststoffsubstraten.



Abbildung 22: Aufnahmen verschiedener Kunststoffzahnräder der Projektpartner hGears und Evonik, beschichtet mit CrAlMoN-Schichten

Schmierstoffentwicklung (HAP 2300)

Der wesentliche Fokus von FUCHS lag im Forschungsprojekt auf der Entwicklung und Bereitstellung applikationsgerechter Schmierstoffe für alle im Forschungsprojekt betrachteten Anwendungen mit dem Ziel durch anwendungsspezifisch optimierte Schmierungslösungen das angestrebte Potential zur Reibungssenkung in den konkreten Anwendungsfeldern zu ermöglichen.

Die hierfür notwendigen Arbeitsinhalte umfassten im Wesentlichen folgende Vorgehensweise:

- Optimierung und Anpassung von Formulierungen/ Additivtechnologien (hinsichtlich Superlubricity)
- Bereitstellung größerer Mengen der Fluidkandidaten
- Qualifizierung der Schmierstoffe hinsichtlich chemisch-physikalischer Eigenschaften
- Grundcharakterisierung und Screening des tribologischen Verhaltens bzw. der Wechselwirkungen zwischen Schmierstoffen und Materialien (z.B. Hartstoffschichten, Kunststoffe) durch den Einsatz tribologischer Prüfmethoden
- Erforschung relevanter Mechanismen durch Einsatz von Simulationsmethoden
- Auswertungsunterstützung der Anwendung durch Korrelationsanalyse mit Modellversuchen

In Summe wurden über die Laufzeit des Forschungsprojekts mehr als 40 unterschiedliche Fluidkandidaten entwickelt und hinsichtlich ihrer Eignung zur Erreichung des Projektziels analysiert. Neben unterschiedlichsten Fluidtechnologien (bspw. für die E-Achse, Industriegetriebe und Förderketten) wurden Fette (für E-Bike-Getriebe und Kettenschmierung) sowie Gleitlacke/ Gleitfilme (bspw. für Kunststoff-Riemenräder sowie Förderketten) entwickelt und bereitgestellt. Abbildung 23 veranschaulicht die anwendungsspezifische Schmierstoffzuordnung.

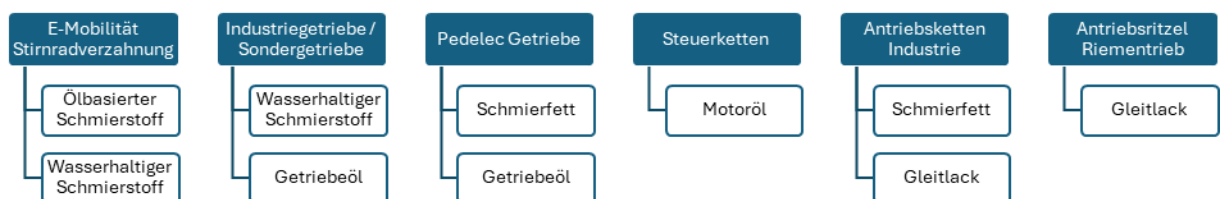


Abbildung 23: Anwendungsspezifische Schmierstoffzuordnung

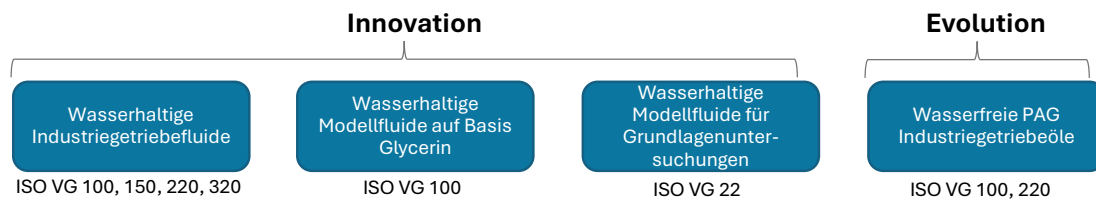
Unterstützt wurden die Entwicklungstätigkeiten durch den Einsatz von Simulationsmethoden (vgl. Atomistische Simulationen (HAP 2800)). Mit diesen wurden bspw. Adsorptionseigenschaften im Kontext tribologischer Eigenschaften von Modellmolekülen untersucht. Betrachtet wurden spezifische funktionelle Gruppen, welche hinsichtlich tribologischem Verhalten von besonderem Interesse sind. Die gewonnenen Erkenntnisse konnten unmittelbar in den Entwicklungstätigkeiten Berücksichtigung finden.

Die anwendungsspezifisch erzielten Ergebnisse sind in den zugehörigen Abschnitten der entsprechenden AWF ausführlicher erläutert. Nachfolgend werden dennoch ausgewählte Schwerpunkte der Schmierstoffentwicklung hervorgehoben.

Schmierstoffentwicklung Sondergetriebe

In vorangegangenen Arbeiten sowie den durchgeführten Untersuchungen auf Grundlagenebene (siehe Tribologische Grundlagenversuche (HAP 2400)) konnte das reibungsmindernde Potential wasserhaltiger Getriebefluidе aufgezeigt werden. Aus diesem Grund wurden für die Anwendung in industriellen Sondergetrieben wasserhaltige Fluide unterschiedlicher Viskositätsklassen formuliert (ISO VG 100, 150, 220, 320). Weiterhin wurden Modellfluide mit unterschiedlichem Wasseranteil (ISO VG 22, 8% bis 40% Wasseranteil) entwickelt, um systematisch den Einfluss des Wasseranteils auf das reibungsmindernde Potential der Fluide zu studieren. Die Untersuchungen im Projektkonsortium an den wasserhaltigen Modellfluiden haben gezeigt, dass auch bei geringen Wasseranteilen immer noch Superlubricity oder Superlubricity-nahe Reibungseigenschaften bestehen. Der niedrige Wasseranteil verspricht ein etwas robusteres Verhalten hinsichtlich Wasserverlust gegenüber Schmierstoffen mit hohen Wasseranteilen, sodass aufbauend auf diesen Erkenntnissen Fluidkandidaten mit verringerten Wasseranteilen für die Endanwendung abgeleitet werden konnten. Für eine Verknüpfung mit dem Hauptarbeitspaket Atomistische Simulationen (HAP 2800) wurde ein anwendungsnahes wasserhaltiges Schmierstoffkonzept umgesetzt, dessen Grundölkonzept das in der Simulation betrachtete Molekül aufgreift (CWIG100-002).

Darüber hinaus motivierte der beobachtete Superlubricity-Effekt von Glycerol auf ta-C die Übertragung des Konzeptes auf eine formulierte, komplexe Schmierstoffmatrix (= Modellfluide auf Basis Glycerin, ISO VG 100). Die basierend auf diesem Konzept entwickelten Kandidaten entsprechen der gleichen Viskositätsklasse, unterscheiden sich jedoch in der gewählten Additivierung. Da jedoch auch eine Weiterentwicklung konventioneller (wasserfreier) Getriebeöle der ISO VG 100 und ISO VG 220 auf Polyglykol-Basis im Rahmen des Projekts untersucht werden sollte, wurden für die Anwendung in industriellen Sondergetrieben unterschiedliche Entwicklungslinien etabliert, welche in Abbildung 24 übersichtlich dargestellt sind.



Nomenklatur der Kandidaten: "Entwicklungslinie"- "ISO VG"- "lfd. Nr." (Bsp.: CWIG-100-001)

Entwicklungslinie: CWIG = wasserhaltig, ChIG = wasserfrei

Abbildung 24: Übersicht der unterschiedlichen Entwicklungslinien für Sondergetriebe und Modelluntersuchungen

Die durchgeführten tribologischen Grundlagenuntersuchungen am Kugel-Scheibe-Tribometer (MTM) bestätigten grundlegend reibungsminderndes Potential, sowohl mit weiterentwickelten, konventionell wasserfreien PAG Industriegetriebeölen, als auch mit innovativen, wasserhaltigen Fluidkonzepten. Ein Beispiel für die wasserfreien ISO VG 220 Schmierstoffe zeigen die Reibungskennfelder in der oberen Reihe der Abbildung 25. Hier konnte eine geringfügige Reibungsreduzierung gegenüber dem Referenzöl Stand der Technik (ChIG-Ref-220-002) in bestimmten Betriebsbereichen für den Entwicklungsschmierstoff ChIG-220-002 nachgewiesen werden.

Bei den wasserfreien ISO VG 100 Schmierstoffen fallen die erzielten Reibungsreduzierungen der untersuchten Entwicklungsschmierstoffe in der Mischreibung deutlich geringer aus (ChIG-100-004) bzw. liegen wie für ChIG-100-005 der Fall sogar über der Referenz ChIG-Ref-100-001. Exemplarisch für die wasserhaltigen Fluidkonzepte ist die Reibungsreduzierung im MTM Reibungskennfeld des Entwicklungsfluids CWIG100-001 dagegen sehr deutlich ausgeprägt (siehe Abbildung 25 untere Reihe).

Diese sehr ausgeprägten Superlubricity ($\mu < 0,01$) und Superlubricity-nahen ($\mu = 0,01-0,02$) Reibungsbereiche zeigen sehr eindrucksvoll das Potential der wasserhaltigen Schmierstoffe auf.

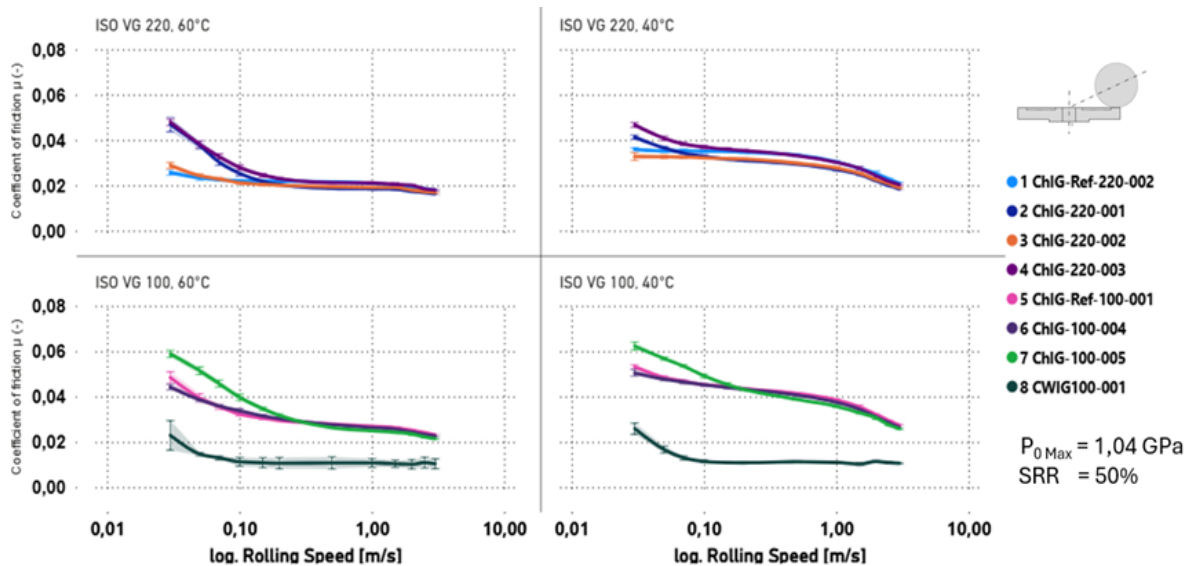


Abbildung 25: MTM-Tribometer – Reibungskennfelder Schmierstoffe Sondergetriebe

E-Achse

Hauptziel der Entwicklungstätigkeiten für die Anwendung in E-Achsgetriebenen liegt in der Optimierung der Schmierstoffzusammensetzung hinsichtlich Effizienzsteigerung, was mit unterschiedlichen Maßnahmen erreicht werden soll. Eine dieser Maßnahmen ist der Einsatz von polymeren Schmierstoffadditiven, die üblicherweise als Viskositätsindexverbesserer in Schmierstoffen Verwendung finden. Solche polymeren Schmierstoffadditive können Einfluss auf die verschiedenen Reibungszustände (Grenz-, Misch-, elastohydrodynamische und hydrodynamische Reibung) ausüben. Die Art und Ausprägung wird dabei maßgeblich durch den chemischen Aufbau, der Struktur und Molekülgröße, aber auch der Wechselwirkung in der Schmierstoffmatrix bestimmt.

Unter Berücksichtigung von Rand- und Grenzbedingungen aller relevanten (Tribo-)Kontakte (Zahnkontakt, Gleit- und Wälzlagerkontakt usw.) wurden zwei Entwicklungslinien festgelegt:

- **Entwicklungslinie A:** Schwefelfreie Additiv- und Grundöltechnologie, beinhaltet u.a. schwefelfreie Polymere vom Projektpartner Evonik, um jegliche Kupferkorrosion durch einen möglichen Angriff von Schwefel zu vermeiden.
- **Entwicklungslinie B:** Einbezug schwefelhaltiger Additivkonzepte zur Erweiterung der Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich Reibung und Verschleiß. Ermöglicht u.a. die Verwendung schwefelhaltiger Polymere vom Projektpartner Evonik. Der Fokus liegt auf einer in der Wechselwirkung mit Kupfer nicht aggressiven Technologie (d.h. keine korrosiven Schwefelkomponenten).
- **Nomenklatur der Kandidaten:** "Entwicklungslinie"- "Ild. Nr." (Bsp.: CE-0S-010)
Entwicklungslinie A (schwefelfrei): CE-0S, Entwicklungslinie B: CE-xS (schwefelhaltig).

Die beiden Entwicklungslinien verfolgen unterschiedliche Schmierstofftechnologieansätze mit dem Ziel die Schmierstoffformulierung auf Effizienzsteigerung hin zu optimieren. Dies beinhaltet u.a. eine rheologische Optimierung durch Absenkung der Viskosität (ausgehend vom Serienstand 6 cSt) oder den Einsatz synthetischer Grundöle (z.B. PAO). Diese Maßnahmen bieten auch aus thermischer Sicht hinsichtlich Kühlleistung entsprechende Optimierungsmöglichkeiten. Die Herausforderung dabei liegt in der Balance zwischen effizienzsteigernden Formulierungsmaßnahmen und der Einhaltung bzw. Erfüllung von Anforderungen aus der Serienanwendung. Eine Schmierstoffformulierung bildet eine komplexe Matrix aus verschiedenen Komponenten, die im Wechselspiel miteinander funktionieren müssen. Um aus der Vielzahl an Kombinationsmöglichkeiten die aussichtsreichsten Formulierungen zu identifizieren, wurden diese zunächst mit einer Auswahl an signifikanten und relevanten Labormethoden vorvalidiert. Gemeinsam mit den Projektpartnern wurde ein umfassendes Konzept zur Vorvalidierung der Fluidkandidaten entwickelt. Um die von Evonik bereitgestellten polymeren Additive hinsichtlich ihres Einflusses auf das Reibungsverhalten

zu charakterisieren, wurden diese zunächst in einer Modellölformulierung am MTM-Tribometer auf ihre reibungssenkende Wirkung geprüft. Für den Einsatz in der Vollformulierung wurden anschließend die vielversprechendsten Polymere aus diesem Test ausgewählt und für beide Entwicklungslinien tribologisch in einer Vorvalidierung charakterisiert (vgl. Abbildung 26).

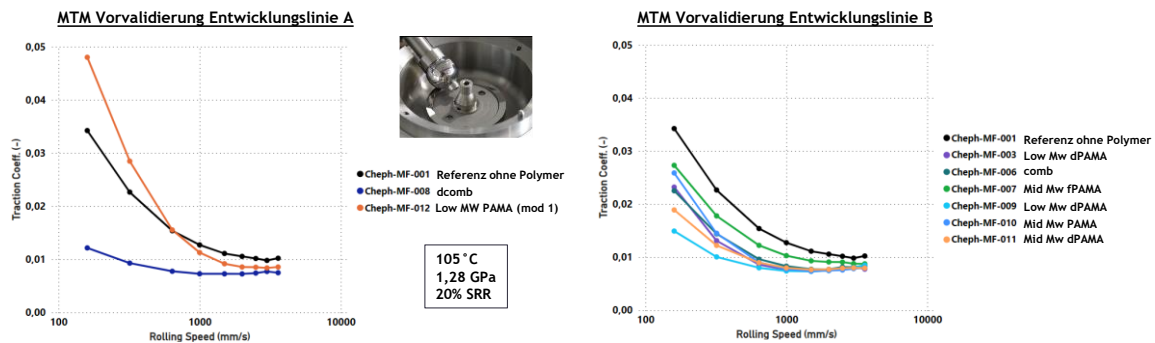


Abbildung 26: MTM Vorvalidierung polymere Additive

Als Fazit der MTM-Vorvalidierung der polymeren Additive wurden für die Schmierstoffentwicklung der Linie A die polymeren Additive „dcomb“, „Low Mw PAMA (mod1)“ sowie „comb (mod 1)“ ausgewählt. Für die Entwicklungslinie B zeigte das Polymer „Low Mw dPAMA“ die günstigsten Reibungseigenschaften. Davon ausgehend und unter Einbezug von BEV-spezifischen Anforderungen wurden Schmierstoffkonzepte ausgearbeitet und bemustert. Als Ausgangsbasis und Bewertungsgrundlage der Entwicklungsschritte wurden mit CE-xS-Ref-01 und CE-OS-Ref-02 entsprechende Referenzschmierstoffe definiert. Auch mit den Entwicklungsschmierstoffen wurde eine tribologische Grundcharakterisierung am MTM-Tribometer durchgeführt (vgl. Abbildung 27). Die gewählten Versuchsbedingungen bilden punktuell definiert die Verhältnisse in der Verzahnung hinsichtlich Schlupf, Pressung, Geschwindigkeit und Temperatur gut ab und liefern dadurch wichtige Hinweise auf das Ansprechverhalten der Additive in der Schmierstoffmatrix.

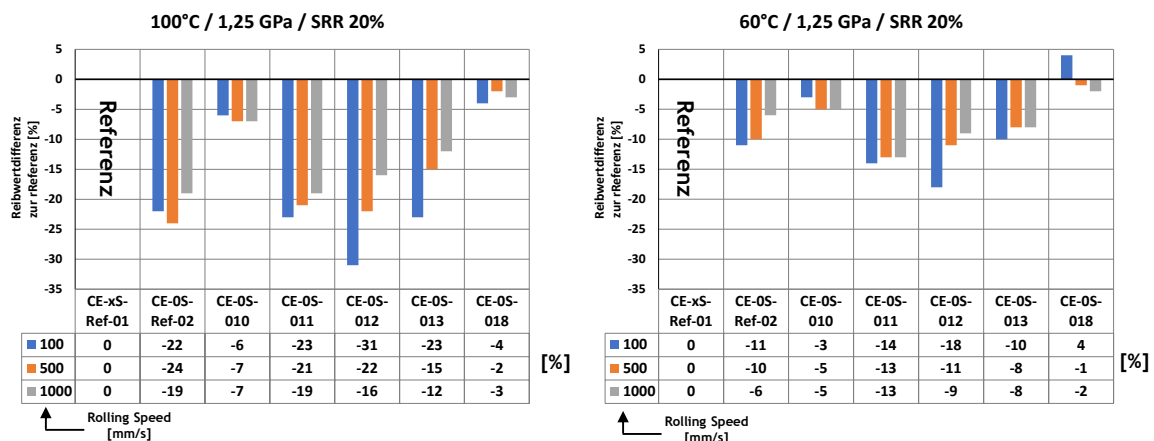


Abbildung 27: MTM – Reibungsbewertung Entwicklungslinie A

Im Vergleich zum Stand der Technik (= Referenzöl CE-xS-Ref 1) zeigen die schwefelfreien Konzepte zum Teil eine erhebliche Reibungsreduzierung. Es konnte gezeigt werden, dass durch die Optimierung und Anpassung des Additivkonzepts eine Reduzierung im Grenz- und Mischreibungsbereich erreicht werden kann. Weiterhin wurde die Optimierung hinsichtlich rheologischer Anpassungen, in diesem Falle einer Absenkung der Viskosität, ausgeweitet. Ausgehend vom Serienstand mit 6 cSt @100 °C wurde die Viskosität stufenweise auf 5 cSt @100 °C und 4 cSt @ 100 °C abgesenkt. Für die rheologische Auslegung kamen dabei unterschiedliche Konzepte zum Tragen (polymerfrei und mit Evonik-Polymeren). Neben der grundsätzlichen Viskositätsabsenkung wurde auch eine Optimierung des Viskositäts-Temperaturverhalten mit Hilfe von polymeren Zusätzen verfolgt. Bei jeweils nominal identischer Viskosität @100 °C soll die Arbeitsviskosität, vor allem im Bereich zwischen 20 °C und 60 °C, im

Verhältnis dazu möglichst niedrig ausfallen. Durch diese Maßnahmen können lastunabhängige Verluste reduziert werden, was sich insbesondere im Kühlkreislauf positiv bemerkbar machen soll (verringerte Strömungsverluste und bessere Wärmeabfuhr durch höheren Fluiddurchsatz etc.). Allerdings birgt eine Viskositätsabsenkung in der Verzahnung auch die Gefahr erhöhter Mischreibungsanteile und somit höhere Reibungsverluste. Insofern besteht hier ein Zielkonflikt, welches ein auf die Anwendung ausbalanciertes Schmierstoffkonzept hinsichtlich Additivierung und rheologischer Auslegung bedarf.

Detaillierte Ergebnisse der Prüfstandsversuche des entsprechenden Anwendungsfalls werden in Abschnitt 1.2.7 gezeigt. Basierend auf diesen wurde mittels einer umfassenden Korrelationsanalyse bestätigt, dass anhand von geeignet gewählten Tribometerversuchen (Reibungsverhalten, Schmierfilmdickenmessung) gemeinsam mit den rheologischen, chemisch-physikalischen Eigenschaften der Fluide auf die Leistung im Komponentenprüfstand (bspw. Effizienz im WLTP-Zyklus) hinsichtlich des reibungsmindernden Potentials geschlussfolgert werden kann.

Riemenräder mit Gleitlackbeschichtung

Zur Bewertung der Eignung von Gleitlacken auf unterschiedlichen Kunststoffen (bspw. PA12, PEEK, PEEK-CF30) sind Basisuntersuchungen hinsichtlich Haftfestigkeit, Materialkompatibilität usw. notwendig. Fokus der entwickelten Gleitlackssysteme waren sowohl PTFE-freie, als auch PTFE-haltige Gleitlacke. Die im Projekt entwickelten und erprobten Lösungen zur Beschichtung von PA12-Riemenrädern haben gezeigt, dass für den betrachteten Anwendungsfall der Einsatz von Gleitlacken auch ohne Hartschichten potentiell optimiertes Verhalten zeigt. Abbildung 28 zeigt exemplarisch die mit Gleitlack beschichteten Kunststoffriemenräder. Neben der reinen Gleitlackbeschichtung wurde auch ein ergänzendes Nachschmierkonzept mittels Spray für den Antriebsriemen adressiert.

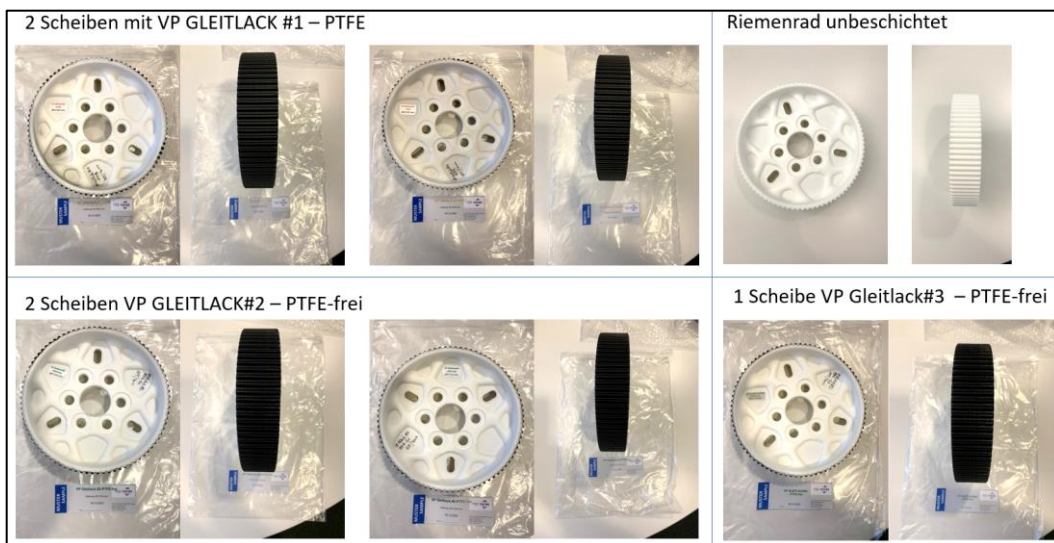


Abbildung 28: Riemenräder aus PA12 mit Gleitlackbeschichtung

Polymere Schmierstoffadditive

Eine der Stellschrauben bei der Formulierung der Schmierstoffe zur Steigerung der Effizienz (Reibungsabsenkung) und Erhöhung der elektrischen Effizienz (Motor- und Leistungselektronikkühlung) ist die Benutzung von geeigneten Viskositätsindexverbesserern. Im Verlauf des Projekts hat Evonik zusätzliche Polymere für das Projekt anhand der bestehenden Erfahrungen mit Tribometertests und anwendungsspezifischen Tests definiert.

Erwartungsgemäß werden die Evonik-Polymere die Viskositätabhängigkeit von der Temperatur reduzieren und die mechanische Effizienz und Kühleffizienz verbessern. In Tabelle 1 ist die Zusammenfassung über Prototypenformulierungen mit den Polymeren, welche zur Auswahl bei der Ölformulierung kommen, dargestellt. Dabei wird für jedes Polymer indiziert, bei welchen Eigenschaften der Ölformulierung die Verbesserung erwartet wird. Die Bezeichnungen der Polymere sind wie folgt zu interpretieren: Polyalkylmethakrylat (PAMA) - ist die chemische Grundstruktur des Polymers, welches eine lineare Polymerstruktur hat; Index „d“ bedeutet, dass das Polymer

dispergierend funktionalisiert ist; Index „f“ bedeutet eine abweichende stärkere Funktionalisierung des Polymers was zur ausgeprägten „Film“-bildenden Eigenschaften verhilft; „comb“-Bezeichnung steht für Kammpolymere auf Polyalkylmethakrylatbasis. Darüber hinaus sind die Polymere nach Vorhandensein von prozessbedingtem Schwefel sortiert. Schwefel ist in den Polymeren gebunden und trägt nicht zu den funktionellen Eigenschaften oder zu erhöhter Cu-Korrosion bei.

Tabelle 1: Übersicht über die Polymere am Beispiel einer Ölformulierung mit der kinematischen Viskosität von 6 cSt bei 100°C

S-freie Additive (VII)	Low Mw PAMA (mod 1)	dcomb	comb (mod 1)	Low Mw dPAMA (mod 1)	Mid Mw PAMA (mod 1)
Kin. Visc. (ASTM D-445) 40°C, mm ² /s	30.74	24.33	25.89	29.44	28.87
VI (ASTM D2270)	152	212	194	153	163
E-Motor (Kühlleistung)	x	x	x	x	x
Getriebeeffizienz (Reibungsabsenkung)	x	x	x	x	x
Grenzreibungsabsenkung		x	x	x	x
Hydrodynamische Reibungsabsenkung	x	x	x	x	x
Reduzierung der Zielviskosität bei 100°C des Schmierstoffs		x	x		

S-haltige Additive (VII)	Low Mw PAMA	Low Mw dPAMA	Mid Mw dPAMA	Mid Mw fPAMA	Mid Mw PAMA	comb
Kin. Visc. (ASTM D-445) 40°C, mm ² /s	29.40	29.44	28.87	28.25	27.92	25.45
VI (ASTM D2270)	153	153	163	165	169	194
E-Motor (Kühlleistung)	x	x	x	x	x	x
Getriebeeffizienz (Reibungsabsenkung)	x	x	x	x	x	x
Grenzreibungsabsenkung		x	x	x		x
Hydrodynamische Reibungsabsenkung	x	x	x	x	x	x
Reduzierung der Zielviskosität bei 100°C des Schmierstoffs				x		x

In Abbildung 29 sind die Effekte der Polymere in der Formulierung anhand der Stribeck-Kurve dargestellt. Tendenziell sind die dispergierenden/ funktionalisierten Polymere in den Grenzreibungsbereichen aktiv und können sowohl die Grenzreibung als auch Verschleiß reduzieren. Bei dem elastohydrodynamischen und hydrodynamischen Reibungsregime können alle Polymere hilfreich sein und die Scherspannung in Kontaktbereichen bei gegebener Scherrate, Druck und Temperatur absenken, was im Projekt auch weiter detailliert untersucht und optimiert wird.

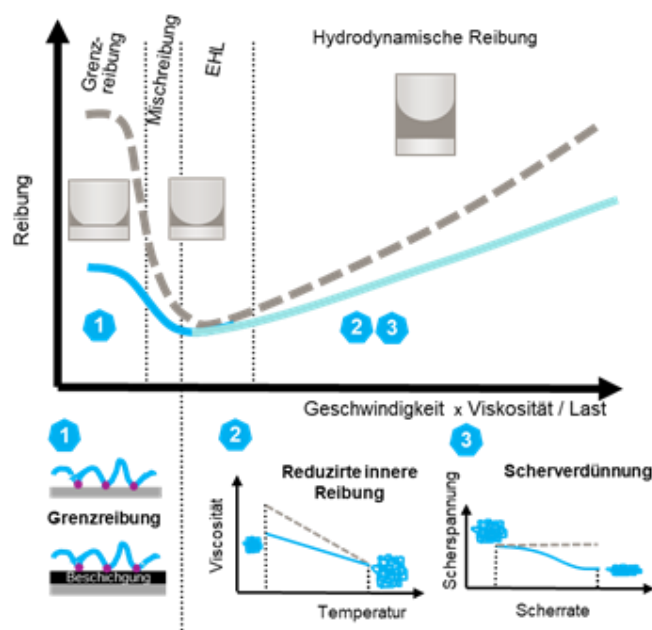


Abbildung 29: Übersicht der Effekte von Evonik-Polymeren anhand der Stribeck-Kurve. In Grenzreibungsbereichen werden vor allem die dispergierenden/funktionalisierten Polymeren mit stärkerer Affinität zur Oberfläche (1) hilfreich sein. In elastohydrodynamischen und hydrodynamischen Reibungsregimen beeinflussen die Polymere das Temperaturverhalten der Viskosität (2) und das im Kontakt induzierte Scherverdünnen (3) bei gegebenen Werten für Temperatur, Druck und Scherrate.

Tribologische Grundlagenversuche (HAP 2400)

In diesem Arbeitspaket erfolgten tribologische Grundlagenversuchen zu wasserhaltigen Schmierstoffen, Beschichtungen und Kunststoffen.

Wasserhaltige Schmierstoffe (FZG)

An der FZG erfolgten systematische Untersuchungen zu Reibung und Schmierfilmdicke von wasserhaltigen Schmierstoffen für die Anwendung in Zahnradgetrieben. Hierzu wurde ein skalenübergreifender Ansatz gewählt, um die Schmiermechanismen und Einflussfaktoren zu untersuchen. Neben experimentellen Untersuchungen an Tribometern und Zahnrädern (siehe Abschnitt 1.2.1) erfolgten simulationstechnische Betrachtungen bis hin zur molekulardynamischen Skala in Kooperation mit dem Fraunhofer IWM (siehe Atomistische und TEHD-Simulation (HAP 2700) und Atomistische Simulationen (HAP 2800)). Die Reibung wurde an einem im Rahmen des Forschungsprojekts beschafften Kugel-Scheibe Tribometers (MTM2) und die Schmierfilmdicke an einem optischen EHD-Tribometer bestimmt. Eine Übersicht der betrachteten wasserhaltigen Schmierstoffe und der Referenzschmierstoffe zeigt Tabelle 2.

Tabelle 2: Wesentliche Eigenschaften der untersuchten wasserhaltigen Schmierstoffe und der Referenzschmierstoffe PEG400 und PAO-05

	CWIG22_001	CWIG22_002	CWIG22_003	CWIG100_001	CWIG100_002	CWIG100_003	PEG400	PAO-05
Kinematische Viskosität ν (40 °C) in mm ² /s	23,3	23,5	20,0	111,5	90,3	97,9	40,0	20,4
Wassergehalt ξ_0 in wt%	8	20	40	20	20	6	-	-
Dichte ρ bei 15 °C in kg/m ³	1126	1108	1103	1126	1128	-	1126	840
ISO Viskositätsgruppe	22	22	22	100	100	100	46	22
Basis	PAG	PAG	PAG	PAG	PAG	Glycerol	PEG	PAO

Insbesondere der Einfluss des funktionalen Wasseranteils stand im Fokus der Untersuchungen. Zudem wurde der Einfluss der Viskosität und des wasserlöslichen Grundöltyps betrachtet. Abbildung 30 zeigt exemplarisch gemessene Reibungszahlen und Schmierfilmdicken unter elastohydrodynamischen Bedingungen. Alle Untersuchungen wurden mit polierten Prüfkörpern durchgeführt, sodass die gemessene Reibungszahl näherungsweise der Flüssigkeitsreibungszahl entspricht.

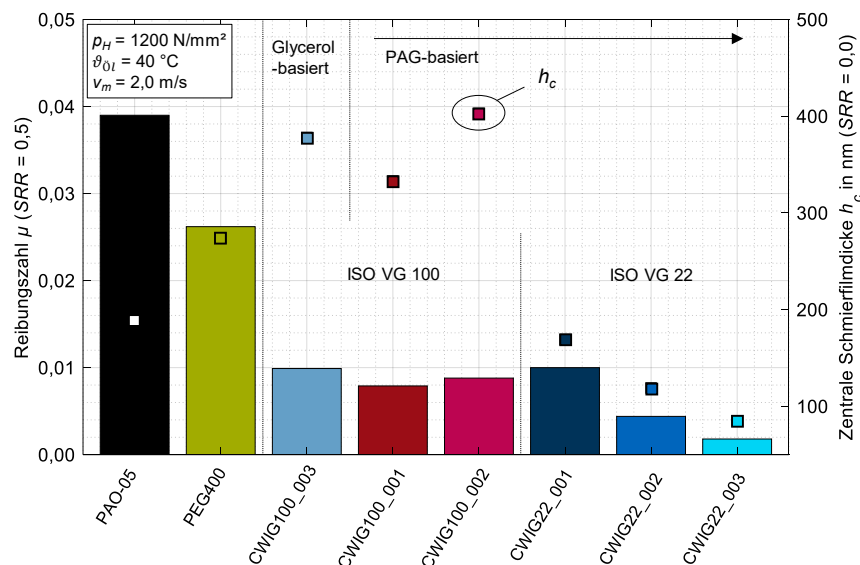


Abbildung 30: Exemplarische Reibungszahlen und Schmierfilmdicken der untersuchten wasserhaltigen Schmierstoffe und der Referenzschmierstoffe PEG400 und PAO-05

Für alle wasserhaltigen Schmierstoffe werden im Vergleich zum Polyalphaolefin PAO-05 und Modellfluid PEG400 sehr niedrige Reibungszahlen ermittelt. Diese liegen für die betrachteten Betriebsparameter im Bereich der Superlubricity mit $\mu < 0,01$. Für PEG400 wird gegenüber PAO-05 auch ohne funktionalen Wasseranteil eine Reibungsreduzierung deutlich. Bei ähnlicher kinematischer Viskosität für CWIG22_001, CWIG22_002 und CWIG22_003 zeigt sich der maßgebende Einfluss des funktionalen Wasseranteils auf die Reibungszahl. Diese nimmt ausgehend vom Schmierstoff CWIG22_001 mit 8wt% Wasseranteil hin zum Schmierstoff CWIG22_003 mit 40wt% Wasseranteil deutlich ab. Für CWIG22_003 wurde eine Reibungsreduzierung von maximal 95 % im Vergleich zu PAO-05 ermittelt. Der funktionale Wasseranteil hat auch Einfluss auf die Schmierfilmdicke, welche für die untersuchten PAG-basierten wasserhaltigen Schmierstoffe mit steigendem Wasseranteil abnimmt. Weiterhin beeinflusst auch das wasserlösliche Grundöl die Reibung. So wird für den Glycerol-basierten Schmierstoff CWIG100_003 mit 6wt% Wasseranteil eine nur leicht höhere Reibungszahl im Vergleich zu den PAG-basierten Schmierstoffen CWIG100_001 und CWIG100_002 mit 20wt% Wasseranteil ermittelt. Eine Ableitung des Druckviskositätskoeffizienten durch Rückrechnung der gemessenen zentralen Schmierfilmdicke ergibt für die wasserhaltigen Schmierstoffe Werte im Bereich von 3-6 GPa⁻¹, was darauf schließen lässt, dass die niedrige effektive Kontaktviskosität der maßgebende, reibungsreduzierende Mechanismus ist. Auch wurden für die betrachteten Betriebsparameter am MTM2 Tribometer keine sprunghaften Änderungen der Reibungszahl in Abhängigkeit des Wasseranteils beobachtet, sodass für das Erreichen von Superlubricity keine Schwellenkonzentration an Wasser erforderlich scheint.

Neben der Charakterisierung von Reibung und Schmierfilmdicke im Neuzustand der Schmierstoffe, erfolgten Untersuchungen zum Einfluss von Wasserverdampfung. Abbildung 31 zeigt dazu den Verlauf der mittleren Reibungszahl und Schmierfilmdicke über dem verdampften Wasseranteil für die Schmierstoffe CWIG100_001, CWIG22_002 und CWIG22_003. Die mittlere Reibungszahl ist als integraler Mittelwert über verschiedene Geschwindigkeiten und Slide-to-Roll Ratios (SRR) definiert, während die mittlere Schmierfilmdicke den arithmetischen Mittelwertwert einer Geschwindigkeitsvariation von 0,5 bis 3,0 m/s wiedergibt.

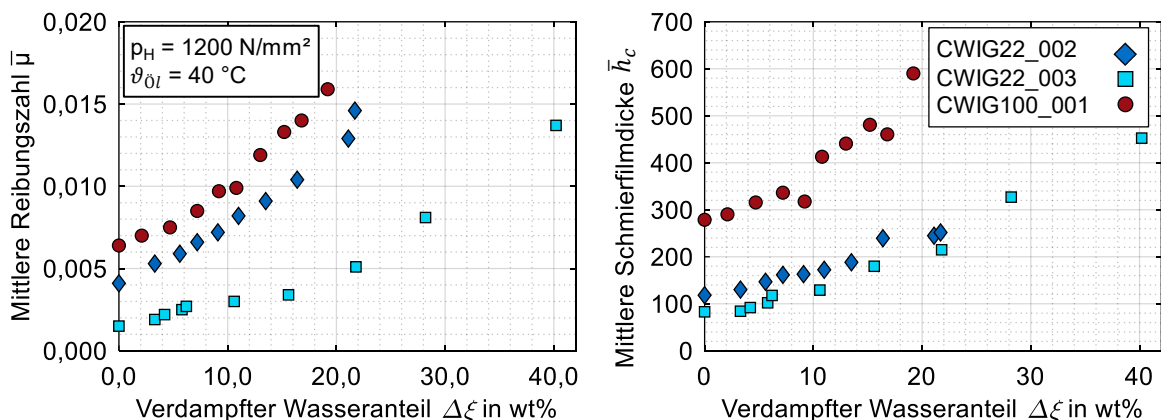


Abbildung 31: Mittlere Reibungszahl $\bar{\mu}$ und mittlere Schmierfilmdicke $\bar{h}_c$ über dem verdampften Wasseranteil $\Delta\xi$ von CWIG100_001, CWIG100_002 und CWIG100_003 basierend auf Hofmann et al.¹³

Mit steigendem Anteil an verdampftem Wasser nimmt sowohl die Reibung als auch Schmierfilmdicke stetig zu. Die Reibung ist dabei selbst bei hohen Anteilen an verdampftem Wasser noch sehr niedrig im Vergleich zu konventionellen Schmierstoffen. Dies verdeutlicht das sehr niedrige Reibungsniveau wasserlöslicher PAGs.

Beschichtungen (FZG)

Ergänzend zum unbeschichteten Stahlkontakt erfolgten Untersuchungen zum Einfluss von Beschichtungen auf die Reibung in Kombination mit wasserhaltigen Schmierstoffen. Abbildung 32 zeigt exemplarische Reibungskurven für unbeschichtete und ta-C beschichtete Prüfkörper am MTM2 Tribometer. Die betrachtete ta-C Beschichtung wurde am Fraunhofer IWS sowohl auf die Scheiben als auch Kugeln der MTM Prüfkörper appliziert und anschließend geglättet, sodass für die

betrachteten Betriebsparameter Vollschröierung vorliegt. Für die wasserhaltigen Schmierstoffe CWIG22_002 und CWIG22_003 nimmt die Reibung für die ta-C-beschichteten Oberflächen mit steigendem SRR zunehmend ab im Vergleich zur unbeschichteten Referenz. Die beobachtete Reibungsreduzierung nimmt dabei mit steigendem Wassergehalt ab und ist für den wasserhaltigen Schmierstoff CWIG22_003 nicht mehr bzw. nicht signifikant vorhanden. Die Ergebnisse ordnen sich in den Stand der Technik zum Einfluss von Beschichtungen auf die Reibung in elastohydrodynamisch-geschmierten Kontakten ein. Bei hohen Gleitanteilen und damit lokalen Temperatureintrag im Kontakt bedingt der thermische Isolationseffekt eine Reduzierung der effektiven Kontaktviskosität und damit Reibung. Durch die sehr niedrige Reibung wasserhaltiger Schmierstoffe ist dieser Effekt jedoch nicht so stark ausgeprägt im Vergleich zu konventionellen Schmierstoffen.

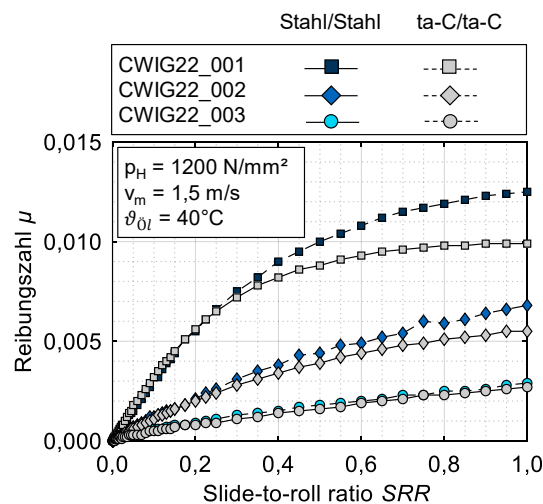


Abbildung 32: Reibungskurven für unbeschichtete und ta-C beschichtete Prüfkörper am MTM2 Tribometer mit den wasserhaltigen Schmierstoffen CWIG22_001, CWIG22_002 und CWIG22_003

Ölgeschmierte Kunststoffkontakte (FZG)

An der FZG wurde das Reibungsverhalten hybrider ölgeschmierter Wälzpaarungen aus Kunststoff und Stahl untersucht. Reibungsmessungen erfolgten am MTM2 Tribometer, wobei die Gesamtreibung in die Anteile Roll- und Gleitreibung aufgeteilt wurde.

Abbildung 33 zeigt den Einfluss der Rollgeschwindigkeit und des SRRs auf die gemessene gesamte Reibungszahl, welche sich aus Roll- und Gleitreibung zusammensetzt. Dabei wurden die Kunststoff-Stahl-Paarungen 100Cr6/PEEK (VESTAKEEP® 5000G), 100Cr6/POM (Delrin® 100 NC010), 100Cr6/PA46 (Stanyl TW441) und 100Cr6/PA12 (VESTAMID® L1940) bei Schöierung mit Mineralöl MIN100 (ISO VG 100) untersucht. Alle Kunststoff-Stahl-Paarungen zeigen für einen großen Bereich der untersuchten Betriebsbedingungen Reibungszahlen im Bereich der Superlubricity. Im Vergleich der Kunststoffe zeigen vor allem die Paarungen 100Cr6/PEEK und 100Cr6/POM die niedrigsten Reibungszahlen, während die Paarungen 100Cr6/PA12 und 100Cr6/PA46 höhere Reibungszahlen sowohl bei Mischschöierung als auch Vollschröierung aufweisen. Dies kann auf die höhere Rollreibung von 100Cr6/PA12 und 100Cr6/PA46 zurückgeführt werden, welche auf viskoelastische Effekte im Bereich der Glasübergangstemperatur zurückgeführt werden kann. Für weitere Informationen und Erkenntnisse sei auf Schmid et al.¹⁴ verwiesen.

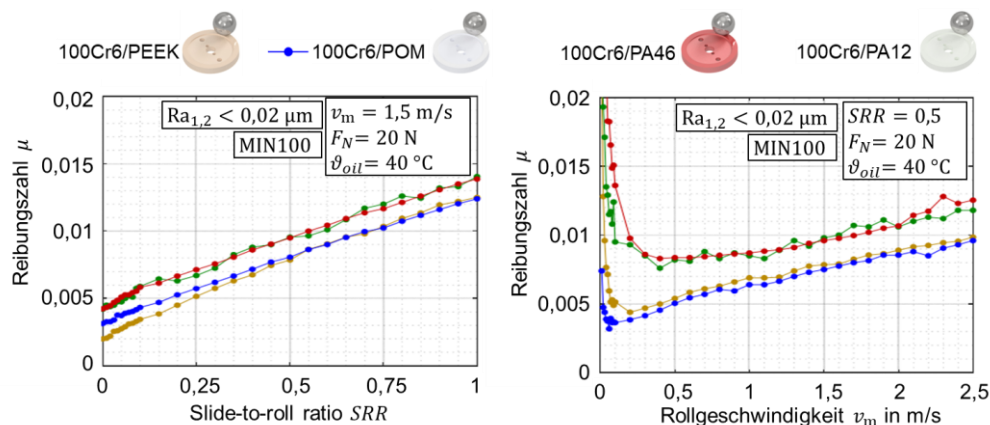


Abbildung 33: Gemessene gesamte Reibungszahl (Roll- und Gleitreibung) der Kunststoff-Stahl-Paarungen 100Cr6/PEEK, 100Cr6/POM, 100Cr6/PA46 und 100Cr6/PA12 für MIN100 und $\theta_{oil} = 40^\circ\text{C}$ basierend auf Schmid et al.¹⁴

Beschichtete Kunststoffe (FZG)

Untersuchungen mit ta-C beschichteten PEEK Prüfscheiben (VESTAKEEP® 5000G) für das FZG-Zweischeibentribometer (ZST) bei Paarung mit einem Stahlgegenkörper in ölgeschmierten Wälzkontakten wurden mit dem Schmierstoff MIN100 durchgeführt. Die ta-C Beschichtung wurde am Fraunhofer IWS entwickelt und appliziert (siehe Abschnitt zu Schichtentwicklung (HAP 2200)). Mit Hilfe der Untersuchungen wurde die Haftfestigkeit der Beschichtung sowie deren Einfluss auf Reibung und Verschleiß bewertet. Dazu wurden verschleißkritische Betriebsbedingungen durch eine niedrige Rollgeschwindigkeit und Gegenlauf beider Prüfscheiben gewählt. Wie in Abbildung 34 dargestellt, wird der gravimetrische Verschleiß der PEEK-Scheibe durch die ta-C-Beschichtung im Vergleich zur unbeschichteten PEEK-Scheibe um 92 % reduziert. Während der Verschleiß der Stahlscheibe bei Paarung mit ta-C-beschichteter PEEK-Scheibe zunimmt, ergibt sich dennoch ein niedrigerer Summenverschleiß beider Wälzpartner. Neben der Reduzierung des Summenverschleißes bewirkt die ta-C-Beschichtung eine Einglättung der Stahloberfläche (siehe Abbildung 34 b). Dadurch ergibt sich eine niedrigere mittlere Betriebsrauheit, infolgedessen sich durch höhere relative Schmierfilmdicken niedrigere (Flüssigkeits-)Reibungszahlen ergeben. Im Rahmen der Verschleißuntersuchungen mit $N = 300.000$ Lastwechseln konnte keine Beschädigung der Beschichtung festgestellt werden.

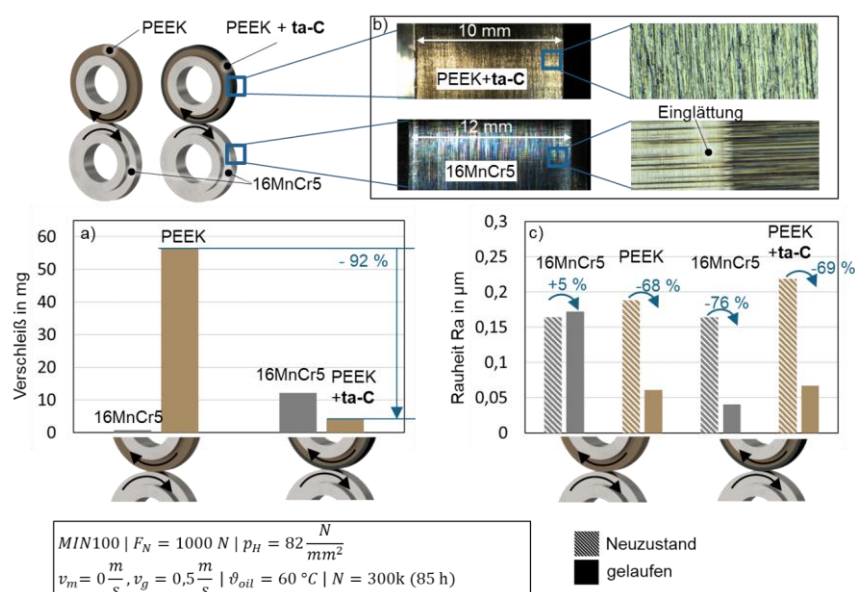


Abbildung 34: Verschleiß (a), Oberflächenaufnahmen (b) und Rauheitsveränderung (c) von unbeschichteten und ta-C beschichteten PEEK-Scheiben bei Paarung mit unbeschichteten Stahlscheiben am FZG-Zweischeibentribometer

Ergänzend zu den Untersuchungen am ZST erfolgten am MTM2-Tribometer Reibungsmessungen mit ta-C beschichteten PEEK-Scheiben (VESTAKEEP® 5000G) bei Paarung mit einer Stahlkugel (100Cr6). Es wurden die am Fraunhofer IWS entwickelten und applizierten Beschichtungsvarianten ta-C, ta-C:B und ta-C:N betrachtet. Durch eine Variation der Rollgeschwindigkeit wurden unterschiedliche Schmierzustände dargestellt. Die Applikation der Beschichtungen führt zu einer Zunahme der arithmetischen Mittenrauheit R_a , wobei die Beschichtungsvariante ta-C:B eine niedrigere Rauheitszunahme aufweist als ta-C und ta-C:N. Abbildung 35 zeigt die gemessenen Reibungszahlen für die unbeschichteten und beschichteten PEEK-Scheiben bei Paarung mit einer Stahlkugel in Abhängigkeit der Rollgeschwindigkeit, welche maßgeblich die relative Schmierfilmdicke bestimmt. Im Bereich hoher Rollgeschwindigkeiten und damit großer relativer Schmierfilmdicken zeigen alle Paarungen sehr ähnliche und sehr niedrige Reibungszahlen im Bereich der Superlubricity. Im Bereich der Mischschmierung zeigen sich für beschichteten PEEK-Scheiben höhere Reibungszahlen als für unbeschichtete PEEK-Scheiben, was auf die höhere Rauheit und damit niedrigere relative Schmierfilmdicken zurückzuführen ist. Die Untersuchungen mit der Beschichtung ta-C weisen die höchsten Reibungszahlen auf. Im Vergleich dazu kann durch die Verwendung von ta-C:B oder durch Substitution des Schmierstoffs MIN100 durch CWIG100-001 oder CWIG100_003 die Reibungszahl im Bereich der Mischschmierung deutlich verringert werden. Damit zeigen sich v.a. bei Mischschmierung synergistische Effekte von wasserhaltigen Schmierstoffen mit ta-C beschichteten Kunststoffwälzkörpern.

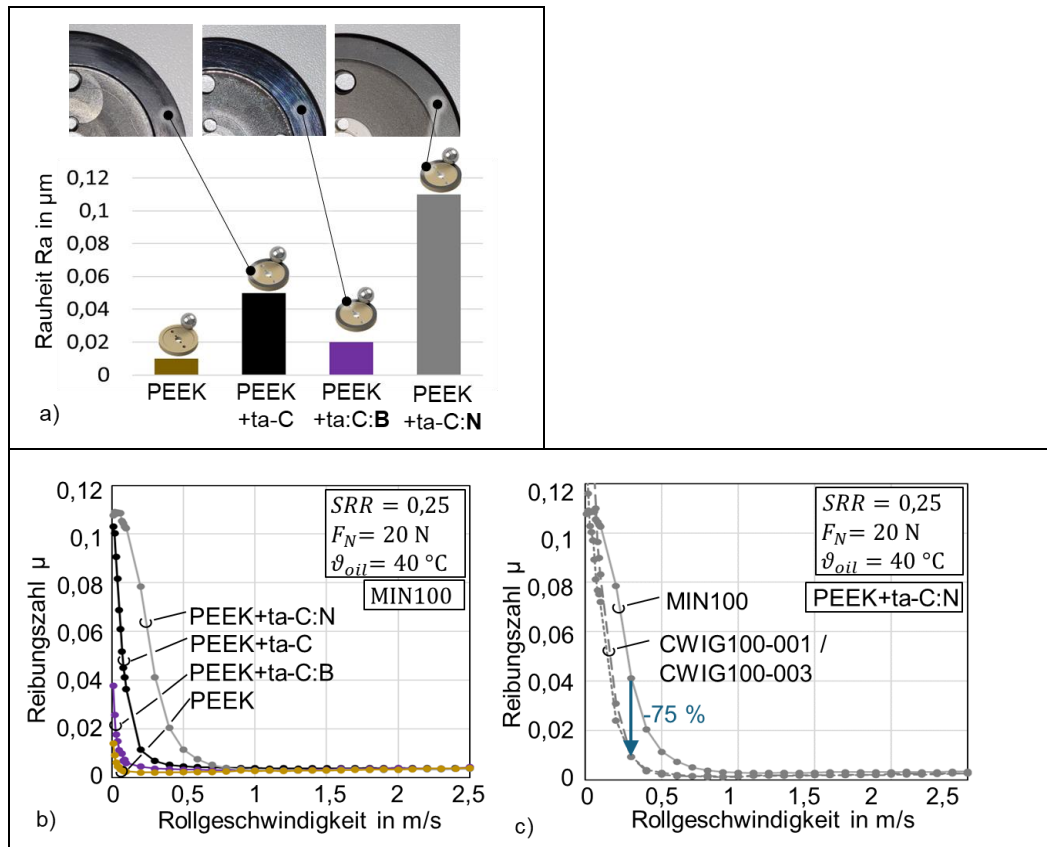


Abbildung 35: a) Einfluss der ta-C Beschichtungsvarianten auf Rauheit; b) Gemessene Reibungszahlen an der MTM2 für Beschichtungsvarianten bei Schmierung mit MIN100; c) Gemessene Reibungszahlen an der MTM2 für Schmierstoffvarianten und der Beschichtungsvariante PEEK + ta-C:N

Zur Bewertung der Haftfestigkeit wurden lichtmikroskopische- und REM-Aufnahmen der ta-C-beschichteten PEEK-Scheiben herangezogen. Abbildung 36 zeigt exemplarische Aufnahmen der Oberflächen in der Lauffläche nach Versuch bei einer Belastung von $p_H = 85 \text{ N/mm}^2$. Es zeigen sich Risse mit kleinsten Ausbrüchen in der ta-C-Schicht, die überwiegend quer zur Laufrichtung verlaufen. Diese lassen sich auf Maxima in der Spannungsverteilung in der Beschichtung

zurückführen. Flächige Bereiche mit Schichtabtrag sind nicht erkennbar, weshalb von einer sehr guten Haftung zwischen Schicht und Substrat ausgegangen werden kann.

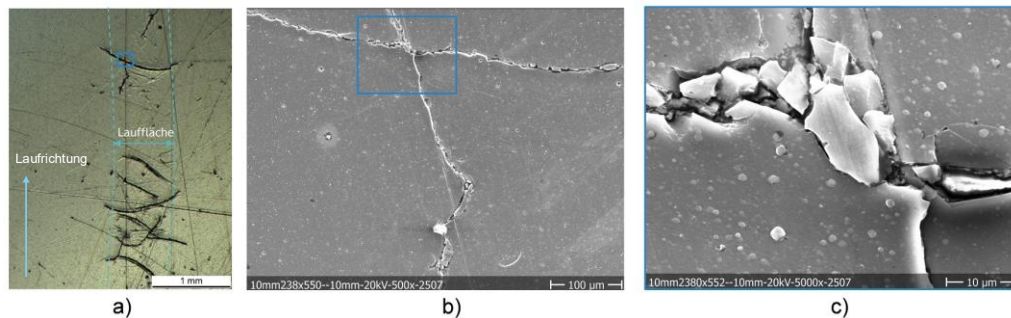


Abbildung 36: Lichtmikroskopische Aufnahmen (a) und REM-Aufnahmen (b, c) der Laufspur einer polierten und ta-C-beschichteten PEEK-Scheibe nach Versuch

Dünnschichtsensorik (HAP 2500)

Arbeiten am IOT

Die Verwendung von PVD-Sensorbeschichtungen bietet aufgrund ihrer geringen Masse und Abmessungen den Vorteil, Temperaturmessungen an Positionen durchzuführen, die mit klassischen Sensoren nicht zugänglich sind. Die Herstellung dieser Temperatursensoren mittels PVD-Technologie erfolgt nach einem mehrlagigen Schichtaufbau. Zunächst wird auf einem elektrisch leitfähigen Substratwerkstoff eine Isolationsschicht appliziert, um eine elektrische Trennung zwischen dem Substratmaterial und der Sensorschicht zu gewährleisten. Darauf folgen die Funktionsschichten: Bei Sensorschichten, die nach dem thermoelektrischen Effekt arbeiten, sind zwei separate Funktionsschichten erforderlich, zwischen denen an der eigentlichen Messstelle ein elektrischer Kontakt besteht. Die Messfläche kann für diesen Typ der Dünnschichtsensorik größer ausfallen, weshalb Überrollvorgänge der Wälzkörper in den Messdaten nicht ersichtlich sind. Für die gleichmäßige Strukturierung und Ausformung der charakteristischen Messstellen der Sensorschicht werden Maskierungen eingesetzt.

Für die messenden Sensorlagen wurden am IOT zunächst metallische Schichtlagen aus Ni und NiCr auf 100Cr6-Stahlsubstraten entwickelt und der Einfluss der Pulsparameter auf die Prozessführung, die resultierenden Schichtdicken sowie die Dropletemission betrachtet. Um die Verschleißbeständigkeit unter tribologischer Beanspruchung zu erhöhen, wurden statt der metallischen Schichten auch nitridische Hartstoffschichten zur Temperaturmessung kombiniert. Aufbauend auf den Ergebnissen der triboaktiven Beschichtungen wurden die Beschichtungsprozesse für die Sensorlagen CrAlN und TiAlN auf 100Cr6-Stahlsubstraten angepasst. Abbildung 37 zeigt den Aufbau einer nitridischen Sensorschicht. Auch in diesem Schichtsystem zeigt sich die Herausforderung der Dropletemission, welche im Arc-PVD-Prozess vorliegt. Innerhalb der Sensorlagen ist ein Defekt in Form eines Droplets erkennbar. Dieser durchdringt die Sensorlagen nicht vollständig, sodass kein elektrischer Kontakt bis außerhalb Isolationsschichten vorhanden ist.

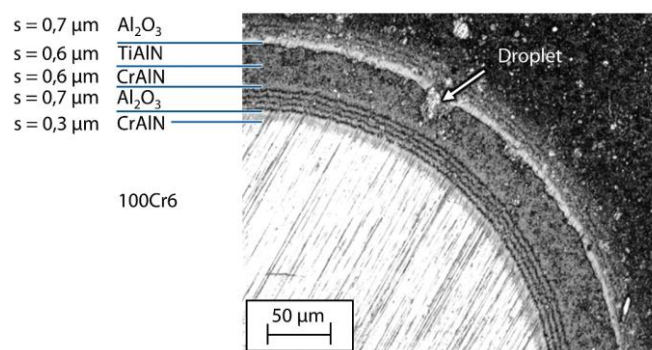


Abbildung 37: CLSM-Aufnahme einer Kalotte in der nitridischen Sensorschicht hergestellt mittels gepulster Lichtbogenverdampfung

Nach Entwicklung der nitridischen Sensorschicht wurden die Beschichtungen auf Lagerscheiben für den Einsatz im Lagerprüfstand beim Partner CEROBEAR hergestellt. An den Kontaktierungsstellen wurden Kupferschichten appliziert. Zur Kontaktierung wurde am IOT ein geeigneter Lötprozess entwickelt. Anschließend wurde die Kalibrierung der Sensorschichten für jedes beschichtete Lager durchgeführt. Zur Erstellung der Potentialdifferenz-Temperatur-Kurven wurden die Proben auf konstante Temperaturen im Temperaturbereich von $RT \leq T \leq 120^\circ\text{C}$ aufgeheizt. Die Temperatur wurde dabei sowohl mit einem kalibrierten Thermoelement gemessen als auch die entstehende Potentialdifferenz der Sensorschicht erfasst.

Zur Untersuchung der Haltbarkeit und Beständigkeit sowie zur Validierung der Temperaturmessung wurden die Sensorschichten zuletzt im Lagerprüfstand beim Partner CEROBEAR eingesetzt. Die beschichteten und kalibrierten Lagerscheiben eines Axialrillenkugellagers wurden gegen eine unbeschichtete Lagerscheibe verspannt. Zwischen den Lagerscheiben wurde ein Käfig mit Kugeln aus Siliziumnitrid eingesetzt. Die Versuche wurden mit einer Fettschmierung durchgeführt. In der ersten Testreihe wurde die Vorspannkraft sowie die Rotationsgeschwindigkeit von $v = 5\text{ rpm}$ bis $v = 30\text{ rpm}$ variiert. Im Folgenden werden die Ergebnisse mit einer Vorspannkraft von $F \approx 440\text{ N}$ und einer resultierenden Hertz'schen Pressung von $p_H \approx 240\text{ MPa}$ für die nitridische Sensorschichtvariante vorgestellt.

Abbildung 38 zeigt die Ergebnisse der Temperaturmessung einer Messstelle während des Einsatzes der beschichteten Lagerscheiben im Lagerprüfstand. Die Referenztemperatur wurde entfernt von der Laufbahn an der Rückseite der Lagerscheibe mit einem kalibrierten Thermoelement gemessen. Der mit der Sensorschichten gemessene Temperaturverlauf ist nahezu konstant. Dieser Messwert liegt nahe an dem auf der Rückseite der Scheibe gemessenen Wert. Dennoch zeigt sich, dass die Temperatur im tribologischen Kontakt wie erwartet etwas höher liegt als an der Rückseite des Lagers messbar. Die Arc-Sensorschichten wurden mit bestehenden Entwicklungen von mittels Magnetronsputtering (MS) hergestellten nitridischen MS-Sensorschichten verglichen. Die Reibkraft im Test mit der MS-Sensorschicht liegt mit $F_R \approx 8\text{ N}$ höher als die Reibkraft im Test mit der Arc-Sensorschicht mit $F_R \approx 4\text{ N}$, was für die Arc-Sensorschicht positiv zu bewerten ist. Am IOT wurde somit im Forschungsprojekt CHEPHREN erfolgreich das Ziel der Entwicklung von Temperatursensorschichten erreicht, welche sich für den Einsatz in tribologischen Anwendungen wie Lagern eignen.

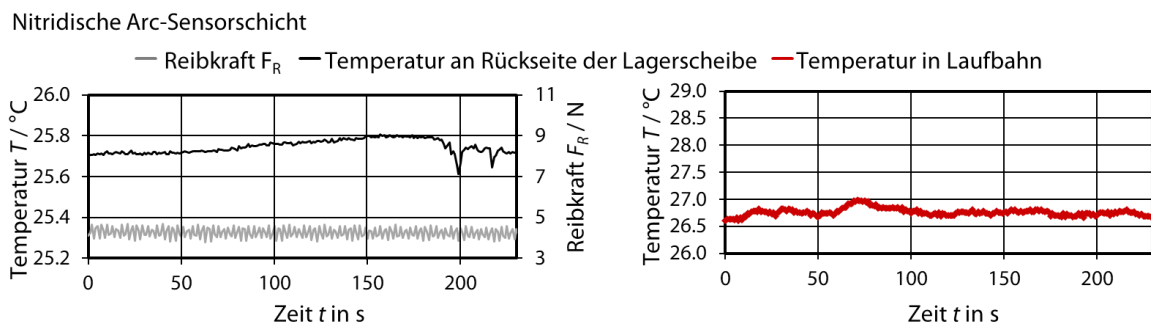


Abbildung 38: Im Lagerprüfstand (links) gemessene Temperatur und Reibkraft sowie durch die Sensorschicht bestimmte Temperatur (rechts)

Arbeiten an der FZG

Zur in-situ Analyse von ölgeschmierten Kunststoffkontakten wurden an der FZG Kontakttemperatur- und Druckmessungen mittels thermo- bzw. piezoresistiven Dünnschichtsensoren mit POM (Delrin® 100 NC010), PA66 (PTS-Creamid-A4H9) und PA12 (VESTAMID® L1940) durchgeführt. Die Dünnschichtsensoren wurden mittels PVD-Verfahren auf keramischen Prüfscheiben aus Zirkoniumoxid (ZrO_2) appliziert. Für Temperaturmessungen wurden Dünnschichtsensoren aus Platin und für Druckmessung aus Chrom verwendet. Abbildung 39 zeigt die Sensorscheibe mit appliziertem Dünnschichtsensor (oben) und Prüfscheibe aus Kunststoff (unten). Die Prüfscheiben aus POM und PA12 wurden spanend hergestellt und auf einer Stahlnabe verschraubt. Die Prüfscheibe aus PA66 wurde im Spritzgussverfahren hergestellt, wobei eine Stahlnabe umspritzt wurde. Die Laufflächen der Kunststoffscheiben wurden anschließend mechanisch geschliffen und poliert, um glatte

Oberflächen zu erhalten. Für weiterführende Informationen zur Messtechnik und zur Sensorapplizierung sei auf Hofmann et al.¹⁵ verwiesen.

Abbildung 40 a) zeigt exemplarisch den Kontaktdruckverlauf für die Paarungen ZrO_2/POM , $\text{ZrO}_2/\text{PA66}$ und $\text{ZrO}_2/\text{PA12}$. Alle betrachteten Paarungen zeigen einen nahezu symmetrischen Druckverlauf, was darauf hinweist, dass keine viskoelastischen Effekte auftreten. Während sich bei POM und PA66 ähnliche Druckverläufe und maximale Pressungen zeigen, weist PA12 einen niedrigeren maximalen Druck bei gleichzeitig größerer Kontaktbreite auf. Dies korreliert mit den Hertz'schen Abplattungsbreiten unter Verwendung der Materialelastizitäten nach der VDI 2736. Die Druckverläufe sind für die untersuchten Betriebsbedingungen nahezu unabhängig vom SRR. Die Belastungsfrequenz der Kunststoffscheiben variiert dabei zwischen ca. 8,0 Hz bei $\text{SRR} = 0$ und 5,3 Hz bei $\text{SRR} = 0,67$. Die dazugehörigen Kontakttemperaturverläufe sind in Abbildung 40 b) dargestellt. Für $\text{SRR} = 0$ werden die maximalen Temperaturen im Kontaktbeginn erreicht und sind mit einer Temperaturerhöhung von ca. 1,5 K für alle Kunststoffe identisch. Mit steigendem SRR steigt die maximale Temperaturerhöhung an, wobei für POM stets die höchsten und PA12 die niedrigsten Temperaturerhöhungen gemessen wurden. Die maximale Temperaturerhöhung bei POM beträgt etwa 3,5 K bei $\text{SRR} = 0,67$, was einer Gleitgeschwindigkeit von 1,3 m/s entspricht.

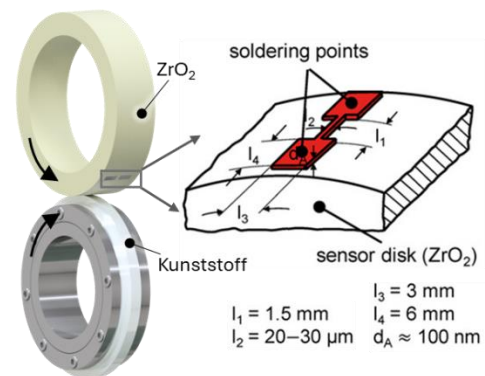


Abbildung 39: Dünnschichtsensortechnik zur Messung des Druck- und Temperaturverlaufs am Zweiseibentribometer für die Kontaktpaarungen ZrO_2/POM , $\text{ZrO}_2/\text{PA66}$, $\text{ZrO}_2/\text{PA12}$

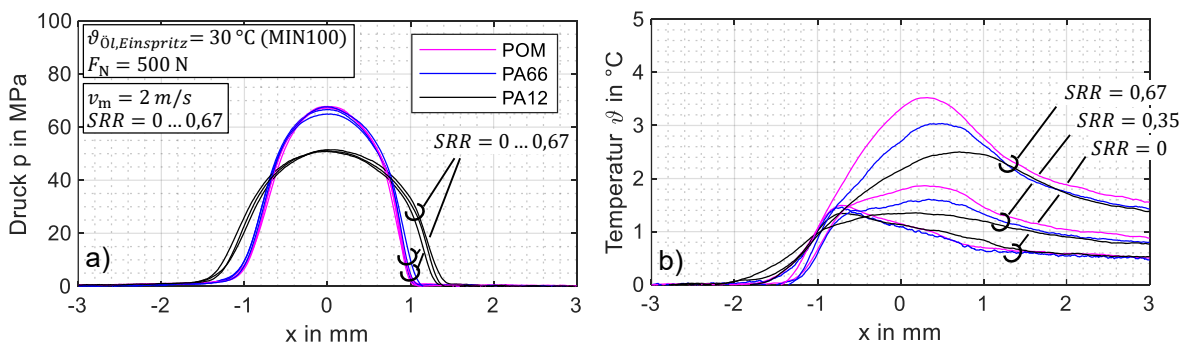


Abbildung 40: Gemessener Kontaktdruck- und Temperaturverlauf am Zweiseibentribometer für die Paarungen ZrO_2/POM (Delrin® 100 NC010), $\text{ZrO}_2/\text{PA66}$ (PTS-Creamid-A4H9), $\text{ZrO}_2/\text{PA12}$ (VESTAMID® L1940)

Haftfestigkeits- und Belastungstests für Beschichtungen (HAP 2600)

Dieses HAP ist beim Institut für Oberflächentechnik der RWTH Aachen (IOT) ein begleitendes methodisches Arbeitspaket. Haftfestigkeitsuntersuchungen werden in AP 2204, AP 2206 und AP 2501 durchgeführt und fließen dort in die Ergebnisdarstellung ein.

Atomistische und TEHD-Simulation (HAP 2700)

TEHD-Simulation mit wasserhaltigen Schmierstoffen (FZG)

An der FZG wurden für das TEHD-Simulationsmodell TriboMesh Modellierungen für wasserhaltige Schmierstoffe durchgeführt. Dabei wurde ein zu CWIG22_002 ähnlicher, wasserhaltiger Schmierstoff WAT untersucht und einem konventionellen PAO-Schmierstoff auf Basis von PAO mit gleicher Nennviskositätsklasse ISO VG 22 gegenübergestellt. Abbildung 41 zeigt, dass sich die modellierten Schmierstoffe hinsichtlich des Reibungszahlniveaus deutlich unterscheiden. Das aus Messungen bekannte Reibungszahlniveau im Bereich der Superlubricity von CWIG22_002 kann simulativ ebenfalls bestätigt werden. Für WAT ist ein stetiger, degressiv steigender

Reibungszahlverlauf erkennbar. Diese charakteristischen Verläufe wurden ebenfalls in experimentellen Untersuchungen am Kugel-Scheibe-Tribometer (MTM2) beobachtet (siehe Abschnitt Tribologische Grundlagenversuche (HAP 2400)). Die Reibungszahlen unterscheiden sich insbesondere bei kleinen SRR-Werten deutlich, was auf die niedrigere low-shear Hochdruckviskosität zurückzuführen ist. Für große SRR-Werte führen hohe Scherverdünnung und thermisch induzierte Viskositätsreduzierung zur Reibungsreduzierung bei PAO, sodass sich die Reibungszahlen tendenziell annähern. Beide Schmierstoffe ergeben rechnerisch sehr ähnliche Schmierfilmdicken im Kontakt (siehe Abbildung 41 b), was maßgeblich auf die Bedingungen im Kontakteinlaufgebiet und die dort vorliegende Viskosität zurückzuführen ist. Aufgrund der höheren Dichte und damit höheren dynamischen Viskosität weist der Kontakt mit dem Schmierstoff WAT leicht höhere Schmierfilmdicken im Vergleich zu PAO auf. Werden die betrachteten Wälzpartner mit einer 2 μm dicken ta-C Beschichtung versehen, ergeben sich für PAO und WAT niedrigere Reibungszahlen. In beiden Fällen ist dies auf die Temperaturerhöhung des Schmierstoffs im Kontakt zurückzuführen, welche aus dem thermischen Isolationseffekt der Beschichtung folgt. Die reibungsreduzierende Wirkung ist für WAT weniger ausgeprägt. Jedoch steigt für beide Schmierstoffe der reibungsreduzierende Effekt mit steigendem SRR.

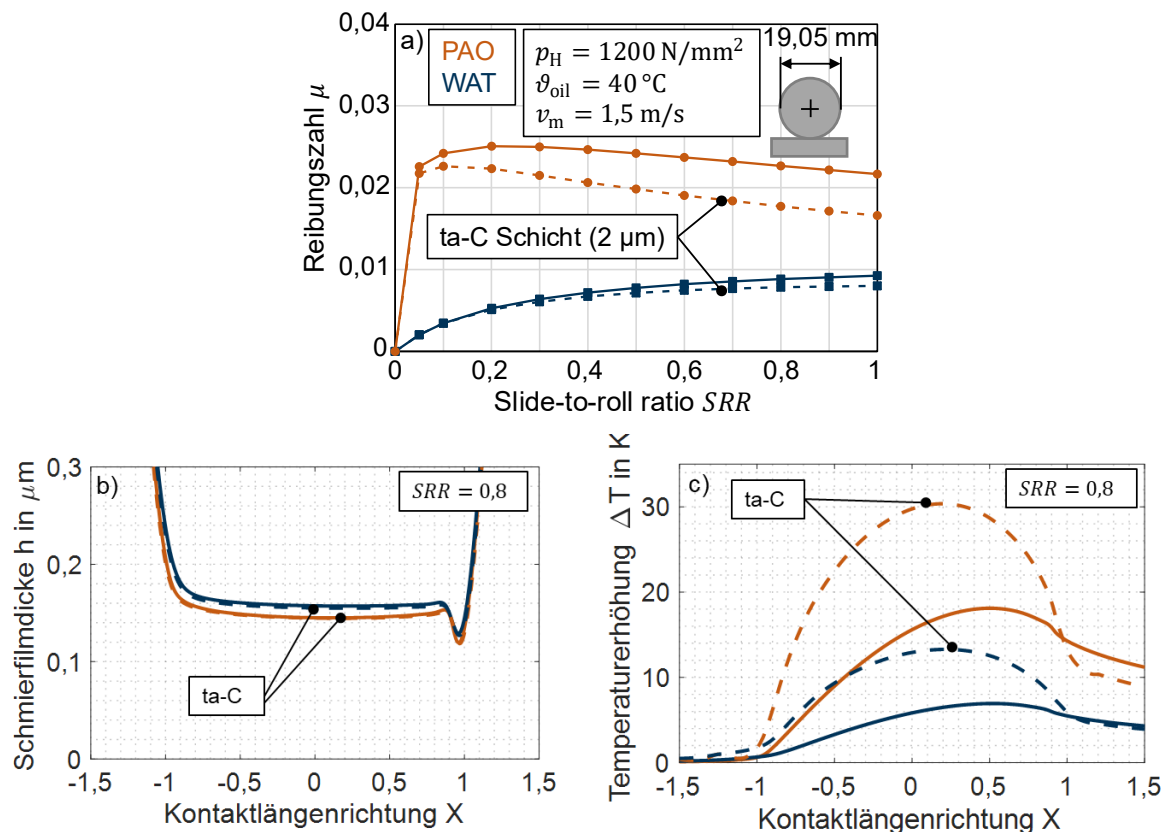


Abbildung 41: TEHD-Simulationsergebnisse eines hochbelasteten Linienwälzkontakts der Paarung Stahl/Stahl bei Vollschrnierung mit einem wasserhaltigen Polyglykol (WAT22) und Polyalphaolefin (PAO22) mit und ohne ta-C Beschichtung. Berechnete Reibungskurven a), exemplarisch für $SRR = 0,8$ kontaktlokale Temperaturerhöhung b) und Schmierfilmdicke c)

TEHD-Simulation für PEG400 und PEG400 + 10% H₂O (FZG)

Um den Einfluss von Wasser auf Reibung und Schmierfilmdicke zu untersuchen, wurde das Modellfluid Polyethylenglykol 400 (PEG400) sowie PEG400 mit 10 wt% Wasser betrachtet. In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IWM wurden hierzu multiskalige Betrachtungsmethoden angewandt. Abbildung 42 zeigt den Zusammenhang der betrachteten Methoden und Skalen. Auf Basis von NEMD-Simulationen des IWMs sowie Fluidvermessungen mittels Schwing-Quartz-Viskosimeter (Hochdruckviskosimeter) wird jeweils ein Konstitutivgesetz zur Modellierung des Fluids abgeleitet. Das molekulardynamisch (MD) abgeleitete Konstitutivgesetz (MD-Modell) ist in Abschnitt

Atomistische Simulationen (HAP 2800) beschrieben. Die aus Fluidvermessungen abgeleiteten Gesetzmäßigkeiten (Viskosimeter-Modell) basieren zur Beschreibung der Hochdruckviskosität $\eta_N(p, T)$ auf einem Ansatz nach Bode¹⁶ und zur Beschreibung der Scherverdünnung auf einem Modell-Ansatz nach Eyring¹⁷. Mit Hilfe des Viskosimeter-Modells und MD-Modells kann in der TEHD-Simulation ein geschmierter Wälzkontakt berechnet werden. Die TEHD-Simulationen wurden anschließend mit am optischen Tribometer gemessenen Schmierfilmdicken und an der MTM2 gemessenen Reibungszahlen zur Validierung gegenübergestellt.

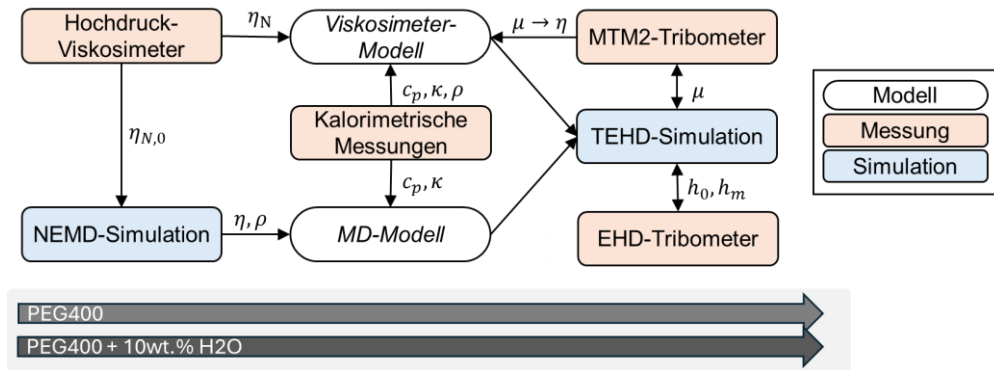


Abbildung 42: Multiskalen- und Multimethodenbetrachtung des Modellfluids PEG400

Abbildung 43 zeigt exemplarisch TEHD-Simulationsergebnisse, die mit dem *Viskosimeter-Modell* und *MD-Modell* berechnet wurden und Messungen am optischen EHD-Tribometer gegenübergestellt sind. Für die zentrale Schmierfilmdicke (Abbildung 43 a) ergeben sich mittels *Viskosimeter-Modell* höhere und mittels *MD-Modell* niedrigere Schmierfilmdicken im Vergleich zu den gemessenen Schmierfilmdicken. Die minimalen Schmierfilmdicken werden mit dem *MD-Modell* mit sehr hoher Übereinstimmung zur Messung berechnet, während aus dem *Viskosimeter-Modell* tendenziell höhere minimale Schmierfilmdicken resultieren.

Neben reinem PEG400 wurden Untersuchungen für PEG400 mit 10 % Wasser durchgeführt, um den Einfluss von Wasser auf Schmierfilmdicke und Reibung zu untersuchen. Abbildung 43 b zeigt die Mess- und Simulationsergebnisse für die Schmierfilmdicke für PEG400+10 wt% H₂O relativ zur Schmierfilmdicke von reinem PEG400. Unabhängig von der verwendeten Methode und Berechnungsmodell beträgt die Schmierfilmdicke ca. 85 % im Vergleich zu reinem PEG400. Während sich die absoluten Schmierfilmdicken für die Methoden unterscheiden, kann der Einfluss von Wasser auf das Schmierfilmdickenverhältnis quantitativ gut bestimmt werden.

Abbildung 43 c und d zeigen die verhältnismäßige Reibungszahl für PEG+10 wt% H₂O im Vergleich zu PEG400. Es zeigen sich für das *MD-Modell* niedrigere Reibungszahlen und für das *Viskosimeter-Modell* höhere Reibungszahlen als am MTM2-Tribometer gemessen. Insbesondere bei niedrigen SRRs lassen sich durch die Steigungen $d\mu/dSSR$ in Kombination mit den Schmierfilmdickenverhältnissen in Abbildung 43 a darauf schließen, dass die Viskosität im *Viskosimeter-Modell* zu hoch und im *MD-Modell* zu niedrig abgebildet werden. Während mittels *MD-Modell* Verhältnisse von ca. 92 bis 94 % vorliegen, werden mit der Messung und dem *Viskosimeter-Modell* von SRR abhängige Verhältnisse berechnet. Dabei nimmt das Verhältnis mit abnehmenden SRR ab und erreicht bei niedrigen SRR-Werten von 0,5 bis 0,6.

Zusammenfassend zeigen die Untersuchungen, dass bereits bei geringem Wasseranteil eine deutliche Reibungsreduzierungen erzielt werden kann, während die Schmierfilmdicke nur geringfügig abnimmt. Beispielsweise kann so bei einem SRR von 0,25 mit bereits 10 wt% Wasser eine um 32 % niedrigere Reibungszahl ermittelt werden, während die Schmierfilmdicke nur um etwa 15 % reduziert wird.

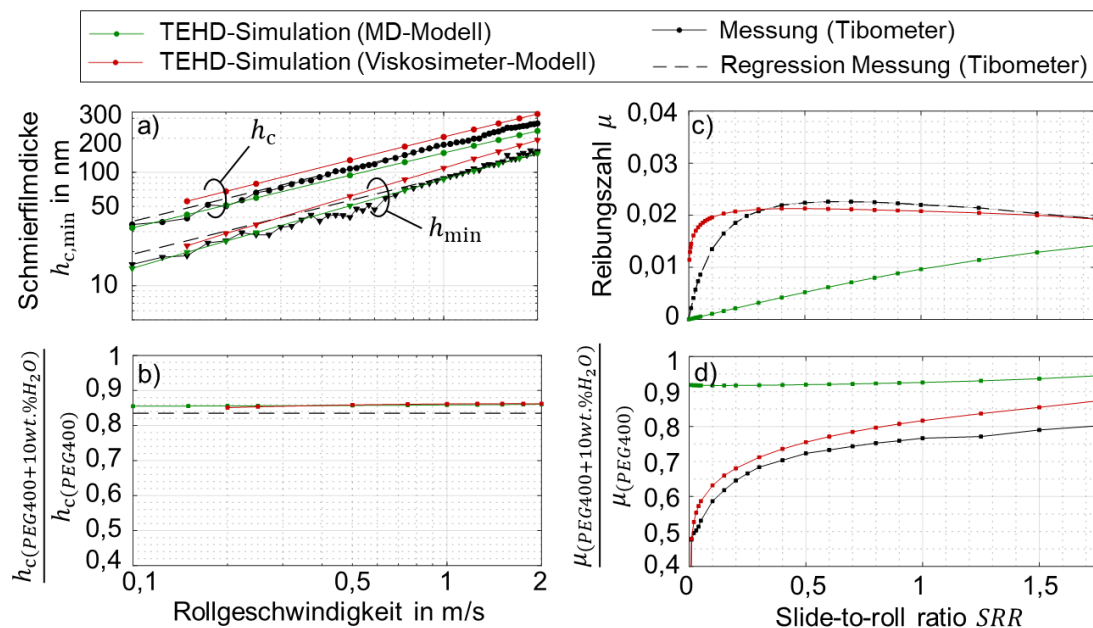


Abbildung 43: Zentrale und minimale Schmierfilmdicke (a) und Reibungszahl (b) für reines PEG400; Relative zentrale Schmierfilmdicke (c) und relative Reibungszahl (d) von PEG400+10 wt%H₂O im Vergleich zu reinem PEG400

Atomistische Simulationen (HAP 2800)

Im Rahmen von HAP 2800 befasste sich das Fraunhofer IWM mit den grundlegenden mikroskopischen Schmierungs-Mechanismen auf atomarer Ebene, deren Verständnis für die gezielte Optimierung (insbesondere neuartiger) Schmierstoffe notwendig ist, die sowohl im EHL- als auch im Mischreibungsbereich auf spezifischen Oberflächen zu einer Supraschmierung führen sollen. Dafür wurde vor allem die Methode nicht-reaktiver Molekulardynamik (MD) Simulationen eingesetzt, die eine Untersuchung der Schmierstoffeigenschaften basierend auf Molekülbewegungen und atomaren Wechselwirkungen erlaubt.

In diesem Abschlussbericht sind die Ergebnisse bezüglich der zwei Haupt-Arbeitsziele des HAP knapp zusammengefasst. Diese Ziele waren:

- Das Aufstellen von Konstitutivgesetzen für die rheologischen Eigenschaften innovativer Schmierstoffe.
- Die Untersuchung der Machbarkeit neuartiger Schmierstoffmechanismen, die auf dem Freisetzen von Schmierstoff aus einem Reservoir unter tribologischer Belastung basieren.

Weitere durch das Fraunhofer IWM definierte Ziele wurden ebenfalls erreicht, z.B. die Aufklärung der Lastverhältnisse in Abhängigkeit der lokalen Rauheit für relevante reale, d.h. experimentell vermessene Topographien. Diese Arbeiten im Rahmen des HAP 2800 wurden, ebenso wie weitergehende Details der im Folgenden zusammengefassten Ergebnisse, im Rahmen umfangreicher nicht-öffentlicher Zwischenberichte dargelegt.

Viskositäts-Konstitutivgesetz für PEG400 und PEG400 mit H₂O

Zur optimalen Auslegung tribologischer Kontakte ist u.a. die Kenntnis der rheologischen Eigenschaften des Schmierstoffs, insbesondere der Viskosität, erforderlich. Gerade für die im engen Tribospalt besonders relevanten Bedingungen, d.h. hohe Drücke und hohe Scherraten, sind diese experimentell nicht einfach zu bestimmen. Speziell neuartige Schmierstoffe, wie etwa wasserhaltiges PEG, sind diesbezüglich noch ungenügend charakterisiert. Vor diesem Hintergrund erfolgte eine Untersuchung der rheologischen Eigenschaften von PEG400 (als Reinstoff und mit verschiedenem Wassergehalt) in einer umfassenden MD Parameterstudie. Dabei wurde die Abhängigkeit der Viskosität $\eta(P, T, \dot{\gamma})$ von Druck P , Temperatur T und Scherrate $\dot{\gamma}$ bestimmt, wie in Abbildung 44 beschrieben. Abbildung 45 zeigt das ermittelte Scherverdünnungsverhalten für einen großen Temperatur- und Druckbereich (bis 90 °C bzw. 2 GPa).

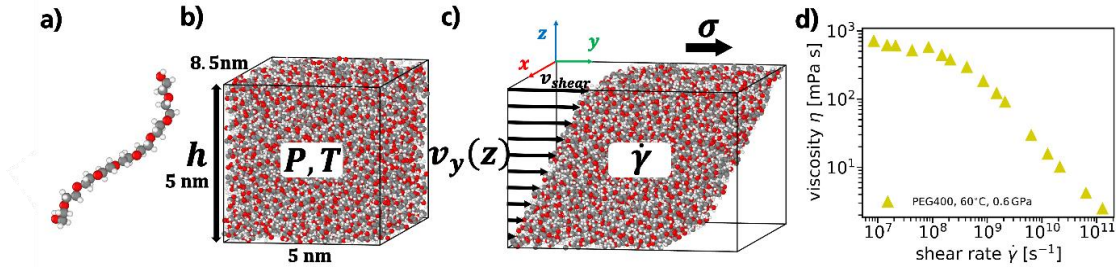


Abbildung 44: Berechnung von PEG Scherverdünnungskurven aus MD Simulationen. a) Atomare Struktur eines PEG400 Moleküls. b) MD Modell des PEG400 Schmierstoffs: mikroskopisches Volumenelement mit periodischen Randbedingungen; P und T sind durch Kopplung des Systems an ein Baro- und Thermostat konstant gehalten. c) wie b, mit zusätzlich vorgegebener Scherrate $\dot{\gamma}$, was zu einer Scherspannung σ führt. d) Beispiel einer Scherverdünnungskurve für die Viskosität $\eta = -\sigma/\dot{\gamma}$, die aus Schersimulationen mit verschiedenen Scherraten resultiert.

Aus diesen Daten wurde schließlich ein Konstitutivgesetz für die Viskosität erstellt indem die Scherverdünnungskurven je (P, T) mit der Carreau-Gleichung

$$\eta(P, T, \dot{\gamma}) = \eta_N(P, T) \cdot [1 + (\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_0(P, T))^2]^{\frac{n(P, T)-1}{2}}$$

gefitet (Abbildung 45) und die (P, T) -Abhängigkeiten der Fit-Parameter Newtonsche Viskosität η_N , kritische Scherrate $\dot{\gamma}_0$ und Exponent n ihrerseits in eine analytische Form gebracht wurden. Dafür wurden $\dot{\gamma}_0$ und n mit η_N korreliert (Abbildung 46), und für η_N (Abbildung 47) erfolgte ein Fit mit der Doolittle-Formel (wobei das Volumen V aus der Druck-Dichte-Relation bekannt ist):

$$\eta_N(P, T) = \eta_0(T) \cdot \exp[B(T) \cdot ((V/V_{occ}(T) - 1)^{-1} - (V_0/V_{occ}(T) - 1)^{-1})]$$

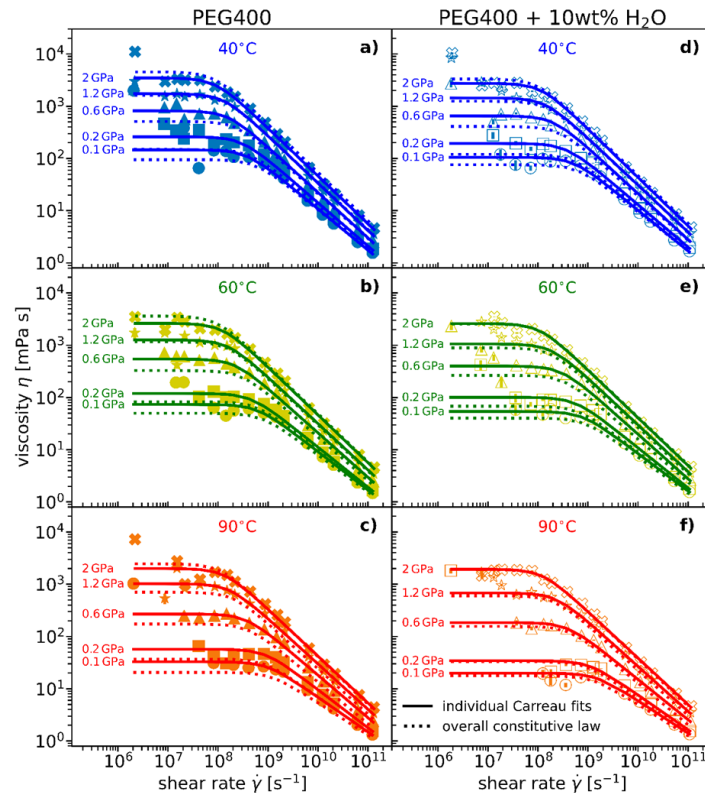


Abbildung 45 Scherverdünnung von PEG400 und PEG400+10 wt% H₂O. Datenpunkte: aus MD Schersimulationen berechnete Viskositäten; durchgezogene Linien: Fits der einzelnen Kurven mit der Carreau-Gleichung; gepunktete Linien: Vorhersage des Gesamt- Konstitutivgesetzes.

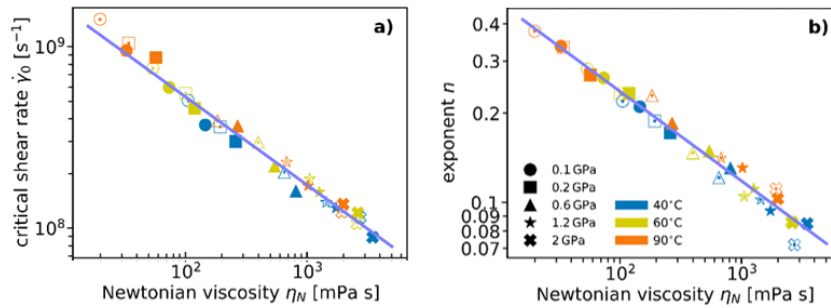


Abbildung 46: Korrelation der Fit-Parameter n , $\dot{\gamma}$ und η_N der Einzelfits (siehe Abbildung 45), für reines PEG400 und PEG400+10 wt% H₂O (gefüllte / leere Symbole)

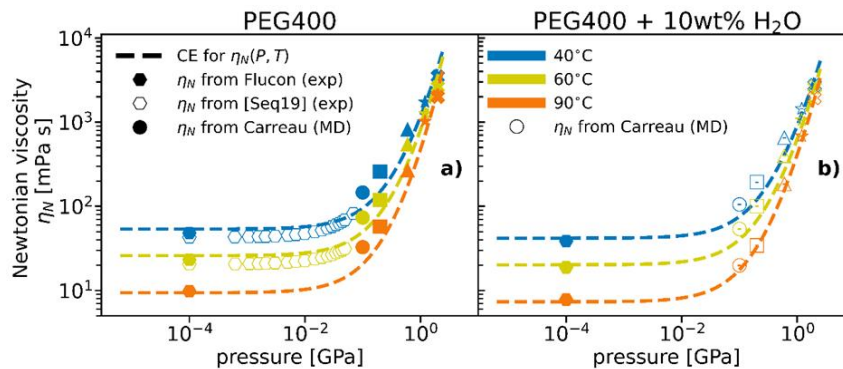


Abbildung 47: Abhängigkeit der Newtonschen Viskosität η_N von Druck und Temperatur mit Gesamtbeschreibung basierend auf der Doolittle-Formel

Das finale Viskositäts-Konstitutivgesetz wurde an die FZG übergeben, wo es für TEHD Berechnungen und Vergleiche mit experimentellen Daten weiterverwendet wurde. Ein Manuskript zur Publikation dieser Ergebnisse in einem wissenschaftlichen Fachjournal ist in Arbeit.

Nachschmierung trockener Kontaktflächen durch Schmierstoffausfluss aus Nanokavitäten

In dieser MD Studie wurde ermittelt ob kleine Schmierstofftaschen in der Oberfläche als Reservoir für die Nachschmierung trockener Kontaktbereiche dienen können, d.h. ob bzw. unter welchen Bedingungen ein Ausfluss von Schmierstoff aus solchen Taschen auftritt. Dafür wurden trockene a-C-Kontakte, von denen eine Oberfläche eine mit PAO4 gefüllte Vertiefung enthielt, mit externem Druck beaufschlagt und unter Scherung gesetzt (Abbildung 48 a). Unter Scherung konnten einzelne Schmierstoffmoleküle in den trockenen Bereich eindringen und nach wenigen Nanosekunden bildete sich eine vollständige Monolage aus (Abbildung 48 b). In der Vertiefung entstand durch den Ausfluss eine Kavitationsblase.

Dieser Nachschmierungs-Effekt hängt stark von der Benetzbarkeit der Oberflächen mit dem Schmierstoff und auch etwas vom externen Druck ab (Abbildung 48 c). Dies konnte durch Skalierung der Wechselwirkungsenergie zwischen Schmiermittel und Oberflächen (systematische Variation des Kontaktwinkels θ zwischen 0° und 125°) gezeigt werden. Für hydrophobe Systeme ($\theta > 90^\circ$) bleibt der Schmierstoff im Reservoir eingeschlossen, für hydrophile Systeme ($\theta < 90^\circ$) erfolgt trotz Druck im unteren GPa-Bereich eine Monolagen-Nachschmierung.

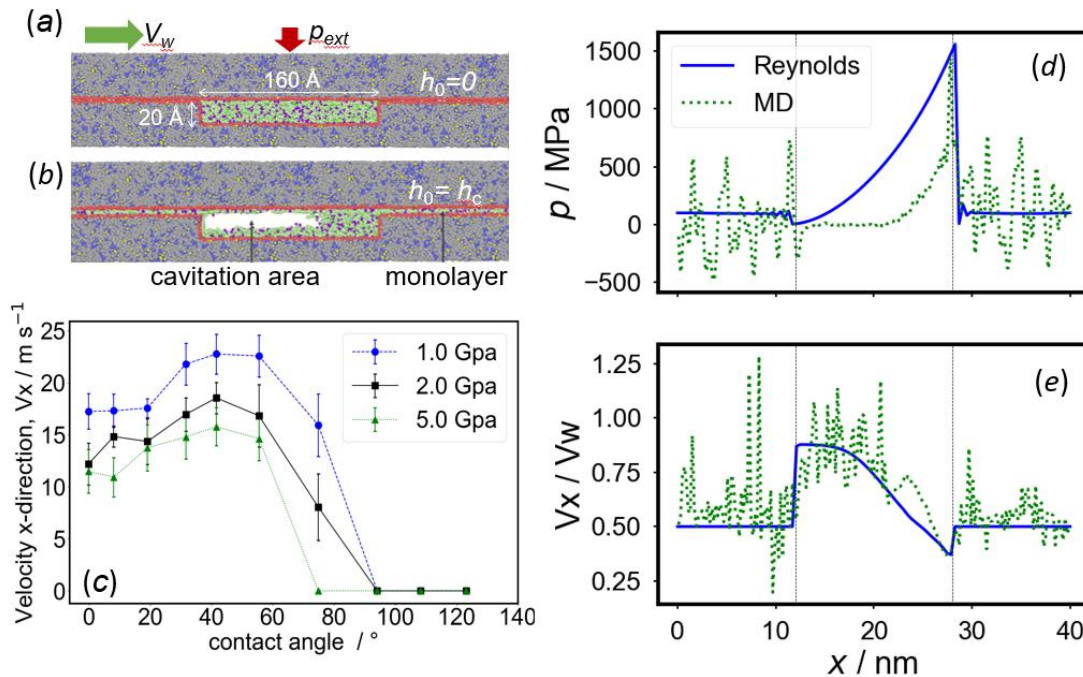
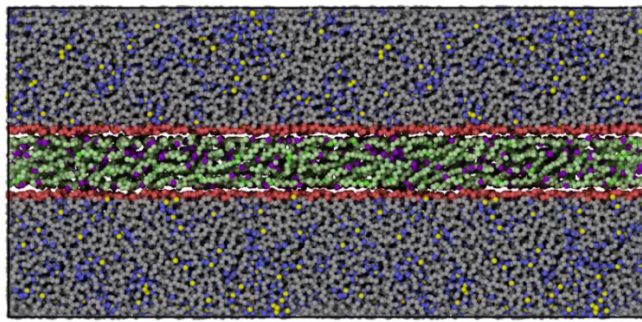


Abbildung 48: Nachschmierung eines Trockenkontakts aus einer Schmiertasche für unterschiedlich starke Oberflächen/Schmierstoff Wechselwirkungen (charakterisiert durch den Kontaktwinkel θ). (a) Anfangszustand der MD Simulationen (grün/lila = PAO4; grau/blau = aC; rot = aC-Oberflächenatome). (b) Endzustand für $\theta = 75^\circ$ und $V_w = 60$ m/s. (c) Durchschnittliche Fließgeschwindigkeit des Schmierstoffs als Funktion des Kontaktwinkels für 1, 2 und 5 GPa. (d/e) lokaler Druck und Fließgeschwindigkeit für Fall b) bei $p_{ext} = 1$ GPa; Vergleich von Reynolds-Modell (blau) und MD Simulationen (grün); vertikale Linien markieren die Ränder des Schmierstoffreservoirs.

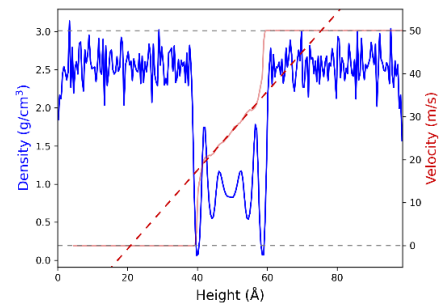
Um die Nachschmierung auch in der Modellierung großskaliger Kontakte berücksichtigen zu können, ist eine Kontinuumsbeschreibung dieses Effekts nötig. Um die Machbarkeit einer solchen Kontinuumsbeschreibung für diesen nanoskaligen Prozess zu testen, wurde ein statisches Reynolds-Modell für die Geometrie in Abbildung 48 (a) implementiert und dessen Vorhersagen mit den MD-Daten verglichen. Die dafür benötigten konstitutiven Gleichungen für die Dichte des Schmiermittels, die Viskosität und den Wandschlupf wurden durch separate MD-Simulationen eines Parallelspalts (Abbildung 49 a) ermittelt. Besonders wichtig für die Vorhersage des Schmierstofftransports in extrem engen Spalten ist dabei der Wandschlupf. Die Schlupfgeschwindigkeiten v_s wurden aus Geschwindigkeitsprofilen ermittelt (beispielhaft in Abbildung 49 b gezeigt). Dann wurde durch Fitten einer molekularkinetischen Theorie an die Schlupfkurven v_s vs. τ_w ein Schlupfgesetz als Funktion der Wandschubspannung τ_w , der Spalthöhe, des Drucks und des Kontaktwinkels parametrisiert (Abbildung 49 c).

Die Lösung der Reynolds Gleichung mit den spezifisch parametrisierten Konstitutivgleichungen für Dichte, Viskosität und Schlupf für das Schmieraschen-System in Abbildung 48 a wurde schließlich mit den MD Ergebnissen der Druck- und Geschwindigkeitsprofile verglichen (Abbildung 48 d/e). Die Vorhersage des Reynolds-Modells ist qualitativ richtig, was die Anwendbarkeit des Reynolds-Ansatzes auf den betrachteten Effekt der Nachschmierung mit einer Fluid-Monolage grundsätzlich bestätigt. Allerdings sind noch einige Diskrepanzen zwischen Reynolds- und MD-Daten zu beobachten, die vermutlich auf Effekte zurückzuführen sind, die bisher nicht im Reynolds-Modell enthalten sind. Das ist zum einen ein Rückfluss aufgrund des diskontinuierlichen Films und zum anderen das spezifische Strömungsregime des Monolagen-Schmierfilms.

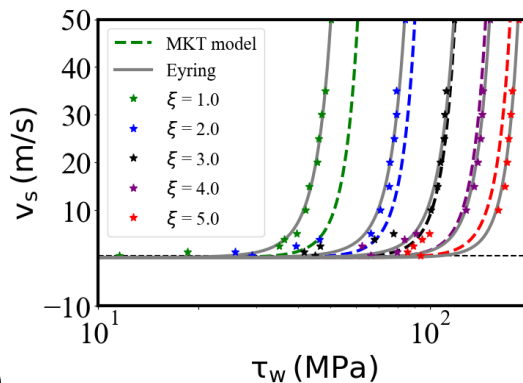
Diese Fragen sollen in Zukunft im Rahmen eines öffentlich geförderten Projekts betrachtet werden, dessen Hauptziel die Entwicklung einer umfassenden Kontinuumsbeschreibung des Nachschmierprozesses ist.



(a)



(b)



(c)

Abbildung 49: Ermittlung von Konstitutivgleichungen für das Reynolds-Modell aus MD Simulationen. (a) MD Parallelsplatt-Modell (pext, Vw und Farben wie in Abbildung 48a). (b) Dichte und Fließgeschwindigkeit (blau bzw. rot; rot-gestrichelt = linearer Fit des Geschwindigkeitsprofils im Spalt) für P=0.4 GPa und Vw=50 m/s. (c) Beispiele der Schlupfgeschwindigkeit vs als Funktion der Wandschubspannung (hier für verschiedene Wand-PAO Wechselwirkungsstärken).

Schicht- und Oberflächenanalytik (HAP 2900)

Dieses HAP ist beim Institut für Oberflächentechnik der RWTH Aachen (IOT) ein begleitendes methodisches Arbeitspaket. Schicht- und Oberflächenanalytik wird in AP 2204, AP 2206 und AP 2501 durchgeführt und fließt dort in die Ergebnisdarstellung ein.

1.2 Anwendungsebene (TP 3000)

Nachfolgend werden die gewonnenen Erkenntnisse der Anwendungsebene von CHEPHREN dargestellt. Die Ergebnispräsentation erfolgt aufgegliedert nach Anwendungsfällen im Projekt.

1.2.1 Anwendungsfall Zahnradgetriebe

Der Anwendungsfall unter Leitung der FZG fokussiert systematische Untersuchungen mit wasserhaltigen Schmierstoffen, Beschichtungen und technischen sowie Hochleistungskunststoffen. Sämtliche Untersuchungen zum Verlustleistungsverhalten wurden an FZG-Wirkungsgradverspannungsprüfständen (WGP) ermittelt. Die Bewertung des Verlustleistungsverhaltens wurde für die betrachteten Tribotechnologien in Anlehnung an die Methode nach FVA345 durchgeführt. Die gesamte Verlustleistung P_V setzt sich dabei aus den einzelnen Komponenten des Prüfstands zusammen, wobei bei Zahnradern und Lagern in lastabhängige und lastunabhängige Verlustleistung unterschieden wird.

$$P_V = P_{VZP} + P_{VZ0} + P_{VLP} + P_{VLO} + P_{VD}$$

Bei symmetrischem Aufbau des Verspannungskreises kann daher annähernd auch auf die Anteile des Prüfgetriebes und Übertragungsgetriebes geschlossen werden.

$$P_{V,PG} \approx P_{V,\ddot{U}G} \approx P_V/2$$

Bei den experimentellen Untersuchungen wird dabei das Verlustmoment sowie Drehzahl gemessen, wobei der Zusammenhang zwischen Verlustleistung und Verlustmoment über $P_V = T_V \cdot n$ gegeben ist.

Modifikationen im mechanischen Aufbau oder abweichende Prüfbedingungen im Rahmen der Untersuchungen dieses Forschungsprojekts sind in den jeweiligen Abschnitten beschrieben.

Wasserhaltige Schmierstoffe

Für einen Transfer der Grundlagenkenntnisse in HAP 2400 auf Komponentenebene erfolgten Untersuchungen zum Verlustleistungsverhalten mit ausgewählten wasserhaltigen Schmierstoffen aus Tabelle 2. Für alle Untersuchungen wurde eine geradverzahnte Prüfverzahnung vom Typ C_{mod} verwendet und die Standardwälzlager durch Hybridlager ersetzt. Aufgrund der hohen Neigung zur Wasserverdampfung bei hohen Temperaturen, wurde eine maximale Öltemperatur $\vartheta_{\ddot{O}l} = 90^\circ\text{C}$ betrachtet. Abbildung 50 zeigt repräsentativ das am WGP gemessene Gesamtverlustmoment T_V für Kraftstufe (KS) 7, Öltemperatur $\vartheta_{\ddot{O}l} = 60^\circ\text{C}$ und Umfangsgeschwindigkeit $v_{t,C} = 8,3\text{ m/s}$. Dargestellt ist jeweils der Mittelwert aus Erst- und Wiederholversuch, wobei die Abweichung durch schwarze Balken gekennzeichnet ist. Das dargestellte Gesamtverlustmoment T_V ist weiterhin unterteilt in ein lastabhängiges- sowie lastunabhängiges Verlustmoment. Das lastabhängige Verlustmoment wurde durch Subtraktion des gemessenen Leerlaufverlustmoments bei KS0 vom Prüflauf bei der jeweils betrachteten Kraftstufe bestimmt. Hierzu wurde die Annahme getroffen, dass das Leerlaufverlustmoment näherungsweise dem lastunabhängigen Verlustmoment entspricht.

Für die betrachtete Betriebsbedingung ist das gemessene Gesamtverlustmoment für die wasserhaltigen Schmierstoffe der ISO VG 100 (CWIG100_002 und CWIG100_003) auf einem vergleichbaren Niveau. Für die wasserhaltigen Schmierstoffe der ISO VG 22 (CWIG22_001 und CWIG22_003) wird der Einfluss des funktionalen Wassergehalts deutlich, da der Schmierstoff CWIG22_003 mit ca. 40 wt% Wasseranteil deutlich niedrigere lastabhängige Verlustmomente im Vergleich zum Schmierstoff CWIG22_001 mit ca. 8 wt% Wasseranteil aufweist. Allgemein ist das Gesamtverlustmoment der wasserhaltigen Schmierstoffe der ISO VG 22 niedriger im Vergleich zur ISO VG 100. Ein Vergleich zwischen dem PAG-basierten wasserhaltigen Schmierstoff CWIG100_002 und glycerolbasierten Schmierstoff CWIG100_003 ordnet sich in die Untersuchungen auf Modellebene am MTM2-Tribometer ein. Ein interessantes Ergebnis sind die vergleichbaren lastunabhängigen Verlustmomente der PAG-basierten Schmierstoffe CWIG100_002, CWIG22_001 und CWIG22_003. Trotz deutlich höherer Viskosität des Schmierstoffs CWIG100_002 ist das Leerlaufverlustmoment vergleichbar. Dies deutet darauf hin, dass es vor allem bei höheren Umfangsgeschwindigkeiten zu einer dominierenden Luftströmung kommt, welche keinen direkten Zusammenhang zur Schmierstoffviskosität besitzt. Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die gemessenen lastabhängigen Verlustmomente mit allen betrachteten wasserhaltigen Schmierstoffen sehr niedrig sind im Vergleich zu konventionellen Schmierstoffen, was bspw. anhand der Untersuchungen im Vorgängerprojekt CHEOPS³ quantifiziert werden kann¹⁸.

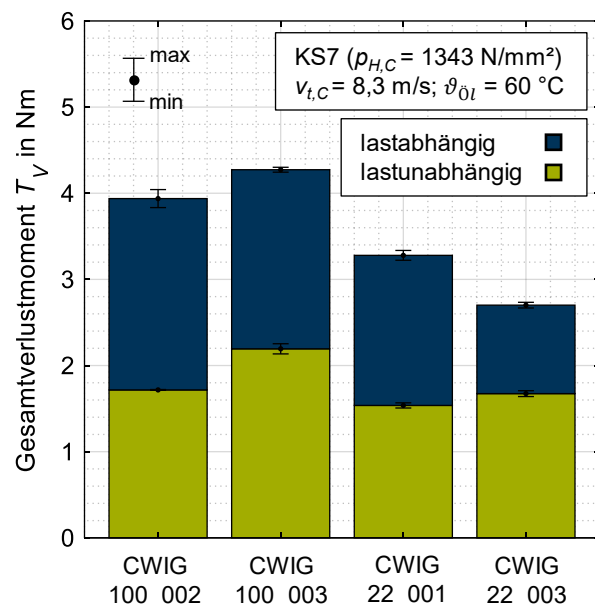


Abbildung 50: Gemessenes Gesamtverlustmoment T_V mit wasserhaltigen Schmierstoffen für Kraftstufe 7, Umfangsgeschwindigkeit $v_{t,C} = 8,3\text{ m/s}$ und Öltemperatur $\vartheta_{\ddot{O}l} = 60^\circ\text{C}$

Analog zu den Untersuchungen in HAP 2400 an Tribometern erfolgten mit den Schmierstoffen CWIG22_002 und CWIG22_003 Untersuchungen zum Einfluss der Wasserverdampfung auf das Verlustleistungsverhalten. Abbildung 51 zeigt für CWIG22_002 und CWIG22_003 das gemessene Gesamtverlustmoment für Kraftstufe 9 und Öltemperatur $\vartheta_{0l} = 60^\circ\text{C}$ für verschiedene Umfangsgeschwindigkeiten $v_{t,C}$.

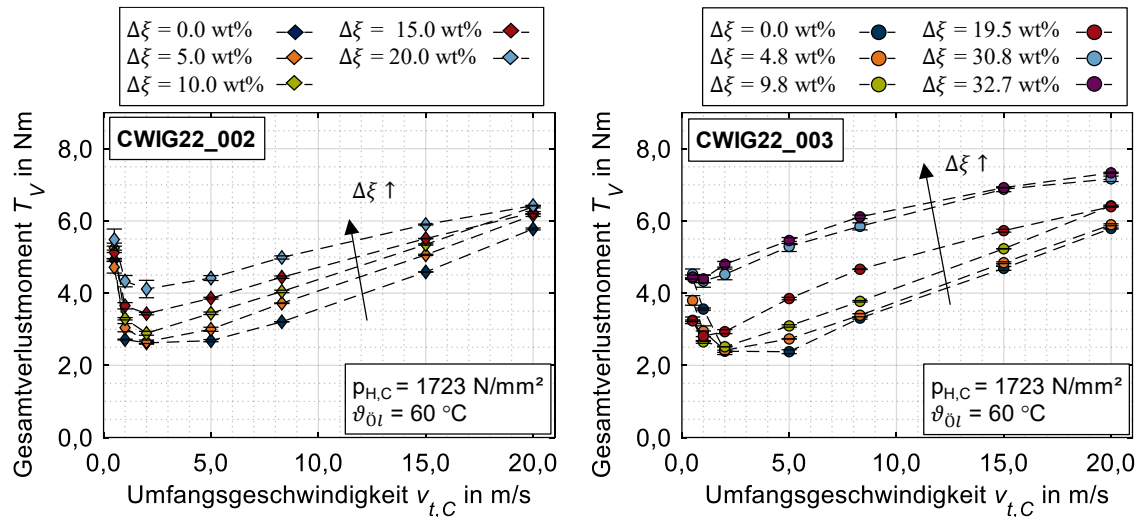


Abbildung 51: Gemessenes Gesamtverlustmoment T_V über der Umfangsgeschwindigkeit $v_{t,C}$ und unterschiedlichen Anteil an verdampftem Wasser $\Delta\xi$ für KS7 ($p_{H,C} = 1343 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ und Öltemperatur $\vartheta_{0l} = 60^\circ\text{C}$ für CWIG22_002 und CWIG22_003¹⁹

Für beide betrachteten Schmierstoffe nimmt das Gesamtverlustmoment T_V mit steigendem Anteil an verdampftem Wasser tendenziell zu. Im Maximum ist das Gesamtverlustmoment dabei mehr als doppelt so hoch bezogen auf den Neuzustand, im Vergleich zu konventionellen Schmierstoffen jedoch trotzdem sehr niedrig. Durch eine separate Messung des Leerlaufverlustmoments T_{L0} erfolgte eine Aufteilung der Verlustmomentanteile und die Sensitivität der jeweiligen Anteile gegenüber Wasserverdampfung wurde auf Basis eines linearen Zusammenhangs abgeleitet¹⁹. Es zeigt sich, dass die Sensitivität der lastabhängigen Verlustmomente mit zunehmendem initialem Wassergehalt steigt. Die Leerlaufverlustmomente hingegen weisen lediglich bei niedrigen Umfangsgeschwindigkeiten einen signifikanten Einfluss der Wasserverdampfung auf.

Beschichtete Zahnräder

Die Bewertung der Effizienzvorteile durch den Einsatz beschichteter Zahnräder erfolgte mit Prüfverzahnungen vom Typ C_{mod} und einer am Fraunhofer IWS applizierten Einlaufschicht (ta-C-a-C) und dem aktuellen Serienschmierstoff aus der BMW E-Achse. Abbildung 52 zeigt beispielhaft die aus der Messung abgeleitete mittlere Verzahnungsreibungszahl μ_{mz} in Abhängigkeit der Umfangsgeschwindigkeit im Wälzpunkt $v_{t,C}$ für eine Öltemperatur von $\vartheta_{0l} = 60^\circ\text{C}$ und Kraftstufe 7 ($p_{H,C} = 1343 \text{ N/mm}^2$).

Die mittlere Verzahnungsreibungszahl μ_{mz} ist für Umfangsgeschwindigkeiten $v_{t,C} \geq 2,0$ m/s niedriger im Vergleich zur unbeschichteten Referenz. Dies kann auf den thermischen Isolationseffekt der Beschichtung zurückgeführt werden. Insbesondere in Folge einer niedrigeren Wärmeleitfähigkeit der Beschichtung kommt es im Zahnkontakt zur lokalen Erhöhung der Kontakttemperatur und damit einer Reduktion der effektiven Kontaktviskosität. Für die betrachteten Betriebsparameter tritt dieser Effekt vor allem bei niedrigen Öltemperaturen sowie mittleren und hohen Umfangsgeschwindigkeiten auf. Bei niedrigen Umfangsgeschwindigkeiten hingegen ist das Verlustmomentverhalten durch Wechselwirkungen der Additive mit den Zahnradoberflächen dominiert. In diesem Bereich konnte für die beschichtete Variante kein Einfluss auf das Verlustverhalten im Vergleich zur unbeschichteten Referenzvariante ermittelt werden. Nach den Wirkungsgraduntersuchungen durchgeführte oberflächenanalytische Untersuchungen zeigten für die beschichteten Zahnräder eine deutliche Einglättung der Einlaufschicht, jedoch auch erste Anzeichen von Schichtverschleiß im Bereich des Zahnfußflankenbereichs.

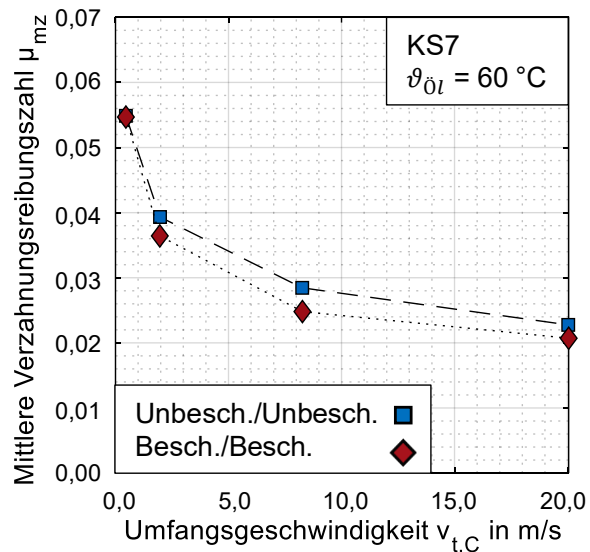


Abbildung 52: Mittlere Verzahnungsreibungszahl μ_{mz} über Umfangsgeschwindigkeit $v_{t,C}$ für eine Öltemperatur $\vartheta_{öl} = 60$ °C und Kraftstufe 7 ($p_{H,C} = 1343$ N/mm²) mit beschichteten und unbeschichteten Zahnrädern

Kunststoffe

Neben Untersuchungen mit wasserhaltigen Schmierstoffen und Beschichtungen in Zahnradgetrieben wurden Untersuchungen zum Verlustleistungsverhalten von Kunststoffzahnradern durchgeführt. Als Zahnradgeometrie wurde die geradverzahnte Stirnradverzahnung *kst-B* mit einem Normalmodul von $m_n = 2$ mm gewählt. Für detaillierte Informationen zur Verzahnungsgeometrie sei auf Hasl et al.²⁰ verwiesen. Es wurden die drei Ritzel/Rad-Paarungen Stahl/Stahl als Referenz sowie Stahl/PEEK (VESTAKEEP® 5000G) und Stahl/POM (Delrin® 100 NC010) als Kunststoffvarianten untersucht. Alle Ritzel sind identisch und aus 16MnCr5 gefertigt, gehärtet und mit einer kurzen Kopfrücknahme von $C_a = 100$ µm geschliffen. Die Kunststoffräder weisen dieselbe Verzahnungsgeometrie auf und unterscheiden sich hinsichtlich des Werkstoffs und der Oberflächenrauheit. Das Stahlrad wurde, analog zu den Stahlritzeln nach der spanenden Fertigung gehärtet und geschliffen, während die Kunststoffräder im Spritzgussverfahren unter Verwendung eines Stahleinlegers hergestellt wurden.

In Abbildung 53 a) sind das Verlustmoment des Prüfgetriebes $T_{V,PG}$ mit den Zahnradpaarungen Stahl/Stahl, Stahl/PEEK und Stahl/POM dargestellt. Zur Bestimmung des Verlustmoment des Prüfgetriebes wurde das Verlustmoment des vorab kalibrierten Übertragungsgetriebes vom gemessenen Gesamtverlustmoment abgezogen.

$$T_{V,PG} = T_V - T_{V,ÜG,kalibriert}$$

Das Prüfgetriebe mit der Zahnradpaarung Stahl/Stahl zeigt stets die höchsten Gesamtverlustmomente. Mit den Paarungen Stahl/POM und Stahl/PEEK werden bei niedrigen Umfangsgeschwindigkeiten bis zu 27,5 % niedrigere Werte gemessen, wie in Abbildung 53 b) dargestellt ist. Für hohe Umfangsgeschwindigkeiten nähern sich die Gesamtverlustmomente aller Zahnradpaarungen an. Dies wird darin begründet, dass bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten der Anteil der lastunabhängigen Verlustmomente T_{V0} dominiert. Die lastunabhängigen Verlustmomente sind nahezu unabhängig vom Zahnradmaterial und werden jedoch von der Zahnradgeometrie beeinflusst, welche für alle untersuchten Zahnradpaarungen nahezu identisch ist. Abbildung 53c)

zeigt die gemessenen Zahnfußmassentemperaturen ϑ_M aller Zahnradpaarungen. Bei Kunststoffzahnradern kann neben der Reibung an den Wirkoberflächen durch Wälzen im Zahnkontakt auch eine Verlustleistung durch Hysteresereibung im Material selbst auftreten. Das PEEK-Rad in der Zahnradpaarung Stahl/PEEK zeigt ähnliche, aber etwas höhere Zahnfußmassentemperaturen als das Stahl-Rad in der Zahnradpaarung Stahl/Stahl, obwohl die Zahnradpaarung Stahl/PEEK stets niedrigere Verlustmomente aufweist. Dies kann entweder auf die niedrigere Wärmeleitfähigkeit von PEEK gegenüber Stahl zurückgeführt werden oder auf einen Anteil an Hysteresereibung durch die zyklische Zahn deformation. Ein Vergleich zwischen PEEK und POM zeigt trotz nahezu identischer Verlustmomente, dass POM bei niedrigen Umfangsgeschwindigkeiten die niedrigsten und bei hohen Umfangsgeschwindigkeiten die höchsten Zahnfußmassentemperaturen ϑ_M aufweist. Für niedrige Umfangsgeschwindigkeiten bestätigt sich vor allem auch die niedrige Verlustleistung durch Roll- und Gleitreibung im Zahnkontakt, die bereits bei vorangegangenen Untersuchungen an Tribometern (siehe Abschnitt Tribologische Grundlagenversuche (HAP 2400)) ermittelt wurde.

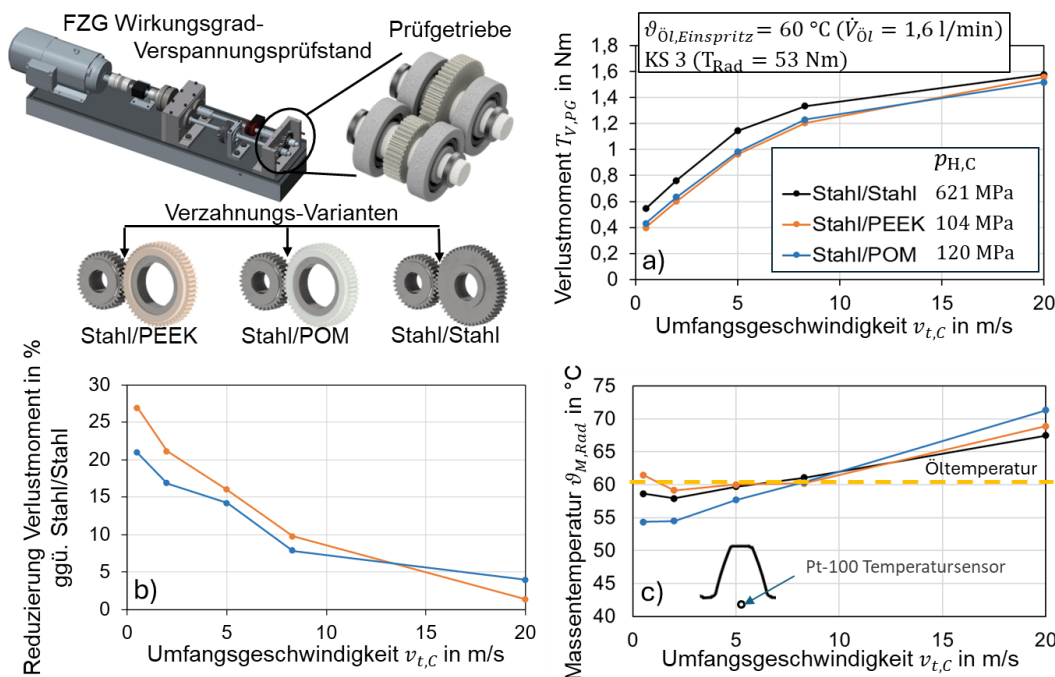


Abbildung 53: Gemessenes Gesamtverlustmoment $T_{V,PG}$ des Prüfgetriebes (PG) der Zahnradpaarungen Stahl/Stahl, Stahl/PEEK und Stahl/POM (a); Reduzierung des Verlustmoments des Prüfgetriebes bei Verwendung eines Kunststoffzahnrad im Vergleich zur Zahnradpaarung Stahl/Stahl (b); Gemessene Zahnmassentemperatur ϑ_M im Zahnfußbereich des Rads (c).
Alle Messungen bei KS3 und Einspritzschmierung mit MIN100 bei $\vartheta_{\text{Öl}} = 60^\circ\text{C}$.

Neben experimentellen Untersuchungen zu Kunststoffzahnradern wurden Berechnungen zum lastabhängigen Verzahnungsverlustmoment T_{VZP} von Kunststoffverzahnungen durchgeführt. Die lastabhängigen Verlustmomente bei Kunststoffzahnradern T_{VZP} entstehen durch Roll- und Gleitreibung im tribologischen Wälzkontakt ($\zeta_{V,Reib}$) sowie durch Hysteresereibung im Material bei zyklischer Belastung und Deformierung ($\zeta_{V,Hys}$).

$$P_{VZP} = P_{An} \cdot (\zeta_{V,Reib} + \zeta_{V,Hys}), \quad \text{mit } \zeta_{V,Reib} = \frac{P_{VZP}}{P_{An}} = H_{VL} \cdot \mu_{mZ} = \frac{\frac{1}{p_{et}} \int_{A'}^{E'} \int_0^b f_N \cdot \mu \cdot v_g dy dx}{T_{An} \cdot n_{An}}$$

Abbildung 54 zeigt exemplarische Berechnungsergebnisse für die Verzahnungsreibungszahl, welche mittels des Methodenträgers LVplus aus FVA 686II berechnet wurde. Die Kontaktbedingungen des tribologischen Kontakts sind über das Eingriffsfeld der Verzahnung veränderlich. Insbesondere kommt es aufgrund der hohen Nachgiebigkeit der Kunststoffzahnradern

zur Verlängerung der Eingriffsstrecke, jedoch auch wesentlich geringeren Kontaktpressungen und damit einhergehend niedrigere Reibungszahlen. Während der Verlustfaktor aufgrund der längeren Eingriffsstrecke für die Kunststoffzahnräder höher ist, sind die mittleren Verzahnungsreibungszahlen niedriger. Der Verlustgrad aufgrund Reibung im Wälzkontakt ergibt sich für die Stahlverzahnung zu $\zeta_{V,Reib} = 0,15 \%$ und für die Kunststoffverzahnungen zu $\zeta_{V,Reib} = 0,06 \%$, was einer Reduktion um 60 % entspricht. Es sei erwähnt, dass dabei Hystereseverluste $\zeta_{V,Hys}$ nicht berücksichtigt sind.

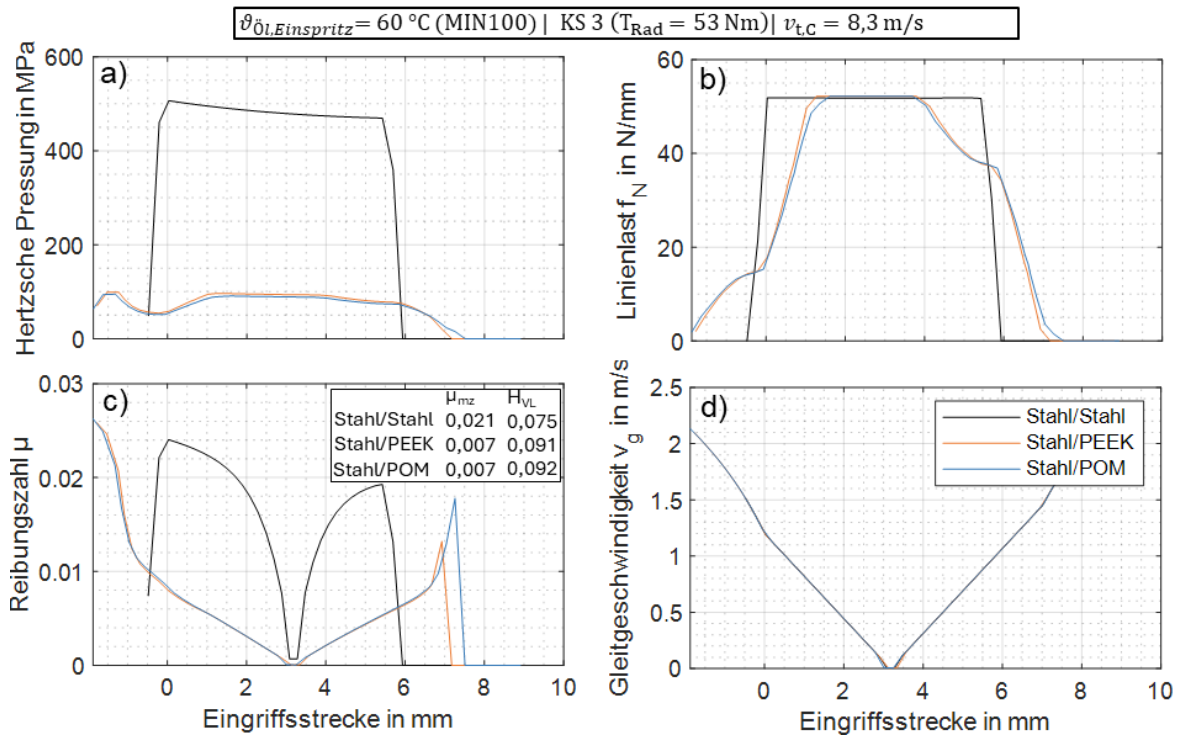


Abbildung 54: Hertz'sche Pressung (a), Linienlast (b), Reibungszahl (c) und Gleitgeschwindigkeit (d) über der Eingriffsstrecke für die Paarungen Stahl/Stahl, Stahl/PEEK und Stahl/POM

1.2.2 Anwendungsfall Sondergetriebe

Ziele und Aufgabenstellung

Im Anwendungsfall Sondergetriebe, geleitet von WITTENSTEIN, war das Hauptziel die Senkung der Gesamtverluste des Sondergetriebes durch den Einsatz verschiedener Modifikationen von Geometrie, Oberflächen und Schmierstoffen. Dazu wurde dieses tribologisch anspruchsvolle Getriebe in Teilsysteme unterteilt, um diese zunächst einzeln zu optimieren und im Folgenden das Optimum für das Gesamtsystem zu finden.

Die tribologischen Teilsysteme wurden zunächst in verschiedenen Modellversuchen möglichst genau nachmodelliert, sowohl bezüglich der Materialpaarungen und Oberflächen als auch bezüglich der Belastungen und Kinematik. Damit war eine Vorauswahl der besten Oberflächen-Schmierstoff-Kombinationen aus der Fülle der Kombinationen möglich. Im Rahmen dieser Arbeit wurde zudem ein bei WITTENSTEIN errichtetes Low-cost-Tribometer fertiggestellt und für eine Vielzahl tribologischer Grundlagenversuche verwendet (CHEPHREN Phase 1).

Mit den vielversprechendsten Kombinationen wurden in der Folge Verifikationsversuche am Gesamtsystem Sondergetriebe durchgeführt, bei denen die Versuchsgetriebe bezüglich ihres Wirkungsgrades und der Temperaturentwicklung überwacht wurden (CHEPHREN Phase 2). Die Modifikationen wurden schrittweise in der gleichen Logik wie in den Vorversuchen, gestuft nach Teilsystemen in die verschiedenen Versuchsgetriebe eingebracht, um den Einfluss der einzelnen Modifikationen abgrenzen zu können. Zum Schluss wurde die beste Kombination im Gesamtsystem ermittelt.

Tribologische Grundlagenuntersuchungen (CHEPHREN Phase 1).

Für die Modelluntersuchungen zum Anwendungsfall Sondergetriebe standen der SRV-Tester am Fraunhofer IWS, das MTM-Tribometer bei FUCHS und das Low-cost-Tribometer bei WITTENSTEIN zur Verfügung.

Herstellung und Beschichtung von Probekörpern und Bauteilen

Zu Beginn war es nötig, die Geometrie und Oberflächengüte der verwendeten Probekörper unter den verschiedenen beteiligten Partnern abzustimmen und diese in ausreichender Anzahl herzustellen, um schnell mit den Versuchen beginnen zu können. Das Low-cost-Tribometer bei WITTENSTEIN wurde so modifiziert, dass die beim IWS bewährten SRV-Pins, Zylindrische Rollen mit einer kugeligen Stirnfläche mit einem Kugelradius von 100 mm aufgespannt und verwendet werden konnten, so war eine Mehrfachverwendung dieser Bauteile und damit ein direkter Vergleich der Ergebnisse der beiden Tribometer möglich.

Am IOT wurden die verschiedenen Bearbeitungsstrukturen der Probekörper im Vergleich zu Realbauteilen charakterisiert und einzelne Probekörper für Vergleichstests poliert. Dadurch lag ein breiter Bereich an Rauheiten und Topografien vor, der untersucht werden konnte. Ziel war dabei immer, das Realsystem möglichst genau nachzubilden, um aussagekräftige Ergebnisse zu erhalten. So wurden frühzeitig alle benötigten Probekörper und Musterbauteile für Beschichtungstests und Modellversuche hergestellt und an die Institute versandt.

Im Laufe des Forschungsprojekts wurden verschiedene Beschichtungsvarianten auf den Probekörpern für die Modellversuche und später auch auf realen Getriebebauteilen aufgebracht. Dabei wurde eine Variation nitridischer Schichten vom IOT und von iwis mobility systems sowie verschiedene Varianten von ta-C-Beschichtungen vom IWS untersucht.

Beim Partner IWS wurden bereits in einer frühen Phase erste Beschichtungen mit ta-C an Polygonwellen und Rundzähnen (siehe Abbildung 55) durchgeführt und die Schichteigenschaften ermittelt. So wurden bereits Erfahrungen für die Beschichtung der Bauteile für die Versuche im Realsystem erworben und diese konnten termingerecht vor den Getriebeversuchen bereitgestellt werden.



Abbildung 55: ta-C-beschichtete Rundzähne und Polygonwelle

Versuche auf dem SRV Tester am IWS

In den Versuchen am IWS wurde zunächst die Bedeutung der Oberflächenrauheit von Gegenkörpern im unbeschichteten und beschichteten Zustand untersucht (SRV4, oszillierend, 40 deg, 10 Hz, 5 mm, 1 h, CWIG100-001 Schmierstoff).

Es zeigte sich, dass beschichtete Pins höhere Reibwerte und geringeren Verschleiß aufwiesen, insbesondere bei rauerer Oberflächen. Die Beschichtung mit ta-C verhinderte die Selbstglättung der Pins, was zu erhöhten Reibwerten und Rondenverschleiß führte. Bei einer Rauheit von $R_a 0,05 \mu m$ konnte ein nahezu verschleißfreies und reibungsarmes System erreicht werden.

In der zweiten Messreihe (siehe Abbildung 56) wurden Pins mit einer Rauheit von $R_a \sim 0,05 \mu m$ und verschiedene Schmierstoffe über einen längeren Zeitraum getestet. CWIG100-01 zeigte die besten Ergebnisse mit niedrigen Reibwerten und geringem Verschleiß, unabhängig vom Beschichtungszustand. Lastrampenversuche ergaben, dass die ta-C-Beschichtung den Reibwert erhöht und den Pinverschleiß verringert, aber den Rondenverschleiß erhöht.

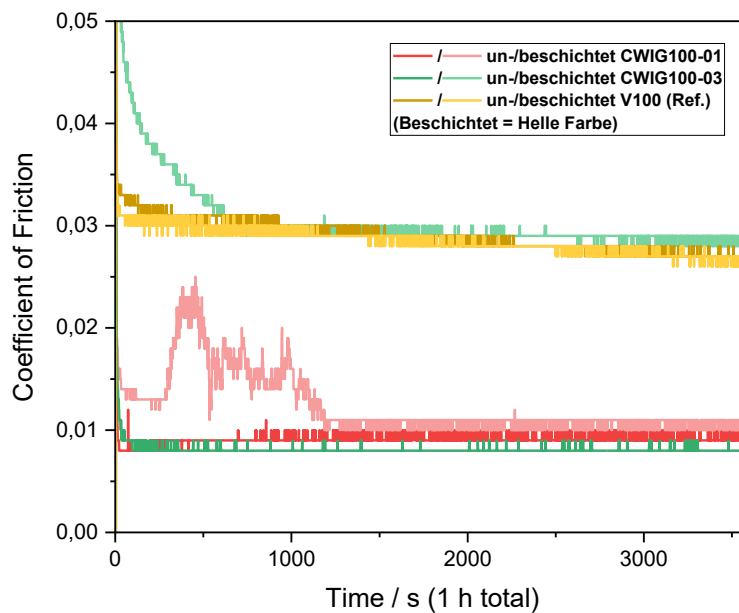


Abbildung 56: Reibwertverlauf bei Verwendung verschiedener Schmierstoffe

Modelluntersuchungen auf dem MTM-Tribometer bei FUCHS

Im Rahmen des HAP 2300 wurden am MTM-Tribometer bei FUCHS eine große Anzahl an Versuchen mit wasserfreien und wasserhaltigen Schmierstoffen der ISO VG Viskositätsklassen 100, 150 und 220 mit Hinblick auf den Anwendungsfall Sondergetriebe durchgeführt (siehe Abbildung 57).

Dabei konnte gegenüber den Referenzölen Stand der Technik bereits eine gewisse Reibungsreduzierung bei einem wasserfreien Entwicklungsschmierstoff nachgewiesen werden. Für die wasserhaltigen Entwicklungsschmierstoffe, wie z.B. CWIG100-001 ist die Reibungsreduzierung sehr deutlich ausgeprägt.

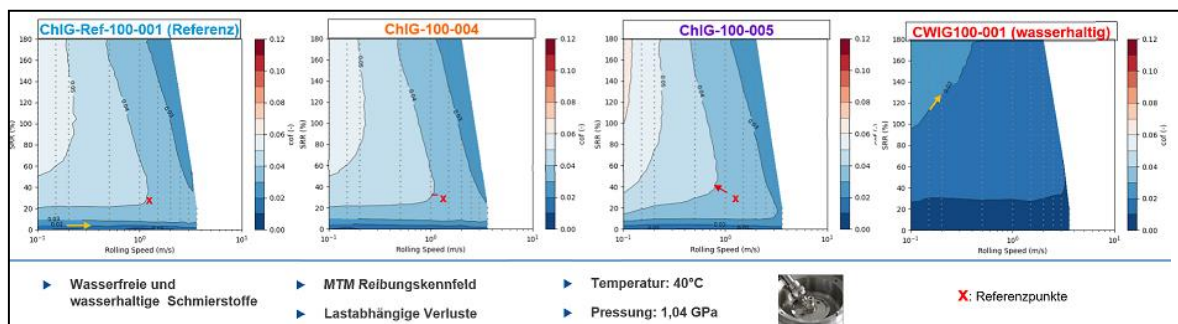


Abbildung 57: Schmierstoff Sondergetriebe - MTM Screening Reibungskennfeld

Low-cost-Tribometer bei WITTENSTEIN

Das Low-cost-Tribometer (siehe Abbildung 58), das im Laufe mehrerer vorangegangener studentischer Arbeiten entstanden war, wurde final für die Nutzung im Forschungsprojekt weiterentwickelt und verbessert. Es ermöglicht hausinterne Modellversuche im Kugel- und Stift-Scheibe-Kontakt unter konstanter Normalkraft und dynamischer Gleitgeschwindigkeit. Die Verbesserungen betrafen die Bedienbarkeit, Datenqualität und -auswertung und den Versuchsablauf. Zudem wurde ein mobiler Laborwagen für den neuen Aufbau des Tribometers konstruiert und aufgebaut, der den flexiblen Einsatz im Laborbereich des Prüffelds ermöglicht.

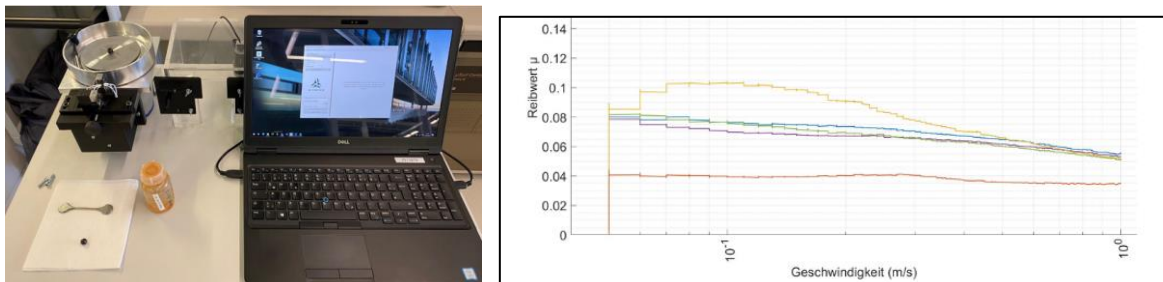


Abbildung 58: Low-cost-Tribometer – Aufbau im Prüffeld und Reibwertkurve

Auf dem Low-cost-Tribometer wurden eine Vielzahl verschiedener tribologischer Untersuchungen in insgesamt drei Messreihen durchgeführt, um die Reibungs- und Verschleißigenschaften von möglichen Oberflächen-Schmierstoff-Kombinationen zu analysieren.

Dabei wurden die beiden betrachteten tribologischen Teilsysteme des Sondergetriebes möglichst genau nachgebildet, vor allem in Hinblick auf die maximal auftretenden Hertz'schen Pressungen und Gleitgeschwindigkeiten. Für das Teilsystem 1 wurden Pressungen von ca. 1000 N/mm² bei einer Gleitgeschwindigkeit von max. 1 m/s gewählt, bei Teilsystem 2 wurden ca. 150 N/mm² bei max. 3 m/s eingestellt.

CHEPHREN Modellversuche		Messreihe 1	Messreihe 2	Messreihe 3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
-------------------------	--	-------------	-------------	-------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Abbildung 59: Messreihen Low-cost-Tribometer

Die aus den Messdaten erzeugten Stribeck-Kurven der beiden Konstellationen unterschieden sich deutlich, sowohl hinsichtlich der Höhe der Reibung als auch hinsichtlich der Position des Ausklinkpunktes. Während sich Teilsystem 1 fast durchgehend im Bereich der Mischreibung befand, ging Teilsystem 2 bereits bei sehr niedrigen Gleitgeschwindigkeiten in die Flüssigkeitsreibung über. Diese Erkenntnis war wichtig für die gesamtheitliche Optimierung des Systems, weil nicht nur das Optimum eines Teilsystems, sondern der gesamtheitliche Bestpunkt gefunden werden musste. Zudem wurde durch diese Betrachtung das Verständnis für das tribologische Verhalten des Sondergetriebes nochmals verbessert.

Anschließend wurden aus der Vielzahl möglicher Kombinationen die vielversprechendsten ausgewählt, um diese anschließend vertieft im Realsystem Sondergetriebe zu betrachten.

Die Modelluntersuchungen am Low-cost-Tribometer zeigten das größte Potential der Reibungsreduzierung bei der Variation der Schmierstoffe. Besonders wasserhaltige und Glycerol-basierte Schmierstoffe zeigten deutliche Vorteile. Von den verschiedenen Beschichtungen konnte sich nur die polierte ta-C Schicht und bei den höheren Lasten auch eine unpolierte ta-C:a-C-Einlaufschicht für weitere Versuche qualifizieren.

Untersuchungen am Gesamtsystem (CHEPHREN Phase 2)

Für die Tests im Realsystem wurde das Versuchsgetriebe RG135 gewählt, für das bereits eine breite Basis an Versuchsdaten vorlag.

Es wurden zwei Varianten des Getriebes konstruiert und gebaut, um die Modifikationen der beiden Teilsysteme Polygonlager und Zahnführung gezielt untersuchen zu können.

Final wurden Kombinationen aus Modifikationen beider Teilsysteme ausgewählt und getestet, um das in Summe beste Ergebnis zu erhalten. Jedes dieser modifizierten Getriebe wurde mit einer Vielzahl verschiedener Versuchsschmierstoffe getestet.

Die Versuche fanden im erprobten alpha-Zyklus, einem Lastversuch mit sinusförmiger Belastung bei verschiedenen Laststufen statt (siehe Abbildung 60), so konnte bei jeder Variation eine Aussage über das Wirkungsgradverhalten abhängig von der Betriebsart und über die Beharrungstemperatur gegenüber dem Referenzsystem getroffen werden.

Bei der Variation der Versuchsschmierstoffe wurde ein großes Augenmerk daraufgelegt, möglichst eine Vermischung der einzelnen Schmierstoffe und damit eine Verfälschung der Versuchsergebnisse zu vermeiden. Dazu wurde nach jedem Versuchsdurchgang das Getriebe vom Prüfstand abgebaut, komplett entleert und einer Spülprozedur unterzogen.



Abbildung 60: Versuchsaufbau und Temperaturen eines Versuchsgetriebes

Die Ergebnisse der Getriebetests zeigten eine sehr gute qualitative und quantitative Übereinstimmung mit den Ergebnissen des Low-cost-Tribometers, was dieses für zukünftige Versuchsreihen qualifiziert und so eine deutlich schnellere Vorauswahl und -qualifikation neuer Schmierstoffe zulässt.

Zudem konnte durch die Versuche das große Potential der wasserhaltigen Schmierstoffe zur Reibungsminimierung nachgewiesen werden. Besonders in Betriebssituationen, die im jeweils beanspruchten tribologischen System zu Mischreibung führen, waren hier deutliche Vorteile gegenüber dem bestehenden wasserfreien Referenzschmierstoff zu verzeichnen.

1.2.3 Anwendungsfall Förderkettentriebe

Im Anwendungsfall Förderkettentriebe arbeitete iwis antriebssysteme daran Systeme und Komponenten reibungsärmer zu gestalten, um so Effizienzsteigerungen zu erzielen und CO₂-Emissionen zu reduzieren. Rollenkettentriebe, wie zum Beispiel Stauförderkettensysteme, finden häufig Anwendung in Fördersystemen. Dabei entstehen die größten Reibungsverluste an den Kettengelenken (zwischen Bolzen und Hülse), in den Bereichen zwischen Spanner bzw. Führung und der Kette sowie im Eingriff der Kette in das Kettenrad. Bei Stauförderkettensystemen kommen zusätzlich Reibungsverluste zwischen den Laufrollen/Bolzen und Laufrollen/Führungsschienen sowie zwischen den Staurollen/Hülsen und den Staurollen/Fördergut vor. Wenn diese Reibungskontakte durch den gezielten Einsatz geeigneter tribologischer Partner, die optimal aufeinander abgestimmt sind, reduziert werden, besteht die Möglichkeit, sowohl die Reibungsenergie als auch den CO₂-Ausstoß signifikant zu senken. Angesichts der weiten Verbreitung von Stauförderkettentrieben, etwa in großen Logistikzentren des Onlinehandels, sowie der zunehmenden Bedeutung der Energieeffizienz in solchen Anwendungen, wird dieser spezifische Anwendungsfall besonders berücksichtigt.

Das Stauförderkettensystem und der im Rahmen dieses Projekts untersuchte Rollenkettentrieb stellen hohe Anforderungen an die Tribologie. Falls es gelingt, in diesem Anwendungsfall die Reibung in den verschiedenen tribologischen Systemen während der gesamten Einsatzlebensdauer zu reduzieren und gleichzeitig die Verschleißbeständigkeit im Vergleich zu herkömmlichen Serienlösungen zu steigern, bestehen hervorragende Chancen, die erzielten Ergebnisse auf andere Anwendungen zu übertragen.

Das tribologische System des Rollenkettentriebs, insbesondere bei Stauförderkettensystemen, lässt sich durch die Entwicklung geeigneter Schichtsysteme, passender Oberflächenbearbeitungen und optimierter Schmierstoffe hinsichtlich Verschleiß- und Reibungseigenschaften dauerhaft verbessern. Neben der Optimierung der tribologischen Systeme an der Kette selbst sollen gegebenenfalls auch die Systeme der Peripherie, wie etwa Kettenspanner, Führungen und Umlenkungen, betrachtet und optimiert werden. Nur eine ganzheitliche Betrachtung des Kettentriebs kann zu einem maximalen Ergebnis und einer erheblichen CO₂-Reduktion führen.

Dafür wurden im Projekt beim Partner iwis antriebssysteme erst Einzelversuche am Tribometer durchgeführt, die anschließend auf dem Applikationsprüfstand wiederholt wurden.

Inbetriebnahme Tribometer

Auf diesem Prüfstand (siehe Abbildung 61) sollten die Einzeluntersuchungen stattfinden. In enger Zusammenarbeit mit dem Hersteller des Tribometers wurde deshalb ein Konzept ausgearbeitet, womit sich die Kontaktstellen Bolzen-Hülse und Bolzen-Stützrolle am Tribometer untersuchen lassen. Die Flachprobe stellt dabei den Reibpartner des Bolzens in der Kette dar.

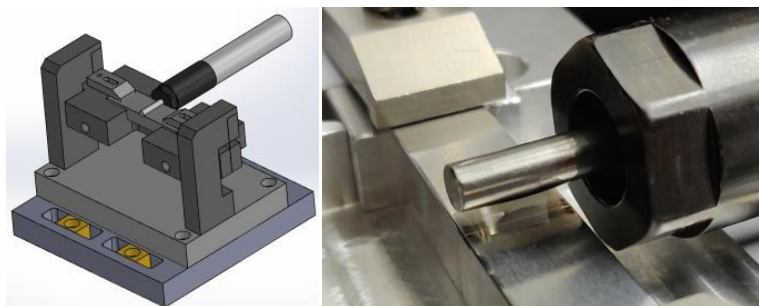


Abbildung 61: Konzept Einzelteilversuche am Tribometer

Der Bolzen ist als Reibpartner deshalb gut für den Einzelteilversuch geeignet, da dieser in zwei Tribosystemen der Stauförderkette wirkt. Zudem lässt sich diese Komponente im Gegensatz zu Hülse oder Rollen (Hohlkörper) auch in unterschiedlichsten Verfahren gut beschichten. Die Gegenkörper im Reibversuch wurden durch eine Flachprobe vertreten, die durch seitliche Niederhalter fixiert wurde.

Die beiden Tribosysteme „Bolzen-Hülse“ und „Bolzen-Stützrolle“ unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Kinematik. Auf dem Prüfstand kann deshalb sowohl eine schwenkende Bewegung als auch eine rotierende Bewegung des Bolzens auf der Flachprobe durchgeführt werden. Eine schwenkende Bewegung stellt die Kinematik zwischen Kettenbolzen und Hülse, also im Kettengelenk, dar. Eine rotierende Bewegung ist im Fall des Systems „Kettenbolzen und Stützrolle“ vorhanden. In den Vorversuchen wurde das Kraft- und Geschwindigkeitsabhängige Verhalten der Tribosysteme untersucht und nach Auswertung der Einlaufdauer eine Versuchsdauer von 20 Minuten definiert.

Neben der Einlaufdauer wurde außerdem der Einfluss von Drehzahl und Normalkraft auf den Reibwert untersucht. Dafür wurden - wieder mit Referenzkomponenten – bei zwei verschiedenen Geschwindigkeiten jeweils vier verschiedene Laststufen gefahren (siehe Tabelle 3).

Es wurde beobachtet, dass die höhere Drehzahl von 1200 U/min, welche im schwenkenden Modus einer Kettengeschwindigkeit von 0,5 m/s entspricht, zu einer dynamischen Anregung des Prüfstands führt. Die höhere Geschwindigkeit führt außerdem zu einer Zunahme des gemessenen Reibwertes bei niedrigen Lasten, wie in Tabelle 3 zu sehen. Bei 600 U/min Abtriebsdrehzahl verhält sich der Reibwert über die Laststufen konstant. Um den Messbereich der Sensorik besser zu nutzen und

anwendungsnahe Verhältnisse zu erhalten, wurde ein Lastfall von 600 U/min und 200 N Normalkraft für die Untersuchungen ausgewählt.

Tabelle 3: Reibwerte bei unterschiedlichen Lastfällen

Drehzahl/Kraft	50 N	100 N	150 N	200 N
600 U/min	0,07	0,06	0,06	0,06
1200 U/min	0,13	0,08	0,06	0,06

Ergebnisse Tribometer

Für die Versuche mit schwenkender Kinematik wurden verschiedene Reibwerte mit den angegebenen Komponenten gemessen. Jede Paarung wurde mit 3 Proben durchgeführt. Neben der schwenkenden Kinematik wurden außerdem die Reibwerte bei durchgehend rotierendem Bolzen aufgezeichnet. Die Versuchsergebnisse zeigen in der schwenkenden Kinematik sowie in der rotierenden Kinematik ein ähnliches Verhalten, wobei die untersuchten Evonik Kunststoffe (PA12 und PEEK) mit geringeren Reibwerten $\mu < 0,02$ dem Standardsystem mit Stahlbauteilen deutlich überlegen sind.

Neben dieser Reibungsoptimierung im Modellkontakt erfolgte auch die Beschaffung des Applikationsprüfstandes. Dieser ist dazu in der Lage, die Reibwerte der einzelnen Tribosysteme einer Stauförderkette in einem realen Fördersystem zu untersuchen.

Inbetriebnahme Applikationsprüfstand

Nach der finalen Inbetriebnahme des Applikationsprüfstandes (siehe Abbildung 62) bei iwis antriebssysteme vor Ort wurde die Programmierung der Messtechniksoftware weitestgehend abgeschlossen.

In den ersten Messreihen wurde die Staukraft der seitlichen Stützrollen mit zwei Kraftmessdosen, das Gesamtdrehmoment der antreibenden Welle und die Stromaufnahme des Elektromotors gemessen. Dafür wurden 8 Messpunkte bei 0,1 bis 0,8 m/s aufgezeichnet. Die Gesamtlast des Werkstückträgers betrug dabei 1000 N. Durch

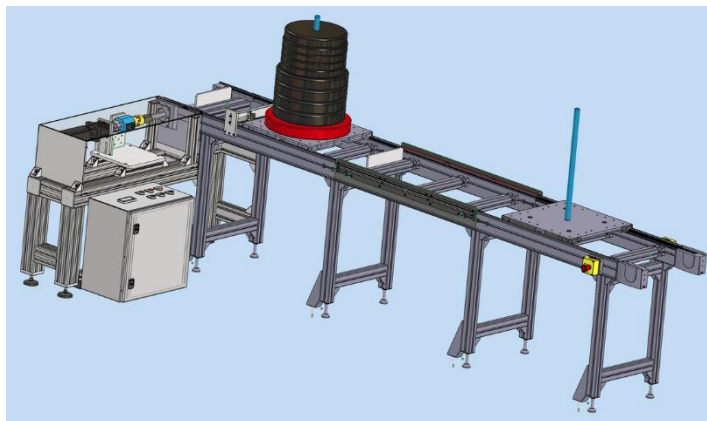


Abbildung 62: Konstruktionsdarstellung des neuen Applikationsprüfstandes

Optimierung der Auswertungsssoftware konnte die Anzahl der Messwerte pro Sekunde von 50 Hz auf 500 Hz angehoben werden. Pro Messpunkt werden für 120 Sekunden Messwerte aufgezeichnet, aus welchen anschließend der Mittelwert gebildet wird.

Ergebnisse Applikationsprüfstand

Mithilfe des Applikationsprüfstandes können mehrere Messgrößen erfasst werden:

- Drehmoment der Eingangswelle
- Staukraft der Stützrollen
- Staukraft der Staurolle
- Stromaufnahme des Frequenzumrichters

Da die Hochleistungskunststoffe von Evonik (PA12, PA12 faserverstärkt, PEEK) bereits auf dem Tribometer sehr niedrige Reibwerte erzielt haben, wurden auch auf dem Applikationsprüfstand als verschiedene Kettenbauteile eingesetzt. Aus diesen Materialien wurden sowohl erste Hülisen als

auch Stützrollen gedreht und zu einem ersten Ketten-Musterstück verarbeitet. Ziel war es zunächst die Bearbeitung und Montagefähigkeit der Kunststoff-Kettenbauteile zu erproben.

Resultierend daraus ließen sich sowohl die unverstärkten PA12- und PEEK-Materialien sehr gut spanend bearbeiten. Lediglich das faserverstärkte PA12 CF15 bereitete Probleme, welche sich in offenliegenden Fasern an der Oberfläche äußern (siehe Abbildung 63).

Die Fasern sind dabei als Defekte sowohl mit dem bloßen Auge als auch mit dem Lasermessgerät (Keyence VR6200) zu erkennen. Mit dem Lasermessgerät lassen sich die Fasern in Extrusionsrichtung identifizieren. In einer Serienfertigung mit Herstellung der Rollen im Spritzgussverfahren kann davon ausgegangen werden, dass dieser Effekt nicht auftritt.

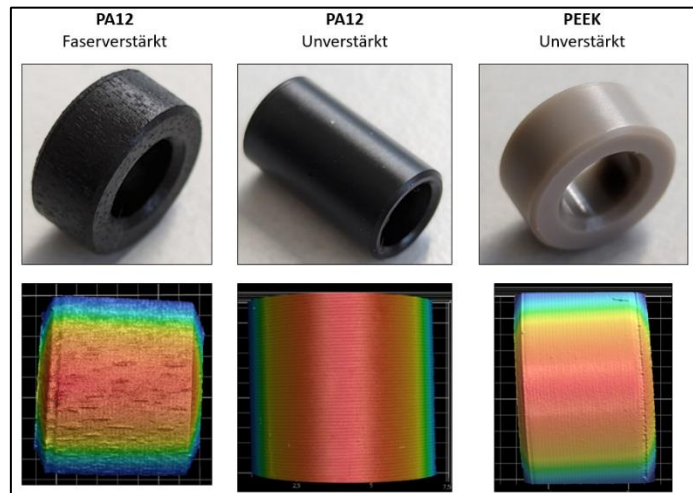


Abbildung 63: Oberflächen der Bauteile aus den verschiedenen Kunststoffen

Für die Stützrollen wurden von Evonik extrudierte Rohr-Halbmaterialzeuge zur Verfügung gestellt. Anschließend wurden die Rollen intern bei iwis antriebssysteme auf die benötigten Durchmesser gedreht und anschließend mit Standard-Bauteilen zur Musterketten verbaut. Dabei wurden zwei unterschiedliche Ketten gebaut. Einerseits mit Stützrollen aus unverstärkten PA12, andererseits aus ebenfalls unverstärkten PEEK. PA12 stellt dabei das preiswertere Material da, während bei PEEK technisch bessere Eigenschaften hinsichtlich Verschleißes und Festigkeit erwartet werden. Beide Materialien sind deshalb für die Untersuchung relevant. Eine dritte Option in Form eines PA12 CF15 konnte für einen Anwendungsversuch nicht verwendet werden, da hier Lunker in das Stangenmaterial eingebracht wurden.

Nach der Fertigung der Musterketten wurden Versuchsreihen durchgeführt, um die Verlustleistung der verschiedenen Ketten zu untersuchen. Dafür wurden insgesamt vier Kettenvarianten untersucht:

1. Systemstandard
Standard-Stauförderkette mit Stahl-Stützrollen und Standard-Initialschmierung
2. JWIS 08B-1 Standard mit IP4 Schmierung
Standard-Stauförderkette von iwis antriebssysteme mit Stahl-Stützrollen
3. JWIS 08B-1 PEEK IP4
Stauförderkette mit PEEK-Stützrollen
4. JWIS 08B-1 PA12 IP4
Stauförderkette mit PA12-Stützrollen

Alle Kettenvarianten wurden bei unterschiedlichen Lasten und Geschwindigkeiten gefahren. Für jede Last-Geschwindigkeits-Stufe wurden zwei Minuten lang Messwerte ausgezeichnet und anschließend gemittelt. Die Geschwindigkeiten wurden dabei von 0,1 bis 0,5 m/s gefahren jeweils bei den Laststufen 500, 1000 und 1500 N. Für jede Kettenvariante ergaben sich so 15 Messpunkte.

Durch Verwendung von PEEK bzw. PA12 Stützrollen konnte das Drehmoment im Durchschnitt um 24 % bzw. 37 % gegenüber dem Systemstandard reduziert werden. Im Best-Case konnte das Drehmoment sogar um 48 % reduziert werden (PA12 gegenüber Systemstandard bei 0,1 m/s und 1500 N).

Übersicht Projektergebnisse und Zielerreichung

Die zu Beginn des Projektes entwickelten Prüfstandsysteme (Tribometer und Applikationsprüfstand) konnten gleichermaßen erfolgreich aufgebaut und in Betrieb genommen werden. Auf beiden

Prüfständen wurden anschließend auch die wesentlichen Reibpartner identifiziert und die wichtigsten Reibkoeffizienten ermittelt. Besonders ist dabei hervorzuheben, dass das komplexe Gesamt-Stauförderkettensystem in alle einzelnen Tribosysteme für Einzelmessungen aufgeschlüsselt werden konnte und somit auch die vielversprechendsten Tribokontakte identifiziert wurden. Deshalb wurde der Schwerpunkt im weiteren Projektverlauf stärker auf die Stütz- und Staurollen gelegt und weniger auf das Kettenrad, da das Gesamtpotenzial zur Optimierung vergleichsweise niedrig ist. Durch den Einsatz von verbesserten Tribo-Einzelsystemen in den Stauförderketten konnten somit enorme Optimierungspotenziale hinsichtlich Reibung und Energieeffizienz im Gesamtsystem ermöglicht werden. Die anschließende erfolgreiche Herstellung von Muster-Kettenbauteilen und auch die Fertigung von verschiedenen Musterketten, die diese Bauteile enthalten, ermöglichten den Transfer der erfolgreichen Ergebnisse vom Tribometer auf den anwendungsnahen Applikationsprüfstand. Die niedrigen Reibkoeffizienten vom Tribometer konnten auf dem Applikationsprüfstand reproduziert werden und haben zu einer deutlichen Reibungsreduzierung im Gesamtsystem geführt. Anschließend wurde die Intervallschmierung des Stauförderkettensystems betrachtet und optimiert, so dass mit der minimalen Aufbringung von Schmierstoff ein gleichbleibender ausreichender Schmierzustand des Systems erreicht werden konnte. Sowohl die Ergebnisse aus der Reibungsreduzierung im Stauförderkettensystem als auch die Verbesserung der Nachschmierung im Gesamtsystem führen zu einer deutlich erhöhten Energieeffizienz und verbesserten CO₂-Reduktion, die sich nach Projektabschluss nicht nur auf viele verschiedene Stauförderkettensysteme übertragen lassen, sondern auch auf viele andere Förderkettensysteme in den unterschiedlichsten Anwendungen.

1.2.4 Anwendungsfall Riemenrad in Kunststoff

Im Rahmen des Förderprojektes CHEPHREN wurde zur Optimierung des Riemenrads des BMW CE04 Scooters eine innovative Materialsubstitution von einem metallisches Riemenrad aus AISi10MnMg durch Kunststoff angestrebt (siehe Abbildung 64).

Das Riemenrad ist ein zentraler Bestandteil des Antriebssystems und überträgt die Kraft vom Elektromotor auf das Antriebssystem des Scooters. Es spielt eine entscheidende Rolle bei der Umwandlung der elektrischen Energie in mechanische Energie, die das Fahrzeug antreibt. Es trägt zur Dämpfung von Vibrationen bei, die während des Betriebs des Motors entstehen können. Dies verbessert den Fahrkomfort und reduziert den Verschleiß anderer Komponenten. Durch die Verwendung von geeigneten Materialien und Designs kann das Riemenrad auch zur Reduzierung von Geräuschen beitragen, die während des Scooter-Betriebs entstehen. Dies ist besonders wichtig für die Akustik und das Fahrerlebnis. Ein gut gestaltetes Riemenrad kann die Reibung minimieren und somit die Effizienz des Antriebssystems erhöhen. Dies führt zu einer besseren Energieausnutzung und einer längeren Reichweite des Scooters. Insgesamt ist das Riemenrad ein entscheidendes Bauteil, das die Leistung, Effizienz und den Komfort des BMW CE04 Scooters maßgeblich beeinflusst.

Daraus ergeben sich fokussierte Leitlinien:

1. Reduzierung des Fahrzeuggewichts und der rotierenden Massen:

Durch den Einsatz leichterer Materialien wird das Gesamtgewicht des Fahrzeugs verringert, was zu einer verbesserten Fahrdynamik und Energieeffizienz führt. Eine Reduzierung der rotierenden Massen (= geringeres Massenträgheitsmoment) trägt zudem zur Leistungssteigerung bei.

2. Umwelt:

Die Reduzierung der Reibung hat nicht nur positive Auswirkungen auf die Effizienz, sondern auch auf den Energieverbrauch und die Emissionen. Darüber hinaus wird die Recyclingfähigkeit der verwendeten Materialien berücksichtigt, um die Umweltbelastung zu minimieren. Eine Verbesserung der Akustik durch geringere Geräuschentwicklung trägt ebenfalls zur Nachhaltigkeit bei.

3. Kostenreduzierung:

Die Optimierung der Produktionsprozesse und die Auswahl kosteneffizienter Materialien zielen darauf ab, die Produktionskosten zu senken. Auch die Gewährleistungskosten können durch die Verwendung performanterer Materialien und Technologien reduziert werden.

4. Freiheiten im Design:

Der Einsatz von Kunststoffen ermöglicht größere Freiheiten im Design des Riemenrads. Innovative Formen und Strukturen können entwickelt werden, die nicht nur funktional sind, sondern auch ästhetische Aspekte berücksichtigen.

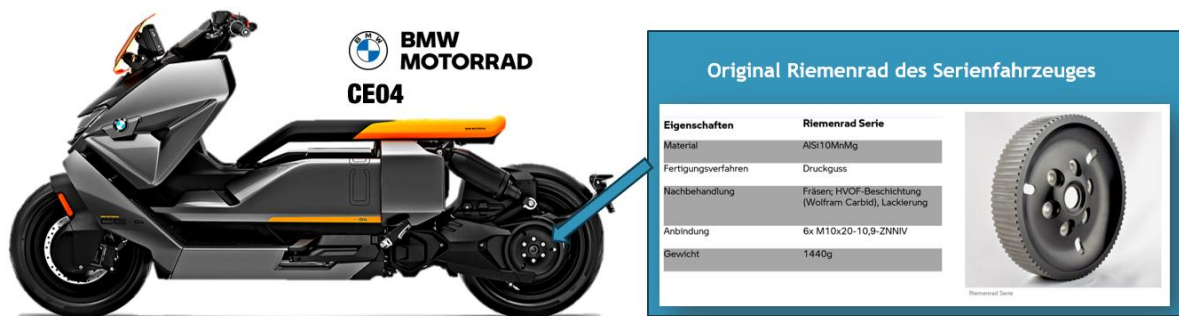


Abbildung 64: BMW CE04 mit Riemenrad

Um die Materialsubstitution des Riemenrades umzusetzen und auf deren Funktion zu testen, wurden mehrere Arbeitspakete definiert und strukturiert abgearbeitet. In Zusammenarbeit mit Evonik, FUCHS, Fraunhofer IWS, hGears und weiteren Partnern wurde dieser Anwendungsfall zur Auslegung und Fertigung des Kunststoff-Riemenrades von BMW initiiert. Ziel war es, ein fertigungsgerechtes Design zu entwickeln, das den Anforderungen der Fertigung und den praktischen Einsatzbedingungen entspricht. In mehreren Abstimmungsrunden wurden mögliche Materialien und Beschichtungen, sowie verschiedene Designs und infrage kommende Fertigungsprozesse besprochen, um ein erstes Konzept eines Kunststoff-Riemenrades für die Serienentwicklung zu realisieren.

Durch die Umsetzung definierter Arbeitspakete wurde angestrebt, das Riemenrad des BMW CE04 Scooters nicht nur funktionell zu gestalten, sondern auch einen bedeutenden Beitrag zur Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks zu leisten. Die Kombination aus innovativen Materialien und fortschrittlichen Technologien wird die Wettbewerbsfähigkeit des Produkts stärken und die Nachhaltigkeitsziele sowie die innovative Wahrnehmbarkeit des Projektes unterstützen.

Evaluierung der einsetzbaren/ einzusetzenden Materialien

Hier erfolgte die Auswahl der Materialien, die für die Herstellung des Riemenrads geeignet sind. Der Fokus lag auf der Identifizierung von Kunststoffen, die sowohl die erforderlichen mechanischen als auch die tribologischen Eigenschaften (geringere Reibung und Verschleiß) bieten.

Initial wurde für die ersten Untersuchungen ein Prototyp im 3D-Druck (SLS-Verfahren) aus PA12 gefertigt. Nach der positiven Bewertung wurde die Fertigung der ersten mechanisch bearbeiteten Riemenräder diskutiert. Daraufhin wurden die Riemenräder in verschiedenen Kunststoffvarianten bei hGears angefordert. Die dabei verwendeten Materialien waren PVDF (Polyvinylidenfluorid), PA6.6GF30 (Polyamid 6.6 verstärkt mit 30 % Glasfaser) und PA12CF15 (Polyamid 12 verstärkt mit 15 % Kohlefaser). Die mechanische Bearbeitung dieser Riemenräder wurde an den Unterlieferanten Becatec vergeben.

Nach den ersten erfolgreichen Tests bei BMW zeigte sich, dass von den getesteten Kunststoffvarianten PA12CF15 die besten Ergebnisse bezüglich der Funktion lieferten. Dieses Material zeichnete sich durch seine hohe Festigkeit und ausgezeichnete Haltbarkeit aus, wodurch es sich als besonders geeignet für den Einsatz in der vorgesehenen Anwendung herausstellte. Infolgedessen entschied BMW die Versuchsreihen auf Basis dieses Materials durchzuführen und weiter zu optimieren.

In weiteren Schritten erfolgte die Fertigung eines spritzgegossenen Grundkörpers und eines Außenrings aus PEEK, welcher weitere tribologische und auch Robustheitsvorteile bei Kunststoffen verspricht. Bei den reibungsreduzierten Beschichtungen lag der Fokus auf Gleitlacken der Firma FUCHS, auch PTFE-frei, sowie Highend DLC-Beschichtungen (ta-C) vom Fraunhofer IWS.

Auslegung und Simulation

In diesem Schritt wurden umfassende Simulationen durchgeführt, um die tribologischen Eigenschaften, Haltbarkeit, Vibrationsdämpfung und Geräuschdämpfung des neuen Riemenrads zu analysieren. Zudem wurden die Forschungs- und Entwicklungsaufwände sowie die Fertigungskosten bewertet, um die Reibarbeitsreduzierung zu quantifizieren.

In unterschiedlichen Konstruktionsphasen wurde ein gewichts- und designorientiertes Erscheinungsbild gewählt, welche die Lastkollektive erfüllen. Ebenfalls konnten dann, mittels eines Simulationstools, aufgrund gegebener Materialwerte und Geometrie die Verbrauchswerte und deren Einsparungen ermittelt werden (siehe Abbildung 65).

			CO ₂ -Reduktion PA12 Riemenrad [%] *	CO ₂ -Reduktion PA12 Riemenrad und Kunststoffteile [%] *
Konstant- Fahrverbräuche	Konstantfahrt-Emission	40 km/h	0,00%	-0,49%
	Konstantfahrt-Emission	80 km/h	-0,13%	-0,26%
	Konstantfahrt-Emission	120 km/h	0,00%	-0,14%
WMTC ohne Rekuperation	spezifische Emission	WMTC Straße ohne Rekuperation	-0,16%	-0,62%
	spezifische Emission	WMTC Rolle ohne Rekuperation	-0,15%	0,00%
WMTC mit Rekuperation	spezifische Emission	WMTC Straße mit Rekuperation	-0,17%	-0,52%
	spezifische Emission	WMTC Rolle mit Rekuperation	0,17%	0,17%
Realzyklen	spezifische Emission	Realzyklus Stadt	-0,19%	-1,13%
	spezifische Emission	Realzyklus Überland	0,00%	-0,87%
	spezifische Emission	Realzyklus Berg	-0,15%	-0,92%
	spezifische Emission	Realzyklus Autobahn	0,00%	-0,17%
	spezifische Emission	Realzyklus Gesamt	-0,14%	-0,84%

* durch die Maßnahmen erreichte prozentuale CO₂-Reduktion im Betrieb (Simulation)

da mehr Gewicht von Vorteil
Größte Effekte

Abbildung 65: CO₂ Reduktion durch Gewichtseinsparung

In der Nutzungsphase ergeben sich Effekte durch die Gewichtsreduzierung des Riemenrads allein. Eine weitere Reduzierung wird durch Extrapolieren der Materialsubstitution um weitere Bauteile, wie z.B. Felgen, erwartet. Eine Materialsubstitution von Metall durch Kunststoff bzw. Leichtbau im Antrieb ist daher sinnvoll.

CO₂-Footprint.

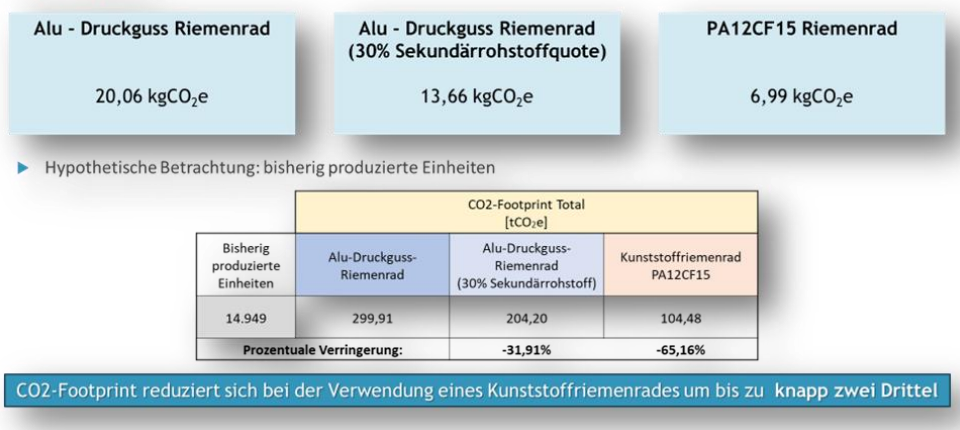


Abbildung 66: Vergleich CO₂-Footprint von unterschiedlichen Riemenradvarianten

Hinsichtlich der CO₂-Reduzierung in der Produktion bei Verwendung von Kunststoff würde sich auch ein positiver Effekt bzgl. des Footprint darstellen (siehe Abbildung 66). In einer Nachhaltigkeitsbetrachtung wurde das Original-Riemenrad mit einer 30 % Sekundärrohstoffquote und einem PA12CF15 Riemenrad verglichen.

Entscheidung der einsetzbaren/ umzusetzenden Verarbeitungs- und ggf. Beschichtungstechnologien

Die Auswahl geeigneter Verarbeitungs- und Beschichtungstechnologien ist entscheidend, um die gewünschten Eigenschaften des Riemenrads zu erreichen und die Produktionsprozesse zu optimieren. Dazu hat BMW gemeinsam mit den Partnern Evonik und Fraunhofer IWS die Materialien

für Kunststoff und Beschichtung ausgewählt. Wie im Abschnitt Schichtentwicklung (HAP 2200) erwähnt, hat das Fraunhofer IWS die ta-C-Beschichtung mittels Laser-Arc-Technologie auf die Beschichtung von Kunststoffen angepasst. Die Beschichtung wurde im Hinblick auf Plasmavorbehandlung und Haftschichtkonzept auf die verschiedenen Riemenrad-Kunststoffe angepasst. Zudem wurde im Rahmen der Entwicklungsarbeiten ein Einlaufschicht-Konzept entwickelt, um die Abrasivwirkung von Schicht-Rauheitsspitzen im tribologischen Einlauf abzumildern und damit die Schichtlebensdauer zu maximieren. Mit dieser Optimierung gelang es Schichten mit einer vergleichsweise großen Schichtdicke von 3 µm zu verwenden.

Für die Kunststoffbauteile wurden teilweise hybride Riemenräder mit einem faserverstärkten Kern PA12 GF50 (VESTAMID® L-GF50) und einem hochmolekularen PEEK Rand (VESTAKEEP® 5000G) sowie ein Mono-Riemenrad aus PA12 CF15 (VESTAMID® L-CF15 BK E70461) hergestellt. Diese wurden wie dann unbeschichtet und beschichtet im Lebensdauertest bei der unterbeauftragten Firma Dayco und in anderen Bauteiltests evaluiert. Zudem wurden unterschiedlichste Herstellungsverfahren wie 3D-Druck, Spritzguss- und Frästechnologien betrachtet.

Zur Reibungsreduzierung im System des Riementriebs wurden die optimierten ta-C- sowie Gleitlackbeschichtungen auf die Riemenräder aufgetragen, siehe Abbildung 69.

Entscheidung der zu erfüllenden Belastungskollektive

In diesem Arbeitspaket wurden die spezifischen Belastungen definiert, die das Riemenrad während des Betriebs aushalten muss. Diese Entscheidung war wichtig für die Auswahl geeigneter Materialien und Konstruktionen.

Zielführend für die Definition von unterschiedlichen Versuchsreihen, die eine Beurteilung zur Funktionalität gewährleisten, waren unterschiedlichste Anforderungen an ein Fahrzeug, welche bei einer Serienentwicklung ähnlich betrachtet werden. Klimatische und belastungsrelevante Zustände wurden als Anforderungen an ein Riemenrad im Antrieb eines Scooters analysiert (siehe Abbildung 67).

Anforderungen an ein Riemenrad.

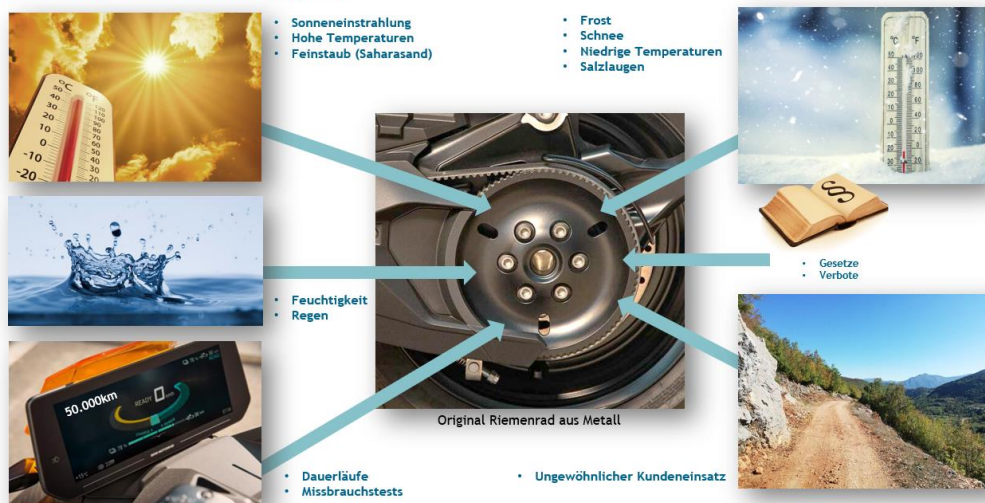


Abbildung 67: Klimatische und belastungsrelevante Anforderungen an ein Gesamtfahrzeug

Anschließend wurden die Anforderungen in 4 Versuchsreihen (siehe Abbildung 68) kategorisiert und beschrieben.

Vorentwicklungstests der Riemenräder.



Abbildung 68: Definierte Versuchsreihen zur Erprobung und Analyse alternativer Riemenräder

Die erste Versuchsreihe war ein Beschleunigungstest auf dem Rollenprüfstand, bei dem die hohen Drehmomentanforderungen überprüft wurden. Alle Riemenräder mit dem Grundkörper PA12x haben diesen Test bestanden. Anschließend konnten priorisierte Riemenräder in Versuchsfahrzeugen montiert werden, welche bei unterschiedlichsten Testfahrten und im Realdauertest ausgiebig getestet wurden. Es kam somit eine Laufleistung von über 20.000 km zu Stande. Die Fahrzeuge werden weiterhin über das Ende des Projekt CHEPHREN eingesetzt.

Um auch Extrembedingungen zu untersuchen, wurde ein Straßenverschmutzungstest bei einem Riemenhersteller (Dayco) mittels Sandeinwurf definiert und durchgeführt. Dieser Test stellt eine hohe Belastung bzgl. Verschleiß für die Riemenräder dar, siehe Abbildung 69. Dabei wurde auch ein Serienriemenrad als Referenz untersucht. Auch dieses zeigte nach dem Versuch Verschleißerscheinungen.

Ergebnis der Kunststoff-Riemenräder.

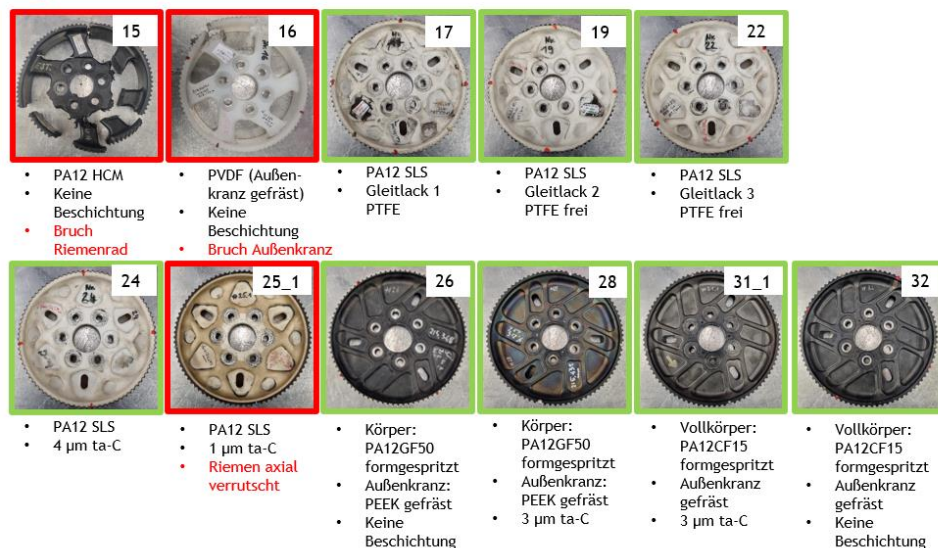


Abbildung 69: Riemenräder nach den Versuchsreihen, grün = Tests bestanden, rot = Tests nicht bestanden



Abbildung 70: Riemenrad-Proben nach Straßenverschmutzungstest

Zum Schluss wurden die Riemenräder, welche alle Tests erfolgreich abgeschlossen haben, einem Missbrauchsversuch im Fahrzeug unterzogen. Es handelt sich hierbei um einen realistischen Bordsteinsprungtest, welcher ein typisches Verhalten eines Scooterfahrers im europäischen Stadtverkehr darstellt.

Nachweis einer prinzipiellen Industrialisierungsfähigkeit

In diesem Schritt wird die Machbarkeit der Industrialisierung des neuen Riemenrads bewertet, um sicherzustellen, dass die Produktion in größerem Maßstab realisierbar ist. In Zusammenarbeit mit Evonik und IMS Gear in einer Unterbeauftragung konnte der Produktionsprozess eines Ein- und Zwei-Komponenten-Riemenrads bewertet werden. Durch die Fertigung einer Prototypenform wurde die Machbarkeit in der Herstellung bestätigt und die daraus entstandenen Prototypen in den voran beschriebenen Versuchen getestet. Den Berechnungen für die Herstellungskosten wurden unterschiedliche Kunststoffmaterialien zugewiesen, siehe Abbildung 71.

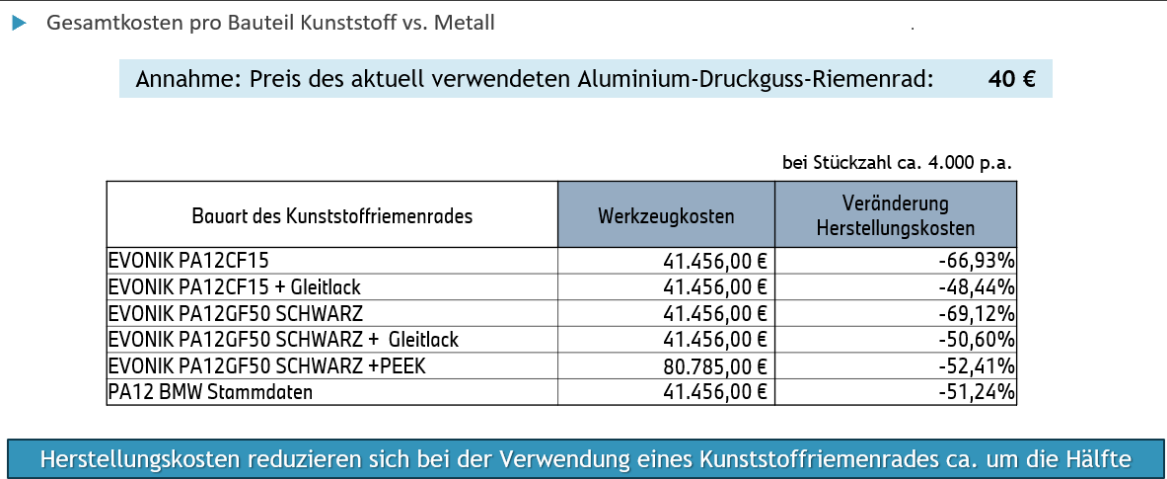


Abbildung 71: Berechnung der Herstellungskosten bei 4000 Stück pro Jahr

Zusammenfassung der Arbeiten

Im Rahmen des Projekts CHEPHREN wurden unterschiedliche, alternative Riemenräder des Antriebes eines Elektroscooters BMW CE04 untersucht. Die Hochleistungskunststoffe auf Basis von PEEK (VESTAKEEP®) und PA12 (VESTAMID®) lagen dabei im Fokus. Die durchgeführten Tests umfassten sowohl unbeschichtete als auch ta-C bzw. Gleitlack-beschichtete Varianten. Die Ergebnisse zeigen, dass die Verwendung dieser innovativen Materialien signifikante Vorteile mit sich bringen.

Die Monomaterialvarianten aus faserverstärktem PA12 sowie die hybriden Materialvarianten, die PA12 GF50 im Kern und PEEK im Außenkranz kombinieren, haben sich als besonders leistungsfähig erwiesen. Die durch den Einsatz dieser Hochleistungskunststoffe erzielten Vorteile umfassen eine deutliche Kostenreduktion, ein verbessertes Geräuschverhalten, eine höhere Missbrauchperformance sowie eine gesteigerte Nachhaltigkeit. Zudem konnten die Anforderungen an die Materialeigenschaften bei gleichzeitig geringeren Kosten erfüllt werden.

Insgesamt belegen die Ergebnisse dieses Projekts das Potenzial von Hochleistungskunststoffen in der Anwendung von Riemenrädern und eröffnen neue Perspektiven für zukünftige Entwicklungen in diesem Bereich. Die Kombination aus technischer Effizienz und wirtschaftlicher Vorteilhaftigkeit macht diese Materialien zu einer vielversprechenden Wahl für BMW Motorrad.

1.2.5 Anwendungsfall Steuerketten-Zahnradritzel in Kunststoff

In diesem Anwendungsfall unter der Leitung von BMW werden Untersuchungen einer Materialumstellung auf Kunststoff bei Zahnradritzeln in BMW-Motorrad-Ventiltrieben dargestellt. Ziel der Entwicklung war es, neben der Senkung von Komponentenkosten, insbesondere die Betriebsgeräusche und die Reibarbeit signifikant zu reduzieren. Erkenntnisse aus verwandten Projekten, wie etwa die Evaluierung von Kunststoffen bei Riemenrädern, wurden systematisch übertragen und weiterentwickelt.

Ein Schwerpunkt lag auf dem BMW-Wasserboxermotor, bei dem die Materialkompatibilität sowie die Dauerhaltbarkeit der Systemkomponenten (Kette, Ritzel, Spann- und Gleitschienen) im Fokus stehen. Das aktuelle Zahnradritzel-Arbeitssteam kam zu der Erkenntnis, dass die Steuerketten-Antriebsritzel des BMW-Boxers voraussichtlich unter anderem Hochleistungskunststoffe wie PEEK erfordern. Zusätzliche funktionale Vorteile ergeben sich potenziell durch das reduzierte Bauteilgewicht aufgrund der geringeren Dichte der verwendeten Materialien.

Die folgende vergleichende Untersuchung wurde vereinbart:

- Reibungs- und NVH-Untersuchungen am Multifunktionsreibprüfstand
- Verschleißuntersuchungen am Verspann-Prüfstand
- Verschleiß- und NVH-Untersuchungen am Zylinderkopfprüfstand

Die dazugehörigen Kettenräder wurden aus Halbzeugen gefertigt, die von Evonik bereitgestellt wurden. iwis mobility systems führte begleitend Hardwaretests durch und stellte sämtliche erforderlichen Geometrien, Lastkollektive und Parameter zur Verfügung.

Fertigung von Kunststoffkettenrädern

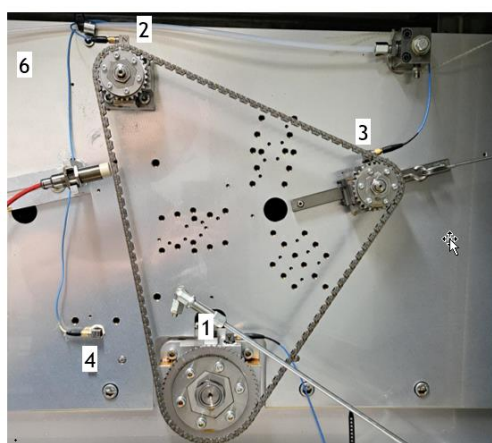
Die benötigten Stahlkettenräder wurden jeweils bei iwis mobility systems intern gefertigt (siehe Abbildung 72). Für die Herstellung der Kunststoffkettenräder wurde eine externe Firma beauftragt. Seitens Evonik wurden Halbzeuge aus VESTAKEEP® 5000G und VESTAKEEP® 4000 CF30 für die Fertigung zur Verfügung gestellt.



Abbildung 72: Kettenräder für die Versuche am Multifunktionsreibprüfstand

Reibungs- und NVH-Untersuchungen am Multifunktionsreibprüfstand

Es wurden Versuche mit Kettenrädern aus VESTAKEEP® 5000G (PEEK) und VESTAKEEP® 4000 CF30 (PEEK CF) im Vergleich zu Stahlrädern als Referenz am Multifunktionsreibleistungsprüfstand (siehe Abbildung 73) durchgeführt. Die Einlaufdauer vor der Versuchsmessung betrug jeweils 70 h. Es wurden jeweils zwei Sätze von jedem Materialtyp getestet und somit sechs Tests innerhalb der Versuchsläufe durchgeführt. Neben der Messung der Reibung ist auch die Messung des akustischen Verhaltens und die Reproduzierbarkeit der Versuche im Fokus. Zielsetzung war A-B-Vergleichsversuche durchzuführen, wobei Stahlkettenräder als Referenz dienen.



► Versuchsparameter

- Öltemperatur: 70 °C
- Kammertemperatur: 70 °C
- Einlaufdauer: 70h
- KR-Varianten: Stahl / PEEK CF / PEEK
- Laufdauer Kette: 70h (jeweils neuer Satz)

- 1 - Lagerbock Antriebsrad
- 2 - Lagerbock Umlenkrad
- 3 - Lagerbock Spannrad
- 4 - Grundplatte
- 5 - E-Motor
- 6 - Mikrofon innen
- 7 - Mikrofon außen

Z Antriebsrad = 58
Z Ritzel = 29

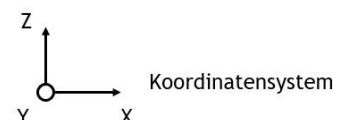


Abbildung 73: Versuchsaufbau des Multifunktionsreibprüfstands

Die Ergebnisse zeigen im Vergleich zu den Kettenrädern aus Stahl eine Reibreduzierung um 8-13 % (PEEK-CF) bzw. 20-25 % (PEEK) in Abhängigkeit der Drehzahl (siehe Abbildung 74). Die beiden Kurven des Prüflaufs mit den Stahlkettenrädern sind Referenzversuche für Stahl wurden am Anfang und am Ende der Versuchskampagne durchgeführt, so dass ein Einfluss der Versuchsreihenfolge ausgeschlossen werden kann. Bei den Kurven von PEEK-CF und PEEK wird eine Streuung zwischen den Versuchsläufen beobachtet. Ob die beobachtete Streuung vorwiegend in der Materialeigenschaft der Kunststoffe oder aufgrund der Unregelmäßigkeit der

Verzahnungsgeometrien (siehe Abbildung 74) bei den Musterkunststoffkettenrädern begründet ist, kann hier nicht abschließend geklärt werden.

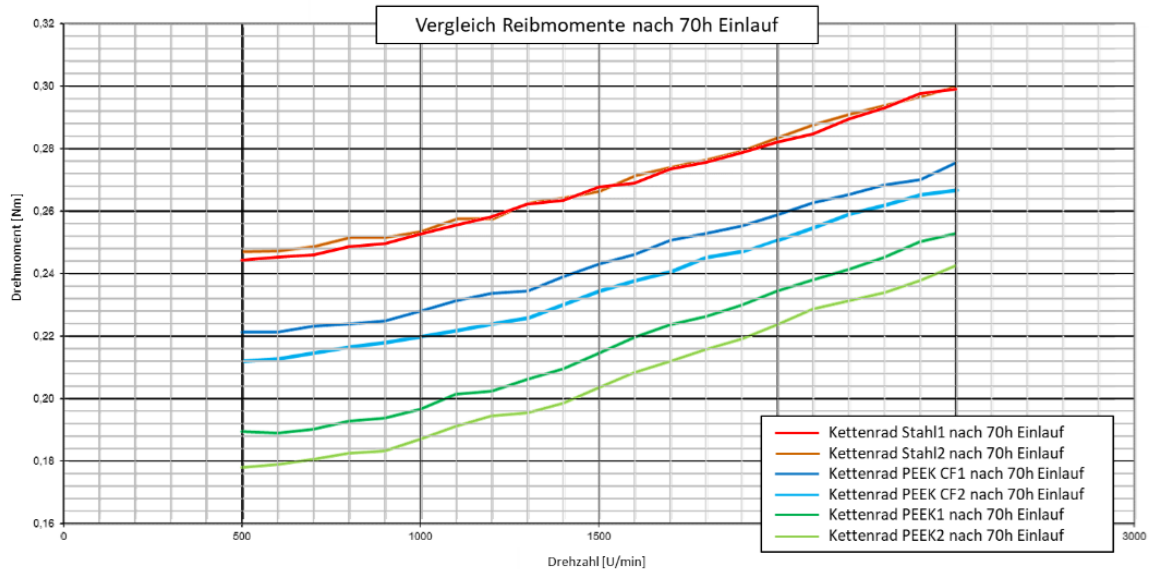


Abbildung 74: Vergleich der Reibmessungen bei unterschiedlichen Drehzahlen von Kettenrädern aus Stahl (rot), PEEK-CF (blau) und PEEK (grün)

Weiterhin wurde innerhalb der Prüfstandläufe das NVH-Verhalten bestimmt (siehe Messpositionen in Abbildung 74). Es wurde an fünf Positionen der Körperschall in Abhängigkeit der Drehzahl gemessen. Die Maßeinheit für die Schwingbeschleunigung ist m/s^2 . Der Pegel der Schwingbeschleunigung ist in dB dargestellt. Grundsätzlich werden in der 29. Ordnung Unterschiede zwischen den Materialtypen beobachtet. Abbildung 74 zeigt die 29. Ordnung (Anzahl Zähne des Antriebsrades). Die Schallpegel für PEEK sind hier erwartungsgemäß am niedrigsten, der von Stahl am höchsten. Für die Versuche, insbesondere mit den Kettenrädern aus PEEK-CF, werden z.T. deutliche Differenzen in Abhängigkeit der Drehzahl zwischen den beiden Versuchsläufen beobachtet. Die bei PEEK-CF signifikant unterschiedlichen Gesamtpegelverläufe (Vektorsummen in Abbildung 74 – durchgehende Linien) der beiden Versuchsläufe werden vermutlich durch die ungleichförmigen Verzahnungsgeometrien verursacht. Die Unregelmäßigkeiten der Verzahnung bei den Kunststoffkettenrädern sind den Herausforderungen der Herstellungsmethode durch Fräsen geschuldet. Diese könnten bei einer seriellen Produktion mittels Spritzgießen vermieden werden.

Nach der Verifizierung einer Reibreduktion und dem Potential von Geräuschreduzierungen durch Verwendung der genannten Kunststoffe wurde im nächsten Schritt die Verschleißfestigkeit der Materialtypen auf Verschleißprüfständen bei iwis mobility systems erprobt. Dazu wurden entsprechende Musterkettenräder beauftragt und bereits geliefert (siehe Abbildung 75). Eine Teilmenge der PEEK-Kettenräder wurde vom IWS mit ta-C beschichtet.

Verschleißuntersuchungen am Verspann-Prüfstand

Die vorangegangenen Untersuchungen zeigten für den Einsatz von Kettenrädern aus VESTAKEEP® 5000G (PEEK) und VESTAKEEP® 4000 CF30 (PEEK CF) im Vergleich zu den Kettenrädern aus Stahl eine Reibreduzierung um 8-13 % (PEEK-CF) bzw. 20-25 % (PEEK) in Abhängigkeit der Drehzahl. Im nächsten Schritt wurde die Verschleißfestigkeit der Materialtypen auf den Verspann-Prüfständen der Firma iwis mobility systems untersucht.

Am Verspann-Prüfstand (siehe Abbildung 75:) werden auf jeder Seite zwei Kettenräder – ein großes und ein kleines – gegeneinander verspannt. Dabei entstehen ein Zug- und ein Leertrum, die bei beiden Ketten spiegelsymmetrisch zueinander angeordnet sind (vgl. Abbildung 75:, Mitte).

Die Kettenzugkraft wird über eine Spindel durch einen Stellmotor definiert aufgebracht. Sowohl die Drehzahl als auch die Zugkraft werden kontinuierlich überwacht und geregelt. Der Prüfstand dient

primär zur Ermittlung der Kettenverschleißverlängerung unter wechselnden Betriebsbedingungen wie Drehzahl, Kraft und Schmiermittel.

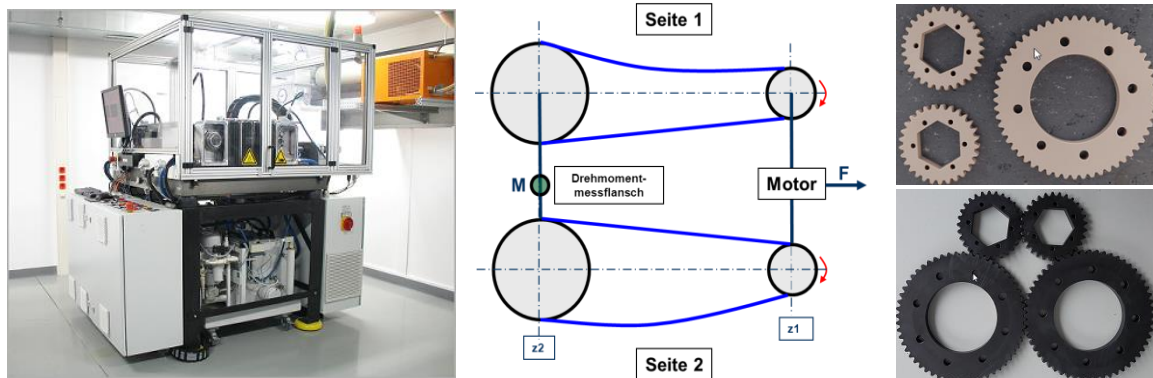


Abbildung 75: Verspann-Prüfstand (Links und Mitte), sowie Kettenräder aus PEEK (Rechts oben) und PEEK-CF (Rechts unten)

Bei vergleichenden Verschleißuntersuchungen der Ketten kann das Fehlen einer Kettenführung vernachlässigt werden. Aufgrund der symmetrischen Anordnung werden ausschließlich Ketten miteinander verglichen, die auf derselben Seite gelaufen sind. Der Prüfstand wurde hier zweckentfremdet zur Beurteilung von Kettenrädern eingesetzt. Die kleinen Stahlkettenräder konnten aufgrund der fehlenden Kettenführung nicht durch Kunststoffkettenräder ersetzt werden.

Die Versuche erfolgten unter folgenden Bedingungen: 4000 U/min Drehzahl, 981 N Kettenzugkraft, Ölzufuhr von 1 l/min bei 90 °C mit frischem Motoröl (Castrol 5W30).

Die Kettenräder aus PEEK sowie PEEK-CF wurden aus von Evonik bereitgestellten Rohlingen gefertigt. Pro Materialvariante wurden jeweils zwei Sätze gefräst. Die Testreihen wurden um zwei zusätzliche Varianten mit einer 5 µm dicken ta-C:N-Einlaufschicht, aufgebracht am IWS, ergänzt. Ein Prüflauf zur Bestimmung der Kettenverlängerung dauert in der Regel etwa 300 bis 400 Stunden.

Unbeschichtetes PEEK zeigte unter den Testbedingungen keine flächigen Verschleißerscheinungen. Die Zahnflanken wiesen lediglich optische Abdrücke der Zahnkette auf. Vereinzelt trat Micro-Pitting auf, welches durch die ta-C:N-Beschichtung unter den gleichen Bedingungen verhindert werden konnte. An den Zahnköpfen traten jedoch vereinzelt Abplatzungen der Beschichtung auf, was auf punktuelle Druckbelastungen hindeutet. Die einseitige Häufung dieser Abplatzungen lässt auf eine asymmetrische Belastung im Prüfstand schließen.

Unbeschichtetes PEEK-CF zeigte nach 352 Stunden lediglich optische Abdrücke an den Zahnflanken, jedoch keinen signifikanten Verschleiß. Auch die beschichteten Varianten aus PEEK-CF zeigten keine Abdrücke im Bereich der Zahnflanken und verhielten sich vergleichbar zu den beschichteten PEEK-Kettenrädern.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das unbeschichtete PEEK-CF-Kettenrad sowie beide beschichteten Varianten unter den gegebenen Testbedingungen nach 400 (bzw. 352) Stunden nur minimale Verschleißerscheinungen aufwiesen. Das unbeschichtete PEEK-Kettenrad zeigte hingegen bereits unter diesen vergleichsweisen milden Bedingungen erste Anzeichen von Micro-Pitting.

Da in vorhergehenden Reibungsuntersuchungen das größte Potenzial in der Verwendung von reinem PEEK identifiziert wurde, sollte dieses Material im nächsten Schritt unter realitätsnäheren Bedingungen auf einem Zylinderkopfprüfstand untersucht werden. In diesem Aufbau wurde die Kette mittels eines Kettenspanners definiert an das Kettenrad geführt. Zudem stellt eine im Verspann-Prüfstand eingesetzte Zahnkette generell höhere Anforderungen an das Kettenrad als eine einfache Hüslengliederkette. Aus diesem Grund wurde der Prüflauf auf dem Zylinderkopfprüfstand mit einer Hüslengliederkette durchgeführt.

Verschleiß- und NVH-Untersuchungen am Zylinderkopfprüfstand

Für den geplanten Zylinderkopfprüflauf wird das Bx8 Steuertriebs-Layout verwendet (Abbildung 76:). Der Antrieb findet über das Kurbelwellen-Kettenrad mit Hilfe eines E-Motors statt. Die Belastung des

Steuertriebs wird realitätsnah durch Nockenwellen und Ventilern abgebildet. Zu diesem Zweck muss eine Adaption der Nockenwellen-Kettenräder erfolgen. Alle anderen Komponenten bleiben unverändert zum Serienstand des Bx8. Der Betriebslauf fand mit nahezu Frischöl statt. Vor dem Versuch wurde der Prüfstand mit Rußöl betrieben. Trotz mehrfachem Spülen verbleibt ein geringer Anteil an Ruß im Öl, somit ist von einem geringen Rußanteil bei dem Versuch auszugehen.

Die Akustik-Untersuchungen wurden jeweils im Anschluss an den Prüflauf im Zylinderkopf-Prüfstand durchgeführt, so dass von einem eingelaufenen Zustand ausgegangen wird. In Abbildung 76: (Mitte) sind die Messpunkte zur Untersuchung des Akustikverhaltens aufgeführt. Der Prüflauf wurde in einem Drehzahlhochlauf jeweils bei Öl-Temperaturen von 70 °C und 90 °C, sowie bei Drehzahlen von 1000, 2000, 3000 und 4000 U/min (Kurbelwelle) gefahren (siehe Tabelle 4). Zur Untersuchung der Akustik fanden vergleichende Ordnungs-Auswertung der Körperschall-Signale statt.

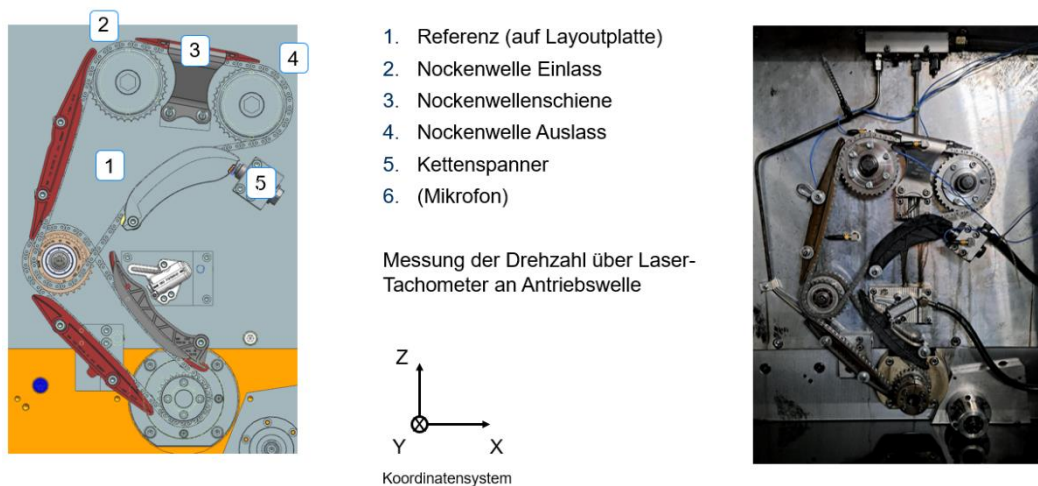


Abbildung 76: Zylinderkopfprüfstand unter Verwendung des Bx8 Steuertriebs-Layout

Hinsichtlich Akustik werden Stahl- mit PEEK-Kettenräder nach dem 200 h Dauerlauf bzgl. der 18. Ordnung (Zähnezahl Kurbelwellen-Kettenrad) miteinander verglichen. Zwischen 70 °C und 90 °C Öltemperatur zeigen sich bei Stahl-Kettenrädern teilweise minimale Unterschiede (2–3 dB). Mit PEEK-Kettenrädern sind praktisch keine Unterschiede sichtbar.

Im Folgenden wurden Stahl mit PEEK-Kettenrädern bei 70 °C Öltemperatur verglichen. Hier zeigt sich vor allem in zwei Bereichen ein etwas besseres Verhalten mit PEEK-Kettenrädern. In einem Drehzahlbereich von 2200 bis 2700/ 2800 U/min sind Vorteile für PEEK zusehen (bis –7 dB). Ab 3400/ 3600 U/min bis 4000 U/min ist in allen Sensoren (außer NW-Schiene) ein deutlicher Vorteil für PEEK zu sehen (bis –7 dB). Teilweise vorteilhaft ist PEEK im Drehzahlbereich 3100–3400 U/min (Einlass-NW, Kettenspanner). Leicht schlechtere Ergebnisse liefert PEEK im Bereich 1600–2000 U/min (bis +2–4 dB). (Ein-/Auslass-NW, Kettenspanner).

Am deutlichsten sind die Unterschiede generell in den Sensorpositionen Einlass-Nockenwelle und Kettenspanner sichtbar. Weniger deutlich an der Auslass-Nockenwelle. An der Nockenwellenschiene ist über fast den gesamten Drehzahlbereich (1100–3500 U/min) ein geringerer Pegel mit PEEK-Kettenrädern sichtbar (bis –7 dB). Ab 3500 U/min aufwärts liegen beide Materialien auf gleichem Niveau.

Tabelle 4: Versuchsdurchführung

Laufzeit [h]	0-25	25-50	50-75	75-100	100-125	125-150	150-175	175-200
Drehzahl [rpm]	1000	1000	2000	2000	3000	3000	4000	4000
Öltemperatur [°C]	70	90	70	90	70	90	70	90

Die PEEK-Kettenräder wiesen leichte Laufspuren im Eingriffsbereich und leichte Anlaufspuren an den seitlichen Flanken auf. Außerdem waren minimale Materialeinlagerungen sichtbar. Ansonsten

waren keine Auffälligkeiten vorhanden. Die Kettenräder befanden sich in einem unauffälligen Zustand (siehe Abbildung 77).

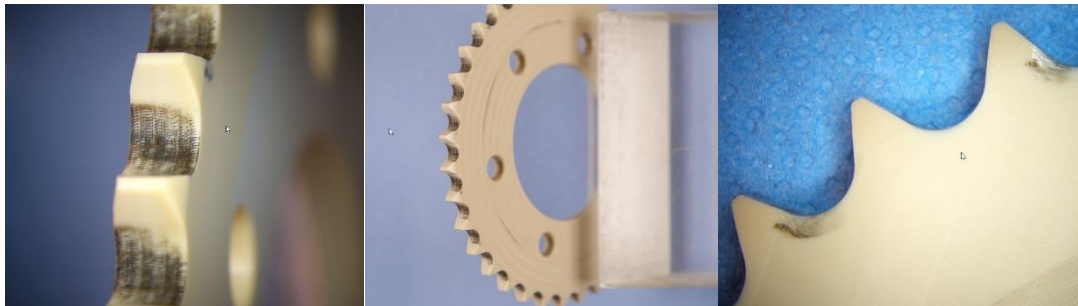


Abbildung 77: Kettenrad nach 200 h Versuchslauf auf dem Zylinderkopfprüfstand

Zusammenfassung der Arbeiten

Im Rahmen dieses Anwendungsfalls wurde untersucht, ob sich Kettenräder aus Hochleistungskunststoffen wie PEEK als Ersatz für Stahlkomponenten im Ventiltrieb von BMW-Motorrädern eignen. Ziel war es, Reibung, Geräuschentwicklung (NVH) und Kosten zu reduzieren. Versuche am Multifunktionsreibprüfstand ergaben eine Reibungsminderung von 8–13 % bei PEEK-CF und 20–25 % bei reinem PEEK im Vergleich zu Stahl. Auch in akustischer Hinsicht zeigte PEEK insbesondere bei höheren Drehzahlen Vorteile. In den Verschleißtests am Verspann-Prüfstand traten bei unbeschichteten Kunststoffrädern frühzeitig Materialschäden auf, die sich durch eine ta-C:N-Beschichtung deutlich verringern ließen. Weitere Tests am Zylinderkopfprüfstand bestätigten die guten akustischen Eigenschaften sowie die erforderliche Verschleißfestigkeit von PEEK unter realitätsnahen Bedingungen. Insgesamt erweist sich PEEK – insbesondere in beschichteter Ausführung – als vielversprechende Alternative zu Stahl, bedarf jedoch weiterer Optimierung hinsichtlich Herstellung und Beschichtung.

1.2.6 Anwendungsfall E-Bike-Getriebe

Der vorliegende Anwendungsfall unter der Leitung von hGears fokussiert auf das Zahnradgetriebe einer E-Bike-Drive-Unit mit dem primären Ziel, Antriebsverluste zu reduzieren, ohne die Tragfähigkeit der Getriebekomponenten zu beeinträchtigen. Hierzu wurde bewusst ein nicht weiterentwickeltes, dreistufiges Stirnradgetriebe ausgewählt, um vorhandene technische Rahmenbedingungen, wie sie bei bestehenden Serienlösungen vorgegeben sein können, gezielt zu umgehen. Dies schaffte Raum für die gezielte Integration neuartiger Technologien und Werkstoffe, insbesondere hinsichtlich innovativer Materialien, Beschichtungstechnologien und Schmierstoffsysteme.

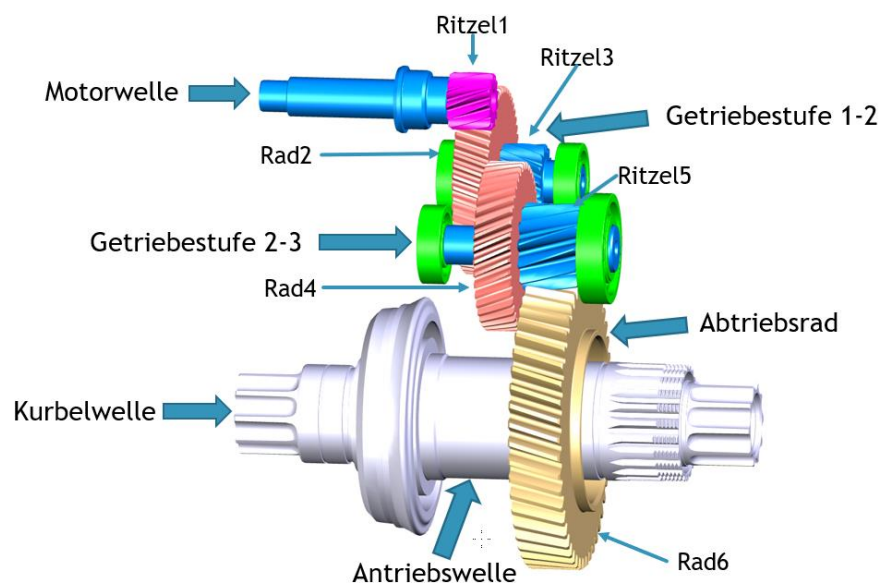


Abbildung 78: Aufbau des ausgelegten E-Bike-Getriebes

Die experimentelle Untersuchung basierte auf einer matrixgestützten Versuchsdurchführung, welche den systematischen Vergleich unterschiedlicher Getriebekonfigurationen ermöglichte. Zur Erfassung von Referenzdaten und zur Validierung des Versuchsaufbaus wurde ein dreistufiges Stirnradgetriebe aus dem Einsatzstahl 16MnCrS5 konstruiert. Es orientierte sich an marktüblichen Lösungen, wurde jedoch ohne mikrogeometrische Modifikationen gefertigt und in ein modular aufgebautes Versuchsgehäuse aus Aluminium integriert, welches anschließend durch ein eigens konstruiertes Getriebegehäuse ersetzt wurde. Abbildung 78 veranschaulicht den schematischen Aufbau des Getriebes in der Stahlvariante.

Die Bestimmung der Antriebsverluste erfolgte mittels experimenteller Untersuchungen auf einem eigens hierfür entwickelten Prüfstand (vgl. Abbildung 79). Das jeweilige Testgetriebe wurde auf der Antriebsseite durch einen Elektromotor mit einem definierten Drehmoment beaufschlagt. Die Abtriebsseite war mit einem Bremsmotor verbunden, welcher über eine integrierte Drehmomentregelung verfügte. Zur Erfassung der Drehmomente an Ein- und Ausgang wurden präzise Drehmomentaufnehmer eingesetzt.

Das prozentuale Momentverlustverhalten ε_M wird auf Basis des Verhältnisses zwischen dem Eingangsdrehmoment M_{Eingang} , dem Ausgangsdrehmoment M_{Ausgang} , sowie dem Übersetzungsverhältnis des Getriebes i_{ges} wie folgt berechnet:

$$\varepsilon_M = \left(\frac{M_{\text{Eingang}}}{M_{\text{Ausgang}} \cdot i} \right) - 1$$

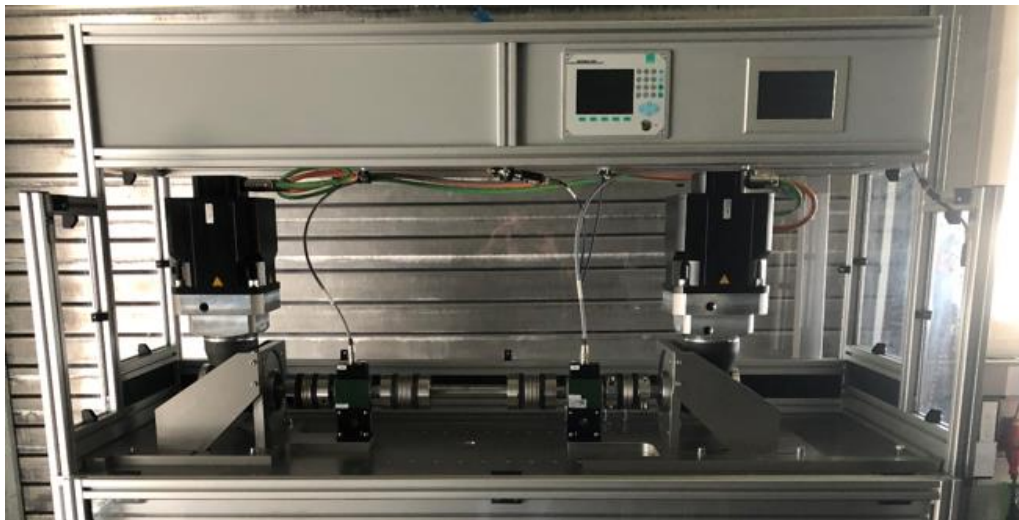


Abbildung 79: Getriebeprüfstand

Die Antriebsseite des Prüfstands ist mit einem Elektromotor ausgestattet, der in Verbindung mit dem aufgebauten Versuchsgetriebe einen variablen Drehzahlbereich von 1 min^{-1} bis 750 min^{-1} abdeckt. Auf der Abtriebsseite befindet sich ein Bremsmotor, der in der Lage ist, ein Drehmoment zwischen 0 Nm und 200 Nm aufzunehmen. Diese Konfiguration ermöglicht die Untersuchung verschiedener Getriebevarianten unter variierenden Lastbedingungen.

Der Getriebeprüfstand erlaubt die Erfassung folgender physikalischer Messgrößen:

- Antriebsverluste
- Drehzahl
- Drehmoment

Die Messung der Antriebsverluste stellte dabei einen zentralen Untersuchungsgegenstand dar, da sie direkte Rückschlüsse auf die Effizienz des betrachteten Getriebes zulässt. Die gewonnenen Messdaten bildeten die Grundlage für die Identifikation von Optimierungspotenzialen, mit dem Ziel,

den mechanischen Wirkungsgrad der Getriebe weiter zu verbessern. Durch gezielte konstruktive und tribologische Modifikationen können Reibungsverluste reduziert und somit die Gesamtleistung des Antriebssystems gesteigert werden.

Der beschriebene Getriebeprüfstand stellt ein leistungsfähiges Instrument zur Untersuchung der genannten Aspekte unter realitätsnahen Bedingungen dar. Insbesondere die detaillierte Analyse der Antriebsverluste ermöglichte eine fundierte energetische Bewertung von E-Bike-Getrieben. Zukünftige Untersuchungen könnten sich auf die Weiterentwicklung innovativer Werkstoffe und Schmierstoffsysteme konzentrieren, um die Reibungsverluste weiter zu minimieren und die Lebensdauer der Getriebekomponenten nachhaltig zu erhöhen.

Zur Gewährleistung einer hohen Vergleichbarkeit der Messergebnisse wurden sämtliche Untersuchungen unter definierten Soll-Abtriebsdrehmomenten durchgeführt. Das zugrunde gelegte Lastkollektiv wurde so ausgelegt, dass alle praxisrelevanten Betriebsbereiche von E-Bike-Getrieben abgedeckt werden. Auf diese Weise wurde eine möglichst realitätsnahe Prüfumgebung geschaffen, die eine fundierte Bewertung des Systemverhaltens unter feldtypischen Lastbedingungen erlaubt. Die konkreten Soll-Drehmomentwerte sind in Abbildung 80 dargestellt.

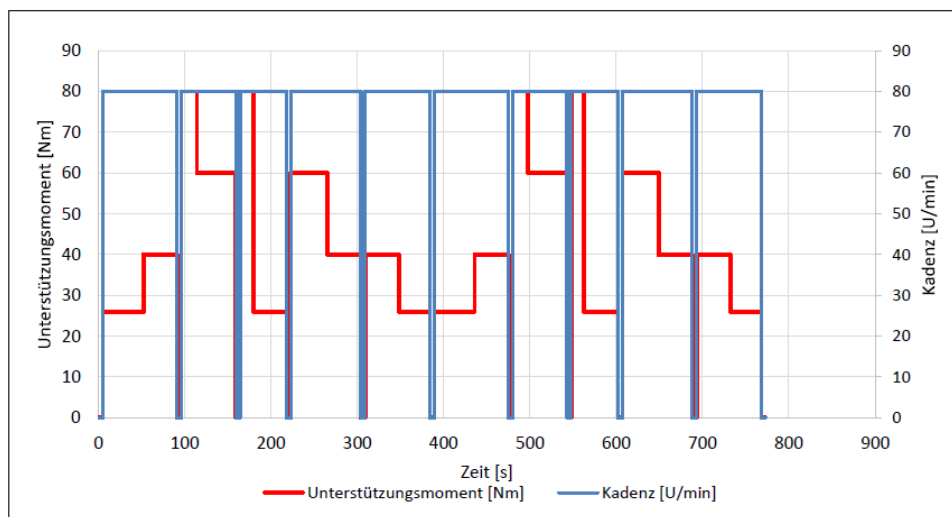


Abbildung 80: Verwendetes Lastkollektiv für den Getriebeprüfstand

Zusätzlich wurde von der Firma hGears ein E-Bike-Gehäuse konstruiert und gefertigt (siehe Abbildung 81). Hierzu wurden zunächst Informationen über am Markt eingesetzte Gehäuse gesammelt. Auf dieser Grundlage wurde ein auf das Stirnradgetriebe angepasstes Modell entwickelt, das die Einbau- und Lagersituation der Stirnräder unter Berücksichtigung markttypischer Fertigungstoleranzen gewährleistet. Die Herstellung des Gehäuses erfolgte aus Vollmaterial mittels eines hochpräzisen 5-Achs-Fräsverfahrens. Um eine fehlerfreie Integration und Verbindung zum Getriebeprüfstand zu gewährleisten, war es erforderlich die Konzeptionierung der Motor- und Abtriebswellen des Getriebes auf die Flanschmaße des Prüfstands anzupassen.

Neben den Erprobungen auf dem zuvor beschriebenen Getriebeprüfstand wurde jede Radpaarung der verwendeten Testgetriebe sowohl vor als auch nach den Leistungstests einer Abwälzprüfung auf einer Einflanken-Messmaschine unterzogen. Diese Untersuchung dient der Bewertung des Einlaufverhaltens sowie der Analyse des Eingriffs der Radpaarungen über die gesamte zur Verfügung stehende Zahnbreite. Darüber hinaus ermöglicht sie die Identifikation möglicher Einflüsse des Prüfstands auf das Abwälzverhalten der Radpaarungen. Die folgenden Radpaarungen wurden geprüft und aufgebaut:

- Motorwelle (Ritzel 1) zu Getriebestufe 1-2 (Rad 2)
- Getriebestufe 1-2 (Ritzel 3) zu Getriebestufe 2-3 (Rad 4)
- Getriebestufe 2-3 (Ritzel 5) zu Abtriebsrad (Rad 6)

In einem weiteren Schritt wurde die erforderliche mikrogeometrische Anpassung der Verzahnung der Stahlstirnräder unter Berücksichtigung der Kontaktfläche des Zahneingriffs bei einem Unterstützungsdrehmoment des Elektromotors von 80 Nm simuliert und optimiert (siehe Abbildung 82). Diese Simulation erfolgte auf der Grundlage der Gehäuseentwicklung, der vorherrschenden Lagersituation, der Achsabstände sowie der wirkenden Kräfte. Auf Basis der Simulationen wurden die Zahnmodifikationen im Teilungsschleifverfahren auf die Zahnräder aufgebracht, um eine präzise und belastungsoptimierte Zahngeometrie zu gewährleisten.



Abbildung 81: E-Bike-Gehäuse

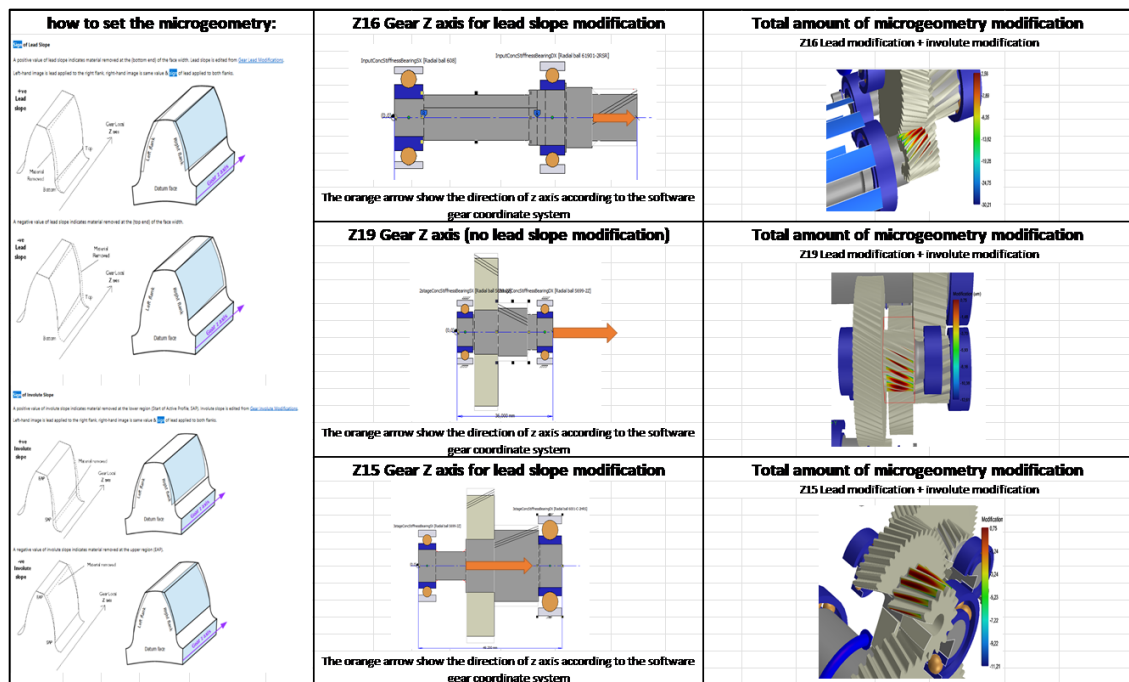


Abbildung 82: Auslegung Mikrogeometrie

Ziel der Kooperation von hGears, Evonik und FZG war die Substitution von Metall- durch Kunststoffzahnradern im Zahnradgetriebe. Berechnungen und Simulationen sollten zunächst jene Komponenten identifizieren, bei denen ein Kunststoffeinsatz aufgrund der im Einsatz zu erwartenden Kräfte möglich ist.

Der Partner FZG hat die Auslegung des E-Bike-Getriebes mit Kunststoffzahnradern durchgeführt. Hierzu stellte Evonik die erforderlichen Werkstoffdaten zur Verfügung und übermittelte die Parameter für den Werkstoff PEEK bereits für die erste Evolutionsstufe des Kunststoffgetriebes an die FZG. Nach der Bewertung der Getriebeauslegung mit verschiedenen Kunststoffen wurde seitens hGears mit der Fertigung der Komponenten des E-Bike-Getriebes aus den vielversprechendsten Kunststoffen begonnen. Nach der Fertigstellung wurden die Getriebe den zuvor beschriebenen Tests auf dem Getriebeprüfstand unterzogen.

Berechnung von Tragfähigkeit und Verlustleistung (FZG)

Durch den Partner FZG wurde eine Auslegung des E-Bike-Getriebes mit Kunststoffzahnradern durchgeführt. Dabei wurde der Hochleistungskunststoff PEEK zugrunde gelegt, um die hohen Anforderungen an Tragfähigkeit bzgl. des Bauraums zu erfüllen. Für die Berechnung der Tragfähigkeit wurde eine Öltauchschmierung bei 50 °C sowie eine geforderte Lebensdauer von 1000 h mit gegebenem Belastungskollektiv angenommen. Im ersten Schritt wurde die Referenzgeometrie des Getriebes, für das ein üblicher Einsatzstahl (16MnCr5) zum Einsatz kam, durch PEEK als Zahnradwerkstoff substituiert. Durch die Verwendung von PEEK-Zahnradern konnten die durch Reibung im Zahnkontakt bedingten lastabhängigen Verzahnungsverlustleistungen P_{VZP} rechnerisch um mehr als 90 % reduziert werden (vgl. Abbildung 83 rechts), was auf die niedrigen Reibungszahlen bei großen relativen Schmierfilmdicken im ölgeschmierten Wälzkontakt mit PEEK zurückzuführen ist. Dieser Umstand lässt sich durch die signifikant geringeren Pressungen im Zahnkontakt sowie die erhöhten relativen Schmierfilmdicken erklären. Letztere resultieren aus den bei Kunststoffkontakten höheren Schmierfilmdicken bei gleichzeitig weniger rauen Oberflächen der spritzgegossenen Kunststoffzahnradern. Da die Tragfähigkeit bei identischer Geometrie mit PEEK-Zahnradern geringer ausfällt als mit Stahlrädern, wurden die Zahnräder um 20 mm verbreitert, sodass eine ähnliche Sicherheit gegen Grübchen erzielt wird (siehe Abbildung 83). Eine Verzahnungsverbreiterung von 20 mm ist aufgrund gegebener Randbedingungen für eine direkte Umsetzung jedoch zunächst nicht zielführend. Die Stufen 1 und 2 haben aufgrund der höchsten Sicherheiten gegen Grübchen das höchste Potential zum Einsatz von Kunststoffzahnradern. Daher wurden im weiteren Vorgehen gezielt diese beiden Stufen betrachtet.

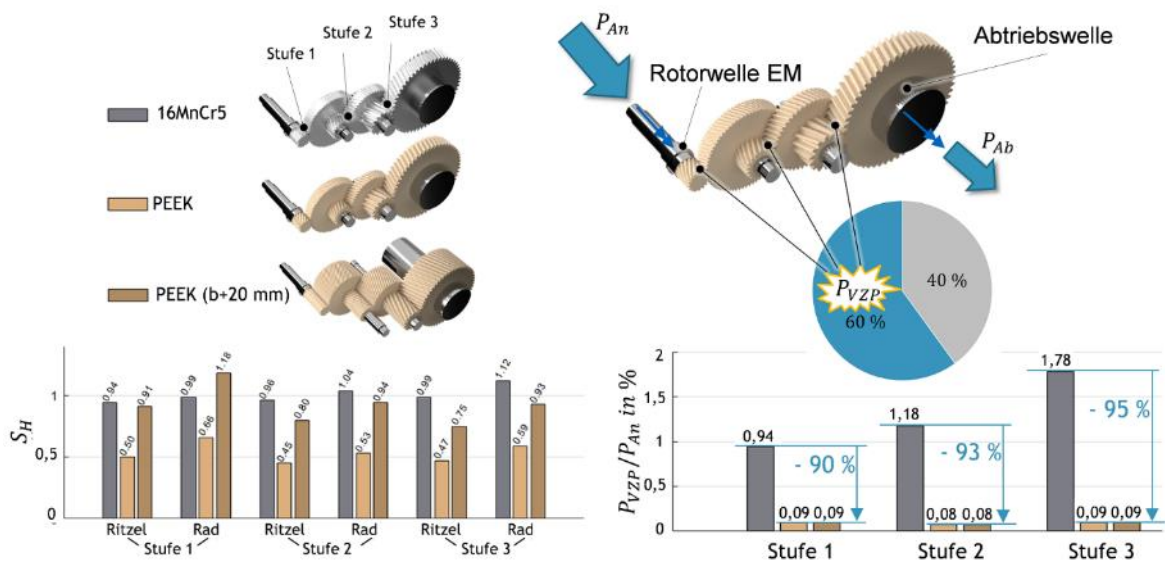


Abbildung 83: Auslegung und Nachrechnung des E-Bike-Getriebes mit Kunststoffzahnradern hinsichtlich Tragfähigkeit und lastabhängiger Verlustleistung

Im Rahmen der Verzahnungsberechnungen des Partners FZG wurde ermittelt, dass das Rad 2 der Getriebestufe 1–2 am besten für eine Fertigung aus Kunststoff geeignet ist. Im ersten Schritt schlug Evonik, basierend auf dem technischen Anforderungsprofil, die Kunststoffe VESTAKEEP® 5000G und VESTAKEEP® 4000CF30 vor. In enger Zusammenarbeit mit Evonik wurde entschieden, den Kunststoff VESTAKEEP® 5000G zu verwenden, der hGears zur Herstellung der Komponenten bereitgestellt wurde.

Nachdem die Herstellung der für das Getriebe benötigten Kunststoffkomponenten abgeschlossen war, stellte hGears den Partnern IWS, IOT und VON ARDENNE Zahnräder (Rad 2 und Rad 6) zur Verfügung, die mit verschiedenen Beschichtungen versehen wurden. Nach dem Erhalt der beschichteten Komponenten wurden diese in das E-Bike-Getriebe mit Kunststoffzahnradern eingebaut und anschließend mit dem bereits für die Stahlvarianten definierten Belastungskollektiv (siehe Abbildung 80) auf dem Getriebeprüfstand getestet.

Für die ersten Versuche auf dem Getriebeprüfstand wurde ein Standardschmierstoff der Firma Klüber verwendet. Um den Einfluss verschiedener Schmierstoffe und -mengen auf die entstehenden Verluste zu bewerten, fanden Gespräche mit dem Partner FUCHS statt. Dieser stellte für die Untersuchungen des E-Bike-Getriebes auf dem Prüfstand den neuen Schmierstoff Ceph-CX001 MFA-Nr.:111087690 zur Verfügung.

Trotz der Simulationsergebnisse von der FZG wurde ein Exkurs durchgeführt, bei dem das Abtriebsrad (Rad 6) ebenfalls aus Kunststoff hergestellt werden sollte. Aufgrund der Berechnungen der FZG war bereits klar, dass Rad 6 den Belastungen von 80 Nm nicht standhalten würde. Um die hohen Produktionskosten und das Gewicht des Radsatzes der Drive Unit, insbesondere des komplexen Bauteils Rad 6, zu reduzieren, wurde ein physischer Versuch gestartet, der darauf abzielte, die Grenzmomente des Kunststoffrads iterativ zu ermitteln. Hierbei wurden diverse Getriebeaufbauten mit abnehmenden Drehmomenten von 80 Nm in 5 Nm-Schritten beaufschlagt. Das in Abbildung 80 ersichtliche Lastkollektiv wurde diesbezüglich hinsichtlich des Peak-Drehmoments absteigend angepasst. Die Ergebnisse dieser Tests zeigten, dass Rad 6 einer Belastung von bis zu 50 Nm kurzzeitig standhalten kann. Es wird festgehalten, dass die oben genannten Annahmen in einem späteren Schritt, außerhalb des aktuellen Projektzeitraums, durch Lebensdauerberechnungen und Tests verifiziert werden müssten. Der Kunststoffeinsatz könnte insbesondere im Bereich der drehmomentreduzierten E-Bike-Antriebe unter den Gesichtspunkten der Gewichtsreduktion und der Herstellkosten von Interesse sein.

Erzielte Arbeitsergebnisse

Für die Tests auf dem Getriebeprüfstand wurden insgesamt 64 verschiedene Getriebe gefertigt, die in unterschiedlichen Ausführungen hergestellt wurden. Diese umfassen:

- 26 Getriebe ausschließlich aus Stahl, unterteilt in:
 - 20 beschichtungslose Getriebe
 - 6 Getriebe aus Stahl, jeweils mit einer ta-C-Beschichtung am Rad 2 und Rad 6, die vom Partner IWS bereitgestellt wurde
- 38 Getriebe mit Kunststoffkomponenten, unterteilt in:
 - 12 Getriebe, bei denen sowohl Rad 2 als auch Rad 6 aus dem Kunststoff VESTAKEEP® 5000G gefertigt wurden:
 - 4 beschichtungslose Getriebe
 - 4 Getriebe mit der Beschichtung PEEK+ta-C1, bereitgestellt durch den Partner IWS
 - 4 Getriebe mit der Beschichtung PEEK+ta-C3, ebenfalls bereitgestellt durch den Partner IWS
 - 26 Getriebe, bei denen nur Rad 2 aus Kunststoff VESTAKEEP® 5000G gefertigt wurden:
 - 2 beschichtungslose Getriebe
 - 4 Getriebe mit der Beschichtung PEEK+ta-C1 vom Partner IWS
 - 4 Getriebe mit der Beschichtung PEEK+ta-C3 vom Partner IWS
 - 4 Getriebe mit der Beschichtung PEEK+CrAlMoN, bereitgestellt durch den Partner IOT
 - 4 Getriebe mit der Beschichtung PEEK1, bereitgestellt durch den Partner VON ARDENNE
 - 4 Getriebe mit der Beschichtung PEEK2, bereitgestellt durch den Partner VON ARDENNE
 - 4 Getriebe mit der Beschichtung PEEK43, bereitgestellt durch den Partner VON ARDENNE

Die verschiedenen Getriebevarianten wurden anschließend sowohl auf dem Getriebeprüfstand als auch auf der Einflanken-Messmaschine getestet. Die dabei gewonnenen Ergebnisse wurden systematisch erfasst und sowohl tabellarisch als auch graphisch dargestellt.

In Abbildung 84 sind fünf verschiedene Stahlradgetriebe gegenübergestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Graphen 1 bis 4 Versuchen mit Getrieben ohne Schmierstoff zugeordnet sind, während Graph 5 den Versuch mit 2 g Schmierstoff darstellt.

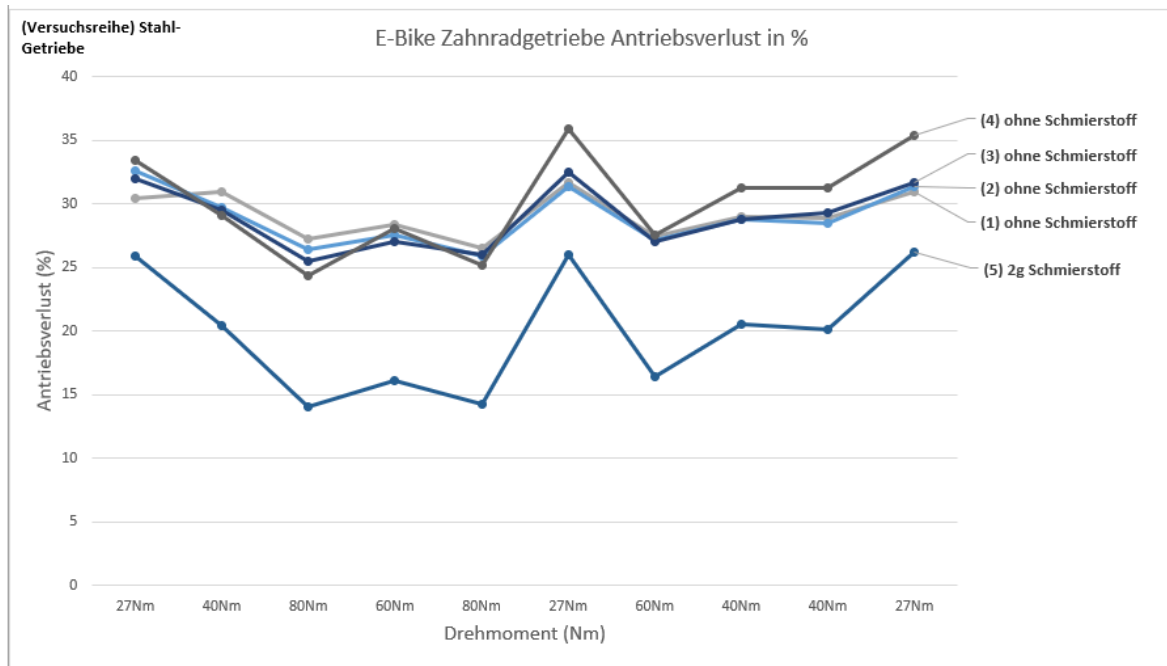


Abbildung 84: E-Bike-Getriebe: Auswertung aus Stahl mit 2 g Schmierstoff pro Getriebeaufbau

In Abbildung 85 sind die graphischen Ergebnisse der Kunststoff-Getriebe dargestellt, die mit verschiedenen Beschichtungen der Partner IWS, VON ARDENNE und IOT sowie unterschiedlichen Schmierstoffen der Firmen Klüber (Standard) und FUCHS ausgestattet wurden. Bei diesen Kunststoff-Getrieben wurde ausschließlich Rad 2 aus dem Kunststoff VESTAKEEP® 5000 G gefertigt.

Um die ursprünglich definierten Rahmenbedingungen zu wahren und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten, wurde für die im Folgenden beschriebenen Versuche erneut das in Abbildung 80 dargestellte Lastkollektiv herangezogen.

Abbildung 85 veranschaulicht, dass das kunststoffbasierte E-Bike-Getriebe bei einem Unterstützungsmoment von 80 Nm die geringsten Verluste aufweist, wenn Rad 2 aus unbeschichtetem Kunststoff gefertigt ist und mit dem Standardschmierstoff der Firma Klüber betrieben wird.

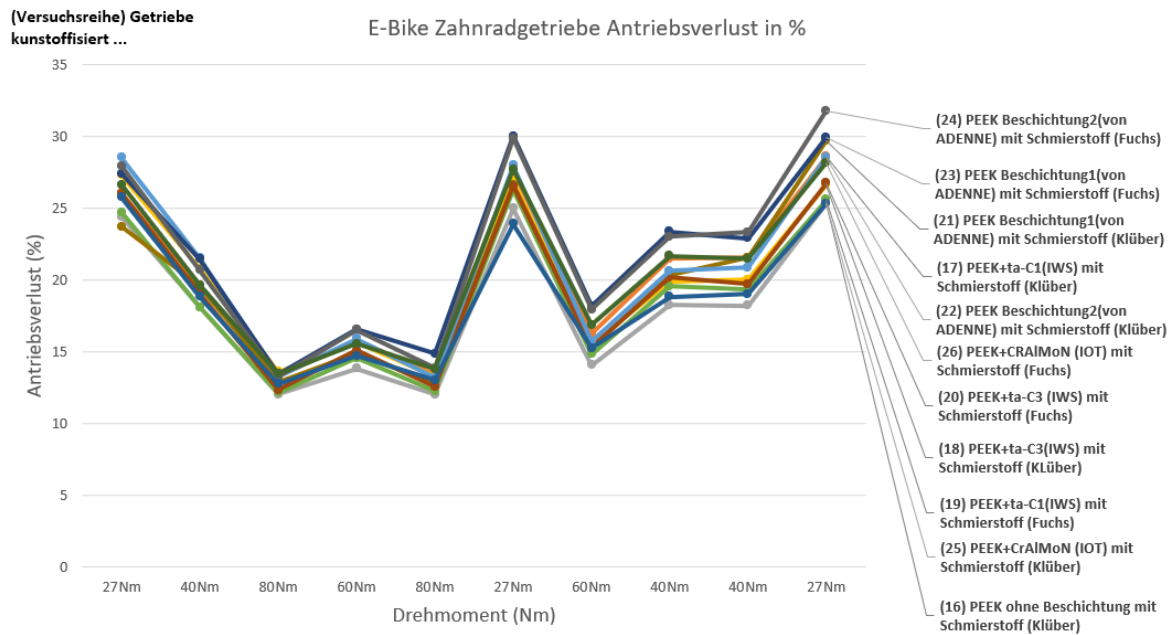


Abbildung 85: E-Bike-Getriebe: Auswertung Kunststoff-Getriebe (Rad 2)

In Abbildung 86 dienen die Ergebnisse des aus Stahl gefertigten E-Bike-Getriebes als Referenz, sowohl im Betrieb ohne Schmierstoff als auch mit einer Schmierstoffmenge von 3 g des Standardschmierstoffs der Firma Klüber. Diese Referenz wurde anschließend mit den unterschiedlichen Kunststoff-Getriebevarianten in Relation gesetzt.

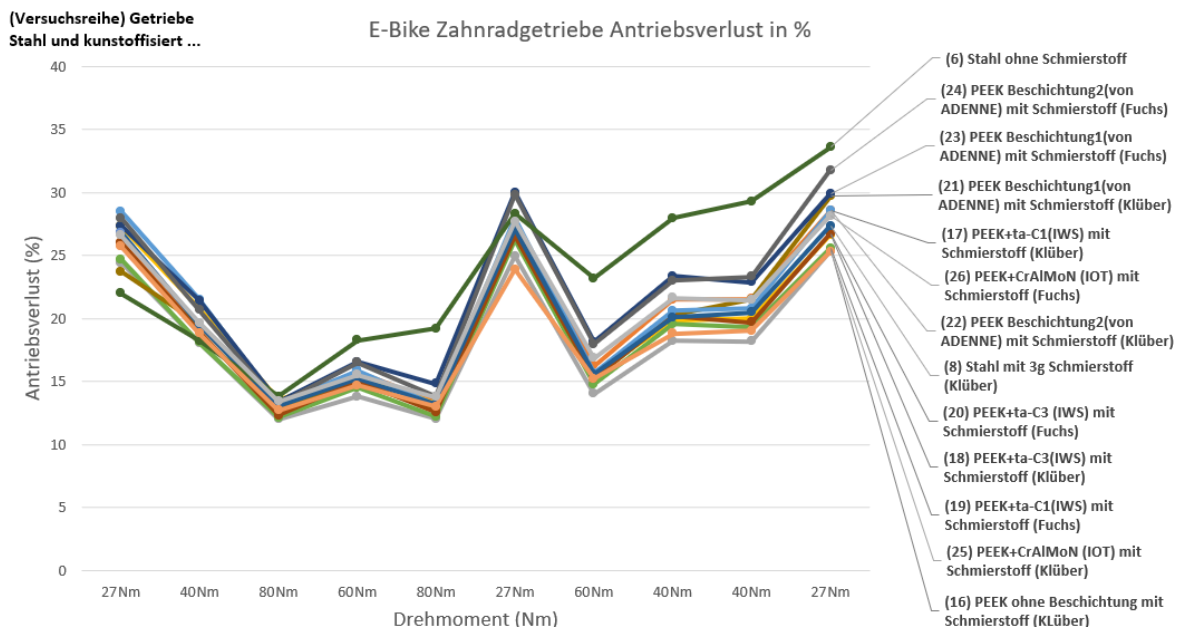


Abbildung 86: E-Bike-Getriebe: Vergleich Stahlradgetriebe zu Kunststoff-Getriebe

Versuche zur Verlustanalyse an E-Bike-Getrieben aus Stahl und Kunststoff wurden erfolgreich durchgeführt und abgeschlossen. In Tabelle 5 sind die untersuchten Getriebevarianten, sowie die durchschnittlichen Antriebsverluste während der Projektlaufzeit aufgeführt.

Tabelle 5: Untersuchte Getriebevarianten und Ergebnisse während der Projektlaufzeit

Getriebe Nummer	Getriebe Variante	Antriebsverlust (xquer)	Validierung über Lebensdaueranalyse sinnvoll (Da in CHEPHREN nicht enthalten)
6	Stahlgetriebe ohne Schmierstoff	23,4	
7	Stahlgetriebe mit 2g Schmierstoff Klüber	19,7	
8	Stahlgetriebe mit 3g Schmierstoff Klüber	19,2	
9	Stahlgetriebe mit 4g Schmierstoff Klüber	19,8	
16	Kunststoffgetriebe ohne Beschichtung, mit 3g Schmierstoff Klüber	18,1	ja
17	Kunststoffgetriebe mit Beschichtung ta-C1 IWS, 3g Schmierstoff Klüber	20,3	
18	Kunststoffgetriebe mit Beschichtung ta-C3 IWS, 3g Schmierstoff Klüber	19,9	
19	Kunststoffgetriebe mit Beschichtung ta-C1 IWS, 3g Schmierstoff Fuchs	18,7	ja
20	Kunststoffgetriebe mit Beschichtung ta-C3 IWS, 3g Schmierstoff Fuchs	19,3	
21	Kunststoffgetriebe mit Beschichtung 1 von ADENNE, 3g Schmierstoff Klüber	19,7	
22	Kunststoffgetriebe mit Beschichtung 2 von ADENNE, 3g Schmierstoff Klüber	20,6	
23	Kunststoffgetriebe mit Beschichtung 1 von ADENNE, 3g Schmierstoff Fuchs	21,8	
24	Kunststoffgetriebe mit Beschichtung 2 von ADENNE, 3g Schmierstoff Fuchs	21,8	
25	Kunststoffgetriebe mit Beschichtung CrAlMoN IOT, 3g Schmierstoff Klüber	18,7	ja
26	Kunststoffgetriebe mit Beschichtung CrAlMoN IOT, 3g Schmierstoff Fuchs	20,5	
27	Kunststoffgetriebe mit Beschichtung 43 von ADENNE, 3g Schmierstoff Fuchs	20,4	
28	Kunststoffgetriebe mit Beschichtung 43 von ADENNE, 3g Schmierstoff Fuchs	21,6	
29	Stahlgetriebe mit 3g Schmierstoff Fuchs	21,7	
30	Stahlradgetriebe mit Beschichtung IWS, ohne Schmierstoff	35,7	
31	Stahlradgetriebe mit Beschichtung IWS, mit 3g Schmierstoff Klüber	20,6	ja
32	Stahlradgetriebe mit Beschichtung IWS, mit 3g Schmierstoff Fuchs	21,3	

Die Ergebnisse dieser Versuche zeigen, dass die folgenden Getriebevarianten die geringsten Verluste aufweisen:

- Getriebe 16 (Kunststoffgetriebe ohne Beschichtung und mit 3 g Schmierstoff von Klüber) weist durchschnittliche Antriebsverluste von 18,1 % auf.
- Getriebe 19 (Kunststoffgetriebe mit Beschichtung ta-C1 vom Partner IWS und 3 g Schmierstoff vom Partner FUCHS) weist durchschnittliche Antriebsverluste von 18,7 % auf.
- Getriebe 25 (Kunststoffgetriebe mit Beschichtung CrAlMoN vom Partner IOT und 3 g Schmierstoff von Klüber) weist ebenfalls durchschnittliche Antriebsverluste von 18,7 % auf.
- Getriebe 31 (Stahlradgetriebe mit Beschichtung vom Partner IWS und 3 g Schmierstoff von Klüber) weist durchschnittliche Antriebsverluste von 20,6 % auf.

Für die vier Getriebevarianten wurde kein Dauerlauf vorgesehen. Allerdings wäre ein solcher Test in zukünftigen Untersuchungen sinnvoll, um die bisherigen Ergebnisse weiter zu validieren. Da hGears derzeit nicht über einen Dauerlaufprüfstand für E-Bike-Getriebe verfügt, konnte ein entsprechender Test bislang nicht durchgeführt werden. Eine abschließende Bewertung der potenziellen Energieeinsparung durch optimierte Antriebsverluste wäre daher erst nach der Durchführung eines Dauerlaufversuchs möglich.

1.2.7 Anwendungsfall E-Achse

Die E-Mobilität hat in den letzten Jahren stark an Akzeptanz im PKW-Sektor gewonnen. Die Verkaufszahlen steigen stetig an, jedoch hat die Technologie in der Breite der Bevölkerung weiterhin mit Vorurteilen zu mangelnder Reichweite, langen Ladezeiten und hohen Anschaffungskosten, im Vergleich zum Verbrenner, zu kämpfen. Um dem Kunden neuste Technologieansätze im Hinblick auf die erwähnten Herausforderungen bieten zu können, fokussiert dieser Anwendungsfall unter Leitung von BMW auf die Erhöhung der Reichweite. Dies kann einerseits über die erhöhte Kapazität der Batterie, andererseits über eine effizientere Nutzung der zur Verfügung stehenden Energie erreicht werden. Daher ist es von enormer Bedeutung unter anderem die E-Achse weiter zu optimieren.

Im Rahmen des Förderprojekts CHEPHREN lag der Fokus im Anwendungsfall „E-Achse“ auf der Effizienzsteigerung einer hochintegrierten BMW-E-Achse. Hierbei wurde in Zusammenarbeit der

Firmen FUCHS, Evonik, Fraunhofer IWS und BMW das Ziel verfolgt, die im Antriebsstrang entstehenden Verluste zu reduzieren.

Ableitend aus dem Ziel zur Effizienzsteigerung wurden folgende Arbeitsumfänge vereinbart:

- a) Aufbau und Inbetriebnahme von E-Achsen Prüfstand
- b) Entwicklung von Schmierstoffkonzepten mit innovativen Additiv- und Polymerpaketen
- c) Beschichtung von Getriebezahnrädern

Die für die Validierung benötigten E-Achsen wurden von Fa. BMW zur Verfügung gestellt und entsprechend modifiziert, um den Prüfstandanforderungen gerecht zu werden. Fa. FUCHS erarbeitete die Entwicklungsschmierstoffe und sicherte diese in Voruntersuchungen ab. Die Prüfstände wurden von Fa. Evonik beauftragt und mit Hilfe von Fa. BMW ausgelegt und in Betrieb genommen. Zudem formulierte Fa. Evonik optimierte Polymermischungen, welche in den Entwicklungsschmierstoffen zum Einsatz gekommen sind. Das Fraunhofer IWS beschichtete die Getriebezahnräder.

a) Aufbau und Inbetriebnahme von E-Achsen Prüfstand

Neben Versuchen auf Komponentenebene sollte im Rahmen des Projekts auch eine Validierung der Einzelpakete auf Systemebene durchgeführt werden, um die Veränderungen der Effizienz auf Basis seriennaher Teilsysteme besser erfassen zu können. Hierfür wurden zwei E-Maschinen Prüfstände inkl. Ansteuerung und Batteriesimulation geplant, aufgebaut und in Betrieb genommen. Ziel der unterschiedlichen Prüfstandsaufbauten war die Differenzierung der innerhalb der elektrischen Antriebsmaschine entstehenden Verluste.

Der erste Prüfstand misst die Gesamteffizienz einer aktiv betriebenen BMW-Serien-E-Achse, analog der im Fahrzeug vorgesehenen Verwendung (vgl. Abbildung 87). Hierbei wird über die eingespeiste elektrische Leistung, sowie die über Lastmaschinen abgenommene mechanische Leistung, der Wirkungsgrad der E-Achse ermittelt. Dieses Ergebnis beinhaltet die lastabhängigen Verluste der mechanischen Reibung in Getriebe, Lagerungen und Dichtungen und den lastunabhängigen Verlusten in den Öl Zu- und Ableitungen und dem Luftspalt der E-Maschine. Neben den Reibverlusten fließen in die Gesamteffizienz zudem die thermischen Verluste aus Inverter, Nebenaggregaten und der E-Maschine mit ein.



Abbildung 87: E-Maschinenprüfstand zur Messung aller in der Achse entstehenden Verluste

Ziel des zweiten Prüfstands war das hochgenaue Messen rein mechanischer Verluste der E-Maschine. Hierzu sollten zwei identische E-Achsen miteinander verspannt und über eine extern angeschlossene Lastmaschine betrieben werden. Da der Aufbau des ersten Prüfstands priorisiert wurde und aufgrund aufwändiger Konstruktions- und Simulationsarbeit, langer Beschaffungszeiten und notwendiger Überarbeitungsschleifen des Prüflings und Prüfstands, keine belastbaren Ergebnisse im Projektzeitraum am Verspannungsprüfstand erarbeitet werden konnten, wird im Folgenden nur auf Ergebnisse aus dem ersten Prüfstand eingegangen.

b) Entwicklung von Schmierstoffkonzepten mit innovativen Additiv- und Polymerpaketen

Wie im Arbeitspaket zur Schmierstoffentwicklung der Fa. FUCHS detailliert beschrieben wurde, lag der Fokus der Entwicklungsschmierstoffe auf den Entwicklungslinien A und B (vgl. Abschnitt Schmierstoffentwicklung (HAP 2300)). Die von Fa. BMW als vorteilhaft erachtete kombinierte Nutzung von Öl, als Schmiermedium im Getriebe und gleichzeitig als direktes Kühlmedium für die E-Maschine, erforderte Eingrenzungen in der Entwicklungsfreiheit der Schmierstoffe. Aus diesem Grund wurde der Fokus in den Entwicklungsschleifen auf ölbasierte und synthetische Formulierungen mit einer kinematischen Viskosität von 4–6cSt bei 100 °C beschränkt. Ergänzend wurden unterschiedliche Anforderungskriterien an die Schmierstoffeigenschaften auf Basis von Erkenntnissen aus bisherigen Serien- und Entwicklungsprojekten definiert und die Entwicklungsschmierstoffe einem Vorvalidierungsprogramm unterzogen. Dieses Vorvalidierungsprogramm beinhaltete eine Auswahl an seriennahen Prüfungen, um einerseits Kandidaten frühzeitig priorisieren oder ausschließen zu können, andererseits bei erfolgreicher Effizienzverbesserung der Schmierstoffkandidaten eine Übergabe mit entsprechender Einordnung an die Serienentwicklung vornehmen zu können. Tabelle 11 in Anhang 1 zeigt die Entwicklungsschmierstoffe, die nach Vorvalidierung auch auf dem E-Achsen Prüfstand untersucht wurden.

Um während des Validierungszeitraums gleichbleibende Bedingungen zu gewährleisten und potenzielle Abweichungen in den Messergebnissen zeitnah feststellen zu können, wurde ein Validierungsprozess ausgearbeitet und festgelegt. Als Referenzschmierstoffe wurden zwei Schmierstoffe definiert, die ausreichend bekannt und bereits im Vorfeld validiert wurden (Ref1 und Ref2). Zudem wurde eine Reihenfolge festgelegt, in der die Entwicklungsschmierstoffe analysiert wurden. Hierzu wurde nach je zwei getesteten Entwicklungsschmierstoffen ein Vergleich mit den Referenzschmierstoffen durchgeführt, um ein Abweichen des Wirkungsgrads der E-Achse schnellstmöglich zu detektieren. Zudem wurde eine Ölwechselprozedur ausgearbeitet. Diese Prozedur sieht vor, dass der folgende Entwicklungsschmierstoff mehrfach neu befüllt und wieder abgelassen werden muss. Nach jedem Befüllen muss ein vorgegebenes Last-Drehzahlkollektiv durchlaufen werden. Dies reduziert die Effekte des Vorgängerschmierstoffs. Mit Ölanalysen nach jedem Ölwechsel wurde sichergestellt, dass kein nennenswerter Restanteil des Vorgängerschmierstoffs detektierbar ist.

Zur Messung der Effizienzverbesserung durch die Entwicklungsschmierstoffe wurden zwei Testprozeduren angewendet. Der erste Zyklus orientiert sich am Zulassungszyklus WLTP (World Harmonized Light Duty Testing Procedure). Der Fahrzyklus des WLTP stellt im E-Achsprüfstand eine zeitliche Abfolge von geforderten Drehmoment- und Drehzahlen dar, die speziell auf ein bestimmtes Fahrzeug mit gegebener Masse, Luftwiderstand und Reifenwiderstand abgestimmt sind (vgl. Abbildung 88). Über Referenz- & Wiederholungsmessungen sowie Berechnungen der Toleranzketten der Messsysteme konnte sichergestellt werden, dass die auftretenden Messfehler deutlich kleiner als die gemessenen Effizienzverbesserungen sind.

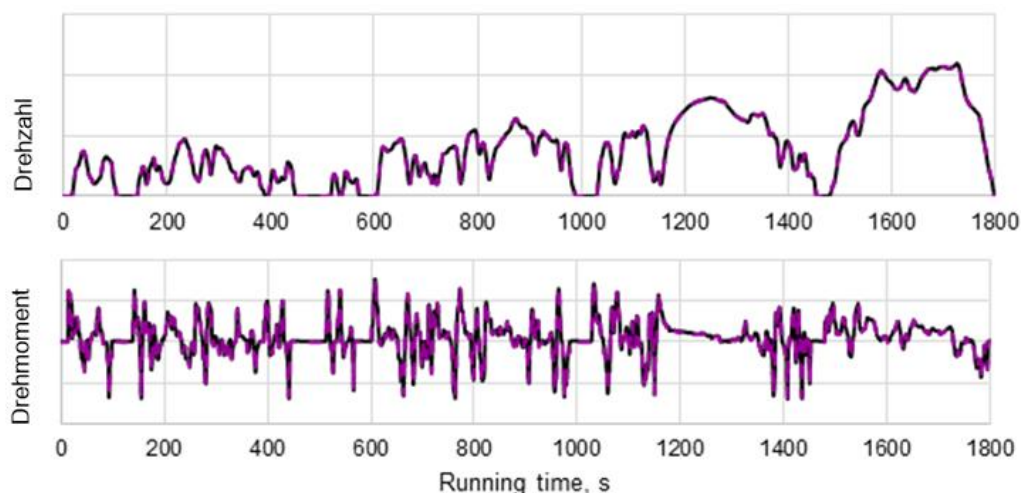


Abbildung 88: WLTP-Fahrzyklus über Drehzahl und Drehmoment mit Sollwert (schwarz) und Istwert (lila)

Zusätzlich zur Messung der Effizienz im WLTP-Fahrzyklus wurden die Schmierstoffe in einem Kennfeldbetrieb untersucht. Je Lastpunkt wurde das Drehmoment und die Drehzahl für einen Zeitraum von 10 Sekunden konstant gehalten und die Messung durchgeführt. Während der Zeit mit konstanten Belastungsparametern wurde die elektrische Eingangsleistung und die mechanische Ausgangsleistung gemittelt. Daraus wurde die Gesamteffizienz in Prozent als Funktion von E-Motordrehzahl und Belastungsdrehmoment ermittelt. Die Vermessung des Kennfelds wurde je Schmierstoff fünf Mal wiederholt. Im Kennfeldbetrieb wurden die Temperatur und der Durchfluss sowohl der Kühlflüssigkeit als auch des Öls konstant gehalten. Die Validierungsläufe wurden bei unterschiedlichen Öleingangstemperaturen durchgeführt. Auch für den Messfehler im Kennfeld konnte sichergestellt werden, dass der Messaufbau fähig und die Ergebnisse vertrauenswürdig sind.

Die WLTP-Validierungen der einzelnen Entwicklungsschmierstoffe zeigen, im Vergleich zum Referenzschmierstoff CE-xS-Ref-01, über unterschiedliche Temperaturniveaus eine Effizienzverbesserung um bis zu 0,28 % (vgl. Abbildung 89). Die Ergebnisse deuten tendenziell auf eine Reduzierung der Effizienzverbesserung hin, umso wärmer die E-Achse bei Zyklusbeginn ist. Dieser Effekt ist unabhängig der kinematischen Viskosität der Schmierstoffe zu erkennen.

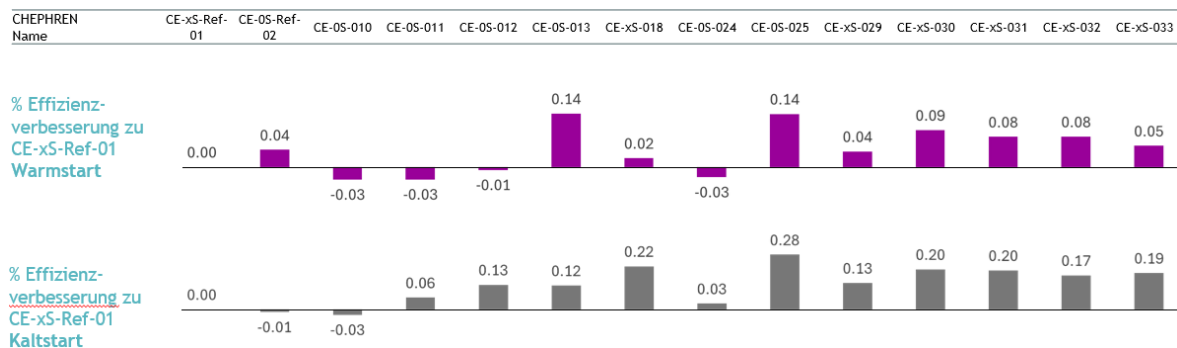


Abbildung 89: Ergebnisse zu Effizienzverbesserung der Entwicklungsschmierstoffe im WLTP-Zyklus

Die WLTP-Ergebnisse mit vorkonditionierter und durchtemperierter E-Achse werden stärker gewichtet als die Ergebnisse aus dem Kaltstart. Aus diesem Grund setzen sich zwei Entwicklungsschmierstoffe in der Zyklusbetrachtung zum Referenzschmierstoff ab (siehe Abbildung 90). Die Entwicklungsschmierstoffe CE-0S-013 und CE-0S-025 unterscheiden sich in ihrer kinematischen Viskosität bei 100 °C. Während der CE-0S-013 Schmierstoff analog dem Referenzschmierstoff ein Öl mit kinematischer Viskosität bei 100 °C von 6cSt ist, stellt der CE-0S-025 eine Variante mit 4cSt dar. Die Ergebnisse aus der Validierung zeigen, dass für den Lastbereich des WLTPs der untersuchten E-Maschine, durch unterschiedliche Additivierung der Schmierstoffe, 6cSt Öle ähnliche Effizienzwerte wie 4cSt Öle aufweisen.

Für den Kennfeldbetrieb wird auf Grund der Datenmenge nur auf die beiden vielversprechendsten Kandidaten aus den WLTP-Messungen eingegangen. Analog zu den WLTP-Auswertungen wird im Folgenden jeweils der Vergleich zum Referenzschmierstoff CE-xS-Ref1 aufgezeigt.

Insbesondere bei den Lastpunkten im WLTP-Bereich (übereinstimmend zu den WLTP-Messungen), sowie bei hohen Drehzahlen zeigen die beiden Entwicklungsschmierstoffe CE-0S-013 und CE-0S-025 messbare Vorteile gegenüber dem Referenzschmierstoff. In Bereichen höherer Lasten weisen beide Entwicklungsschmierstoffe tendenziell leichte Effizienzverschlechterungen auf. Jedoch liegen die gemessenen Effizienzverschlechterungen im Rahmen der Toleranzabweichungen der Einzelmessungen. Bezogen auf das gesamte Effizienzkennfeld zeigt der CE-0S-013 eine ausgewogenere Effizienzverbesserung gegenüber dem Referenzschmierstoff als der CE-0S-025.

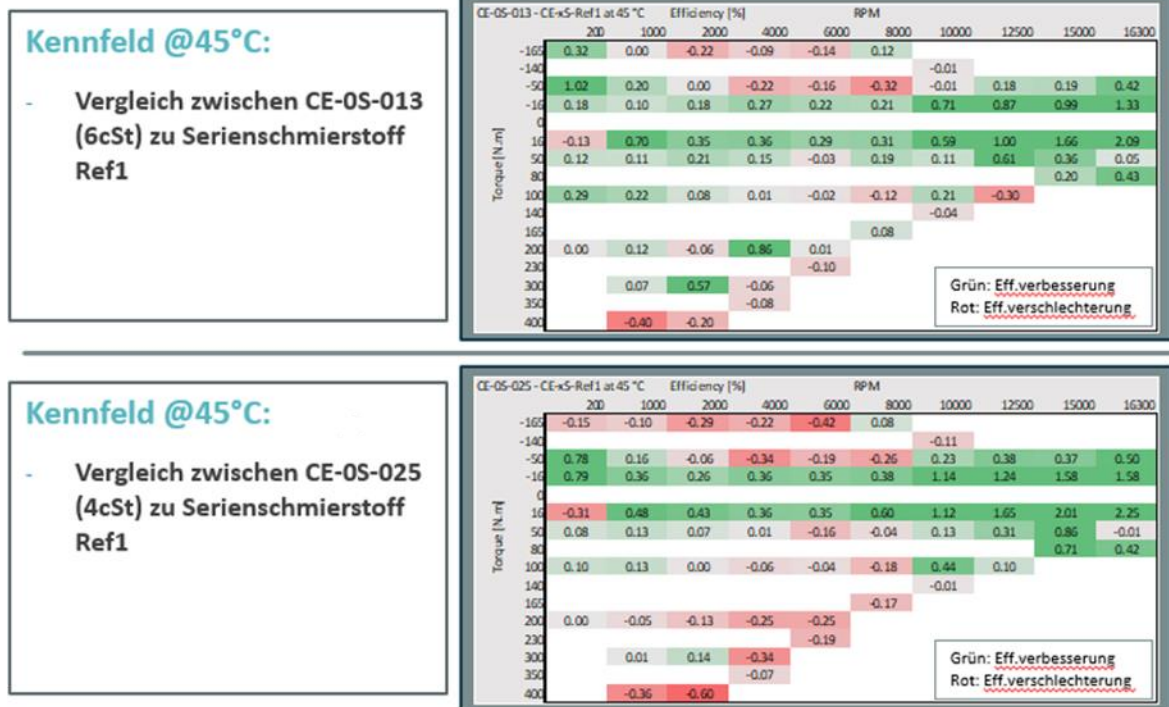


Abbildung 90: Effizienzvergleich im Kennfeldbetrieb zwischen Referenzschmierstoff und Entwicklungsschmierstoffen

c) Beschichtung von Getriebezahnradern

Neben der Formulierung und Validierung von Entwicklungsschmierstoffen wurden im Anwendungsfall der E-Achse die effizienzsteigernden Potentiale von DLC (Diamond-like Carbon) Beschichtungen in Verbindung mit Zahnradern näher betrachtet und erforscht. Hierfür arbeiteten die Projektpartner BMW, FZG und IWS eng zusammen. Die Vorteile derartiger Schichten liegen, neben deutlich verbesserter Festigkeit und optimiertem Verschleißverhalten, in der Nutzung der geringeren Wärmeleitfähigkeit zu einer lokalen Öltemperaturerhöhung des Schmiermittels (thermischer Isolationseffekt). Mit der Erhöhung der Öltemperatur sinkt die Kontaktviskosität, was zu einer Reduzierung der Reibungszahl führt.

Die Beschichtung komplexer Geometrien – wie bspw. die Zahnflanken von Zahnradern – ist sehr herausfordernd. Vom Zahnfuß über die Zahnflanke bis zum Zahnkopf sollte eine durchgängige Schicht, mit identischer Schichtdicke aufgebracht werden, um innere Spannungen zu reduzieren und Sollbruchstellen in der Schicht zu vermeiden. Zudem stellt der sehr hohe Härtegradient im Übergang zwischen Schicht und Grundkörper aus Stahl eine Herausforderung bei der Beschichtung von Zahnradern dar. Dieses Problem (welches lange eine technologische Grenze bei der DLC und insbesondere ta-C Beschichtung war) wird durch eine sogenannte Einlaufschicht gelöst. Dabei wird unter der meist tetraedrischen und sehr harten Kristallstruktur des ta-C, eine weichere amorphe Struktur (a-C) aufgebracht, sodass eine neuartige Schicht – nämlich ta-C-a-C – identifiziert und analysiert werden kann. Die ta-C-a-C-Schicht reduziert den Härtegradienten und somit interne Spannungen zwischen Zahnradgrundkörper und Beschichtung.

Um die oben beschriebenen Vorteile experimentell bestätigen zu können, wurde eine dreistufige Absicherung geplant. Dabei war ein positives Ergebnis der jeweiligen Stufe der Enabler für die nächste Stufe. Der erste Validierungsschritt sollte zunächst die Potentiale einer Beschichtung an einem Kugel-Scheibe Tribometer (MTM) verifizieren und einer klassischen Stahl-Stahl-Paarung gegenübergestellt werden. Die Erkenntnisse aus den Versuchen am Kugel-Scheibe Tribometer (MTM) zeigten sehr gute Ergebnisse hinsichtlich Reibungsreduzierung beim Einsatz von ta-C-a-C beschichteten Komponenten im Vergleich zu unbeschichteten Komponenten. Um außerdem den Einfluss des Schmierstoffs auf die Reibungszahl bei Beschichtungen zu untersuchen, wurden die zwei Referenzöle aus der Schmierstoffentwicklung (Ref1 und Ref2) verwendet. Vor allem im Bereich

der Grenzschmierung zeigen sich große Effizienzpotentiale mit einer Reduktion der Reibungszahl von bis zu 30 % (vgl. Abbildung 91). Diese Reduktion ist in erster Linie auf den Effekt der thermischen Isolation zurückzuführen. Zudem weist die beschichtete Paarung, im Vergleich zur Stahl-Stahl-Paarung, eine niedrige Festkörperreibungszahl auf, was eine geringere Kontaktreibung bei Grenzschmierung zur Folge hat.

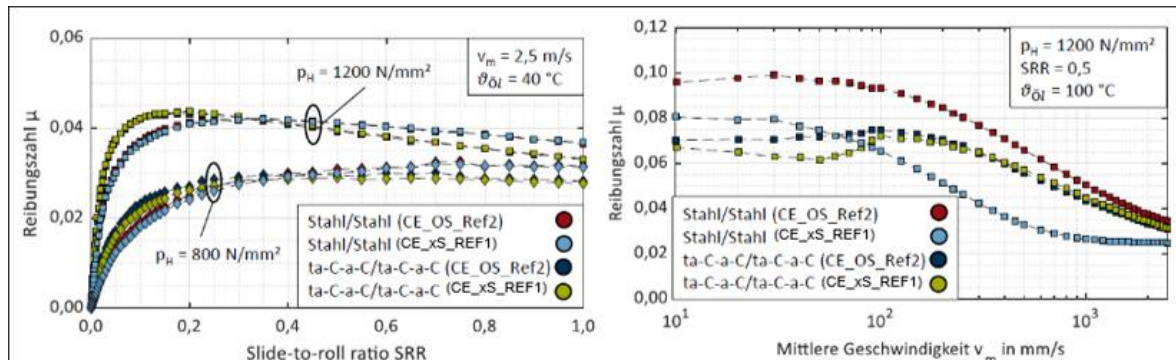


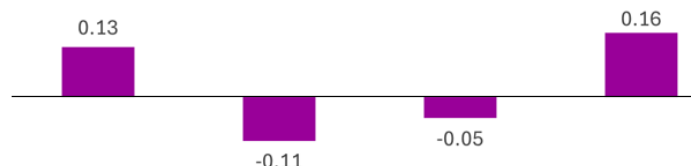
Abbildung 91: Ergebnisse Grundlagenversuche an MTM; Stahl/Stahl vs. ta-C-a-C/ta-C-a-C Beschichtung in Verbindung mit unterschiedlichen Schmierstoffen

In einer zweiten Stufe wurden die Schichten auf Prüfverzahnungen aufgebracht und am FZG-Wirkungsgradverspannungsprüfstand getestet. Anhand der Testmethode nach FVA345 zur Charakterisierung des Wirkungsgrads, konnten auch hier positive Effekte bzgl. Reibminimierung beschichteter Zahnräder dargestellt werden, weshalb eine Validierung auf Systemebene als nächster Validierungsschritt vereinbart wurde.

Zur Validierung auf Systemebene mit beschichtetem Getriebe wurden, neben den Referenzschmierstoffen, die Entwicklungsschmierstoffe CE-OS-013 und CE-OS-25 getestet. Ziel war es, neben dem alleinigen Einfluss der Beschichtung des Getriebes, einen Einfluss des Schmierstoffs im Zusammenhang mit der Beschichtung herauszuarbeiten. Alle Ergebnisse aus Abbildung 92 wurden im WLTP-Zyklus auf Effizienz untersucht und auf den unbeschichteten Zustand der E-Achse mit Schmierstoff CE-xS-Ref-01 referenziert. Um den Einfluss von unbeschichtetem zu beschichtetem Getriebe analysieren zu können, wurde am E-Achsen-Prüfling nur das Getriebe gewechselt.

CHEPHREN Name		CE-xS-Ref-01	CE-OS-Ref-02	CE-OS-013	CE-OS-025
Kin. Visc. (ASTM D-445) 40°C	mm ² /s	29.4	29.2	24.2	16.72
Kin. Visc. (ASTM D-445) 100°C	mm ² /s	5.95	5.98	6.02	4.17
VI (ASTM D2270)		153	156	214	161
Viskositätsindexverbesserer (VII)		-	-	dcomb	-
Schwefel in VII		-	-	Nein	-
Grundöl		Gr III+	Gr III	Gr III	PAO
Additivpaket		S-haltig	S-frei	S-frei	S-frei

% Effizienzverbesserung
bezogen auf
CE-xS-Ref-01 (unbeschichtetes
Getriebe)
Warmstart



% Effizienzverbesserung
bezogen auf
CE-xS-Ref-01 (unbeschichtetes
Getriebe)
Kaltstart



Abbildung 92: Effizienzverbesserungen mit beschichtetem Getriebe im WLTP-Zyklus

Anderes als im unbeschichteten Zustand des Getriebes zeigt der Entwicklungsschmierstoff CE-0S-013 eine Effizienzverschlechterung um 0,11 % im warmen WLTP-Zyklus, im Vergleich zum unbeschichteten Referenzschmierstoff. Der Referenzschmierstoff CE-xS-Ref-01 hingegen erzielt in Verbindung mit dem beschichteten Getriebe eine deutliche Effizienzverbesserung von 0,13 %. Der CE-0S-025 befindet sich im Warmen WLTP-Zyklus auf ähnlichem Niveau wie der CE-xS-Ref-01 bei beschichtetem Getriebe.

Diese Ergebnisse weisen ein Potenzial zur Effizienzverbesserung durch ein beschichtetes Getriebe auf, jedoch sollte anwendungsspezifisch für jede Beschichtung ein optimierter Schmierstoff formuliert und validiert werden. Nach den Grundlagenversuchen zur Beschichtung von Getriebezahnradern im Projekt CHEPHREN, bedarf es weiterführender Untersuchungen, um eine qualifizierte Übergabe an die Serienentwicklung durchführen zu können. Im Fokus solcher Untersuchungen müssen die Dauerhaltbarkeit der Beschichtung auf Getriebezahnradern, die Entwicklung anwendungsoptimierter Schmierstoffe für Beschichtungen, sowie die Sicherstellung reproduzierbarer Beschichtungshöhen bei komplexen Zahnradgeometrien stehen.

Modellbasierte Korrelationsanalyse zwischen Komponenten- und Systemvalidierung

Im Rahmen des Projekts CHEPHREN wurde neben der Schmierstoffvalidierung auch ein Modell zur Korrelation der Vorvalidierungsergebnisse und der Systemergebnisse auf der E-Achse entwickelt. Ziel dieser Korrelationsanalyse war es, die umfassenden Daten aus den Vorvalidierungsergebnissen der MTM-Analyse, der Schmierfilmdicke, sowie der Formulierungsparameter der einzelnen Entwicklungsschmierstoffe in Zusammenhang mit den erzeugten Effizienzergebnissen der E-Achse zu bringen. Dieses Modell soll bei zukünftigen Schmierstoffentwicklungen, bereits in der frühen Entwicklungsphase auf Basis von Vorvalidierungsergebnissen, Tendenzen zur Effizienz der E-Achse geben können. Diese Erkenntnisse helfen frühzeitig Schmierstoffe einzuordnen, Validierungszeit zu reduzieren und teure Systemprüfungen zu minimieren. Im Rahmen des Projekts wurde ein erster Stand des Modells erstellt, der als Grundlage für zukünftige Optimierungen dient. Hierzu sind weitere Validierungen notwendig, um erforderliche Datensätze zu generieren und das Modell weiterzuentwickeln.

Zusammenfassung

Die Arbeiten im Anwendungsfall „E-Achse“ hatten das Ziel der Effizienzverbesserung im elektrifizierten Antriebsstrang. Der Prüfstands Aufbau ermöglichte eine seriennahe Erprobung der einzelnen Arbeitspakete. Es wurden innovative Schmierstoffformulierungen produziert und erfolgreich getestet. Einige der Entwicklungsschmierstoffe zeigten Effizienzsteigerungen über den WLTP-Zyklus von knapp unter 0,3 % im Kaltstart und bis zu 0,14 % bei erwärmter Achse. Neben der erzielbaren Reichweitensteigerung für den Kunden, ergibt sich zudem eine CO₂-Reduktion im Vergleich zu den Referenzschmierstoffen. Dies liegt an der reduzierten, für die gleiche Fahrstrecke benötigten Energie. Auch die beschichteten Zahnräder zeigen weiteres Potenzial zur Reduzierung von Reibung im Getriebe. Hier sind jedoch weitere Grundlagenuntersuchungen durchzuführen und der Fertigungsprozess zu optimieren, um gleichbleibende Qualität auch über den Lebenszyklus eines Getriebes zu gewährleisten. Zudem müssen speziell für Beschichtungen formulierte Schmierstoffe entwickelt werden, um das volle Potenzial an Effizienzverbesserung auszuschöpfen.

1.2.8 Anwendungsfall Wälzlager

Der CEROBEAR Anwendungsfall war hinsichtlich der Anwendungen und deren Zielsetzung breit aufgestellt. Daher erfolgte zu Beginn des Projekts die Einteilung der Arbeiten in vier verschiedene Entwicklungsstränge (EW) (Abbildung 93).

Entwicklungsstrang EW1 umfasste die Arbeiten zur Supraschmierung (Superlubricity = SL) an geschmierten Systemen. Neben Reibungs- und Verlustmessungen an geschmierten Wälzlagern im Mischreibungs- und Vollschröpfungsbereich wurden auch Überrollversuche zur Ermittlung der Belastungsgrenze und des Versagensverhaltens von ta-C-Schichten durchgeführt. Ziel war die Ermittlung von energieeffizienten Materialkombinationen, Schwerpunkte lagen auf Käfigmaterialien und Schmierstoffen. Als zusätzlicher Reibkontakt wurde ebenfalls eine Dichtung der Lager mit Deck- und Dichtscheiben untersucht. Als Versuchsträger wurden Schrägkugellager 7006 spezifiziert und gefertigt, für Überrollversuche an Schichten ein modifiziertes Axiallager 51102. Die Arbeiten zielten auf ein breites Anwendungsfeld von Wälzlagern und umfasste den Hauptteil der Arbeiten im Projekt.



Abbildung 93: Definierte Entwicklungsstränge

Entwicklungsstrang EW2 umfasste Arbeiten zur Untersuchung des Festschmierstoffes MoS₂. Im Gegensatz zu den Arbeiten im EW1 zielten die Arbeiten in EW2 auf spezielle Anwendungen für Wälzlager unter Vakuumbedingungen und niedrigen Drehzahlen ab. Als Versuchsträger wurde ein abgestimmtes, doppelreihiges Schrägkugellager wie es z.B. in SADM (Solar Array Drive Mechanism) zur Anwendung kommt, spezifiziert und gefertigt.

Im Bereich des EW3 wurden Sonderschmierstoffe auf PFPE-Basis, die für den Einsatz in Vakuumanwendungen geeignet sind, mit Schwerpunkt auf der Reduzierung der Verlustreibung untersucht. Auch hier waren die Arbeiten auf spezielle Anwendungen unter Vakuumbedingungen und sehr niedrigen Drehzahlen fokussiert. Versuchsträger war ein abgestimmtes, doppelreihiges Schrägkugellager mit einer hohen Anzahl Kugeln und somit auch einer hohen Anzahl Reibkontakte.

Entwicklungsstrang 4 umfasste die Arbeiten zur Ertüchtigung einer durch das IOT der RWTH Aachen entwickelten Dünnschichtsensorik zur Messung von Temperaturen für den grundsätzlichen Einsatz im Wälzlager. Im Projekt wurde der Ansatz, die Dünnschichtsensorik auf eine einfache Lagergeometrie aufzubringen, verfolgt.

Das Reibungsverhalten der verschiedenen Prüflager und die Schichtcharakterisierung wurden auf verschiedenen Prüfständen und unter verschiedenen Testbedingungen untersucht. Die wesentlichen Ergebnisse der Arbeiten aus den verschiedenen Entwicklungssträngen werden im Folgenden näher beschrieben.

Ziele der Arbeiten in EW1 waren die Ermittlung der Überrollfestigkeit und des Versagensverhaltens zur Charakterisierung von Schichten und die Reduzierung Verlustreibung über die Auswahl der Werkstoffe in Bereich der Supraschmierung. Zusätzlich wurden Lebensdauerversuche an Wälzlagerstählen mit wasserhaltigen Schmierstoffen durchgeführt.

Die Schichtcharakterisierung wurde als Überrollversuch in Abhängigkeit von der Belastung an verschiedenen ta-C-Schichten durchgeführt. Während der Prüfung erfolgte eine stufenweise Erhöhung der Prüflast und damit einhergehend der Hertz'schen Pressung im Wälzkontakt. Als Zielwert für die Überrollfestigkeit wurde eine Hertz'sche Pressung von 2758 MPa ohne Auftreten von Schichtdelamination über eine Anzahl von 10⁸ Zyklen definiert. Aus den Versuchen wurde eine gute Überrollfestigkeit unter Berücksichtigung der Belastbarkeit sowie des Verschleiß- und Versagensverhaltens bis zu einer Hertz'schen Pressung von 4132 MPa ermittelt. Mit zunehmender Last änderte sich die Laufbahnfärbung und Breite. Die Vermessung der Laufbahn ergab Änderungen deutlich unterhalb der Schichtdicke, so dass die hellere Färbung auf einen Einlauf der Schicht zurückzuführen war. Der Zustand der Laufbahn in Abhängigkeit von der Last ist in Abbildung 94 dargestellt.

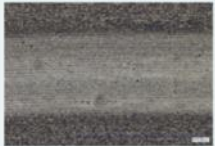
Testkomponente	GS51102000010A	GS51102000010A	GS51102000010A
Laufbahn (unten: Neu)			
			
S/N	AC069762 (LB)	AC069762 (LB)	AC069762 (LB)
Hertzsche Pressung	1724 MPa	2758 MPa	4132 MPa

Abbildung 94: Ergebnisse Schichtcharakterisierung – Belastung

Die Lebensdauerversuche mit wasserhaltigem Schmierstoff wurden zum Vergleich der Überrollfestigkeit verschiedener Wälzlagerstähle durchgeführt. Erfahrungen aus dem CHEPHREN-Konsortium zeigten, dass der konventionelle Wälzlagerstahl 100 Cr 6 eine unzureichende Lebensdauer unter diesen Bedingungen aufweist, was im Versuch mit CWIG100-01 tendenziell nachgewiesen werden konnte. Lebensdauerversuche mit fünf Ausfallzeiten wurden für den 100 Cr 6 ausgewertet. Die Lebensdauer L10h lag bei 79 Stunden. Vergleichsversuche mit X30 CrMoN 15 1 wiesen Laufzeiten oberhalb von 700 Stunden ohne Ausfall auf. Daher war eine Lebensdaueranalyse der Daten nicht möglich. Abbildung 95 zeigt die Weibull-Daten für 100 Cr 6. Die grünen Punkte auf der X-Achse stellen im Vergleich die Laufzeiten von X30 CrMoN 15 1 dar.

Die Reibungsmessungen wurden als Stribeck-Messungen, der Ermittlung der Lagerreibung in Abhängigkeit von der Drehzahl, durchgeführt. Es wurden zwei Laststufen untersucht (grafische Ergebnisdarstellung siehe Anhang 2 Abbildung 107, Abbildung 108), eine niedrige (LC1) und eine hohe Last (LC4). Es wurden die Kombinationen aus drei Fetten und sechs Käfigwerkstoffen untersucht, darunter zwei Projektwerkstoffe des Partners Evonik (VESTAKEEP® 5000G, VESTAKEEP® 4000 FC30) (Abbildung 96).

Es erfolgte die Betrachtung des Wälzkontaktes von Wälzkörpern zu Lagerringen im Schrägkugellager 7006 sowie der Gleitreibungskontakte von Käfig zu Führungsbord. Zusätzlich wurde der Gleitreibungskontakt Dichtscheibe zu Lagerring betrachtet. Die Messungen der Reibungsverluste in Stribeck-Messungen an Schrägkugellagern waren umfangreich (grafische Ergebnisdarstellung siehe Anhang 2 Abbildung 109). Es wurden sechs Käfigwerkstoffe in Kombination mit drei Fetten (K1, N1, B1) sowie zwei Käfigwerkstoffe in Kombination mit einem wasserhalten Öl (CWIG100, F1) des Projektpartners FUCHS in zwei Laststufen untersucht. Referenz ist der PEEK-Käfig mit Schmierstoff K1.

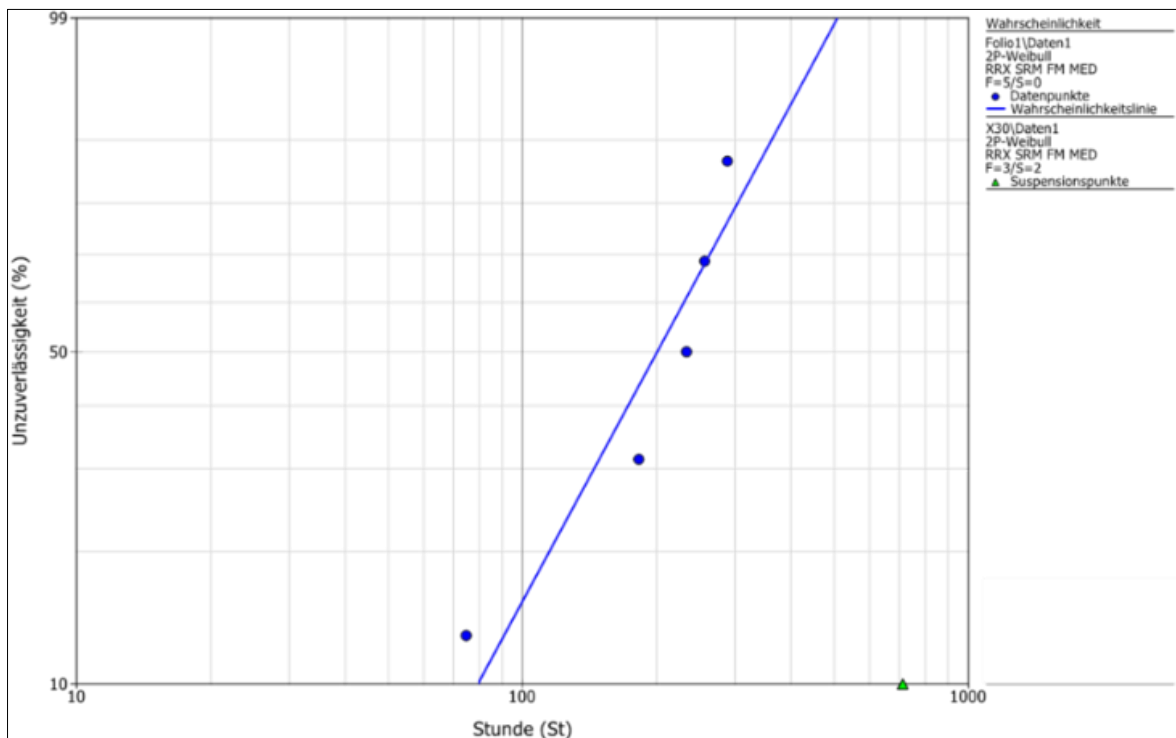


Abbildung 95: Weibull-Analyse

Grundsätzlich konnte eine höhere Reduzierung der Reibung im Mischreibungsbereich erzielt werden. Unter der geringeren Last konnten die geringeren Reibwerte verschiedener Käfigwerkstoffe dem Schmierstoff K1 zugeordnet werden, während unter der höheren Last diese dem Schmierstoff N1 zugeordnet werden konnten. Bei den Käfigwerkstoffen waren der Vespel SP21, PEEK PVX und der VESTAKEEP® 5000G bei beiden Laststufen unter den reibungstechnisch günstigsten Kombinationen. Bei beiden Käfigwerkstoffen (PEEK, Vespel SP21), die in Kombination mit wasserhaltigem Schmierstoff untersucht wurden, zeigte sich bei niedriger Last eine deutlich erhöhte Reibung in Abhängigkeit von der Drehzahl. Daher erscheint für diesen Schmierstoffe bei geringen Lasten ein Einsatz unter niedrigen Drehzahlen sinnvoll. Bei höheren Lasten ist der Reibungsverlauf konstanter und liegt innerhalb der übrigen Schmierstoff-Käfigkombinationen.

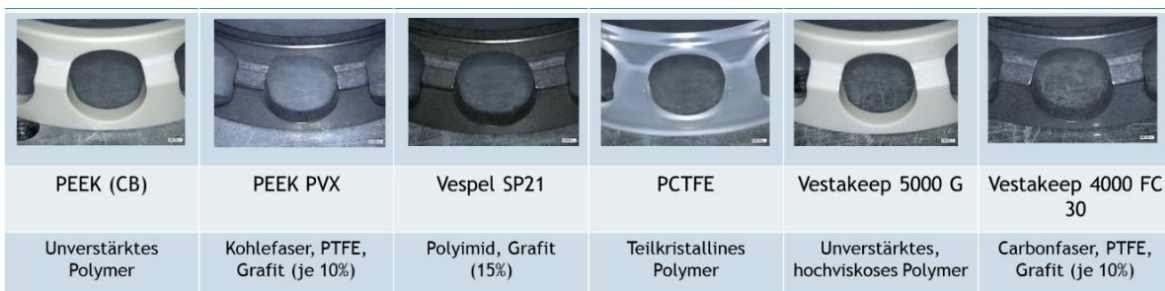


Abbildung 96: Käfigwerkstoffe

Für den Kontakt Dichtscheibe zu Lagerring konnte eine deutliche Erhöhung der Lagerreibung durch Einsatz einer berührenden (Lagerring) Dichtscheibe aufgezeigt werden, während eine berührungslose Dichtscheibe keinen nachweisbaren Einfluss auf die Lagerreibung zeigte. Auch eine Abhängigkeit von der Belastung konnte aufgezeigt werden. Bei niedrigeren Lasten war der Einfluss der Dichtscheibe auf die Lagerreibung größer als bei höherer Last. Es konnten Kombinationen aus Käfigwerkstoff und Schmierstoff mit geringer Reibung mit Schwerpunkt auf dem Mischreibungsbereich ermittelt werden, darunter die Kombination VESTAKEEP® 5000G / N1.

In EW 2 lag die Zielstellung auf der Reibungsmessung an MoS₂-Schichten in langsam drehenden Schrägkugellagern und der Identifizierung der Variante mit einer geringen und konstantem Reibungsverlauf. An einer kommerziellen Schicht wurden Referenzdaten zu Reibungsverlusten und Schichtlebensdauer generiert. Als Prüflager wurde ein doppelreihiges Schrägkugellager mit einem Käfig aus selbstschmierendem Komposit eingesetzt. Herausforderungen im Umgang mit MoS₂ Festschmierstoffen liegen vor allem in der Handhabung. Sie sind empfindlich gegenüber Luftfeuchtigkeit. Daher wurden die Schichten unter kontrollierter Luftfeuchte gemessen. Es wurde ein Run In zum Einlauf der Schicht bei erhöhter Drehzahl und eine Reibmomentmessung durchgeführt.

Abbildung 97 stellt die Messkurven für Lager mit kommerzieller Schicht dar. Links ist der Run In zu sehen, rechts die Reibmomentmessung. Messgröße ist die Reibkraft der Lager, die gelbe Kurve stellt die Messdaten dar, die schwarze Linie den Mittelwert. Es ist ein deutlicher Einlauf der Schicht im Signal erkennbar. Zudem waren Partikel vorhanden, die durch den Einlaufprozess entstanden sind. Die gemessene Reibkraft lag im Mittel bei etwa 5 N.

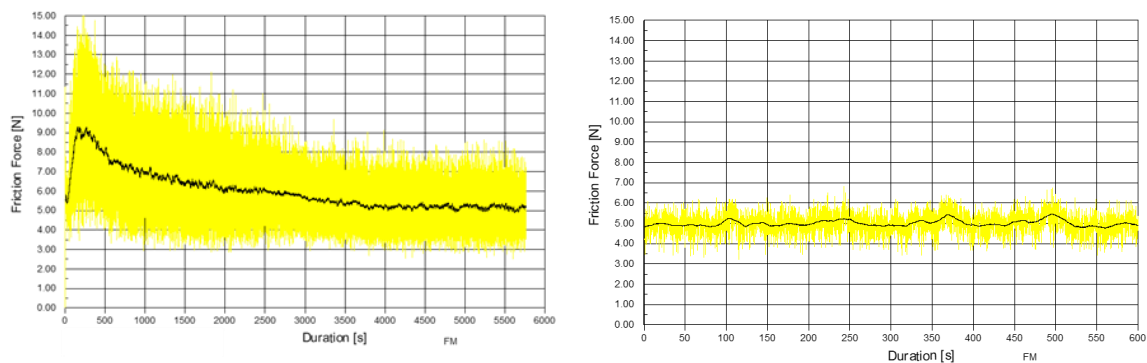


Abbildung 97: Run In (links) und Reibmomentmessung (rechts) kommerzielle MoS₂-Schicht

Abbildung 98 stellt ein repräsentatives Beispiel für die Messkurven von Projektschichten dar. Im Vergleich zur kommerziellen Schicht fiel auf, dass der Run In deutlich geringer ausgeprägt ist und auch das Niveau der Reibung mit einem Mittelwert von etwa 2,5 N geringer ist. Zudem fiel auf, dass kaum Partikel durch den Run In Prozess vorhanden waren.

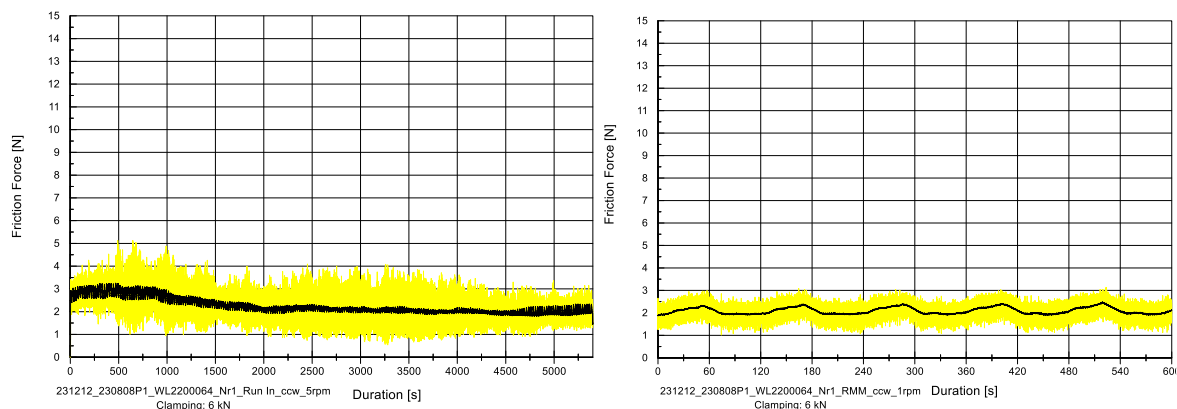


Abbildung 98: Run In (links) und Reibmomentmessung (rechts), Projektschicht Charge 230808P1

Im direkten Vergleich zeigte die Projektschicht eine gegenüber der kommerziellen Schicht eine um etwa 50 % geringere Reibung. Durch die prozessbedingten Eigenschaften der Schicht fiel der Run In deutlich kürzer aus und es wurden weniger Partikel generiert. Dadurch kann der zeitliche Aufwand und die Handhabung der Schicht vereinfacht werden. Die im Projekt gesetzten Ziele konnten damit sogar übertroffen werden.

In EW3 lag der Schwerpunkt auf der Reibungs- und Verlustmessung an Lagern mit Sonderschmierstoffen, die für den Einsatz unter Vakuumbedingungen geeignet sind. Die

Anforderungen an die Schmierstoffe liegen in einer geringen Ausgasung und Abdeckung eines weiten Einsatztemperaturbereichs. Als Prüflager wurde ein anwendungsnahes, abgestimmtes, doppelreihiges Schrägkugellager spezifiziert und gefertigt. Ziel war die Identifizierung von Einflussgrößen auf die Lagerreibung bei Drehzahlen kleiner einer Umdrehung die Minute, um die Lagereinheit reibungstechnisch verbessern zu können.

Die Charakterisierung des Reibungsverhaltens erfolgte über eine Reibmomentmessung im Kurz- und Langzeitverhalten. Zur Schmierung wurden im ersten Ansatz ein PFPE-basiertes Fett und dessen Grundöl eingesetzt und das Reibungsverhalten in Abhängigkeit von Drehzahl und Klemmkraft (axiale, externe Kraft) untersucht. Es wurden dabei Klemmkraftstufen unterhalb der Abstimmung des Lagers sowie oberhalb der Abstimmung des Lagers mit 2-facher, 3,3-facher und 5,5-facher Abstimmung des Lagers durchgeführt.

Die Reibmomentmessung zum Kurzzeitverhalten wurde bei einer Drehzahl von einer Umdrehung pro Minute durchgeführt. Es wurde eine Zunahme der Reibung bei steigender Klemmkraft beobachtet. Zwischen den beiden mittleren Klemmkraftstufen waren die Unterschiede in der Reibung geringer als zwischen den anderen Stufen. Die Messkurven innerhalb einer Klemmkraftstufe waren konstant und unauffällig und entsprachen somit den Erwartungen. Die Reibmomentmessungen zum Langzeitverhalten wurden bei niedrigeren Drehzahlen von etwa 0,02 Umdrehungen/Minute durchgeführt. Bei allen Klemmkraften wurde ein deutlicher Anstieg der Reibung gemessen. Die höchsten Anstiege lagen bei der kleinsten und höchsten Klemmkraftstufe vor. Die Reibverläufe der beiden mittleren Klemmkraftstufen waren vergleichbar vom Niveau und der Charakteristik.

Zum Vergleich wurden die Versuche ebenfalls mit dem Grundöl des Prüfschmierstoffs durchgeführt. Die Messungen zeigten einen konstanten Verlauf auf niedrigerem Reibungsniveau. Die Untersuchungen haben ergeben, dass ein für die Anwendung ungünstiger Betriebszustand durch den Einsatz von PFPE-Fetten bei Drehzahlen deutlich unterhalb einer Umdrehung/Minute erreicht wird. Ein maßgeblicher Einfluss auf das Reibungsverhalten kann demnach auf den Verdicker zurückgeführt werden.

In EW4 wurden die Sensorschichten des IOT unter tribologischer Beanspruchung auf dem CEROBear-Wälzlagerprüfstand untersucht. Im Fokus lag der Nachweis, dass die Temperaturmessung über die Schichtsensorik möglich ist, sowie die Untersuchung der Überrollfestigkeit der Sensorschichten.

Es wurden Axial-Rillenkugellagerscheiben mit einem Außendurchmesser von 28 mm (CEROBear Referenz GS5110200010) und 105 mm (CEROBear Referenz WS0600423) als Probenkörper spezifiziert und gefertigt. Die Beschichtung und Strukturierung erfolgte durch das IOT (Abbildung 99). Die beiden Bilder links zeigen die Probe WS0600423, das rechte Bild die Probe GS5110200010.



Abbildung 99: Proben Dünnschichtsensorik Wälzlager

Die Untersuchungen auf dem CEROBear Wälzlagerprüfstand wurden mit den Proben WS0600423 an drei Schichtvarianten (ID-5000 – CrAIN+TiAIN Magnetron Sputtering, ID-5016 - CrAIN+TiAIN Lichtbogenverdampfung, ID-5017 – Ni+NiCr Lichtbogenverdampfung) durchgeführt. An den Proben wurden zwei Messkampagnen zur Temperaturmessung und Überrollfestigkeit gemeinsam mit dem IOT durchgeführt. Für die Versuche wurden Wälzkörper aus Siliciumnitrid, Käfige aus PEEK und Fettschmierung eingesetzt. Die Versuchsdauer, Lasten und Drehzahlen wurden zunächst geringgehalten und sukzessive gesteigert, um eine Beschädigung vor der Generierung von Messdaten zu vermeiden. Eine Übersicht über die untersuchten Schichtvarianten gibt Tabelle 6.

Tabelle 6: Dünnschichtsensorik – Übersicht Messkampagnen 1

Last (N)	Drehzahlstufen	Schicht ID
100	5...30 rpm, Schrittweite 5 rpm	5017-1.9; 5016-1.4, 5000-1.2
400	5...30 rpm, Schrittweite 5 rpm	5017-1.7; 5016-1.5, 5000-1.3
1100	5...30 rpm, Schrittweite 5 rpm, 500, 1000 rpm	5017-1.8; 5016-1.6, 5000-1.1 (nur bis 30 rpm)

Der Prüfaufbau (siehe Abbildung 100) umfasste zwei Prüflager. Die Probe wurde auf der nicht rotierenden Seite des unteren Lagers eingebaut, um die Kontaktierung über die Kabel durchführen zu können. Die Hertz'sche Pressung im Lager wurde über die Axialkraft eingestellt, die über einen Kraftaufnehmer erfasst wird. Links im Bild ist das Lager neben dem Prüfaufbau zu sehen. Neben der Vorspannkraft wurden auch die Lagertemperaturen und die Lagerreibung als Messgrößen erfasst.



Abbildung 100: Dünnschichtsensorik Prüfaufbau

Die Messung der Temperatur an der Dünnschichtsensorik erfolgte über einen Messaufbau des IOT. Die Temperaturmessung konnte erfolgreich durchgeführt werden, die Überrollfestigkeit der Schicht war für die kurzen Messungen ausreichend. Die Ergebnisse dazu werden im Abschnitt Dünnschichtsensorik (HAP 2500) dargestellt.

1.3 Systemebene (TP 4000)

Die nachfolgenden Ausführungen erläutern die im Forschungsprojekt CHEPHREN erzielten Ergebnisse auf Systemebene. Aufgrund der engen inhaltlichen Überlappung und Wechselwirkung zwischen Grundlagen, Anwendungen und Gesamtsystemen innerhalb des Forschungsprojekts wurden zentrale Aspekte der Systemebene bereits in vorangegangenen Abschnitten, insbesondere im Kontext der Anwendungsfälle, dargestellt.

Prüfstandserprobung (HAP 4100)

Im Rahmen der Anwendungsebene (siehe Abschnitt 1.2) wurden verschiedene Prüfstände aufgebaut und Komponenten sowie Systeme getestet.

Modellierung Systemauslegung (HAP 4200)

Die Arbeiten an diesem HAP erfolgten parallel zu den Tätigkeiten in den Anwendungsfällen (siehe Abschnitt 1.2). Die entsprechenden Ergebnisse sind in den jeweiligen Abschnitten dargestellt.

Beschichtungsanlagenauslegung (HAP 4400)

Im Rahmen des Projektes erfolgte seitens VON ARDENNE (VA) in Zusammenarbeit mit den anderen Projektpartnern eine Schichtentwicklung von Kohlenstoffschichten auf Kunststoffen mit der Laser-Arc-Technologie.

Weiterhin wurde im Rahmen des HAP 4400 durch VON ARDENNE ein Kohlenstoff-Beschichtungsmodul (LAM1100) konzipiert und konstruiert, welches für die horizontale Durchlaufbeschichtung geeignet ist. Dazu wurde auch ein Demonstrator aufgebaut und erprobt. Dieses Beschichtungsmodul ermöglicht die Herstellung von wasserstofffreien, supragleitfähigen Kohlenstoffschichten mit hoher Beschichtungsrate.

Technologieentwicklung für die Beschichtung von Kunststoffsubstraten (VON ARDENNE)

Zielsetzung der Arbeiten war die ta-C Beschichtung von elektrisch isolierenden Substraten mit komplexer 3-dimensionaler Geometrie unter Verwendung des Laser-Arc-Verfahrens. Im Rahmen des Projektes wurden dazu Zahnräder und Lagerkomponenten aus Kunststoff beschichtet. Dabei waren zwei wesentliche Unterschiede im Vergleich zu der ta-C-Beschichtung von elektrisch leitfähigen metallischen Substraten zu berücksichtigen:

- Erstens war eine Schichtabscheidung ohne Verwendung einer BIAS-Spannung am Substrat zu realisieren. Dies erforderte Maßnahmen zur gezielten Einstellung der Ionenenergie des Plasmastrahls. Es zeigte sich, dass dazu elektrische Parameter der pulsformig geführten Vakuumbogenentladung geeignet waren.
- Zweitens sollte die Beschichtung von komplexen Strukturen wie die von Kunststoffzahnradern entwickelt werden. Aufgrund der Konturenproblematik, d.h. der allgemein bekannten Problematik der PVD-Beschichtung von Vertiefungen, waren dabei Winkelabhängigkeiten der Plasmaeinwirkung zu berücksichtigen.
- Auf der Grundlage der Vorarbeiten des IWS erfolgte die Beschichtung von Kunststoffzahnradern und Kugellagerkomponenten mit ta-C unter optimierten Bedingungen. Diese wurden den Projektpartnern zur Analyse und zum Einsatztest zur Verfügung gestellt.

Die Abbildung 101 zeigt ein Schema der verwendeten Beschichtungsanlage DREVA 900 (links) und Abbildungen der verwendeten Probenhalterungen (rechts). Dargestellt ist auch der sog. „V-Halter“ zur Simulation einer Zahnflanke.

Zuerst wurde auf ebenen Kunststoffproben die Prozessoptimierung zur Realisierung hafter ta-C-Beschichtungen durchgeführt. Dazu wurden Prozessparameter zur Vorbehandlung der Substrate wie z.B. Strahlungsheizung, Plasmaätzung, Haftschichten und die ta-C-Schichtabscheidungsparameter wie z.B. Pulsstrom, Pulslänge und Pulsfrequenz variiert. In einem zweiten Schritt wurden vorbereitende Versuche zur Optimierung der Zahnflankenbeschichtung von Kunststoffzahnradern durchgeführt. Dazu wurde zur Simulation des schrägen Ioneneinfalls der Probenhalter modifiziert, so dass dazu auch ebene Proben nach der Beschichtung auswertbar waren (V-Halter). Der Öffnungswinkel der Nut zur Halterung der Proben wurde in Anlehnung an den Öffnungswinkel von etwa 30° eines exemplarischen Kunststoffzahnrades gewählt. Mittels einer Erhöhung des Kammerdruckes sollte durch verstärkte Gasstreuung die ta-C-Beschichtung in der V-Nut optimiert werden. Dazu wurde Argon- bzw. Stickstoffgas in den Rezipienten eingelassen. Messergebnisse zu Ionenstrom, Schichtdicke und Schichtdickenverteilung unter dieser Gasstreuung bildeten die Grundlage für die Beschichtung von Bauteilen. Es zeigte sich, dass die Gasstreuung einen deutlich höheren Einfluss auf den Ionenstrom hat als auf die Beschichtungsrate, da der Ionisierungsgrad durch Stoßprozesse verringert wird.

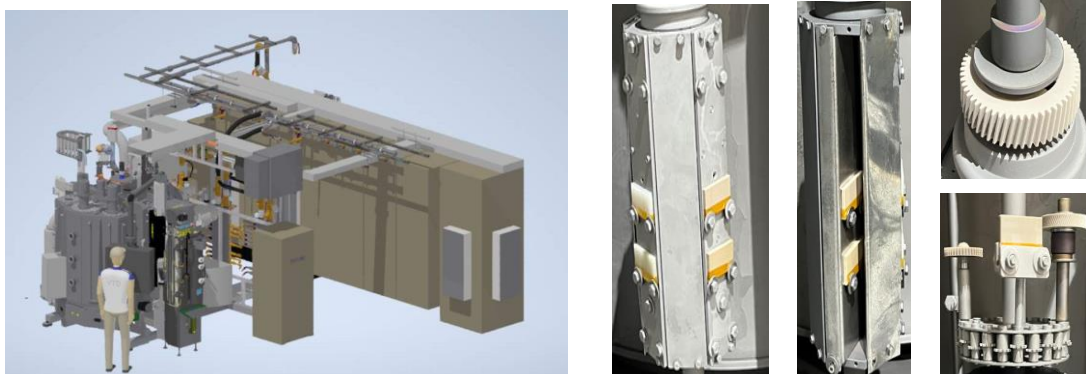


Abbildung 101: Links: VON ARDENNE ta-C- Beschichtungsanlage DREVA 900; rechts: verwendete Halterungsoptionen Sechseckprisma, „V-Halter“ und Kasette mit Kicker für eine weitere Rotationsachse

Nach Durchführung der ta-C-Beschichtung wurden zur Schichtcharakterisierung Schichtdicke, Schichthaftung und Oberflächenrauigkeitswerte bestimmt.

Zur Charakterisierung des Verschleißverhaltens der ta-C-beschichteten Kunststoffsubstrate wurden zwei unterschiedliche Testverfahren eingesetzt. Bei ersteren handelt es sich um ein Präzisions-Kalottenschleifverfahren (KaloMAX NT, Fa. BAQ). Die Versuchsdurchführung wurde gemäß der Betriebsanleitung des Herstellers BAQ durchgeführt. Als Abrasivmittel wurde eine vom Hersteller bezogene Schleifsuspension (BAQ Slurry APT1, Al_2O_3 1 μm , Tropfen der Masse: 35 mg $\pm$ 1 mg) eingesetzt.

Beim zweiten Verfahren handelte es sich um das Prüfgerät „Taber Abraser“ (Fa. Taber) zur Bestimmung des Abriebwiderstands. Dafür wurden auch größere Kunststoffplatten (100 mm x 100 mm) mit ta-C beschichtet, die mit einer vollständigen Verschleißspur versehen und über den Massenverlust ausgewertet werden konnten. Bei der Auswertung des Verschleißverhaltens mittels Massenverlustes sind in Abbildung 102 die durch Wiegung (Mikrowage der Fa. Sartorius) ermittelten Werte von unbeschichteten Grundmaterial (PEEK) und ta-C-beschichteten PEEK vergleichend dargestellt. Die Durchführung des Wiegens erfolgte alle 200 Zyklen mit Austausch des Al_2O_3 -Schleifpapiers gemäß Vorgaben des Herstellers.

Abbildung 102 (links) zeigt deutlich die hohe Verschleißschutzwirkung der ta-C-Beschichtung im Vergleich zum unbeschichteten PEEK-Substrat; Abbildung 102 (rechts) die Verschleißspuren nach 1000 Zyklen. Messungen der Erosionstiefe bestätigten das Ergebnis der Wägung.

Mit beiden Testverfahren konnte eine hervorragende Verschleißschutzwirkung der ta-C-Beschichtung von PEEK und PA12 nachgewiesen werden. Im Fall der Verschleißprüfung mittels Kalottenschleif war die Verschleißrate der ta-C-beschichteten PEEK-Proben ca. 2 Größenordnungen geringer als im Falle der unbeschichteten PEEK- Substrate.

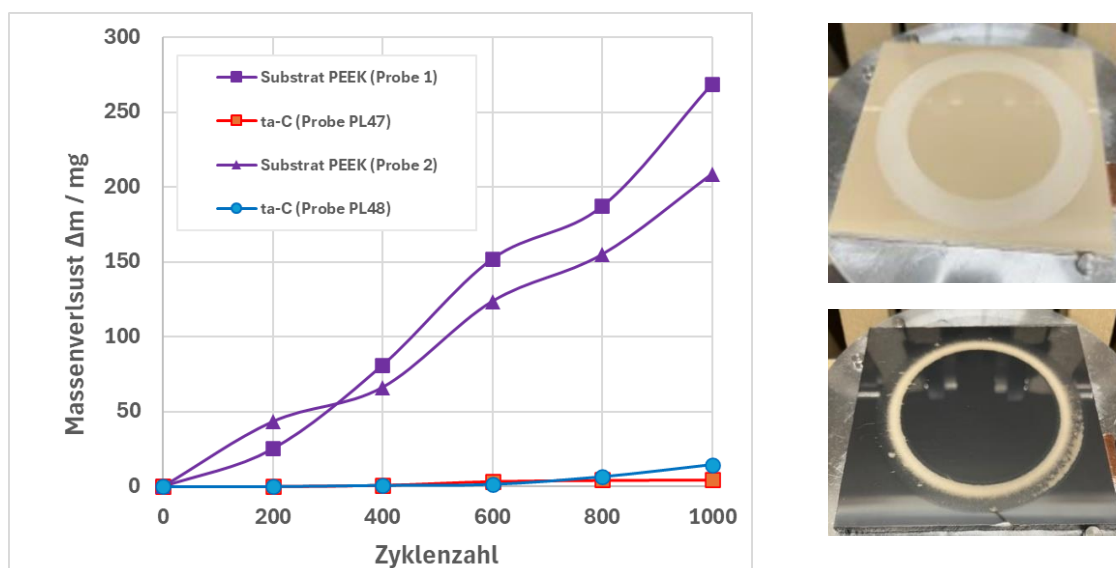


Abbildung 102: Links: Verschleißtestung mittels Taber-Abraser-Testung; Massenverlust/mg; rechts oben: PEEK-Substrat nach 1000 Zyklen (max. Erosionstiefe: 60 μm); rechts unten: ta-C-Beschichtung (d ta-c = ca. 2 μm) nach 1000 Zyklen (max. Erosionstiefe: 5 μm)

Im Rahmen des Projektes wurden seitens VA ausgewählte Kunststoffkomponenten der Projektpartner CEROBear, Evonik und hGears zur Einsatztestung mit ta-C beschichtet. Abbildung 103 (links) zeigt im Vordergrund zwei ta-C-beschichtete Evonik-Zahnräder (C030136) und im Hintergrund ein hGears-Zahnrad (Welle 1–2, stage 1–2), sowie eine Flachprobe (40 mm x 25 mm) desselben Grundmaterials (PEEK). In Abbildung 103 (rechts oben) sind zwei Zahnräder von hGears gezeigt. Unten rechts sind ta-C-beschichtete Kugellagerkäfige von CEROBear zu sehen.



Abbildung 103: Links: Zahnräder (Evonik, hGears) und Probekörper aus PEEK nach der ta-C-Beschichtung; rechts oben: zwei ta-C-beschichtete Zahnräder von hGears; rechts unten: ta-C-beschichtete Kugellagerkäfige von CEROBear

Die Einsatzdauer des Zahnrades von Evonik mit Cr-Haftschrift war deutlich höher (964 Zyklen bei Versuch mit Cr- HS gegenüber 396 Zyklen bei Versuch ohne Cr-HS, Testung mit Öl bei 80 °C). Die Zyklenzahl des unbeschichteten Zahnrades konnte jedoch nicht erreicht werden. Ursache waren Brüche am Zahnfuß aufgrund von Überlastung des Grundmaterials. CEROBear wurden ta-C-beschichtete Kugellagerkäfige zur Testung zur Verfügung gestellt.

Beim Einsatztest der Zahnräder von hGears wurden die prozentualen Antriebsverluste eines E-Bike-Getriebes in Abhängigkeit vom Drehmoment untersucht. Die Antriebsverluste der durch VA beschichtete Zahnräder lagen etwas höher als bei den durch den Projektpartner IWS ta-C-beschichteten Zahnrädern. Als Ursache konnte eine höhere Schichtdicke und damit höhere Rauigkeit der VA-Beschichtung ermittelt werden. Ein Schichtvergleich mittels Tribometer durch das IWS bestätigte diesen Sachverhalt.

Konzeption und Konstruktion eines Beschichtungsmoduls für horizontale Durchlaufbeschichtung (VON ARDENNE)

Bei diesen Arbeiten erfolgte die Konzeption und Konstruktion des horizontalen Kohlenstoff-Beschichtungsmoduls LAM1100, das zur Herstellung wasserstofffreier supragleitfähiger Kohlenstoffschichten mit hoher Beschichtungsrate dient.

Die neue Konzeption des Laser-Arc-Moduls weist die folgenden Eigenschaften auf:

- Das Modul ist für horizontale und vertikale Einbaulage geeignet, statt der bisher ausschließlichen vertikalen Einbaulage in Produktion.
- Größen-Skalierung der Breite des LAM-Moduls durch Verwendung einer Kohlenstoff-Quellenbreite von 1100 mm statt der bisher eingesetzten Kohlenstoff-Quellenbreite von 2 x 200 mm beim LAM500.
- Eignung für die Geometrie des Superfilters, der beim Projektpartner IWS entwickelt wurde, so dass eine Kombination des LAM1100 mit dem Superfilter realisierbar ist.
- Durchgängig angeordnete Kohlenstofftargets, um eine gute Homogenität der Schichteigenschaften bei großer Quellenbreite zu ermöglichen.
- Das Konzept ermöglicht eine weitere Skalierung für eine noch größere Kohlenstoff-Targetbreite oder auch eine reduzierte Kohlenstoff-Targetbreite.
- Eignung des Laser-Arc-Moduls für Beschichtungsanlagen zur hochproduktiven In-Line-Beschichtung und Auslegung zur Inline-Nutzung durch konstruktive Änderungen für eine höhere Standzeit.

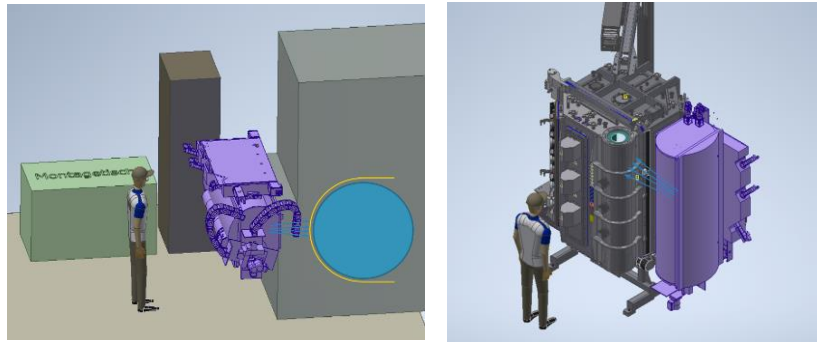


Abbildung 104: Anordnung des neuen Laser-Arc-Moduls LAM1100 in verschiedenen Einbaulagen. Links: In horizontaler Einbaulage zur Bandbeschichtung. Rechts: In vertikaler Einbaulage zur Verwendung an einer exemplarischen Batch-Beschichtungsanlage. Das Modul ist jeweils in Lila dargestellt.

In der Abbildung 104 wird beispielhaft die Nutzung des neuen Laser-Arc-Moduls LAM1100 in horizontaler Einbaulage zur Bandbeschichtung (links) und in vertikaler Einbaulage an einer Anlage zur Batch-Beschichtung gezeigt (rechts).

Folgende konzeptionelle Eigenschaften gehen über die im Projektantrag vorgesehenen Modul-Entwicklung hinaus: Standzeiterhöhung, Größen-Skalierung sowie die universelle Eignung für eine horizontale und vertikale Verwendung.

Zur Absicherung der Konzeption des neuen Moduls wurden in der Frühphase des Projektes vorbereitende experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Insbesondere wurden das thermische Verhalten eines Laser-Arc-Moduls LAM500 bei höherer Leistungsdichte untersucht und das Zündverhalten eines neuen Lasers und die Eigenschaften weiterer neuer optischer Komponenten validiert und bei Bedarf optimiert.

Basierend auf den konzeptionellen Arbeiten erfolgte anschließend die mechanische Konstruktion und die Elektrokonstruktion eines Demonstrators des Laser-Arc-Moduls LAM1100. In diese konstruktiven Arbeiten flossen die Ergebnisse der vorgenannten Testung von Einzelkomponenten ein, um die resultierenden Risiken des Gesamtkonzeptes zu minimieren.

Aufbau und Erprobung eines Beschichtungsmoduls für horizontale Durchlaufbeschichtung (VON ARDENNE)

Im Rahmen dieser Arbeiten wurde das zuvor konzipierte und konstruierte Beschichtungsmodul LAM1100 in Form eines Demonstrators mechanisch und elektrisch aufgebaut und schrittweise erprobt.

Vor der Erprobung des Gesamtmoduls wurden in diesem Arbeitspaket bereits wesentliche Einzelkomponenten des optischen Laser-Scanner-Systems getestet und optimiert. Dies betraf folgende Kernkomponenten:

1. Einen alternativen Laser für eine bessere Integration in Inline-Anlagenkonzepte.
2. Neue Spiegel-Loch-Scheiben ermöglichen die angestrebte Target-Quellenbreite von 1100 mm, indem sie den Laserstrahl des PulsLasers in mehrere Strahlengänge aufteilen.
3. Das neue Scannersystem ermöglicht die schnelle Auslenkung des aufgeweiteten Laserstrahls des PulsLasers, um die Kohlenstoff-Targets linear abzuscannen.
4. Neue Feldobjektive, welche den PulsLaser auf die Kohlenstofftargets fokussieren und die gezielte Zündung der einzelnen Kohlenstoff-Arc-Entladungen sicherstellen.

In der Abbildung 105 ist der aufgebaute Demonstrator während der Erprobung dargestellt. Im Rahmen Erprobung des Demonstrators zeigte sich, dass das LAM1100 alle getesteten Charakteristika wie vorgesehen erfüllt.

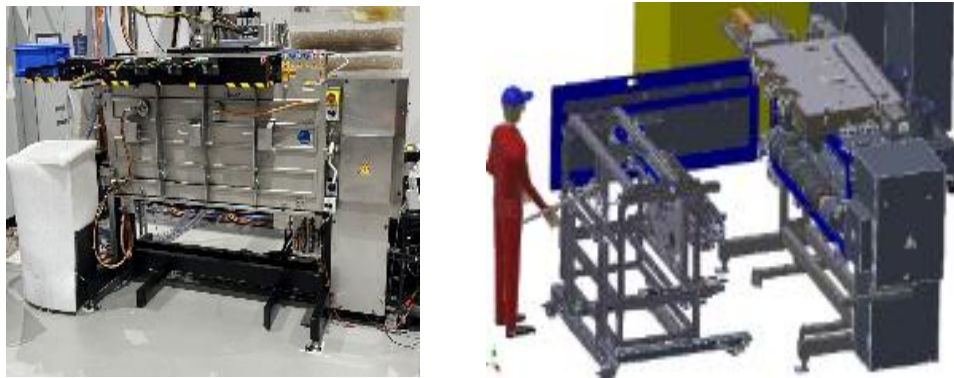


Abbildung 105: Fotografische Ansicht und Modellabbildung des Demonstrators des horizontalen Beschichtungsmoduls LAM1100.

Links: Demonstrator des horizontalen Beschichtungsmoduls LAM1100 während der Erprobung. Das flache horizontale schwarze Bauelement im oberen Bereich des Moduls ist das neu entwickelte optische Laser-Scanner-System für eine Quellenbreite von 1100 mm. Rechts: Modellabbildung des Demonstrators des horizontalen Beschichtungsmoduls LAM1100 mit dem Handlingwagen für die Kohlenstofftargets.

Die während der Inbetriebnahme und Erprobung aufgetretenen Ergebnisse wurden analysiert und flossen in die nachfolgenden Arbeiten ein.

Folgende Eigenschaften, die bereits während der Erprobung des Demonstrators des LAM1100 validiert werden konnten, sollen hier exemplarisch besonders herausgestellt werden:

- Größen-Skalierung des Quellenmoduls auf eine Kohlenstoff-Targetbreite von 1100 mm.
- Hervorragende Zündeigenschaften der Bogenentladungspulse über die komplette Target-Quellenbreite.
- Verteilung der thermischen Kühllast des Beschichtungsmoduls auf die einzelnen Kühlkreise des Beschichtungsmoduls und der Testkammer entsprechend der konzeptionellen und konstruktiven Auslegung.
- Nach Optimierung der Verteilung wurde bereits ohne die Verwendung einer Korrekturblende eine Schichtdickenhomogenität der Kohlenstoffbeschichtung von $\pm 10\%$ über einen Beschichtungsbereich von 90 cm erzielt. Weitere Optimierungen sind geplant.
- Nachweis der Eignung einer Standard-Komponente (Target-Endblock) aus Eigenfertigung für den Anwendungsfall Laser-Arc-Modul.
- Nachweis der thermischen Stabilität und der Komponentenstabilität im Rahmen einer mehrtägigen Dauererprobung. Die dabei ermittelten Plasma-Zündraten sind in Abbildung 106 dargestellt.
- Nachweis der vorgesehenen Kohlenstoff-Beschichtungsrate für eine Modulfrequenz von 600 Hz für die gesamte Kohlenstoff-Targetbreite von 1100 mm.
- Anhand des Verbrauchs der Targets und der Bedampfungsschutzfolie konnte bei einer Modul-Pulsfrequenz von 600 Hz gezeigt werden, dass eine Kampagnendauer für eine Inline-Beschichtung von einer Woche ohne Unterbrechung möglich ist.
- Neu konzipierte Spiegel-Loch-Scheiben mit verringertem Fertigungs- und Justageaufwand.
- Erweiterter Scanbereich der Einzelscanner gegenüber dem LAM500 durch neues optisches Design mit neuen optischen Komponenten.

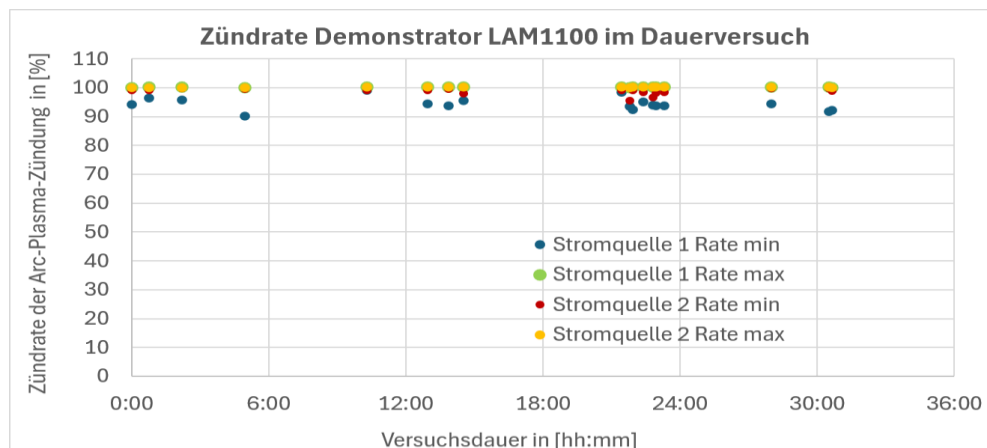


Abbildung 106: Stabilität des Verlaufes der Zündrate des Bogenverdampfung bei der Langzeiterprobung des Demonstrators des horizontalen Beschichtungsmoduls LAM1100

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen (HAP 4500)

Arbeiten bei VON ARDENNE

Im Rahmen dieses HAP wurde zunächst die Produktionskapazität verschiedener Beschichtungsanlagen gegenübergestellt. Weiterhin wurden die relativen Beschichtungskosten und der Energieverbrauch dieser Beschichtungsanlagen für die Beschichtung von tribologischen Bauteilen miteinander verglichen.

Produktivitätsabschätzungen (bauteilbezogen) von PVD Batch- und Durchlaufbeschichtung (VON ARDENNE)

Unter Einbeziehung der Informationen der Konsortialpartner zu den notwendigen Beschichtungszeiten wurden bauteilbezogene Produktivitätsabschätzungen für verschiedene Bauteile vorgenommen, vgl. Tabelle 7. Die Berechnungen basieren auf einem in der Automobilindustrie üblichen 17-Schichtbetrieb (wöchentlich 17 Schichten von jeweils 8 Stunden). Für die Produktivität bei der Beschichtung von Riemenrädern wurden folgende Daten ermittelt. Es wurden dabei 50 Produktionswochen im Jahr angenommen. Bei einem Anlagenbetrieb 24/7 ergeben sich rund 20 % höhere Jahres-Produktionskapazitäten.

Tabelle 7: Jährliche relative Beschichtungskapazitäten für Riemenräder

Anlage	Anlage Typ 1 (Dreva600LAM)	Anlage Typ 2 (größerer Drehkorbumfang)	Anlage Typ 3 (größerer Drehkorbumfang und -höhe)
LAM-Modul	LAM Typ 1	LAM Typ 1	LAM Typ 2
Teil	Riemenrad	Riemenrad	Riemenrad
Relative Produktionskapazität	100 %	260 %	550 %

Wenn statt einer Anlage vom Typ 1 (Batchanlage Dreva600LAM) eine Anlage vom Typ 2 (Batchsystem mit größerem Drehkorbumfang) verwendet wird, ergibt sich eine Steigerung der Produktionskapazität um Faktor 2,6. Eine Anlage vom Typ 3 (Batchsystem mit erhöhtem Drehkorbumfang und erhöhter Beschichtungshöhe) ermöglicht eine weitere Steigerung der Produktionskapazität bis zu einem Faktor 5,5 im Vergleich zu Anlage Typ 1.

Ermittlung von bauteilbezogenen Beschichtungskosten (VON ARDENNE)

Unter Einbeziehung der Informationen der Konsortialpartner wurden bauteilbezogene Beschichtungskosten ermittelt. Die Berechnungen basieren auf einem in der Automobilindustrie üblichen 17-Schichtbetrieb.

Tabelle 8: Relative Beschichtungskosten und Energieaufwand zur Beschichtung für Riemenräder

Anlage	Anlage Typ 1 (Dreva600LAM)	Anlage Typ 2 (größerer Drehkorbumfang)	Anlage Typ 3 (größerer Drehkorbumfang und -höhe)
LAM-Modul	LAM Typ 1	LAM Typ 1	LAM Typ 2
Teil	Riemenrad	Riemenrad	Riemenrad
Relative Beschichtungskosten je Riemenrad	100 %	50 %	30 %
Relativer Energieverbrauch für die Beschichtung je Riemenrad	100 %	65 %	52 %

Die Daten in Tabelle 8 zeigen, dass im Vergleich zur Anlage Typ 1 einhergehend mit der Steigerung der Produktionskapazität eine Kostensenkung der Beschichtung auf 50 % für Anlage Typ 2 bzw. 30 % für Anlage Typ 3 realisiert werden kann. Dabei kann außerdem auch der Energieverbrauch der Beschichtung je Riemenrad deutlich reduziert werden, nämlich auf etwa 65 % für Anlage Typ 2 und auf etwa 52 % für Anlage Typ 3.

Ingangbringung der Wertschöpfungskette für Kunststoff-Tribologiebauteile (HAP 4600)

Herstellverfahren und Technologien von Kunststoffbauteilen

In der Fahrzeugindustrie ist es wichtig, zwischen Prototypenfertigung und Serienfertigung von Kunststoffbauteilen zu unterscheiden, da die Wahl des Herstellungsverfahrens stark von den spezifischen Anforderungen abhängt. In CHEPHREN wurden unterschiedlichste Verfahren unter Führung von BMW Motorrad evaluiert, um Prototypen zu fertigen mit Unterstützung durch Evonik und hGears, sowie IMS Gear im Unterauftrag, und diese ausführlich analysiert.

Für die Prototypenfertigung kann der 3D-Druck mit selektivem Lasersintern (SLS) besonders geeignet sein. Dieses Verfahren ermöglicht eine schnelle Herstellung komplexer Geometrien ohne den Einsatz zusätzlicher Werkzeuge um eine hohe Designfreiheit bei gleichzeitig niedrigen Bauteilkosten zu erreichen. Allerdings können die mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu spritzgegossenen Teilen unterschiedlich sein. Der 3D-Druck via SLS ist allerdings weniger für große Serien geeignet, da die Produktionsgeschwindigkeit im Vergleich zu anderen Verfahren, wie z.B. der Spritzgusstechnologie niedriger und kostenintensiver ist.

Das Hot Compression Molding (HCM) kann ebenfalls für Prototypen verwendet werden, erfordert jedoch oft spezielle Formen, was die Flexibilität einschränkt. Weiterhin kann auch die Extrusion für die Herstellung von Prototypen eingesetzt werden, falls die Halbzeuge die erforderlichen Maße einhalten. Bei beiden Herstellverfahren muss allerdings im Anschluss eine maschinelle Nachbearbeitung z.B. mittels Fräsen erfolgen, um die finale Geometrie zu erhalten.

Auch die Spritzgusstechnologie kann für Prototypen eingesetzt werden, jedoch sind die Kosten für die Werkzeuge hoch und sie bietet wenig Flexibilität hinsichtlich möglicher Änderungen im Design. In CHEPHREN konnte BMW Motorrad jedoch ein Alu-Spritzgusswerkzeug für Prototypenbauteile einsetzen, um auch diese Technologie bewerten zu können. Ein Stahl-Werkzeug für eine Serienfertigung, mit hohen Stückzahlen, ist jedoch kostenintensiver.

Die Spritzgusstechnologie ist ideal für die Serienfertigung, da sie hohe Stückzahlen mit gleichbleibender Qualität produzieren kann. Sie bietet eine hohe Maßgenauigkeit, gute

Oberflächenqualität und mechanische Eigenschaften, kann jedoch längere Vorlaufzeiten und höhere Kosten bei der Formherstellung bedeuten.

Die wirtschaftlichen Auswirkungen des Herstellungsverfahrens für Kunststoffteile in der Fahrzeugindustrie sind erheblich und werden maßgeblich durch die Produktionskosten beeinflusst. Aufgrund der bereits verkauften Stückzahlen des Basisfahrzeuges der BMW Scooter CE04 und dessen Riemenrades, welches in CHEPHREN untersucht wurde, kommt nur dieses Verfahren für die Serienfertigung bei BMW Motorrad in Betracht.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Wahl des Herstellungsverfahrens in der Fahrzeugindustrie sowohl für die Prototypen- als auch für die Serienfertigung von Kunststoffteilen entscheidend von den spezifischen Anforderungen sowie den gewünschten Eigenschaften und Anzahl der benötigten Teile abgeleitet werden kann.

Aufbau und Eigenschaften von Kunststoffen

Kunststoffe bestehen aus langen Polymerketten (Makromoleküle) und i.d.R. Additiven, deren Art, Konzentration und Verteilung maßgeblich die Eigenschaften bestimmen. Grundsätzlich unterscheidet man bei Thermoplasten zwischen amorphen und teilkristallinen Polymeren:

- Amorphe Kunststoffe (z. B. PC oder PMMA) besitzen eine ungeordnete Molekülstruktur. Sie sind transparent aber meist weniger chemikalienbeständig.
- Teilkristalline Kunststoffe (z. B. PA, POM, PEEK) besitzen sowohl geordnete (kristalline) als auch ungeordnete (amorphe) Bereiche. Sie sind mechanisch stabiler, verschleißfester und chemikalienresistenter.

Zusätzlich werden Kunststoffe durch Verstärkungen (z. B. Glasfasern, Kohlefasern) und Additive (UV-Stabilisatoren, Flammschutzmittel etc.) gezielt für bestimmte Anwendungen modifiziert. Die Materialeigenschaften hängen stark vom gewählten Kunststofftyp, der Verarbeitung und der Nachbehandlung ab.

Insbesondere die nachfolgend dargestellten Potentiale und Vorteile der Kunststoffe gegenüber Metallen motivierten die Untersuchungen der Partner Evonik, BMW Motorrad, hGears und IMS Gear im Unterauftrag in CHEPHREN.

Kunststoffe sind viskoelastisch, das heißt, sie weisen sowohl elastische als auch viskose Eigenschaften auf. Dadurch können u.a. Schwingungen im Vergleich zu Metallen besser absorbiert werden. Dies kann sich vorteilhaft auswirken, um Schäden vorzubeugen, da der Kunststoff nachgiebig ist und nach der Verformung bzw. Belastung (abhängig vom Grad der Belastung) sich wieder in die Ausgangslage orientieren kann. Metallbauteile sind elastisch, verformen sich bzw. versagen bei zu hoher Belastung meist dauerhaft. Kunststoffteile dämpfen aufgrund des viskoelastischen Verhaltens bei mechanischem Kontakt (z. B. Zahnräder, Gleitlager) und erzeugen dadurch deutlich weniger Geräusch als vergleichbare Metallteile. Auch aus diesem Grund wurden in CHEPHREN die Untersuchungen von Ketten- und Zahnrädern intensiviert.

Kunststoffe können als strukturelle Dämpfer zwischen schwingungsaktiven und ruhenden Bauteilen eingesetzt werden – beispielsweise als Motorlager, Distanzstücke oder Gehäuseeinsätze. Durch die Formgebung von Kunststoffteilen (z. B. Verrippungen, flexible Zonen) kann gezielt eine Entkopplung oder Dämpfung eingeplant werden – das ist bei Metallen nur mit zusätzlichen Dämpferelementen möglich. Dadurch ergeben sich weitere Potentiale, die den Einsatz im Antrieb eines Fahrzeuges vorteilhaft gestalten können.

Viele technische Kunststoffe haben (je nach Tribosystem) einen geringeren Reibungskoeffizienten als Metalle. Besonders ausgeprägt ist dies u.a. bei:

- POM (Polyoxymethylen)
- PA (Polyamid)
- PTFE (Polytetrafluorethylen))
- PEEK (Polyetheretherketon)

Dies bedeutet, dass die Kontaktreibung geringer ist, was zu weniger Energieverlusten, weniger Wärmeentwicklung und höherer Effizienz führt. Da die Eigenschaften von Kunststoffteilen jedoch stark verarbeitungsabhängig sind, ist eine gezielte Qualitätssicherung und auch angepasste

Validierungsarbeit notwendig, um eine bessere Alternative zu bisher verwendeten Metallbauteilen nachweisen zu können.

Diese Potentiale motivierten Untersuchungen in CHEPHREN um akustische, schwingungs- und reibungstechnische Vorteile von Kunststoffen in diesen Einsatzbereichen zu evaluieren.

2 Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse

Zur Bewertung der betrachteten Technologien in CHEPHREN wurden für ausgewählte AWF Potentialindikatoren erarbeitet. Im Fokus stand die Energie- und Emissionseinsparung während der Nutzungsphase. Für den AWF Riemenrad erfolgte zudem eine Ausweitung der Betrachtung auf die Herstellungsphase (siehe Abschnitt 1.2.4). Die Bewertung der Energieeinsparung erfolgte auf Basis von Effizienzmessungen mit etablierten Testzyklen für die jeweiligen Anwendungen, bspw. dem WLTP-Zyklus für den AWF E-Achse. Weiterhin wurden nachfolgende Annahmen zur Berechnung des Energie- und Emissionseinsparpotential getroffen:

- Die Umrechnung von Energie- auf Emissionsreduzierung erfolgte auf Basis des Strommix in Deutschland für das Jahr 2023 und beträgt 380 gCO₂/kWh.
- Für den AWF Steuerkettenritzel erfolgte die Umrechnung auf Basis des Energiegehalts von Benzin und beträgt 2370 gCO₂/l.
- Die jeweiligen Stückzahlen pro AWF beziehen sich auf das Jahr 2024 in Deutschland. Somit werden äquivalente Einsparpotentiale auch bei Produkten von Wettbewerbern angenommen sowie eine vollständige Marktdurchdringung. Für AWF mit unbekannter Stückzahl werden die Potentiale herstellerbezogen angegeben.

Tabelle 9 zeigt das geschätzte Energie- und Einsparpotential mit jeweils durchgeführter Maßnahme ausgewählter AWF. Detaillierte Informationen zu den Maßnahmen finden sich in den jeweiligen Abschnitten in Abschnitt 1.2. Weiterhin ist neben der absoluten Einsparung auch die relative Einsparung im Vergleich zur Referenztechnologie/ zum Stand der Technik angegeben.

Es ergibt sich ein kumuliertes Emissionseinsparpotential von 89.000 t CO₂ pro Jahr in Deutschland. Hierbei gilt es zu beachten, dass mit fortschreitender Marktdurchdringung das Emissionseinsparpotential deutlich steigen wird. Weiterhin ist bei Durchdringung internationaler Märkte eine deutliche Skalierung möglich. Ferner ist durch den im Forschungsprojekt aufgezeigten Methodentransfer die Erschließung neuer Anwendungsfelder mit ähnlichen Einsparpotentialen zu erwarten.

Tabelle 9: Abgeschätztes Energie- und Emissionseinsparpotential ausgewählter Technologien und Anwendungsfälle.

*Keine Angabe möglich, ¹Basis Verkaufszahlen Elektrofahrzeuge in Deutschland 2024, ²Verkaufszahlen Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor 2024 (Anteil Steuerketten 33 %) in Deutschland.

Anwendungsfall	Technologie	Energieeinsparung in kWh p.a. pro Einheit für Stückzahl in D (rel. Einsparung)	CO ₂ Reduktion in t CO ₂ p.a. pro Einheit für Stückzahl in D
E-Achse	Innovative Schmierstoffe mit niedriger Viskosität und neuartigen Polymeradditiven	3,3 1.4 Mio ¹ (0,14 %)	0,001254 535 ¹
Sondergetriebe	Schmierstoffe mit funktionalem Wasseranteil auf Basis von PAG	* 1.2 Mio (herstellerbezogen) (35 %)	* 447 (herstellerbezogen)
Planetengetriebe	Schmierstoffe mit funktionalem Wasseranteil auf Basis von PAG	* 193 Mio (herstellerbezogen) (35 %)	* 73.475 (herstellerbezogen)
Förderkette	Substitution von Stauförderkettenelementen aus Stahl durch Kunststoff	* 11.4 Mio* (37 %)	* 4.332
Riemenrad	Substitution Riemenrad aus Aluminiumdruckguss durch Kunststoffriemenrad	1,5 6.000 (herstellerbezogen) (0,19 %)	* 65 (Herstellung + Nutzung)
Steuerkettenrad	Substitution Stahlritzel durch Kunststoffritzel	81,6 40 Mio ² (0,85 %)	* 10.053

Die in CHEPHREN betrachteten Technologien in den jeweiligen AWF wurden weiterhin nach ihrer Technologiereife bewertet. Hierzu erfolgte eine Einordnung nach Technology Readiness Level (TRL). Tabelle 10 fasst die erreichten TRLs zusammen.

Es wird deutlich, dass viele der betrachteten Technologien bereits einen hohen Entwicklungsstand aufweisen und vereinzelt nahe an der Markteinführung liegen.

Tabelle 10: Erreichte TRLs ausgewählter Anwendungsfälle und Technologien

Anwendungsfall	Erreichtes TRL nach CHEPHREN
Zahnradgetriebe	TRL3 (Wasserhaltige Schmierstoffe) TRL3 (Beschichtungen)
E-Bike Getriebe	TRL3 (Kunststoffzahnräder)
Sondergetriebe	TRL8 (Geometrieangepassung) TRL4 (Wasserhaltige Schmierstoffe)
Förderkettentriebe	TRL7 (Kunststoffstützrolle)
Steuerkettenritzel	TRL3 (Kunststoffritzel)
Riemenrad	TRL 5 (Kunststoffriemenrad)
E-Achse	TRL5 (Schmierstoffe) TRL3 (Beschichtungen)

3 Veröffentlichungen

Was	Leitung	Autorenschaft	Titel	Datum	Zugriff
Poster/ 15. Aachener Oberflächentechnik-Kolloquium 2021	RWTH IOT	K. Bobzin, C. Kalscheuer, J. Görtz	Triboaktive (Cr,Al,X)N-Beschichtungen zur Reibungsreduktion – CHEPHREN	07.12.2021	https://www.shaker.de/de/content/catalogue/index.asp?lang=de&ID=8&ISBN=978-3-8440-8350-7&search=yes
Pressemitteilung/ BMWi-Fachportal industrie-energieforschung.de	Fraunhofer IWS	V. Weihnacht	Supraschmierung in der Tribologie	10.01.2022	https://www.industrie-energieforschung.de/news/de/tribologie_chephren_supraschmierung_antriebssysteme
Präsentation/ Gesellschaft für Tribologie – 63. Tribologie Fachtagung (2022)	RWTH IOT	K. Bobzin, C. Kalscheuer, J. Görtz	CrAlN-Hartstoffbeschichtungen auf technischen Kunststoffen	20.09.2022	ISBN: 978-3-9817451-7-7
Präsentation/ Gesellschaft für Tribologie – 63. Tribologie Fachtagung (2022)	FZG	S. Hofmann, Enzo Maier, T. Lohner, K. Stahl	Friction and film thickness with water-containing gear fluids	27.09.2022	
Poster/ 16. Aachener Oberflächentechnik Kolloquium 2022	RWTH IOT	K. Bobzin, C. Kalscheuer, J. Görtz	CrAlN-Beschichtungen auf technischen Kunststoffen	12-2022	https://www.shaker.de/de/content/catalogue/index.asp?lang=de&ID=8&ISBN=978-3-8440-8863-2&search=yes ISBN: 978-3-8440-8863-2
Journal/ Frontiers in Mechanical Engineering	FZG	S. Hofmann, T. Lohner, K. Stahl	Influence of water content on elastohydrodynamic friction and film thickness of water-containing polyalkylene glycols	27.03.2023	https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmech.2023.1128447/full
Journal/ Industrial Lubrication and Tribology	FZG	F. Schmid, C. Paschold, T. Lohner, K. Stahl	Characteristics in Hard Conformal EHL Line Contacts	23.06.2023	https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ILT-12-2022-0366/full/html
Präsentation/ 64. Tribologie-Fachtagung, Göttingen 2023	Evonik Oil Additives	S. Wieber, D. Shakhvorostov, A. Hees, P. Moore	S. Wieber, D. Shakhvorostov, A. Hees, P. Moore	27.09.2023	
Präsentation / 64. Tribologie-Fachtagung, Göttingen 2023	Fraunhofer IWS	F. Kaulfuß, P. Neubauer, F. Härtwig, V. Weihnacht	ta-C-Verschleißschutzschichten auf Kunststoffbauteilen	27.09.2023	
Präsentation / 64. Tribologie-Fachtagung, Göttingen 2023	Fraunhofer IWM	F. Stief, L. Kruse, A. Klemen, K. Falk, M. Moseler	MD-Simulationen der Scherverdünnung bei PEG400 zur Konstitutivgesetzbildung	27.09.2023	
Präsentation / International Tribology Conference	FZG	S. Hofmann, T. Lohner, K. Stahl	Influence of water evaporation on elastohydrodynamic lubrication with water-containing polyalkylene glycols	28.09.2023	
Präsentation / International Tribology Conference	Fraunhofer IWS	V. Weihnacht et al.	Development of high-performance ta-C-based coatings for tribological applications using laser-arc technique	28.09.2023	

Was	Leitung	Autorenschaft	Titel	Datum	Zugriff
Poster/ 17. Aachener Oberflächentechnik Kolloquium	RWTH IOT	K. Bobzin, C. Kalscheuer, M. P. Möbius, J. Borowy	Triboactive CrAlMoN coatings deposited by pulsed arc-PVD with variable peak currents	11-2023	https://www.shaker.de/de/content/catalogue/index.asp?lang=de&ID=8&ISBN=978-3-8440-9305-6&search=yes ISBN: 978-3-8440-9305-6
Präsentation/ ICMCTF 2024	VON ARDENNE, Fraunhofer IWS	M. T. Wenzel et al.	ta-C Beschichtung von Kunststoffen: Coating of Plastic Parts with Tetrahedral Amorphous Carbon for Wear Protection Using Laser-Arc Technology	23.05.2024	https://icmctf2024.avs.org/
Präsentation/ 6th European DGM-Symposium on Friction, Wear and Wear Protection - Friction 2024	Fraunhofer IWS	V. Weihnacht	Enabling Superlubricity by superhard ta-C(:X) coatings	26. 02.2024	
Journal/ ACS Applied Materials & Interfaces 2024, 16, 18112–18123	Fraunhofer IWM, Fraunhofer IWS	S. Peeters, T. Kuwahara, F. Härtwig, S. Makowski, V. Weihnacht, A. F. Lasagni, M. Dienwiebel, M. Moseler, G. Moras	Surface Depassivation via B–O Dative Bonds Affects the Friction Performance of B Doped Carbon Coatings	28.03.2024	https://doi.org/10.1021/acsami.3c18803
Journal/ Friction	FZG	S. Hofmann, T. Lohner, K. Stahl	Influence of water evaporation on elastohydrodynamic lubrication with water-containing polyalkylene glycols	14.08.2024	https://doi.org/10.1007/s40544-024-0916-1
Journal/ Lubricants	FZG	F. Schmid; T. Lohner; K. Stahl	Friction in Oil-Lubricated Rolling–Sliding Contacts with Technical and High-Performance Thermoplastics	28.10.2024	https://www.mdpi.com/2075-4442/12/11/372
Journal/ Lubricants – Special issue Tribology in Germany: Latest Research and Development	Fraunhofer IWS	P. Neubauer, F. Kaulfuss, V. Weihnacht	A Tribological Study of ta-C, ta-C:N, and ta-C:B Coatings on Plastic Substrates under Dry Sliding Conditions	27.09.2024	https://doi.org/10.3390/lubricants12100331 https://www.mdpi.com/books/reprint/10388-tribology-in-germany-latest-research-and-development
Poster/ 18. Aachener Oberflächentechnik Kolloquium	IOT	K. Bobzin, C. Kalscheuer, M. P. Möbius, J. Borowy	Tribological Behavior of Triboactive CrAlMoN Coatings in Rolling Contact	12. 2024	https://www.shaker.de/de/site/content/shop/index.asp?lang=de&ID=8&ISBN=978-3-8440-9818-1
Präsentation/ 19th International Conference on Plasma Surface Engineering	Fraunhofer IWS	F. Kaulfuss, P. Neubauer, F. Haertwig, S. Makowski, V. Weihnacht	ta-C wear protection coatings on plastic components	03.09.2024	
Präsentation/ 65. Tribologie-Fachtagung der GfT	Fraunhofer IWS	F. Kaulfuß, F. Härtwig, S. Makowski, V. Weihnacht	ta-C-Einlaufschichten für Zahnradanwendungen	24.09.2024	
Präsentation/ 65. Tribologie-Fachtagung der GfT	Evonik, BMW	P. Kilian, P. Ludwig	Neue Potenziale von Kunststoffen im Fahrzeugantriebsstrang – Effizient, Leise, Leicht und Nachhaltig	24.09.2024	

Verbundprojekt CHEPHREN (Phase 1 + 2)
Gemeinsamer öffentlicher Abschlussbericht

Was	Leitung	Autorenschaft	Titel	Datum	Zugriff
Präsentation/ 65. Tribologie-Fachtagung der GfT	Evonik	D. Shakhvorostov	Effizienzmessung und Schmierstoffoptimierung in direktgekühlten E-Antrieben: Einfluss von Viskositätsindexverbesserern, Grundöl und Viskositätsprofil	24.09.2024	
Präsentation/ 65. Tribologie-Fachtagung der GfT	FZG	F. Schmid, S. Hofmann, T. Lohner, F. Stief, M. Moseler	Elastohydrodynamische Schmierung mit Polyethylenglykolen – Einfluss von Druckviskosität und Scherverdünnung	24.09.2024	
Präsentation/ 65. Tribologie-Fachtagung der GfT	Fraunhofer IWM	E. J. García, S. Peeters, F. Stief, K. Falk, M. Moseler	A multiscale study on the lubrication pocket effect: Can oil in surface textures relubricate dry contacts?	24.09.2024	
Präsentation/ 65. Tribologie-Fachtagung der GfT	iwis mobility systems	J. Pantförder	Reduktion von Reibung und Verschleiß in Antriebssystemen: Potenziale von PVD/PACVD-Beschichtungen im INLINE-Verfahren	24.09.2024	ISBN: 978-3-9817451-9-1
Präsentation/ 66. Tribologie-Fachtagung der GfT	VON ARDENNE	M.T. Wenzel, M. Holzherr, R. Seifert, B. Gebhardt	Projekt CHEPHREN: Untersuchungen von ta-C Beschichtungen auf Kunststoffsubstraten und Entwicklung eines neuen horizontalen LAM für industrielle Durchlaufanlagen	30.9.2025	
Präsentation/ 66. Tribologie-Fachtagung der GfT	FZG	S. Hofmann, F. Schmid, T. Lohner, K. Stahl	Aqueous Lubrication for Gears - Lubrication Mechanisms, Efficiency Potentials, and Challenges	30.9.2025	
Journal/ Engineering Research	FZG	S. Hofmann, T. Lohner, K. Stahl	Influence of water evaporation on the power loss behavior of cylindrical gears lubricated by aqueous polyalkylene glycols	2025	
Journal/ tbd	FZG / Fraunhofer IWM	F. Schmid, S. Hofmann, T. Lohner, K. Stahl, F. Stief, K. Falk, M. Moseler	Effect of Water in Elastohydrodynamic Lubrication with Polyethylene Glycol – A Multi-Scale and Multi-Method Approach	vrsl 2025	
Journal/ tbd	FZG	F. Schmid, S. Hofmann, T. Lohner, K. Stahl	In Situ Contact Analysis of Technical Thermoplastics under Elastohydrodynamic Lubrication	vrsl. 2025	

Literaturverzeichnis

- 1 Gesellschaft für Tribologie. GfT Arbeitsblatt 7. https://neu.gft-ev.de/wp-content/uploads/2002_AB_7_Tribologie.pdf (abgerufen am 25.06.2025)
- 2 Yilmaz, M.; Lohner, T.; Michaelis, K.; Stahl, K. Minimizing gear friction with water-containing gear fluids. *Forschung im Ingenieurwesen* **2019**, *83*, 327–337. <https://doi.org/10.1007/s10010-019-00373-2>
- 3 Liu, W.; Wang, H.; Liu, Y.; Li, J.; Erdemir, A., Luo, J. Mechanism of Superlubricity Conversion with Polyalkylene Glycol Aqueous Solutions. *Langmuir* **2019**, *35* (36), 11784–11790. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.9b01857>
- 4 Wang, H.; Liu, Y.; Li, J.; Luo, J. Investigation of Superlubricity Achieved by Polyalkylene Glycol Aqueous Solutions. *Advanced Materials Interfaces* **2016**, *3* (19), 1600531. <https://doi.org/10.1002/admi.201600531>
- 5 Poláček, T.; Šperka, P.; Křupka, I. Liquid superlubricity of lubricants containing hydroxyl groups and their aqueous solution under rolling/sliding conditions. *Friction* **2024**, *12*, 164–173. <https://doi.org/10.1007/s40544-023-0762-6>
- 6 Maier, E.; Ziegltrum, A.; Lohner, T.; Stahl, K. Characterization of TEHL contacts of thermoplastic gears. *Forschung im Ingenieurwesen* **2017**, *81*, 317–324. <https://doi.org/10.1007/s10010-017-0230-4>
- 7 Kaulfuss, F.; Weihnacht, V.; Zawischa, M.; Lorenz, L.; Makowski, S.; Hofmann, F.; Leson, A. Effect of Energy and Temperature on Tetrahedral Amorphous Carbon Coatings Deposited by Filtered Laser-Arc. *Materials* **2021**, *14* (9), 2176. <https://doi.org/10.3390/ma14092176>
- 8 Bobzin, K.; Brögelmann, T.; Kalscheuer, C. Triboactive CrAlN+X hybrid dcMS/HPPMS PVD nitride hard coatings for friction and wear reduction on components. *Surface and Coatings Technology* **2017**, *332*, 452–463. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.06.089>
- 9 Bobzin, K.; Brögelmann, T.; Kalscheuer, C. Arc PVD (Cr,Al,Mo)N and (Cr,Al,Cu)N Coatings for Mobility Applications. *Surface and Coatings Technology* **2019**, *384*, 125046. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125046>
- 10 Bobzin, K.; Brögelmann, T.; Kalscheuer, C.; Stahl, K.; Lohner, T.; Yilmaz, M. (Cr,Al)N and (Cr,Al,Mo)N hard coatings for tribological applications under minimum quantity lubrication. *Tribology International* **2019**, *140*, 105817. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.06.010>
- 11 Bobzin, K.; Brögelmann, T.; Kalscheuer, T.; Thiex, M. Steigerung der Leistungsfähigkeit technischer Kunststoffe durch DLC-Beschichtungen. *Tagungsband der 60. Gesellschaft für Tribologie (GfT) e.V. Tribologie-Fachtagung 2019*. ISBN 978-3-9817451-4-6.
- 12 Bobzin, K.; Kalscheuer, C.; Carlet, M.; Janowitz, J. Untersuchung mehrlagiger PVD-Temperatursensorschichten unter tribologischer Beanspruchung. *Reibung, Schmierung und Verschleiß: Forschung und praktische Anwendungen: 62. Tribologie-Fachtagung 2021*. GfT Gesellschaft für Tribologie e.V., 57/1-57/10.
- 13 Hofmann, S.; Lohner, T.; Stahl, K. Influence of water evaporation on elastohydrodynamic lubrication with water-containing polyalkylene glycols. *Friction* **2024**, *12* (10), 2370–2388. <https://doi.org/10.1007/s40544-024-0916-1>
- 14 Schmid, F.; Lohner, T.; Stahl, K. Friction in Oil-Lubricated Rolling–Sliding Contacts with Technical and High-Performance Thermoplastics. *Lubricants* **2024**, *12*, 372. <https://doi.org/10.3390/lubricants12110372>
- 15 Hofmann, S.; Maier, E.; Lohner, T. In Situ Contact Analysis of Polyetheretherketone under Elastohydrodynamic Lubrication. *Polymers* **2022**, *14* (20), 4398. <https://doi.org/10.3390/polym14204398>
- 16 Bode, B. Modell zur Beschreibung des Fließverhaltens von Flüssigkeiten unter hohem Druck. *Tribologie und Schmierungstechnik* **1989**, *36* (4), 182–189.
- 17 Eyring, H. Viscosity, Plasticity, and Diffusion as Examples of Absolute Reaction Rates. *The Journal of Chemical Physics* **1936**, *4* (4), 283–291. <https://doi.org/10.1063/1.1749836>

- 18 Yilmaz, M.; Lohner, T.; Michaelis, K.; Stahl, K. Minimizing gear friction with water-containing gear fluids. *Forschung im Ingenieurwesen* **2019**, 83, 327–337. <https://doi.org/10.1007/s10010-019-00373-2>
- 19 Hofmann, S.; Lohner, T.; Stahl, K. Influence of water evaporation on the power loss behavior of cylindrical gears lubricated by aqueous polyalkylene glycols. *Engineering Research* **2025**. Submitted.
- 20 Hasl, C.; Illenberger, C.; Oster, P.; Tobie, T.; Stahl, K. Potential of oil-lubricated cylindrical plastic gears. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing* **2018**, 12 (1), JAMDSM0016. <https://doi.org/10.1299/jamdsm.2018jamdsm0016>

Anhang

Anhang 1: Anwendungsfall E-Achse – b) Entwicklung von Schmierstoffkonzepten mit innovativen Additiv- und Polymerpaketen

Darstellung von Entwicklungsschmierstoffen, die nach Vorvalidierung auf dem E-Achsen Prüfstand untersucht wurden.

Tabelle 11: Auswahl an Entwicklungsschmierstoffe für Systemprüfstand

CHEPHREN Name		CE-xS-Ref-01	CE-OS-Ref-02	CE-OS-010	CE-OS-011	CE-OS-012	CE-OS-013	CE-xS-018	CE-OS-024	CE-OS-025	CE-xS-029	CE-xS-030	CE-xS-031	CE-xS-032	CE-xS-033
Kin. Visc. (ASTM D-445) 40°C	mm²/s	29.4	29.2	28.5	27.9	28.4	24.2	26.6	28.4	16.72	15.2	16.03	18.14	20.0	23.7
Kin. Visc. (ASTM D-445) 100°C	mm²/s	5.95	5.98	6.02	5.96	5.97	6.02	5.73	6.03	4.17	3.93	4.03	4.95	4.92	6.00
VI (ASTM D2270)		153	156	166	167	163	214	165	167	161	162	158	221	185	217
Viskositätsindex verbesserer (VII)		-	-	-	-	low Mw PAMA (mod1)	dcomb	low Mw dPAMA	-	-	-	comb	dcomb	comb	dcomb
Schwefel in VII		-	-	-	-	Nein	Nein	Ja	-	-	-	Ja	Nein	Ja	Nein
Grundöl		Gr III+	Gr III	Gr III	Gr III	Gr III	Gr III	Gr III	PAO	PAO	PAO	Gr III	Gr III	Gr III	Gr III
Additivpaket		S-haltig	S-frei	S-frei	S-frei	S-frei	S-frei	S-haltig	S-frei	S-frei	S-haltig	S-haltig	S-haltig	S-haltig	S-haltig

Anhang 2: Anwendungsfall Wälzlager

Darstellung von Reibungsmessungen, durchgeführt als Stribeck-Messungen zur Ermittlung der Lagerreibung in Abhängigkeit von der Drehzahl. Untersucht wurden zwei Laststufen LC1 (niedrige Last) und LC4 (hohe Last).

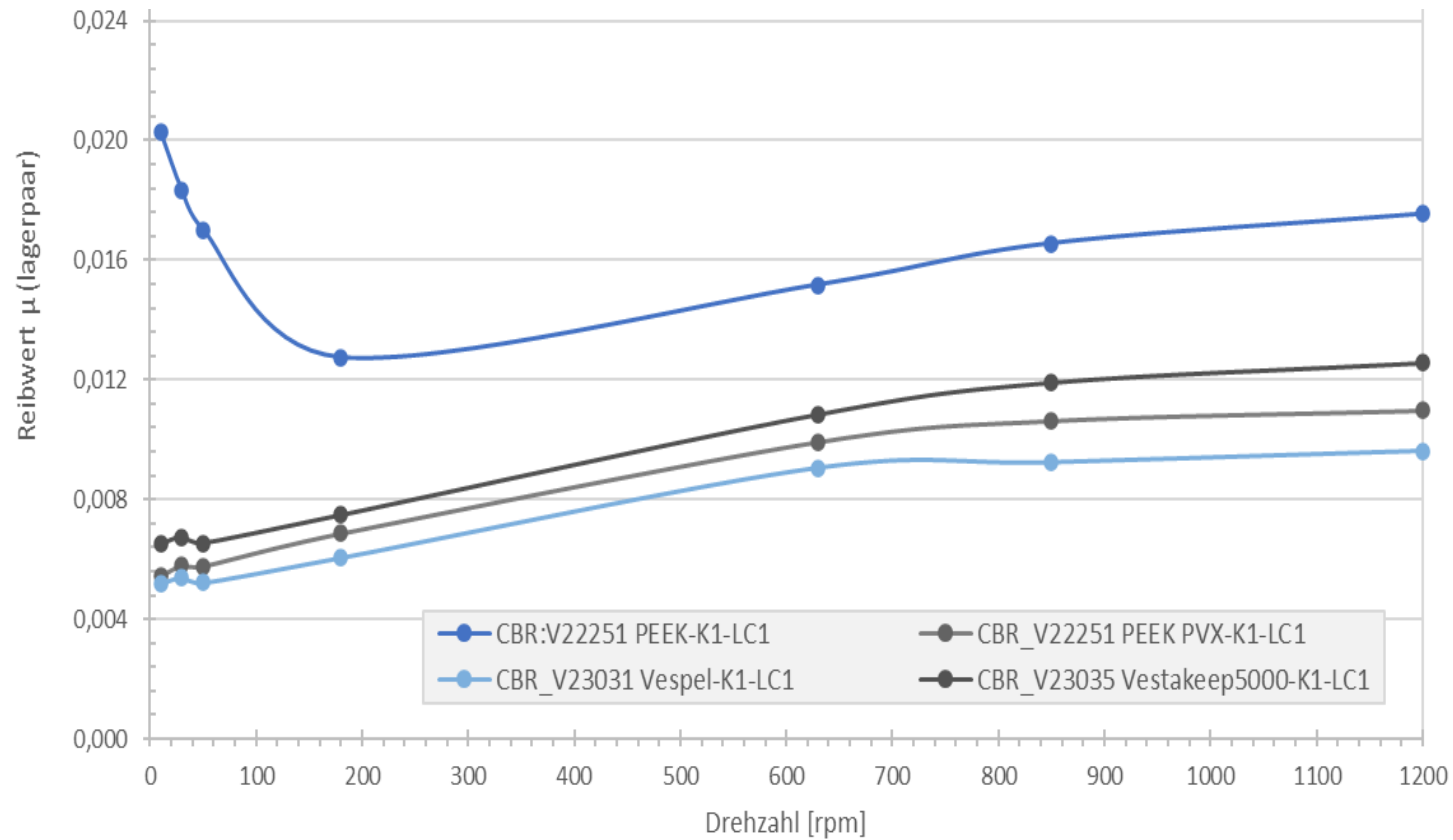


Abbildung 107: Ergebnisse LC1 (niedrige Last)

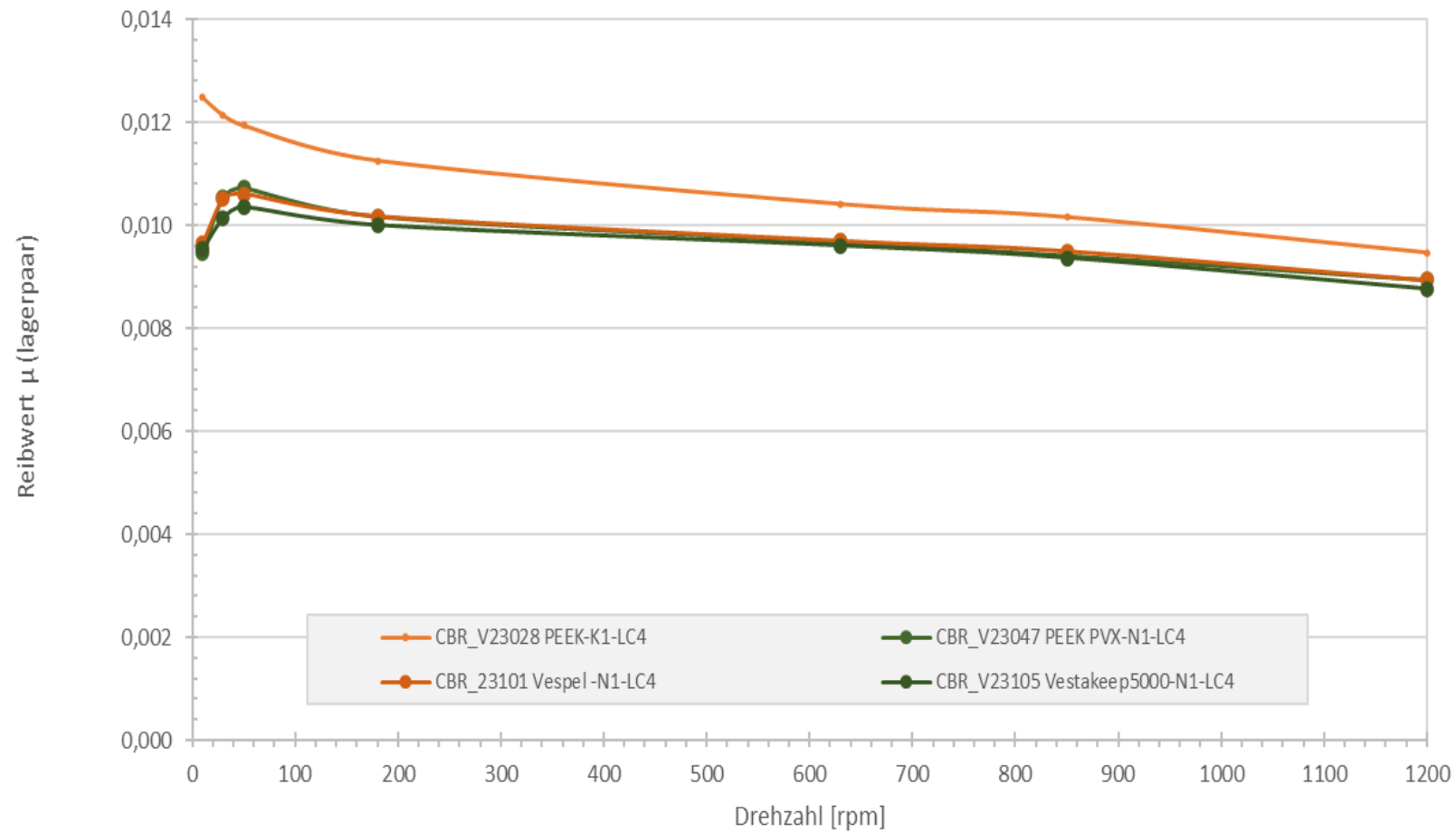


Abbildung 108: Ergebnisse LC4 (hohe Last)

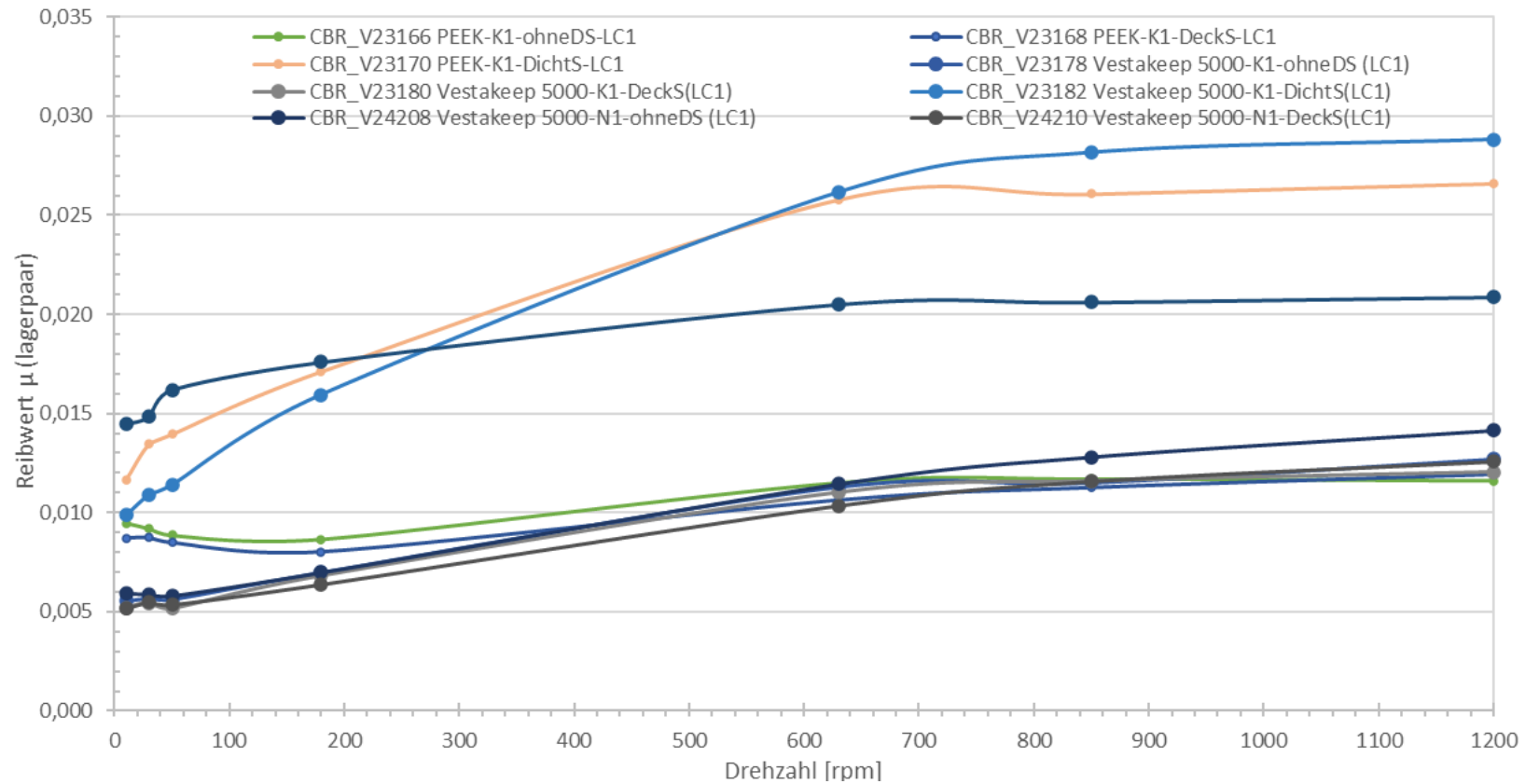


Abbildung 109: Ergebnisse Stribeck-Messungen