



Tribologie in Deutschland

Querschnittstechnologie zur Minderung
von CO₂-Emissionen und zur Ressourcenschonung

Tribologie in Deutschland

Querschnittstechnologie zur Minderung
von CO₂-Emissionen und zur Ressourcenschonung

Eine Expertenstudie der Gesellschaft für Tribologie e.V.
2019

Autoren

Mathias Woydt (Gesamtredaktion),
MATRILUB, Berlin

Thomas Gradt,
BAM Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung, Berlin

Tim Hosenfeldt,
SCHAEFFLER Technologies AG & Co. KG,
Herzogenaurach

Rolf Luther,
FUCHS Schmierstoffe GmbH, Mannheim

Adrian Rienäcker,
Universität Kassel, Kassel

Franz-Josef Wetzel,
BMW AG, Motorrad, München

Christoph Wincierz,
Evonik Resource Efficiency GmbH, Darmstadt

IMPRESSUM

Herausgeber und Vertrieb:

Gesellschaft für Tribologie e.V.

E-Mail: tribologie@gft-ev.de – Internet: www.gft-ev.de

Gestaltung und Satz:

pulcinello

Marcus Depenbusch

Soerser Winkel 43 – 52070 Aachen

Telefon: (0241) 400 87 46 – Telefax: (0241) 400 87 54

E-Mail: info@pulcinello.de – www.pulcinello.de

Das Urheberrecht an dieser Studie verbleibt bei der Gesellschaft für Tribologie. Vorstände der Gesellschaft für Tribologie haben diese Studie erstellt. Alle Angaben und Daten sind sorgfältig recherchiert. Allerdings geben weder die Gesellschaft für Tribologie noch die Autoren irgendeine ausdrückliche oder implizierte Garantie oder übernimmt irgendeine rechtliche oder sonstige Verantwortung für die Korrektheit, Vollständigkeit oder Nutzbarkeit irgendeiner Information, eines Produktes oder eines enthaltenen Prozesses, oder versichert, dass deren Nutzung private Rechte nicht verletzen würden.

Ohne schriftliche Genehmigung der Gesellschaft für Tribologie darf die Studie weder kopiert noch vervielfältigt werden.

INHALT

Impressum.....	4
Zu dieser Studie.....	6
Kurzzusammenfassung der GfT-Tribologiestudie 2019	7
A. Volkswirtschaftliche Bedeutung	9
B. Energetische Bedeutung der Tribologie (die Exajoule-Frage).....	10
C. Reibungsoptimierung in der Mobilität	11
C1. Energieflüsse und Reibungsminderungspotentiale im Kraftfahrzeug mit Verbrennungsmotor	11
C2. Reibungsminderung in der Kolbengruppe	14
C3. Reibungsminderung durch Einsatz von Dünnschichten	15
C4. Reibungsminderung durch verbesserte Motoröle	16
C4.1. <i>Niedrigviskose Öle</i>	16
C4.2. <i>Öle mit einem hohen Viskositätsindex</i>	17
C5. Rekuperation	18
C6. Alternative Antriebe	19
C6.1. <i>E-Mobilität</i>	20
C6.2. <i>Wasserstoff und Methan als Energieträger</i>	22
C6.3. <i>Synthetische, flüssige Kraftstoffe</i>	23
D. Bedeutung im Licht gesellschaftspolitischer Diskussionen	24
D1. Schmierstoffmarkt	24
D2. Bioschmierstoffe	25
D3. Umweltpolitische Einflussnahmen durch den Gesetzgeber	27
D3.1. <i>Feinstaubpartikel aus Abrieb</i>	27
D3.2. <i>Wolframcarbid und Verschleißschutz</i>	28
E. Lehre und Forschung	28
E1. GfT-Studie „Tribologie an Universitäten und Hochschulen“	28
E2. Forschung	29
E2.1. <i>Forschungsförderung</i>	29
E2.2. <i>Schwerpunktprogramme und Sonderforschungsbereiche der DFG</i>	30
E2.3. <i>Förderung durch das BMWi</i>	30
E3. Tribologische Prüftechnik (Tribometrie)	30
Bibliographische Referenzen zum Nachlesen.....	31

ZU DIESER STUDIE

Nachdem die Gesellschaft für Tribologie e.V. im Jahr 2014 eine Studie zur Ermittlung der tribologischen Aktivitäten an deutschen Hochschulen durchgeführt hatte, ist der Ansatz der vorliegenden Arbeit umfassender. Führende Experten der Fahrzeug- und Schmierstoffindustrie sowie aus Forschungseinrichtungen schildern die gegenwärtige Situation der Tribologie in Deutschland aus ihrer Sicht und geben einen Ausblick auf die Zukunft. Wegen der großen Bedeutung der Kraftfahrzeugbranche und den sich dort abzeichnenden technologischen Umbrüchen, wurde der Schwerpunkt der aktuellen Studie auf diesen Industriezweig gelegt und insbesondere der Zusammenhang zwischen Reibung und CO₂-Emissionen sowie weitere umweltrelevante Themen, wie Feinstaub und E-Mobilität betrachtet. Ziel ist aufzuzeigen, welchen Beitrag tribologische Forschung und Entwicklung zur Energiewende, Ressourcenschonung und Minderung von Schadstoffemissionen leisten kann.

Tribologische Fragestellungen in anderen wichtigen Bereichen, wie der Energietechnik, der Lebensmittelindustrie oder der Medizintechnik (z. B. künstliche Gelenke), sind einer für 2021 geplanten Fortschreibung der Studie vorbehalten. Dort sollen auch die Entwicklungen, die die Digitalisierung, verbesserte Analytik und neue Methoden der Simulation von Tribosystemen mit sich bringen, betrachtet werden. Bereits für 2020 ist eine Ergänzung durch eine weitere Studie „Verschleißschutz und Nachhaltigkeit“ geplant. Die GfT ermutigt alle Fachleute auf diesen Gebieten, einen Betrag dazu zu leisten.

Parallel zu der vorliegenden Expertenstudie wurde eine Online-Befragung zur Situation der Tribologie in Deutschland durchgeführt. Sie richtete sich nicht ausschließlich an Personen, die beruflich mit tribologischen Fragestellungen befasst sind, und gab so auch Auskunft über die Bekanntheit des Fachgebiets allgemein. Die Ergebnisse werden auf der Webseite der GfT (www.gft-ev.de) sowie in Heft 6/2019 der Zeitschrift „Tribologie und Schmierungstechnik“ veröffentlicht.

DER BEGRIFF „TRIBOLOGIE“

Sir Peter Jost begründete erstmals 1966 den Begriff „Tribologie“. Die englische Originaldefinition

„Tribology is the science and technology of interacting surfaces in relative motion and of related subjects and practices“

kann man nach Czichos ins Deutsche folgendermaßen übertragen:

„Tribologie ist die Wissenschaft und Technik von Wirkflächen in Relativbewegung und zugehöriger Technologien und Verfahren“.

Die Elemente der Tribologie, Reibung, Verschleiß und Schmierung, zielen darauf ab, die Reibung kontrolliert zu nutzen, den Verschleiß für eine lange Gebrauchsdauer zu mindern und durch Schmierung den Bewegungswiderstand abzubauen, wie auch den Verschleiß. Tribologische Aufgaben sind nur in einer gesamtheitlichen Systembetrachtung mit einer interdisziplinären Konzeption zu lösen.

KURZZUSAMMENFASSUNG DER GfT-TRIBOLOGIESTUDIE 2019

TRIBOLOGIE, die Lehre von Reibung, Schmierung und Verschleiß, ist eine Querschnittstechnologie von volkswirtschaftlicher Bedeutung. Sie ermöglicht als Grundlagentechnologie Energieeffizienz und Ressourcenschonung durch Minderung von Reibung und Verschleiß sowie Verwendung von CO₂-neutralen Kraftstoffen (e-fuels, Wasserstoff, etc.).

CO₂-Einsparungen durch Reibungsminderungen

Die Reibungsminderung, insbesondere in der Mobilität, stellt, abgesehen von der Rekuperation, das Kernelement zur Verbesserung der Energieeffizienz dar. Dadurch reduzieren sich die CO₂-Emissionen und vermindert sich die Anhängigkeit von Importen von Energieträgern. Der Anteil der Reibungsverluste am globalen Primärenergieverbrauch beträgt 23%, wobei das realistische und langfristige Minderungspotential des globalen Primärenergieverbrauchs durch Reibungsverluste bei 8,6% liegt. Aus den Arbeiten des Forschungsclusters „Low Friction Power Train“ ergibt sich, dass die motorischen Reibungsverluste ein Minderungspotential von bis zu 30% offerieren. Dies ermöglicht eine Verbrauchsminderung von 0,94 l/100 km bzw. 12,1%. Dazu kommen Reduktionspotentiale im weiteren Antriebsstrang (Getriebe, Radlager, Nebenaggregate etc.). Wendet man die ermittelten -12,1% Minderungen im Kraftstoffverbrauch auf die in der Bundesrepublik Deutschland verkaufte Kraftstoffmenge an, so würde sich bei voller Ausschöpfung der Reibungsminderungspotentiale die verbrauchte Benzinmenge um rund 2,2 Mt Benzin (oder 2,98 Milliarden Liter) verringern, was rechnerisch 6,92 Mt weniger CO₂ entspricht. Der Verbrauch von Diesel ließe sich um rund 4,68 Mt (oder 5,50 Milliarden Liter) mindern, was ca. 14,95 Mt weniger CO₂ bedeutet. Insgesamt lassen sich also fast 22 Millionen Tonnen CO₂ oder 6,4% der bis 2030 von der Bundesregierung erwarteten CO₂-Reduzierungen allein durch Verringerung von Reibung einsparen und dies, ohne den Gebrauchswert zu beeinflussen.

Weitere Reibungsminderungspotentiale der Schmierungstechnik, insbesondere durch niedrigviskose Öle und/oder Schmierstoffe mit hohem Viskositätsindex, im Zusammenwirken mit der Oberflächentopographie, offenbaren unzählige weitere Möglichkeiten zur Minderung der CO₂-Emissionen auf Basis einer hohen Funktionssicherheit. Die Reduzierung der Reibungswiderstände im gesamten Antriebsstrang ist eine Kernaufgabe für die zukünftige Mobilität und als solche unabhängig von der gewählten Antriebstechnologie.

Eine Viskositätsabsenkung des Motorenöls mit einer Verbrauchsminderung von nur 1% ergäbe auf Basis der CO₂-Emissionen des deutschen Straßenverkehrs in 2017 von ca. 170 Millionen Tonnen CO₂ allein eine rechnerische Ersparnis von 1,7 Millionen Tonnen CO₂.

Überträgt man die allgemein angenommenen Anteile der Reibungsgesamtverluste am Primärenergieverbrauch, so errechnet sich allein für Deutschland ein Einsparpotential von ca. 208 Mt CO₂, was bis zu 60% der von der Bundesregierung angestrebten Reduzierung an Treibhausgasemissionen bis 2030 entspräche.

Über die Reibungsminderung hinaus ist die Tribologie in Systemen zur Rekuperation von Energie aus Abgaswärme eingebunden, welche weiteren Kraftstoffeinsparungspotentiale zwischen 5 und 10% offerieren.

Elektromobilität

Elektrische Antriebsstränge benötigen zwar keine Motorenöle, wohl aber spezifische Schmierstoffe und Funktionsflüssigkeiten, wie Schmierfette für Wälzlager, Kühlmittel (für Batterie, E-Motor und Leistungselektronik) und Getriebefluide (z. B. für hochdrehende Planetenradsätze). Andererseits bedarf es Neuentwicklungen, da die Getriebeöle, Kühlmittel und Fette mit elektrischen Modulen, Sensoren und Schaltkreisen sowie Isoliermaterialien oder Spezialkunststoffen in Kontakt kommen. Zudem erhöht jede Energieeinsparung durch Reibungsminderung die Reichweite bei gleichbleibender Batteriekapazität.

Luftreinhaltung

Ca. 90% der Partikelemissionen des Straßenverkehrs entstehen nicht in Verbrennungsmotoren, sondern durch Reifen-, Bremsen- und Straßenabrieb (non-exhaust emissions). Grundsätzlich wird sich daran bei batterie- und Brennstoffzellen betriebenen Fahrzeugen nichts ändern; einzig die Rekuperationsleistung wird die Beanspruchung von Bremsen etwas verringern. Straßenbahnen und Eisenbahnen tragen auch zu den Partikelemissionen bei über Pentagraphen (Stromabnehmer), Radreifen (auch wenn aus Stahl!) und Bremsen. Die Tribologie kann hier einen großen Beitrag zur Minderung der Partikelemissionen über verschleißbeständigere Werkstoffe leisten und das unter Beibehaltung der anderen, funktionalen Eigenschaften.

CO₂-neutrale Energieträger

Die Beherrschung der Tribologie in Komponenten, welche mit alternativen Kraftstoffen in Berührung kommen, stellt eine Kernfrage für deren erfolgreiche Markteinführung dar. Die tribologischen Lösungsansätze umfassen Beschichtungstechnologien und neue Legierungen. Die CO₂-neutralen e-fuels, insbesondere e-Gase wie Wasserstoff und Methan, haben auch eine direkte Auswirkung auf die Formulierung von Motorenölen. Die Arbeiten der Tribologie ermöglichen für die „Wasserstoffwirtschaft“ zukünftig den endverbraucher- und alltagstauglichen, wie auch wartungsfreien und langlebigen, Gebrauch der Komponenten und Netze. Die zu entwickelnden Werkstoffe müssen verschleißarm sein, um eine geringe Kontamination des Wasserstoffs mit Partikeln zu gewährleisten. Der Anwendungsfall einer motorischen Verbrennung erfordert neue, wasserlösliche Motorenöle. Anspruchsvoll sind darüber hinaus die Zusatzanforderungen nach der Beständigkeit gegenüber der Wasserstoffversprödung und den Kosten auf Basis „erschwinglicher“ Legierungen.

Umweltschonung

Die Schmierstoffmenge entspricht ca. 1% der Kraftstoffmenge in Deutschland. Die Rohstoffe für die an sich langlebigen Schmierstoffe können aus Biomasse synthetisiert werden, wobei die verschiedenen Syntheserouten Ester, Polyglykole und Kohlenwasserstoffe erlauben. Bioschmier-

stoffe zeigen im Vergleich zu Mineralölprodukten allgemein niedrigere Reibung und belasten zudem die Ökosysteme in deutlich geringerem Maße.

Substitute für verbotene Stoffe

Durch die Umwelt- und Chemikalienpolitik der Europäischen Union entsteht ein Substitutionsdruck für bewährte und eingeführte Beschichtungen oder Werkstoffe sowie für viele in Schmierstoffen gebräuchliche Funktionsadditive. Die Tribologie leistet hier einen Beitrag für die Entwicklung von alternativen, metallurgischen und schmierstofftechnischen Lösungen, die gleichzeitig die Erfüllung der funktionalen und toxikologischen Anforderungen erlauben.

Forschung

Im Gegensatz zur Vergangenheit stellt die Tribologie innerhalb der Forschungsträger DFG und BMBF heute kein besonderes und eigenständiges Förderungsfeld mehr dar, obwohl es als omnipräsente Querschnittstechnologie bedeutende Beiträge zur Erreichung technologischer und ökologischer Anforderungen leisten konnte.

Nach einigen Jahren mit geringem förderpolitischem Engagement der öffentlichen Hand hat allerdings das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Jahre 2017 das „Forschungsfeld Tribologie“ initiiert, das die Akteure aus Wissenschaft und Industrie branchenübergreifend unter dem Dach eines Forschungsnetzwerks vereint und dabei insbesondere das Ziel einer CO₂-Vermeidung durch Reibungsreduktion verfolgt.

An vielen Hochschulen und Universitäten werden tribologische Inhalte vermittelt, jedoch nicht in einer hinreichenden Breite und Tiefe. Deshalb ist es auch geboten, die Vermittlung der Grundlagen von Reibung, Verschleiß und Schmierung in den Studiengängen zu verstärken.

Grundlagenuntersuchungen stellen einen wesentlichen Teil tribologischer Entwicklungen dar. Zu ergänzen wäre noch, dass die heute bedeutendsten, tribologischen Prüfgeräte mit internationaler Durchdringung ihren Ursprung in Deutschland haben.

A. VOLKSWIRTSCHAFTLICHE BEDEUTUNG

Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Tribologie zur Einsparung reibungs- und verschleißbedingter Energie- und Materialverluste beschränkte sich in früheren Studien z. B. von Jost 1966 [1, 2], ASME 1977 [3] und BMFT 1976 [4, 5] auf ökonomische Betrachtungen, wie Kostensenkungen und/oder Qualitätsverbesserungen (siehe Tabelle 1).

Besonders hohe Materialverluste, und in der Folge Stillstandskosten, entstehen in der Minen- und Hüttenindustrie sowie der Baumaschinenindustrie, deren Maschinen und Geräte hauptsächlich abrasiv und/oder erosiv beansprucht werden. Die mechanische Fertigung in der produzierenden Industrie konsumiert ebenfalls hohe Mengen an Schneidstoffen.

Der Titel „Strategy of Energy Conservation through Tribology“ der ASME-Studie von 1977 [3] verdeutlichte die Ausrichtung auf Energieeffizienz und vernachlässigte verschleißbedingte Verluste. Die geschätzte Einsparung von 10,9% Primärenergie entsprach 1976 einem Geldwert von 16,2 Mrd. Dollar bzw. 40,8 Mrd. DM. 1976 betrug das BIP der USA 1.877 Mrd. US-\$, so dass die geschätzte Ersparnis an Primärenergie 0,86% des BIP betrug. Diese Ausrichtung stand sicherlich unter dem Eindruck des ersten „Ölschocks“ von 1973. Die industrielle Initiative „Industrial Innovation“ von Präsident Jimmy Carter vom 31.10.1979 beinhaltete Querschnittstechnologien von volkswirtschaftlicher Bedeutung, wie die Tribologie (Reibung, Schmierung und Verschleiß).

In Kanada betrug 1984 die Verluste durch Reibung 1,22 Mrd. Can-\$ und durch Verschleiß 3,7 Mrd. Can-\$ [6, 7], wovon 25% als vermeidbar eingestuft werden. Bezogen auf das BIP von 1982 in Höhe von 388,7 Mrd. Can.-\$ ergäben sich ökonomische Verluste durch Reibung und Verschleiß von nur 1,3% des BIP.

Die Studie des Forschungskuratoriums Maschinenbau e.V. für das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT FB T 76-38) bezifferte für 1975 die volkswirtschaftlichen Verluste durch Reibung und Verschleiß auf etwa 1% des Bruttoinlandproduktes (BIP). Die direkten Verluste für Maschinen und Anlagen durch Reibung und Verschleiß betrug 1985 in der Bundesrepublik Deutschland 38,7 Mrd. DM [4] bzw. 2,0% des BIP zu Preisen von 1985 (BIP der Bundesrepublik Deutschland in 1985 = 984 Mrd. €). Zu den volkswirtschaftlichen Verlusten durch Reibung und Verschleiß würde man heute noch die ökologischen Belastungen hinzurechnen. Ebenso sind die ökonomischen, anteiligen Beträge des Primärenergieverbrauchs bzw. die resultierenden Einsparpotentiale in Euro durch die stark gestiegenen Rohölpreise um ein Vielfaches größer als in den 1970ern.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich die verschiedenen Studien aus der Vergangenheit entweder auf energetische (Jost, A.S.M.E.) oder monetäre Einsparpotentiale (BMFT, NRC) beziehen. Der aus heutiger Sicht bedeutende CO₂-Aspekt wurde nicht betrachtet.

Tabelle 1: Einsparpotentiale am Energieverbrauch durch Reibungsminderungen über tribologische Maßnahmen

Studie	Erscheinungsjahr	Einsparpotentiale an Energie		Ökonomische Einsparpotentiale an Reibung und von Verschleiß	
		in % vom Energieverbrauch	in EJ bezogen auf den Verbrauch an Primärenergie 2017	in % vom BIP	in Mrd. € bezogen auf das jeweilige BIP von 2017
Jost (G.B.)	1966	5%	0,4 EJ	2 % in G.B.	2%= 46,5 Mrd. €
A.S.M.E. (USA), Pinkus&Wilcock	1977	10,9%	10 EJ (93 EJ)	–	–
BMFT (DE)	1976	–	–	1 % in DE*	1%= 32,7 Mrd. €*

1 EJ= 10¹⁸ Joules; A.S.M.E.= The American Society of Mechanical Engineers; BMFT= Bundesministerium für Forschung und Technologie; *Absolute, volkswirtschaftlichen Verluste

B. ENERGETISCHE BEDEUTUNG DER TRIBOLOGIE (DIE EXAJOULE-FRAGE)

Die Energieverluste in Tribosystemen entstehen unweigerlich durch die verschiedenen Formen der Reibung, die die Gesamtwiderstände gegenüber der Relativbewegung der Maschinenelemente ergeben. Die Folgeerscheinung ist der Verlust an Antriebsenergie, welche irreversibel in Wärme umgesetzt wird. Laut einer neueren Betrachtung von Holmberg et al. [8] zum Energieverbrauch durch Reibung in Automobilen wird praktisch die gesamte aus dem Brennwert des Kraftstoffes für die im „Vortrieb“ nutzbare Arbeit als Reibungsverluste über die verschiedenen Tribosysteme in (Verlust-)Wärme umgesetzt.

Führt man sich vor Augen, dass der Import von Energieträgern die Handelsbilanz einer Volkswirtschaft erheblich belastet, verwundert es nicht, dass das Thema „Energieeffizienz“ auch die amerikanische Politik erreichte. Die Resolutionen #916 vom 28.09.2016 bzw. #306 vom 02.05.2017 des „House of Representatives“ stellt „die Bedeutung der Tribologie für die Wirtschaft und Wettbewerbsfähigkeit der Vereinigten Staaten“ fest (hierzu auszugsweise Zitate):

„Whereas approximately a third of the world’s primary energy consumption is attributed to friction, and about 70 percent of equipment failures is blamed on lubrication breakdown and wear loss;

.....

Whereas reduction of friction is at the very core of improving fuel economy and reducing greenhouse gas emissions; ...”.

Demnach kann Reibungsminderung also auch einen bedeutenden Beitrag zur Minderung der CO₂-Emissionen leisten, da 81,5% der globalen Primärenergie aus fossilen Energieträgern gewonnen werden [9].

Während in den letzten 45 Jahren die Rohölpreise die Maßnahmen zum „Energieeinsparen“ bestimmten, treten heute und zukünftig die Klimapolitik mit ihren umwelt- und naturschutzpolitischen Zielen in den Vordergrund.

Überträgt man die von Holmberg et al. in [8] verwendete Methodik zur Abschätzung der motorischen Reibungsverluste auf eine globale und volkswirtschaftliche Ebene, so verbrauchen nach Holmberg und Erdemir [10] Reibstellen bzw. tribologische Kontakte ca. 23% der globalen Primärenergie. Diese ca. 23% teilen sich auf für die Überwindung der Reibung mit ca. 20 absoluten Prozent und mit ca. 3 absoluten Prozent für die Instandsetzung verschlissener Bauteile.

Hier bleibt zu berücksichtigen, dass die Reibung ambivalent ist und nicht beliebig erniedrigt werden kann. Es gibt erwünschte Reibung, wie z. B. für Reifen und Bremsen, welche auch der Betriebssicherheit dienen, und z. B. die Reibung in Wälz- & Gleitlagern, aber auch der Kolbengruppe in Verbrennungsmotoren, welche idealerweise „Null“ wäre. Für die langfristige Minderung der Reibungsverluste nehmen Holmberg und Erdemir [10] ein Potential von -40% an, was einer absoluten Verminderung des globalen Primärenergieverbrauches von -8,6% entspräche.

Je nach Quelle [11, 12] betragen 2017 die globalen CO₂-Emissionen ca. 32.500 Millionen Tonnen (Mt), wovon 905 Mt CO₂ [13] auf Deutschland entfielen. Kombiniert man diese Zahlen mit dem Anteil an der Primärenergie der Reibungsverluste nach Holmberg und Erdemir [10] von 23%, so hat die Reibung einen Anteil an den globalen CO₂-Emissionen von 7.475 Mt und ein langfristiges Senkungspotential von ~-3.000 Mt CO₂.

Bezogen auf Deutschland bedeutet dies, dass langfristig allein durch Reibungsminderungen ein Einsparpotential von ca. 208 Mt CO₂ besteht. Die Bundesregierung hat zum Ziel, die Treibhausgasemissionen bis 2030 auf < 563 Mt CO₂ zu senken, bzw. eine Minderung von -342 Mt CO₂ gegenüber 2017 zu erreichen. Dies bedeutet, dass unter Zugrundelegung der Ergebnisse von Holmberg und Erdemir [10] das Minderungspotential zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen rechnerisch zu ca. 60% allein durch Reibungsminderungen erbracht werden könnte. Die Reduzierung der Reibungswiderstände im gesamten Antriebsstrang ist deshalb eine Kernaufgabe für die zukünftige Mobilität und unabhängig von der gewählten Antriebstechnologie.

C. REIBUNGSOPTIMIERUNG IN DER MOBILITÄT

Die Systemeigenschaften der Tribologie erfordern allgemein ein Bündel an möglichen Maßnahmen zur Reibungsoptimierung. Dazu zählen gezieltes Einstellen der Oberflächentopographie, die Werkstoff- bzw. Beschichtungstechnik und Fortschritte bei Schmierstoffen. Auch der erfolgreiche Einsatz von Rekuperationssystemen hängt entscheidend von deren Effizienz und Verschleißfestigkeit ab.

Tribologie: Ist eine Grundlagentechnologie zur Ermöglichung der Energieeffizienz und Ressourcenschonung durch Minderung der Reibung und Verwendung von Biofuels und e-fuels auf Basis nachwachsender Rohstoffe, wie auch von Wasserstoff (CO₂-neutral) oder (Bio)Methan als Energieträger.

C1. ENERGIEFLÜSSE UND REIBUNGSMINDERUNGSPOTENTIALE IM KRAFTFAHRZEUG MIT VERBRENNUNGSMOTOR

Der Heizwert (kalorische Wärme) des vom Verbrennungsmotor umgesetzten Kraftstoffes teilt sich typischerweise wie folgt auf:

- a. Thermodynamische Verluste
 - 30%-37% werden über das Abgas ausgebracht,
 - 25%-33% gehen in das Kühlwasser über
- b. Mechanische Arbeit
 - 33%-40% stehen als mechanische Arbeit zur Verfügung, wobei davon 3%-12%-Punkte für den Luftwiderstand bis 100 km/h in Ansatz gebracht werden müssen.

Reibungsminderungen können nur bei der „mechanischen Arbeit“ greifen, während die Rekuperation die Wärmemengen aus dem Abgas und Kühlwasser (thermodynamische Verluste) partiell zurückgewinnen kann (siehe Kapitel C5). Hierzu sind zumeist Kolbenexpander in der Diskussion, welche wiederum unzählige Reibstellen ausbilden, die tribologisch optimiert werden können.

In einem umfangreichen Forschungscluster „Low Friction Power Train“ [14], gefördert im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und durch das CO₂-Sonderforschungsprogramm der Forschungsvereinigungen Antriebstechnik (FVA) und Verbrennungskraftmaschinen (FVV), wurden die Energieflüsse am

Beispiel eines Mittelklasse Personenkraftwagens (Mercedes C-Klasse) mit mechanisch aufgeladenem 1,8 Liter Benzinmotor (M271 KE) und Handschaltgetriebe analysiert. Basis der vom 01.10.2008 bis 30.9.2012 durchgeführten Forschungsarbeiten war der Verbrauch im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ). Im Rahmen der Arbeiten entstanden eine Vielzahl von detaillierten Simulationsmodellen (Kolben, Ringpaket, Getriebe, Hauptlager etc.), die datenbasiert in einem energetischen Gesamtmodell zusammengeführt wurden. Im Gesamtmodell wurden Einzelmaßnahmen zur Reibungsreduktion wie auch Maßnahmenpakete in voller Wechselwirkung miteinander untersucht und bewertet.

Die Referenz-Serienkonfiguration erreicht einen Kraftstoffverbrauch von 7,81 l/100 km und eine CO₂-Emission von 183 g/km im Testzyklus. Die im Treibstoff enthaltene Energie¹ (27313,8 kJ) teilt sich auf in Wandwärmeverluste (34,3%), indizierte Arbeit (28,4%) und Abgasenthalpie (37,2%). Bezogen auf den Primärenergieeinsatz (27313,8 kJ) teilt sich die indizierte Arbeit in effektive Arbeit (4427,8 kJ, 16,2%) und Reibungsarbeit (3333,5 kJ, 12,2%) auf (siehe Bild 1). Die effektive Arbeit, bereinigt um Kupplungsverluste (37,8 kJ, 0,1%) und Getriebeverluste (255,3 kJ, 0,9%) führt zu einer Nutzarbeit von 4134,7 kJ (15,1%), mit der unter anderem der Rollwiderstand (2202,7 kJ, 8,1%) und der Luftwiderstand (1352,3 kJ, 5,0%) überwunden werden.

¹ Der Werte stammen von einem Simulationsmodell für das Gesamtfahrzeug, in das die Einzelmodelle über Kennfelder eingebaut wurden zzgl. weitere Einzelmodelle (Kennfelder) für Reibung am Kolbenring, im Pleuellager, im Hauptlager, im Ventiltrieb etc., welche durch verschiedene Messungen validiert waren. Analog wurden von anderen Projektpartnern die Rollwiderstände, die Luftwiderstände, die Getriebeverluste etc. beigesteuert.

Tabelle 2: Abkürzungen zu den Energieflussbildern (Bild 1 bis Bild 3)

Kürzel	Bedeutung	Kürzel	Bedeutung
Ko	Reibung der Kolben (Hemd+Ringe+Bolzen)	Ne	Reibung zusätzlicher Aggregate (Lenkhilfepumpe, Klimakompressor, Vakuumpumpe, Kraftstoffpumpe)
WP	Reibung der Wasserpumpe	ML	Reibung des Kompressors (Motrolader von Eaton)
VT	Reibung des Ventiltriebes (inklusive Antrieb)	LLK	Ladeluftkühler
PI	Reibung der Pleuellager (Nebenlager)	ÖWWT	Öl-Wasser-Wärmetauscher
KW	Reibung der Kurbelwellenhauptlager	HK	Hauptwasserkühler
MA	Reibung des Massenausgleichs	RS	Wärmeverluste durch Abstrahlung der Wasserleitungen
OP	Reibung der Ölpumpe	Hzg	Wärmestrom in Fahrgastzellenheizung
Ge	Reibung des Generators (ohne Antrieb)	dU	Änderung der inneren Energie
ÖW	Wärmeverluste des Öls an die Umgebung (haupts. über Ölwanne)		

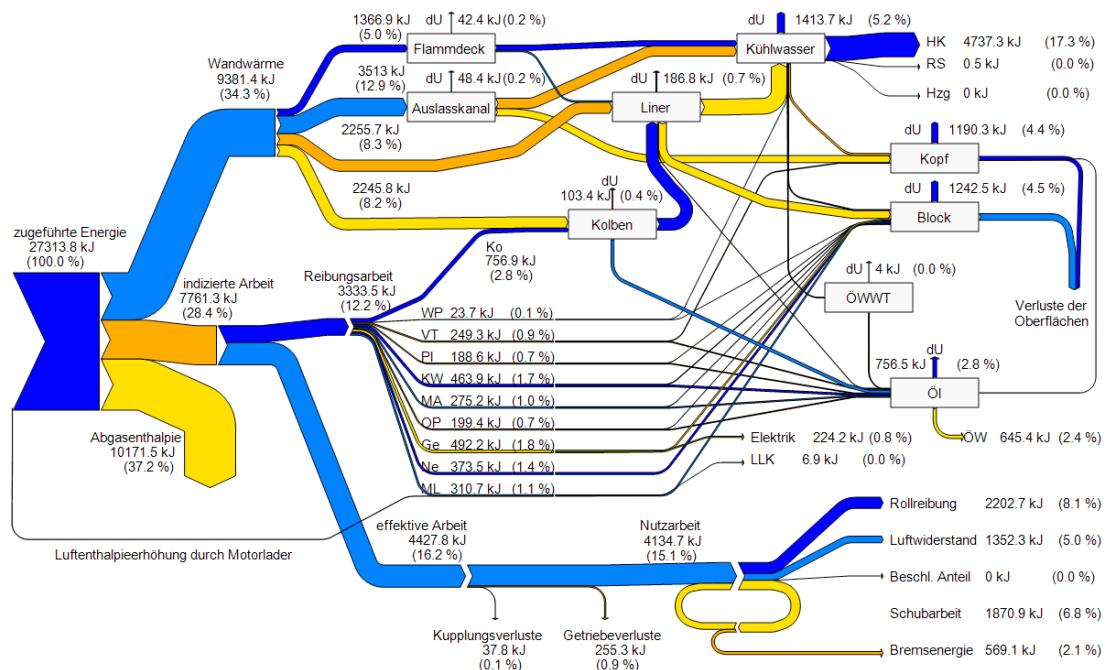


Bild 1: Kumulierte Energieflüsse am Ende eines NEFZ für das Basisfahrzeug (I) [14]

Von den Reibungsverlusten des Motors (s. Bild 2) verursacht die Kolbengruppe den größten Anteil (20,9%) gefolgt vom Generator (13,6%), den Hauptlagern der Kurbelwelle (12,8%) und den Nebentrieb (10,3%).

Die Untersuchung von Maßnahmenkombinationen unter Berücksichtigung der Wechselwirkun-

gen zeigt, dass die Vorteile geringer ausfallen, als durch Superposition der Einzelmaßnahmen vorhergesagt wird. Die vorgeschlagenen Maßnahmenpakete umfassen Veränderungen im Kolben-Liner Bereich, Einsatz von Wälzlagern, Eingriffe in das Kühl- und Schmiersystem und einer Start/Stop-Funktionalität.

Die Maßnahmen zur Reibungsminderung im Tribosystem „Kolben/Liner“ unterteilt Bild 3 in Wirkmechanismen, die

- auf das Additiv im Schmieröl,
- eine reduzierte Ringvorspannung in Kombination mit geänderter Honung,
- ein erhöhtes Kolbenspiel auf 1,2‰ und
- ein reduziertes Schmierstoffangebot zurückzuführen sind.

Die Optimierung der Triebwerkslagerreibung (heute Gleitlager!) erfolgt durch den Einsatz von Wälzlagern, welche konstruktiv nur schwierig zu integrieren sind. Weitere Reduktionen in der Motorreibung ergeben sich durch

- den Einsatz eines Kennfeldthermostats,
- einer elektrischen Wasserpumpe,

- Splitcooling und
- Ersatz der Öldruckpumpe durch eine volumenstromgeregelte Ölpumpe mit reduziertem Galeriedruck und schaltbaren Kolbenspritzdüsen sowie
- von einer Start-Stop-Strategie und
- Getriebeaufheizung.

Durch diese Kenntnis dieser Einzelzusammenhänge beträgt in Bild 3 die maximal vorhergesagte Reibungsreduktion bei 30,8% der Gesamtreibung und mündet in eine Reduktion des Kraftstoffverbrauchs um 12,1% oder 0,945 l/100km². Die Nachrechnung verschiedener weiterer Testzyklen zeigt durchweg Reibungsreduktionen um 30% mit entsprechenden Verbrauchsminderungen.

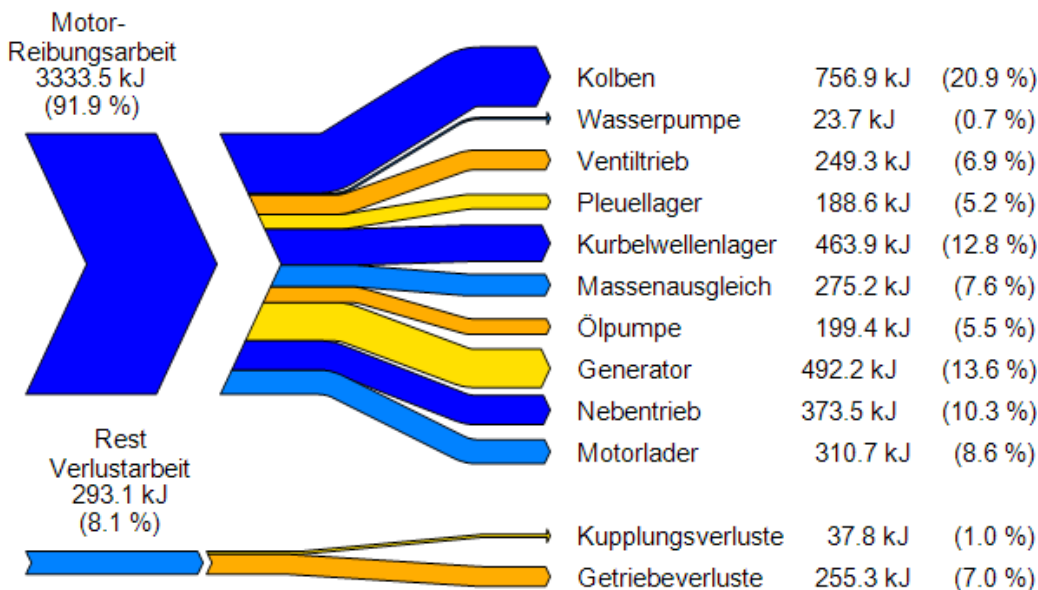


Bild 2: Unterteilung der Reibung des gesamten Antriebsstranges [14]

² Die mögliche Ersparnis von 0,945 l Benzin/100 km entsprechen 2,249 kg CO₂/100 km. 2017 wurden rund 18,3 (Vorjahr: 18,2) Millionen Tonnen Benzin in Deutschland in Verkehr gebracht [Jahresbericht 2018 des Mineralölwirtschaftsverbandes e.V.]. Der Forschungscluster „Low Friction Power Train“ [14] ermittelte als maximal mögliche Minderung des Kraftstoffverbrauchs durch Reibungsreduzierungen für einen Benzinmotor 12,1%. Diese 12,1% würden allein die verbrauchte Benzinmenge um rund 2,2 Mt Benzin (oder 2,98 Milliarden Liter bei einer Dichte von 0,737 kg/l) mindern bzw. um rechnerische 6,92 Mt CO₂. Homologe Betrachtungen kann man für Dieselmotor anstellen, wobei 2017 der Dieselmotor in Deutschland 38,7 Mt Diesel betrug. Die zuvor genannten Reibungsminderungspotentiale von 12,1% angewandt auf die verbrauchte Dieselmotormenge ergäben eine Minderung von rund 4,68 Mt Diesel (oder 5,50 Milliarden Liter bei einer Dichte von 0,850 kg/l) bzw. rechnerischen 14,95 Mt CO₂.

Auf Basis der EU-weiten CO₂ Grenzwerte für Fahrzeugflotten ab 2020 ergeben sich folgende Relationen zwischen Kraftstoffverbrauch und CO₂-Emissionen: 1 l Benzin = 2,317 kg CO₂; 1 l Diesel = 2,714 kg CO₂.

Der Anteil an biogenen Kraftstoffen in Deutschland betrug 2017 beim Benzin 6,3% und beim Diesel 5,7%.

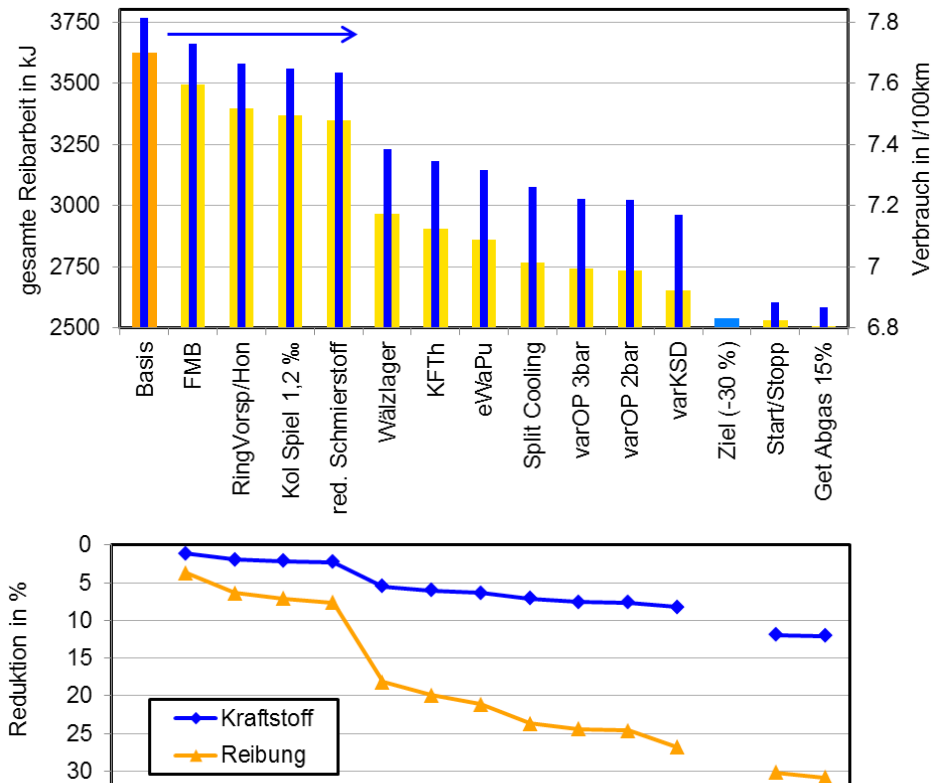


Bild 3: Maßnahmen zur Reibungsreduktion und Auswirkungen auf den Verbrauch [14]

Die Reibungsminderung, insbesondere in der Mobilität, stellt das Kernelement zur Energieeffizienz dar, abgesehen von der Rekuperation. Dabei vermindert sich die Abhängigkeit von Importen von Energieträgern und reduziert die CO₂-Emissionen. Bei einem langfristigen Minderungspotential für die Reibungsverluste von 40% erniedrigt sich der globale Primärenergieverbrauch um 8,6%. Die motorischen Reibungsverluste offerieren ein Minderungspotential von bis zu 30% oder umgesetzt in eine Verbrauchsminderung von 0,94 l/100 km.

C2. REIBUNGSMINDERUNG IN DER KOLBENGRUPPE

Die „Kolbengruppe“ erzeugt grob ca. 50% der Reibungsverlustleistung eines Verbrennungsmotors. Beispielsweise beim aktuellen Verbundförderprojekt PROMETHEUS des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (01/19-12/21) zeichnen sich ausreichende Chancen zur nachhaltigen Reduzierung von Reibungsverlusten ab. Kernansatz ist die Schaffung wesentlich besserer Funktionsbedingungen für reibungs- und verschleißmindernd wirkende Schmierstoffmoleküle. Die Motorenhersteller BMW AG, M.A.N. SE und Rolls-Royce Power Systems AG (MTU Motoren) arbeiten hierbei in Bezug auf die Weiterentwicklung der tribologischen Funktionalitäten ihrer Zylinderlaufbahnen sehr eng mit dem

Schmierstoffhersteller FUCHS Petrolub AG sowie dem Kolbengruppen-Lieferanten FederalMogul Burscheid GmbH (TENNECO Inc.) zusammen. Die Untersuchungen werden entlang der tribologischen Prüfkette vom Tribometer bis hin zum Motorversuch und der atomistischen Modellierung durchgeführt.

Schon im ersten Projektjahr hat sich gezeigt, dass unkonventionelle Oberflächenwerkstoffe und -strukturierungen in Kombination mit hierauf abgestimmten Additiven signifikante Reibungsminierungen erzielen.

C3. REIBUNGSMINDERUNG DURCH EINSATZ VON DÜNNSCHICHTEN

Die Entwicklung von großserientauglichen und reibungsmindernden Beschichtungen nimmt viele Jahre in Anspruch. Die „Standardstößel“ aus dem Jahre 2001 mit standardmäßiger Wärmebehandlung und geschliffener Oberfläche dienen in Bild 4 als Referenz und sind einem Reibungsniveau von 100% bei 2000 U/min und 80°C Öltemperatur zugeordnet. Im ersten Schritt verminderte sich die Reibung auf 80% durch eine Optimierung der Topographie. Der parallele Einsatz von niedrigviskosen Schmierstoffen machte die Verwendung von Dünnschichten notwendig, auch um adhäsiven Verschleißmechanismen zu begegnen. Beispielsweise hatte die SCHAEFFLER Gruppe eine spezielle Hartstoffschicht Triondur CN auf Basis von Chromnitrid (CrN) entwickelt, welche die polierte Oberfläche konserviert und die Reibung auf gleichbleibend 75% reduziert. Von dieser Lösung wurden rund 20 Millionen Teile pro Jahr ausgeliefert und von Kunden mit dem Innovations- und Qualitätspreis ausgezeichnet. Steigende Anforderungen des Marktes und der Kunden hinsichtlich Energieeffizienz und speziell der legislativen Vorgaben zur CO₂-Einsparung konnten mit neu entwickelten nanostrukturierten, amorphen und wasserstoffhaltige Kohlenstoffschichtsystemen (Triondur C+) erfüllt werden. In Kombinationen mit niedrigviskosen Motorölen nahm die Reibung im Ventiltrieb um weitere 20 Prozent ab.

Mittels Dotierungselementen verbesserten sich die funktionalen Wechselwirkungen der amorphen Kohlenstoffschichten mit den Schmierstoffadditiven. Das Ergebnis dieser kontinuierlichen Beschichtungsentwicklung war eine konsequente Reduzierung der Reibung auf den halben Wert der Reibung im Ventiltrieb, je nach Motoröl und der Wahl der Dünnschichten (wasserstoffhaltige und dotierte Kohlenstoffschichtsystem Triondur CX+ oder superharte, tetraedrische und wasserstofffreie, amorphe Kohlenstoffschichten Triondur CH. Das bedeutet für den Verbraucher 1% bis 2% wertvolle Kraftstoffverbrauchseinsparungen und für die Gesellschaft wertvolle CO₂-Emissionsreduzierungen von 307.500 Tonnen im Jahr.

Die Automobilindustrie wird als „Protagonist“ im Einsatz neuer Werkstoffe, Beschichtungen und Schmierstofftechnik betrachtet. Die Übertragung und Implementierung dieses Erfahrungshorizontes in den allgemeinen Maschinenbau und Verfahrenstechnik eröffnet große Potentiale zur Minderung der Reibungsverluste und CO₂-Emissionen.

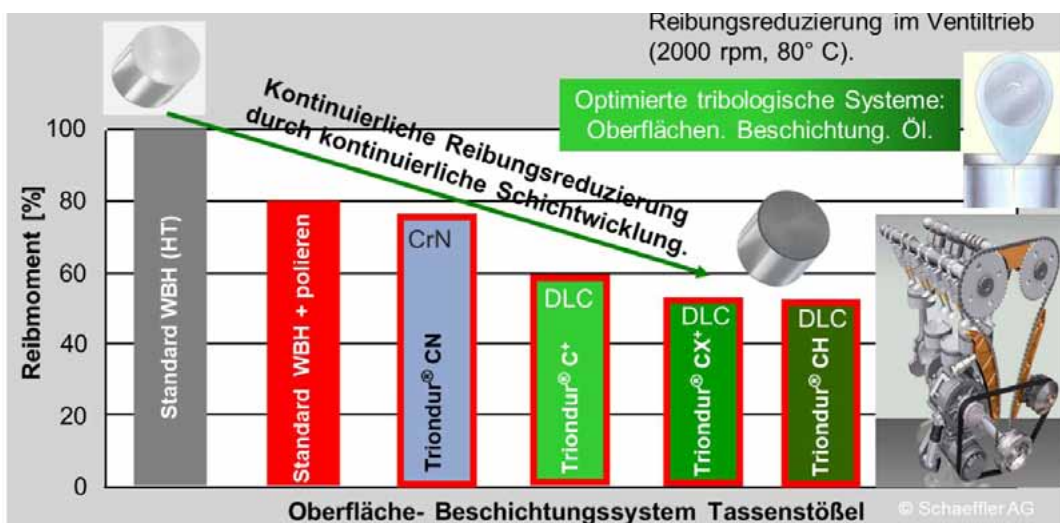


Bild 4: Maßnahmen zur Reibungsminderung im Ventiltrieb (Foto: SCHAEFFLER AG)

C4. REIBUNGSMINDERUNG DURCH VERBESSERTE MOTORÖLE

Die Beiträge der Schmierstoffviskosität (Zähigkeit) zur Reibungsminderung unterteilen sich in zwei Achsen:

1. Niedrigviskosere Öle und/oder
2. Öle mit einem hohen Viskositätsindex³.

C4.1. NIEDRIGVISKOSE ÖLE

Von 100% Kraftstoffenergie betragen die gesamten motorischen Reibungsverluste 25%-35%, je nach Belastungszustand [15, 16]. Die Minderung im Kraftstoffverbrauch durch den Schmierstoff hängt von dessen Viskosität, dem Fahrzyklus und der konstruktiven Auslegung inkl. der gewählten Werkstofftechnik ab. Es besteht Übereinstimmung in den verschiedenen systematischen Untersuchungen zum Einfluß der Motorölviskosität auf den Kraftstoffverbrauch in genormten Fahrzyklen, sowohl bei PkWs, als auch bei Nutzfahrzeugen, dass mit abnehmender Viskosität der Kraftstoffverbrauch sinkt, wobei der absolute Beitrag zusätzlich von der Motorenkonstruktion und werkstofflichen Ausgestaltung abhängt.

Die SAE J300 bestimmt global die viskosimetrischen Klassifikationen von Motorenölen. Zur bislang niedrigsten Motorölviskosität eines SAE 20 (HTHS^{150C} 4 = 2,6-2,9 mPas) wurden 2015 der SAE J300 weitere, niedrigviskose Klassen hinzugefügt:

- SAE 16, HTHS^{150C} = 2,3-2,6 mPas
- SAE 12, HTHS^{150C} = 2,0-2,3 mPas
- SAE 8, HTHS^{150C} = 1,7-2,0 mPas

Man muss sich für die Aufgabe der Motorenschmierung vorstellen, dass ein SAE 8 bei 150°C mit einer dynamischen Viskosität (HTHS^{150C}) von 1,7-2,0 mPas nur noch 1,7-mal zäher ist, als Wasser bei 20°C! Die Fachdiskussion beinhaltet sogar Forderungen nach einem SAE 4 (HTHS^{150C}=1,4-1,7 mPas). Der unstrittige positive Beitrag der niedrigviskosen Motorenöle zum Kraftstoffverbrauch⁵ fördert Vorbehalte hinsichtlich eines höheren Mischreibungsanteils und eines größeren Verschleißrisikos im Motor, denen wiederum konstruktiv und werkstofftechnisch begegnet werden kann.

Tabelle 3 beziffert die möglichen Kraftstoffersparnisse durch die Absenkung der „high temperature, high shear“-Viskosität (HTHS bei 150°C) um 1 mPas. Ähnliche Zusammenhängen bestehen zwischen der kinematischen Viskosität bei 80°C [17, 18] bzw. 100°C [19] und der Fuel Economy. Der Wechsel vom NEDC (New European Driving Cycle) zum WLTP (Worldwide harmonized Light vehicles Test Procedure) mag diese Relationen verändern.

Auf Basis der CO₂-Emissionen des deutschen Straßenverkehrs in 2017 von ca. 170 Millionen Tonnen CO₂ [13] ergäbe eine allein durch die Viskositätsabsenkung erzielbare Verbrauchsminderung von nur 1% eine Ersparnis von 1,7 Millionen Tonnen CO₂. Kombinationen zuvor geschilderter, tribologischer Maßnahmen mögen höhere Einsparungen ermöglichen (siehe Kapitel B).

Tabelle 3: Zusammenhänge zwischen Viskosität (HTHS) und Einsparungen im Kraftstoffverbrauch (FE= Fuel economy)

Studie	Testzyklus	Kraftstoffersparnis in % pro Absenkung der dynamischen Viskosität HTHS bei 150°C [% FE pro HTHS ^{150C} in mPas]
R.I. Taylor et al., 2004	PkW (M111)	~1,6
SAE 2009-01-2856	LkW (13 mode ESC cycle)	~0,8
M. Carvalho et al., 2014	PkW (NEDC)	~1,5

³ Der Viskositätsindex (VI) ist ein Maß zur Stabilität der Viskosität mit ansteigender Öltemperatur. Bei jedem Schmierstoff nimmt mit ansteigender Öltemperatur die Viskosität (Zähigkeit) um Zehnerpotenzen ab. Ein hoher VI bedeutet, dass die Abnahme der Viskosität mit zunehmender Öltemperatur geringer ist.

⁴ HTHS= high temperature high shear viscosity. Diese dynamische Viskosität wird bei 150°C und bei einem Schergefälle von 10 s⁻¹ gemessen.

⁵ JASO (The Japanese Automotive Standards Organization) hat für niedrigviskose SAE 0W-8 Motorenöle die JASO M 364:2019 ("GLV-1") herausgegeben für Markteinführungen ab dem ersten Oktober 2019.

Für die technische Umsetzung zeichnen sich Funktionsgrenzen für niedrigviskose Öle auf Basis von Kohlenwasserstoffen hinsichtlich der physikalischen Verdampfung ab (ansteigender Ölverbrauch und Emissionen!), welche mit Estern und Polyglykolen gleicher Viskosität signifikant geringer sind.

C4.2. ÖLE MIT EINEM HOHEN VISKOSITÄTSINDEX

Ein hoher Viskositätsindex kann entweder über polymere Viskositätsindexverbesserer (VI) oder intrinsische Eigenschaften des Grundöles (Polarität von Estern und Polyglykolen) erzielt werden. Da die Viskosität weniger von der Öltemperatur abhängt und es bei der Auslegung um die Viskosität bzw. Schmierfilmhöhe bei der normalen Betriebstemperatur geht, ergibt ein Schmierstoff mit hohem VI bei niedrigeren Öltemperaturen geringere Viskositäten und damit auch verminderte Reibungsverluste, was bei transienten Betriebsweisen in der Öltemperatur (Kurzstrecken, kalt-warm-kalt-Fahrprofile) von Vorteil ist [20, 21]. Die trotzdem rechnerisch gleichbleibende Schmierfilmhöhe fördert dagegen die Betriebszuverlässigkeit und mindert Verschleiß. Drei Merkmale beschreiben die Leistungsfähigkeit der VI-Verbesserer:

1. Viskositätsindex (VI)³,
2. Tieftemperaturverhalten und
3. Scherstabilität.

Bei Motorölen lässt sich mit Hilfe scherstabiler Hochleistungs-VI-Verbesserer das Dilemma aus zu dünnem Schmierfilm bei hohen Temperaturen, das zu Verschleiß und höherer Reibung (Mischreibung) führen kann, und zu dickem/zuhem Schmierfilm bei moderaten Temperaturen, der zu erhöhter Reibung (hydrodynamische Verluste) und demzufolge Kraftstoffbedarf führt, auflösen. Es ist möglich, mit diesen Hochleistungs-VI-Verbesserern Öle nach SAE 0W-20 zu formulieren, die einen um bis zu 1% reduzierten Kraftstoffverbrauch gegenüber SAE 0W-16 aufweisen. Weiterhin lässt sich je nach Motor und Viskositätsklasse der Kraftstoffbedarf innerhalb einer Viskositätsklasse um 0,5%-1,5% senken durch einen strukturell optimal abgestimmten VI-Verbesserer (siehe Bild 5).

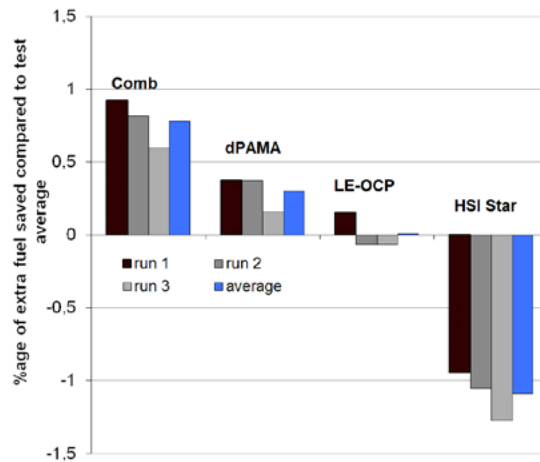


Bild 5: Einfluss der Molekularstruktur eines VI-Verbesserers auf den Kraftstoffverbrauch von Motorölen mit einer HTHS von 3,5 mPas (Daimler 350 CGI, NEDC) [22]

Bild 6 illustriert weitere Minderungen im Kraftstoffverbrauch für Formulierungen mit sehr hohem Viskositätsindex in eine 2 Liter Benzinturbomotor. Je nach verwendeten Testzyklus⁶ betragen die Minderungen im Kraftstoffverbrauch 0,80%-1,60%.

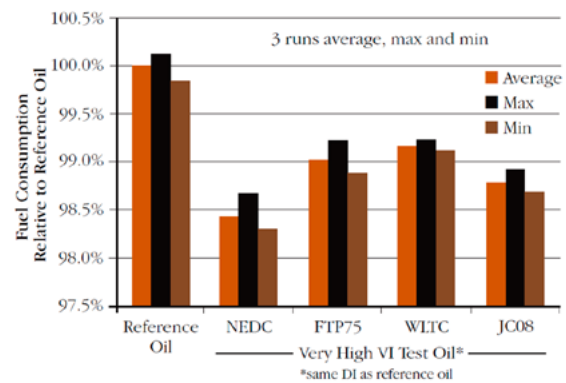


Bild 6: Einfluss des Testzyklus auf die Minderungen im Kraftstoff für eine Motorölformulierung mit sehr hohem Viskositätsindex [23] (Reference oil: VI= 164 (DEXOS 1, ILSAC GF-5), Test oil: VI= 242)

⁶ FTP75= U.S. EPA Federal Test Procedure (urban driving cycle); JC08= Japanese chassis dynamometer test cycle for light vehicles.

In hydraulischen Anwendungen, wie Baggern, Forstmaschinen, Spritzgussmaschinen und Werkzeugmaschinen lassen sich sehr große Verbesserungen im Energiebedarf und der Produktivität durch Hydraulikfluide erreichen, die einen VI über 160 und eine hohe Scherstabilität aufweisen. In Bild 7 ist der signifikante Anteil der Hydraulik am Energiebedarf einer Werkzeugmaschine dargestellt.

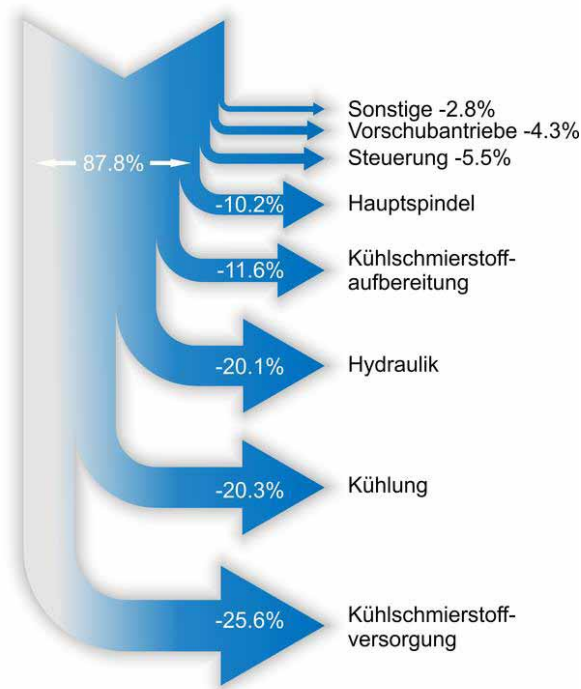


Bild 7: Energiebedarf für die einzelnen Komponenten einer Werkzeugmaschine [24]

Durch den hohen VI ist die optimale Rheologie und damit die Energieeinsparung über einen

C5. REKUPERATION

Die Rekuperation stellt einen logischen Schritt zur weiteren Nutzung der Verbrennungsprozesse der Mobilität dar, da ca. 40% des Brennwertes vom Energieträger (Kraftstoff) als „Abgaswärme“ (siehe Bild 1) ungenutzt verpuffen.

weiten Arbeitstemperaturbereich gegeben. Weiterhin wird dadurch die Sicherheit gegenüber Verschleiß bei hohen Temperaturen deutlich verbessert, während die Start- und Betriebsfähigkeit zu tieferen Temperaturen hin erweitert wird. Im Bagger lassen sich so Kraftstoffeinsparungen bezogen auf die verrichtete Arbeit von bis zu 20% erzielen [25], in Spritzgussmaschinen werden Energieeinsparungen bis zu 10% erreicht [26], in Werkzeugmaschinen zwischen 2 und 20% [27]. Da eine höhere Energieeffizienz mit geringeren Verlusten und somit einem geringeren Temperatureintrag einhergehen, lässt sich bei Produktionsanlagen auch eine teilweise deutliche Absenkung des Kühlbedarfs feststellen; um mehr als 10°C geringere Kühlwassertemperaturen im regulären Produktionsbetrieb eines Kunststoffkneters wurden gemessen.

In Getriebeölen für automobiler Anwendungen tragen VI-Verbesserer schon lange zur Optimierung des rheologischen Profils bei. Startfähigkeit bei -40°C und kurzfristige Einsatztemperaturen bis zu 180°C erfordern einen hohen Viskositätsindex. Darüber hinaus lässt sich die Effizienz deutlich steigern und die Betriebstemperatur um mehr als 10°C bei gleicher Viskositätsklasse senken [28]. Dadurch wird die Lebensdauer des Getriebes und des Schmierstoffes deutlich verlängert.

Das Reibungsminderungspotential der Schmierungstechnik, im Zusammenwirken mit der Oberflächentopographie, offenbart unzählige Prozentpunkte zur Minderung der CO₂-Emissionen auf Basis einer hohen Funktionssicherheit.

Die Rückgewinnung (Waste Heat Recovery, Exhaust Energy Recovery, Energy Harvesting) kann auf zwei Wegen erfolgen:

- a. Heißdampftechnologie mit Expander und elektrischem Generator und
- b. Thermoelektrik⁷ (SEEBECK-Effekt).

⁷ Der primäre Effekt für den thermoelektrischen Generator (TEG) ist der Seebeck-Effekt, der die direkte Entstehung einer elektrischen Spannung entlang eines elektrischen Leiters bedingt durch einen Temperaturgradienten (Heiß-Kalt-Gradient) beschreibt. TEGs können einen Teil der motorischen Verlustwärme direkt in nutzbare elektrische Energie umwandeln.



Bild 8: Rekuperationseinheit und die in der Fahrerprobung erzielten Minderungen im Kraftstoffverbrauch (Foto: EXOÉS)

Der thermoelektrische Generator (TEG) ist zwar kompakt und kommt ohne Reibstellen aus, jedoch ist die Rohstoffverfügbarkeit bestimmter Elemente, wie Tellur gar nicht, oder für Bismut nur bedingt für eine automobilen Volumenentwicklung gegeben.

Kolbenexpander werden zur Expansion in der Mobilität von Heißdampf favorisiert. Kolbenexpander bilden verschiedene Reibstellen aus und erfordern mit Wasser verträgliche Schmierstoffe, aber auch heißdampfdegradationsbeständige Werkstoffe. Mit ansteigender Temperatur wird Wasser saurer und neigt zur hydrolytischen Degradation von Schmierstoffen, weswegen die Kolbengruppe und die dampfführenden Bereiche des Expanders nicht geschmiert werden können. Die Tribologieforschung arbeitet hier an reibungs- und verschleißbeständigen Werkstoffen, welche unter Heißdampfbedingungen ein günstiges tribologisches Profil ausbilden. Die Rekuperation wird in Anbetracht der Platzverhältnisse und verfügbaren Wärmemengen vorzugsweise eine Anwendung bei Nutzfahrzeugen finden. Bild 8 verdeutlicht Kraftstoffminderungspotentiale in Nutzfahrzeugen durch die Rekuperation von 5%-

10%, die losgelöst von Reibungsminderungen im Antriebsstrang zu sehen sind. In Großmotoren liegt das nachgewiesene Kraftstoffeinsparpotential durch Rekuperation zwischen 5,5%-12,7% [29].

Der unvermeidliche Eintrag des Arbeitsmediums in den Schmierstoff erfordert wasser- und ethanollösliche Schmierstoffe, wie z. B. Polyalkylen-glykole, woraus sich u.a. der tribologische Entwicklungsbedarf ableitet.

Zukünftig werden auch „Strom-Wärme-Strom-Speicher“ (sog. „Carnot-Batterien“) an Bedeutung gewinnen [30]. Pumped Thermal Energy Storage (PTES) ist eine neue Idee für ein Verfahren zum Speichern von Wärmemengen im GWh-Bereich aus regenerativen Quellen, welche bei Bedarf wieder in elektrische Energie zurück gewandelt werden. Dabei ist z. B. Argon das Arbeitsfluid und geschmolzenes Salz (eutektisches $\text{NaNO}_3/\text{KNO}_3$) das Wärmespeichermedium, wobei noch kryogen geeignete Kohlenwasserstoff-Fluide zum Wärmetransport benötigt werden. Die hier notwendigen Wärmekraftmaschinen bilden Reibstellen aus, welche für einen hohen Wirkungsgrad reibungsarm sein müssen.

C6. ALTERNATIVE ANTRIEBE

Das prognostizierte Wachstum in der globalen Gesamtmobilität wird ökonomisch und ökologisch vernünftig global nur durch die Nutzung verschiedener Energieträger, Antriebstechnologien und Mobilitätsformen realisiert werden können. Dazu zählen:

1. Elektromobilität
2. Wasserstoff (ist für Brennstoffzelle und Verbrenner gleichermaßen geeignet) und Methan als Energieträger
3. Nutzung von Biomassen (Zellulose, Algen, Zucker) für synthetische Kraftstoffe (e-Fuels).

C6.1. E-MOBILITÄT

Batterie- und Brennstoffzellen betriebene Fahrzeuge werden je nach zukünftiger Marktdurchdringung den Schmierstoffverbrauch und den Produktmix beeinflussen und mindern, denn aktuell verbraucht die Automobiltechnik 55%-60% der gesamten Schmierstoffmenge von gut ca. einer Million Tonnen (2018: 1.017.267 Tonnen) Schmierstoffe in Deutschland. Man geht heute davon aus, dass Elektrofahrzeuge immerhin ca. 1,5 kg-2,0 kg Fettschmierstoffe benötigen.

Bis 2040 soll nach Einschätzung der International Energy Agency [31] der Bestand an Elektrofahrzeugen weltweit auf 300 Millionen anwachsen, während in derselben Zeit der Bestand an Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor von 1,3 Mrd. Fahrzeugen auf ca. 2,1 Mrd. Fahrzeugen steigt. Somit bleibt der Verbrennungsmotor auf absehbare Zeit die Hauptmotorisierung und muss durch geeignete, umweltverträgliche Energieträger alimentiert werden, in denen durch Reibungsoptimierungen weitere CO₂-Minderungspotentiale erschlossen werden.

Abgesehen von der Leistungsfähigkeit des Stromnetzes stellt die Versorgung der Batterien mit Ressourcen, wie Cobalt und Lithium, einen limitierenden Faktor für einen hohen Anteil der Elektromobilität dar, falls nicht andere Batteriekonzepte (wie z. B. auf Basis von LiTi₂NbO₇)⁸ serientauglich werden. Insofern darf davon ausgegangen werden, dass die Entwicklung an Motorölen weitergehen wird.

Die Tribologie und Schmierstoffanwendungen sind von der e-Mobilität direkt betroffen. In Elektrofahrzeugen werden weniger Teile verbaut, die dem Verschleiß, der Reparatur und der regelmäßigen Wartung unterliegen. So entfällt beispielsweise die Ölschmierung, der Riementrieb, Dichtungen und viele Verschleißteile im Bereich des Verbrennungsmotors. Dennoch verbleiben Bremssysteme und Reifen.

Elektrische Antriebsstränge benötigen dagegen mehr Wälzlager, Fette und spezifische Schmierstoffe, wie:

- » Schmierfette für Wälzlager (ca. 1,5 kg-2,0 kg Fett/Fahrzeug),
- » Kühlmittel für Batterie, E-Motor und Leistungselektronik und
- » Getriebefluidе (z. B. für hochdrehende Planetenradsätze).

Die aktuell favorisierte E-Konfiguration umfasst mindestens auch ein Untersetzungsgetriebe und ein Differential (siehe Bild 9), alles mit einem Fluid geschmiert (ca. 3-4 Liter). Zusätzlich werden funktionalisierte Kühlflüssigkeiten diskutiert, welche etwas 20 l umfassen können. Bezüglich der vielen Nebenaggregate eines modernen Kraftfahrzeuges (Lenkung, Bremsen, Stoßdämpfer, Gelenke, Sitze, Stellmotoren, Klimatisierung etc.) werden derzeit keine wesentlichen Änderungen für den Schmierstoffeinsatz angenommen; insbesondere der Schmierfettanteil und trockene Gleitlacke¹⁰ werden tendenziell sogar zunehmen.

Reibungsminderung ist sowohl für E-Antriebe von Bedeutung, da es dort um Reichweite geht, als auch beim Verbrenner, wo gegenwärtig die CO₂-Reduktion oberstes Entwicklungsziel ist.

Andererseits bedarf es Neuentwicklungen, da die Getriebeöle, Kühlmittel und Fette mit elektrischen Modulen, Sensoren und Schaltkreisen sowie Isoliermaterialien oder Spezialkunststoffen in Kontakt kommen und sind selbst noch elektromagnetischen Feldern ausgesetzt.

Hybrid-Antriebe nehmen in der Mobilität eine wichtige Stelle ein, weil sie zum einen die große Reichweite der klassischen Antriebe mit ihren energiedichten Kraftstoffen verbinden mit der Möglichkeit Bewegungsenergie bei Bedarf in Batterien zu rekuperieren und damit wertvolle Energie einzusparen.

⁸ LiTi₂NbO₇ oder LiNb₁₈W₁₆O₉₃ zeichnen sich durch sog. Ionenkanäle oder Ionentunnels mit etwas größeren Durchmesser im Kristall aus, sodass die Lithiumionen leicht und schneller vom Kristall aufgenommen und abgegeben werden können sowie schneller darin diffundieren (wandern), wodurch sich die Ladezeiten signifikant reduzieren.

⁹ Fette zählen zu den konsistenten (pastösen) Schmierstoffen, die nicht in einem Kreislauf umlaufen

¹⁰ Gleitlacke sind gebundene Festschmierstoffe. Feststoffe sind in einem organischen Binder gebunden und werden nach den bekannten Technologien der Lackierung auf das Bauteil aufgebracht und ggfs. noch „eingebraunt“. Das Bauteil läuft trocken, also öl- & fettfrei

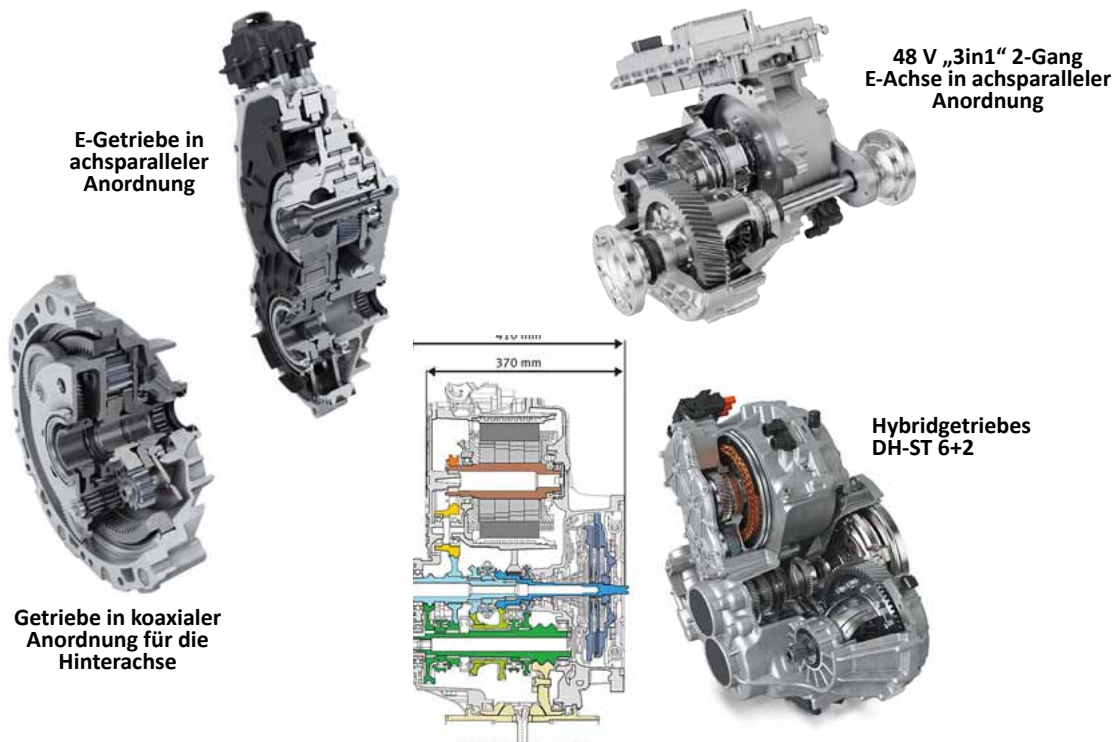


Bild 9: Illustrationen von SCHAEFFLER zu Komponenten für die E-Mobilität

Sie verändern aber die gewohnte Belastungssituation im Verbrennungsmotor, weil zu den bekannten Betriebsbelastungen bei elektrischem Betrieb zusätzlich Schwingungbelastungen im Stillstand hinzukommen. Außerdem kühlt das System in dieser Phase ab und wird damit in der Regel durch eine vermehrte Zahl an Kaltstarts beansprucht. Insbesondere in der Warmlaufphase kann dabei der Blowby-Gas-Eintrag ins Motoröl besonders ungünstig sein, weil die fehlende Wärme z. B. ein Ausdampfen von Wasser oder Kraftstoff behindert. Der heutige Nebetrieb mit Klimakompressor und Lichtmaschine wird bei künftigen Hybridfahrzeugen vermutlich nicht mehr über den Verbrennungsmotor, sondern elektrisch angetrieben oder an das Getriebe angekoppelt. Heutige Reibungsbeitragspartner wird es dort also nicht mehr geben. Der Verbrennungsmotor wird nicht mehr permanent laufen, sondern beispielsweise beim Plug-in-Hybrid nur noch, wenn die Batterie leer ist oder die Geschwindigkeit außerhalb der Stadt mehr als 70 bis 80 km/h beträgt. Bei dieser Fahrsituation entstehen höchste tribologische Anforderungen an die Reibpartner im Verbrennungsmotor, da diese dann direkt mit hoher Drehzahl betrieben werden, ohne dass sich ein trennender Schmierfilm aufgebaut

hat. Dies erfordert Materialkombinationen und Beschichtungen, die im besten Fall Trockenlauf aber mindestens einen hohen Anteil von Mangelschmierung bei hohen Kontakttemperaturen ermöglichen. Für solche Motoren bietet sich der Einsatz von Wälzlagern an der Kurbelwelle an, da sie für diese Betriebszustände eher geeignet sind. Zudem werden tribologische Systeme in Elektroantrieben vermehrt elektrischer Beanspruchung durch Streuströme oder wechselnde Felder ausgesetzt. Um daraus resultierende Stromdurchgangsschäden z. B. an Lagerstellen zu vermeiden wächst der Bedarf an gezielter Ableitung des elektrischen Stromes oder an elektrisch isolierten Bauteilen, wie sie bereits durch isolierende Schichten oder elektrisch nichtleitender Materialien realisiert werden können. Insgesamt verlangen die veränderten Betriebsbedingungen den tribologischen Systemen ein neues Maß an Robustheit ab und der Bedarf an Materialien die gleichzeitig elektrisch isolierend und thermisch gut leitend sind gewinnt stark an Bedeutung. Das erfordert den Einsatz von Schmierstoffen mit neuen Eigenschaften hinsichtlich der elektrischen und thermischen Eigenschaften hinsichtlich Stabilität und Wärmemanagement.

Da auch Elektromotoren kennfeldabhängige Wirkungsgrade aufweisen ist der Einsatz von automatisch schaltbaren Getrieben in elektrisch angetriebenen Fahrzeugen wahrscheinlich. Infolge des breiten Drehzahlbandes von Elektroantrieben wird die Zahl der benötigten Gänge jedoch geringer ausfallen als bei klassischen Antrieben, gleichzeitig müssen die Wälzlager für die hohen Drehzahlen entsprechend robust ausgelegt sein.

Reibungsreduzierung bleibt auch in elektrischen Antrieben ein wichtiges Entwicklungsziel, nicht nur um den Energieverbrauch an sich zu senken und Ressourcen einzusparen, sondern auch, weil die Energiedichte verfügbarer Batteriesysteme begrenzt ist und sich eine Verbrauchsreduzierung unmittelbar auf die Reichweite der Fahrzeuge auswirkt.

Infolge fehlender Verbrennungsgeräusche treten bei elektrisch angetriebenen Fahrzeugen Betriebsgeräusche des mechanischen Antriebsstrangs deutlicher in den Vordergrund (Komfortfrage) und es wird vermehrt Aufgabe der Tribologie Kontaktstellen geräuscharm zu gestalten.

C6.2. WASSERSTOFF UND METHAN ALS ENERGIETRÄGER

Aktuell konzentriert sich die öffentliche Diskussion auf Elektroantriebe mit Batterien als Stromquelle, zumeist Cobalt-basiert. Die praktischen Reichweiten sind noch deutlich von Verbrennungsmotorantrieben entfernt, wenn auch für den urbanen Verkehr ausreichend. Einen möglichen Ausweg bieten Fahrzeuge, die mit Wasserstoff oder Erdgas betrieben werden [32]. Zurzeit sind in Deutschland 72 Wasserstofftankstellen verfügbar. Dabei kann Wasserstoff entweder

- a. direkt verbrannt, oder
- b. über Brennstoffzellen elektrifiziert

werden. Im Falle der Nutzung über Brennstoffzellen ist die sehr hohe Reinheitsanforderung an den Wasserstoff gemäß SAE J2719 und ISO 14687-2 zu beachten. Zumindest als Brückentechnologie wird aktuell besonders auf Erdgas in komprimierter Form oder verflüssigt gesetzt [33, 34]. Erdgas gehört zwar auch zu den fossilen Energieträgern, entscheidend ist jedoch, dass es bis zu 99% aus Methan besteht und dessen Verbrennung etwa 15 bis 30% weniger CO₂ erzeugt,

als die von Benzin- oder Dieselmotoren. Zudem ist Methan einerseits der Hauptbestandteil von Biogas, andererseits kann es auch synthetisch hergestellt werden. Damit bildet die Erdgasteknik eine Brücke zur Nutzung regenerativer Kraftstoffe im Verkehrssektor.

Weltweit gibt es bereits heute über 22 Millionen Erdgasfahrzeuge, davon sind nach aktuellen Untersuchungen allein in China etwa 200.000 LkWs und Busse mit tiefkalt verflüssigtem Erdgas im Einsatz, welches insbesondere im Langstreckeneinsatz in gewerblicher Nutzung Vorteile bietet [33]. Anzumerken ist, dass stationäre Erdgas-Verbrennungsmotoren in der Stromerzeugung z. B. in Blockheizkraftwerken eine große Rolle spielen [35]. Die Motorenöle müssen auf diese Art von „Gasmotoren“ angepasst werden und generell gibt es heute spezielle Gasmotorenöle [35, 36, 37].

Für die Verbreitung von Erdgas und Wasserstoff im Transportsektor ist der Aufbau einer Infrastruktur für eine zuverlässige und sichere Kraftstoffversorgung entscheidend. Die Industrie setzt dabei langfristig auf Power-to-Gas (P2G), welche als eine Schlüsseltechnologie für die Energiewende gilt. Bei P2G wird elektrische Energie aus Wind- oder Solarstrom zur elektrolytischen Aufspaltung von Wasser genutzt und dadurch CO₂-neutraler Wasserstoff gewonnen. In einem optionalen zweiten Schritt kann aus diesem Wasserstoff unter Zugabe von Kohlendioxid auch Methan, also Erdgas, synthetisiert werden. Mit diesem Verfahren lässt sich temporär überschüssige elektrische Energie für die Wasserelektrolyse nutzen. Der so gewonnene Wasserstoff kann bei Bedarf entweder rückverstromt, direkt bzw. nach der Methanisierung von CO₂ ins bestehende Gasnetz eingespeist oder als Kraftstoff an Tankstellen zu Verfügung gestellt werden.

Komponenten für den Einsatz in Wasserstoff- und Erdgasantrieben sowie der zugehörigen Infrastruktur müssen das gleiche hohe Maß an Sicherheit, Wartungsfreiheit und Zuverlässigkeit erreichen, wie es die gegenwärtige Fahrzeugtechnik und deren Versorgung mit fossilen Kraftstoffen auszeichnet. Reibbeanspruchte Oberflächen in Kompressoren, Pumpen, Regel- und Absperrventilen sind besonders kritisch, zumal beide Gase über längere Strecken fast ausschließlich in flüssiger Form transportiert werden. Die Siedetem-

peratur von Erdgas liegt bei $-161,5^{\circ}\text{C}$, die von Wasserstoff bei -253°C und somit weit unter den Erstarrungspunkten von Schmierölen und -fetten. Aber auch für den Einsatz als Gas bei Raumtemperatur müssen speziell angepasste Schmierstoffe verwendet werden, wobei insbesondere die Brennstoffzellentechnik sehr hohe Anforderungen an die Reinheit des Wasserstoffs stellt, was die Auswahl an möglichen Schmierstoffen in der Peripherie ebenfalls stark einengt. Für entsprechende Bauteile gilt es, sichere, kostengünstige und verschleißbeständige Werkstofflösungen zu erarbeiten, die auch im Langzeitbetrieb im Kontakt mit alternativen Kraftstoffen nicht versagen. Die Tribologie leistet hier einen Beitrag zum sicheren Umgang und Markteinführung von Wasserstoff und Methan als Energieträger.

Die aktuelle EN16942 enthält Piktogramme für insgesamt 13 verschiedene Kraftstoffsorten, auch wenn praktisch nur fünf bis sechs Sorten an den Tankstellen anliegen. Es stellt sich die Frage, um das zukünftigen Mobilitätswachstum ökologisch und ökonomisch zu ermöglichen, warum die Kraftstoffvielfalt (siehe Bild 10) nicht zunehmen sollte? CO_2 -neutrale Energieträger sind das oberste Gebot.



Bild 10: Die Zapfsäulenfrage auf Basis CO_2 -neutraler Energieträger

C6.3. SYNTHETISCHE, FLÜSSIGE KRAFTSTOFFE

Treibhausgasneutrale e-Fuels und Feedstocks sind notwendig, um die EU-Klimaschutzziele des Verkehrssektors zu erreichen. Synthetische Kraftstoffe haben eine zentrale Bedeutung für den Verkehrssektor, da ca. 98% der Antriebsenergie im Verkehrssektor aus flüssigen Energieträgern stammen. Dabei dreht sich die Fachdiskussion um die Frage nach der geeigneten, biogenen Ressource, insbesondere hinsichtlich deren Ökobilanzen und dem Zielkostenniveau. Unterschiedliche Ansätze werden zur Generierung biogenen Grundmaterialien (Kraftstoffe) verfolgt, wie

- a. Biomasse (Lignozellulose, Pflanzenöle, Gastronomieabfälle, etc.),
- b. Zucker und
- c. Algen,

sowie die Nutzung von Überschussstrom (vorzugsweise aus regenerativer Energiewandlung, wie Photovoltaik und Windkraft) zur Umwandlung von CO_2 in flüssige Kohlenwasserstoffe (Power-to-Liquid, PtL).

Voraussetzung für ein akzeptables Kostenniveau knapp oberhalb fossiler Energieträger ist der Einstieg großindustrieller Anlagentechnik. Die CO_2 -neutralen e-fuels verbinden den Vorteil, dass die gesamte Benzin-/Diesel-/Kerosin-Infrastruktur (Pipelines, Tankstellen, Fahrzeuge) weiter genutzt werden können, ebenso die bestehende Erdgasinfrastruktur. Außerdem ist eine Rückwärtskompatibilität grundsätzlich gegeben. Treiber für die CO_2 -neutralen e-Fuels sind die Automobil- und Luftfahrtindustrie und folgende, mögliche Moleküle werden diskutiert:

- a. Triptane (C_7H_{16} , Oktanzahl: 112; aus Methanol & Dimethylether),
- b. Paraffine aus einem Fischer-Tropsch-Prozess unter Nutzung von Biomassen,

Die Arbeiten der Tribologie ermöglichen für die "Wasserstoffwirtschaft" den konsumer- und alltagtauglichen, wie auch wartungsfreien und langlebigen, Gebrauch der Komponenten und Netze. Die zu entwickelnden Werkstoffe müssen verschleißarm sein zur Gewährleistung einer geringen Kontamination des Wasserstoffs mit Partikeln. Der Anwendungsfall einer motorischen Verbrennung erfordert neue, wasserlösliche Motorenöle. Anspruchsvoll sind die Zusatzanforderungen nach der Beständigkeit gegenüber der Wasserstoffversprödung und den Kosten auf Basis „erschwinglicher“ Legierungen.

- c. Tri- und Tetraoxymethylenglycoldimethylether aus Biomethan,
- d. Biodimethylether (Bio-DME) aus Biomethanol,
- e. Bioolefine aus Algen (Botryococcane) oder
- f. "Farnesane" (C₁₅H₃₂) aus Zucker.

Der Vorteil dieser, im Idealfall CO₂-neutralen Alternativen liegt vor allem darin, dass sie sich als direkter Ersatz für konventionelle Kraftstoffe eignen – flüssige Produkte mit hoher Energiedichte, die nur geringe Änderungen an bestehenden Motorkonzepten und Infrastrukturen erfordern.

Es ist an dieser Stelle allerdings auch darauf hinzuweisen, dass der Gesamtwirkungsgrad für den Antrieb eines Fahrzeugs, bezogen auf die eingesetzte elektrische Energie, für PtL auf 15 bis 20% veranschlagt wird: Etwa 50% für die Bereitstellung des flüssigen Kraftstoffes, etwa 40% Wirkungsgrad eines Diesel-Verbrennungsmotors [38]. Daher werden die PtL-Alternativen inzwischen bevorzugt als Kerosin-Ersatz diskutiert, da für Flugkraftstoffe die hohe Energiedichte flüssiger Kraftstoffe essentiell ist.

Perspektivisch sind auch andere technische Lösungen denkbar, um synthetische Energieträger herzustellen, bei denen der Wasserstoff nicht an den Kohlenstoff, sondern anderweitig gebunden wird. Das kann durch reversible chemische Bindung des Wasserstoffs an spezielle Trägermoleküle erfolgen, womit man auch die problematischen Sicherheitsaspekte von Wasserstoff beim Transport und der Verteilung umgehen kann. Als flüssige organische Wasserstoffträger (LOHC = Liquid Organic Hydrogen Carriers) werden beispielsweise Toluol/Methylcyclohexan, N-Ethylcarbazol, Dibenzyltoluol, Benzyltoluol, Naphthalin, Azaborine diskutiert; die Technologie befindet sich noch im Demonstrationsstadium.

Die Beherrschung der Tribologie in Komponenten, welche in alternativen Kraftstoffen betrieben werden müssen, stellt eine Kernfrage für deren erfolgreiche Markteinführung von CO₂-neutralen Kraftstoffen dar. Die tribologischen Lösungsansätze umfassen Beschichtungstechnologien und neue Legierungen. Die e-fuels haben auch eine direkte Auswirkung auf die Formulierung vom Motorenölen.

D. BEDEUTUNG IM LICHT GESELLSCHAFTSPOLITISCHER DISKUSSIONEN

Die betriebswirtschaftliche Bedeutung der Tribologie zur Einsparung reibungs- und verschleißbedingter Energie- und Materialverluste umfasst zunehmend auch human- und öko-toxikologische Aspekte, wie

- a. den Umwelteintrag von Schmierstoffen für die Wasser-, Boden- und Luftqualität (WaBoLu), und vor allem volkswirtschaftliche Aspekte, wie
- b. Reibungssenkung = Energieeffizienz & Ressourcenschonung (CO₂-Emissionen) oder
- c. Verschleißschutz = Materialeffizienz & Ressourcenschonung (Verminderung von Abfällen, weniger Importe von Ressourcen)

Für ein rohstoffarmes Land, wie Deutschland, wiegen in der Leistungsbilanz Importe von Ressourcen jeglicher Art per Saldo negativ. Schonender Umgang mit Ressourcen und effiziente Nutzung von Materialien einschließlich hoher Sekundärkreisläufe (Recycling) verbessern die Leistungsbilanz durch reduzierte Importe und stärken Exporte über eine hohe Wertschöpfung aus den importierten Ressourcen, was insgesamt eine positive ökologische Wirkung entfaltet, da die Ressourcen vollständig genutzt werden.

D1. SCHMIERSTOFFMARKT

Tabelle 4 teilt den deutschen Schmierstoffmarkt (2018) nach Produktgruppen auf. Über die explizit genannten Kfz-Betriebsstoffe hinaus gibt es

erhebliche Mengen Hydraulikfluide (Stoßdämpferöle, Bremsflüssigkeit – ca. 30.000 t) und Kompressorenöle (Kältemaschinenöle), die als Be-

triebsstoffe in Kraftfahrzeugen zum Einsatz kommen. Weiterhin werden für die Motorenkühlung große Mengen Kühlerfrostschutz benötigt. In der Summe werden deutlich mehr als 40% der in Deutschland eingesetzten Schmiermittel dem Automotive Bereich zugeordnet.

Für reine Elektrofahrzeuge (BEV) geht man heute davon aus, dass die Gesamtschmierstoffmengen durch den Wegfall von klassischen Motorenölen deutlich sinken wird. Bei der Abschätzung der Betriebsstoffe pro Fahrzeug sollte man sich allerdings auf die aktuell favorisierte E-Konfiguration beziehen, und das heißt: Das System umfasst neben einem Hochdrehzahl-E-Motor mindestens auch ein Untersetzungsgetriebe und ein Differential, alles mit Fluid geschmiert (ca. 3-4 Liter). Deutlich zunehmen wird der Bedarf an Kühlflüssigkeiten, da neben dem E-Motor auch die Leistungselektronik, wie auch die Batterien, aktiv gekühlt werden müssen; hier spricht man von 10 bis 20 Liter Kühlerfrostschutz oder vergleichbarer Flüssigkeiten.

Tabelle 4: Schmierstoffmarkt in Deutschland nach Produktgruppen (Mineralölstatistik vom Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle)

Schmierstoffgruppe/Anwendung	Tonnage in 2018
Motorenöle	275.314
Getriebeöle Kfz.	103.425
Getriebeöle Industrie	21.940
Schmierfette Kfz.	8.006
Schmierfette außer Kfz.	25.070
Hydraulikfluide	73.083
Metallbearbeitungsfluide*	95.172
Kompressorenöle	8.475
Turbinenöle	1.566
Elektroisolieröle	11.117
Maschinenöle	27.316
Andere Industrieöle nicht zum Schmieren, Prozessöle etc.	366.783
Gesamt	1.017.267

*(Härteöle, wassermischbare und nicht wassermischbare KSS, Korrosionsschutzöle)

D2. BIOSCHMIERSTOFFE

Die Flüssigschmierung ist die Zentraltechnologie der Tribologie zur Reibungsminderung und dem Verschleißschutz. Der Gesamtverbrauch an Schmierstoffen liegt in Deutschland stabil bei knapp über einer Million Tonnen/Jahr. Von der verkauften Schmierstoffmenge werden ca. 60% über die Altölsammlung zurückgewonnen [39, 40, 41]. Diese Einschätzung hat sich in den letzten 20 Jahren nicht wesentlich geändert. Ein weiterer Anteil davon wird also als Resultat von innermotorischer Verbrennung, Verlustschmierung, Leckagen, Undichtigkeiten oder anderen systembedingten Gründen in die Umwelt gelangen. Insgesamt geht man in Deutschland von einer verbleibenden Restmenge aus von ca. 20%, die über unbekannte Eintrittspfade in die Umwelt gelangen.

Ein Einfluss dieser Eintrittspfade von Schmierstoffen in die Umwelt, insbesondere auf die Wasserqualität, ist seit langer Zeit bekannt und unstrittig. Daher hat der VDMA im Jahre 1994 einige Richtlinien zu „biologisch abbaubaren Druckflüssigkeiten“ (VDMA-Einheitsblätter 24568 und 24569) herausgegeben, woraus im Jahre 2002 schließlich die DIN ISO 15380 „Umweltverträgli-

che Hydrauliköle“ entstand. Parallel dazu wurde das deutsche Umweltzeichen „Blauer Engel“ für Schmierstoffe entwickelt – zunächst aufgeteilt nach Anwendungen:

- d. RAL-UZ 48 „Biologisch schnell abbaubare Kettenschmierstoffe für Motorsägen“ (seit 1988),
- e. RAL-UZ 64 „Biologisch schnell abbaubare Schmierstoffe und Schalöle“ (seit 1991) und
- f. RAL-UZ 79 „Biologisch schnell abbaubare Hydraulikflüssigkeiten“ (seit 1994).

Ab 2012 wurden diese drei Umweltzeichen vereinheitlicht zum RAL-UZ 178 „Biologisch abbaubare Schmierstoffe und Hydraulikflüssigkeiten“.

Parallel wurde im Jahre 2005 ein Europäisches Umweltzeichen (European Ecolabel, Euro-Margerite) für Schmierstoffe eingeführt, ab 2005 als Richtlinie 2005/360/EC, ab 2011 unter 2011/381/EU und zuletzt ab 2020 unter 2018/1702/EU.

Alle diese Ansätze haben in differenzierter Form die öko-toxikologischen Grundanforderungen an schnell biologisch abbaubare Schmierstoffe

(Bioschmierstoffe) international verfestigt. Daneben hat das „Europäische Ecolabel bisher auch einen Mindestanteil an nachwachsenden Rohstoffen gefordert, wobei dieser überraschend in der dritten Novelle (2018/1702/EU) fallen gelassen wurde.

Aufgrund unterschiedlicher Ansätze und Terminologien zu umweltverträglichen Schmierstoffen hat die Europäische Kommission mit dem Mandat M491 im Jahr 2011 einen Normungsauftrag zum Begriff „Bio-Schmierstoff“ an CEN vergeben. Das Resultat ist die DIN EN 16807:2016, in den Kriterien und Anforderungen für Bio-Schmierstoffe und biobasierte Schmierstoffe festgelegt wurden. Für die verschiedenen Schemata werden im Kern gefordert:

- a. schnell biologische Abbaubarkeit (vollständige Mineralisierung; kein Primärabbau),
- b. 2-3 aquatische Toxizitäten gemäß OECD 201, 202 und 203 sowie
- c. ein Mindestanteil an nachwachsenden Rohstoffen von 25%.

In Hinsicht auf umweltrelevante Kriterien für Schmierstoffe ist in den letzten 20 Jahren also viel realisiert worden. Für den allgemeinen Einsatz sind Bioschmierstoffe gesetzlich in Europa nicht vorgeschrieben, weswegen deren Marktanteil noch klein ist. Allerdings bleibt der Einsatz der umweltverträglichen Varianten in Europa bisher zumeist auf Freiwilligkeit begrenzt, weshalb der Marktanteil umweltverträglicher Schmierstoffe in den letzten 10 Jahren nicht über die erreichten 3%-3,5% (ca. 120.000 t/a) hinausgekommen ist [42].

Um dieses Umsetzungsdefizit zu beseitigen, hat die Europäische Leitmarkt-Initiative (LMI; {COM(2007) 860 final} vom 21.12.2007) im Jahr 2011 folgende Empfehlung an die EU-Kommission adressiert: „Prüfe die Möglichkeit einer Verpflichtung zum Einsatz von Bio-Schmierstoffen und Hydraulikfluiden in umweltsensiblen Bereichen. Dies könnte implementiert werden z. B. durch Gesetze zum Schutz von Boden und Wasser. Bisher wurde diese Empfehlung noch nicht umgesetzt.

Die USA beschritt, als „Nachzügler“ bei Bioschmierstoffen, einen anderen Weg. Dort wurde mit der „Vessel General Permit (VGP) for

discharges incidental to the normal operation of vessels“ ab dem 19.12.2013 eine bindende Richtlinie erlassen, die den Einsatz von umweltverträglichen Schmierstoffen auf Schiffen in den Territorialgewässern der USA („water to sea interfaces“) zwingend vorschreibt, was ein Vorbild für Europa darstellen kann. Dabei kommen spezifische Kriterien zur Anwendung, welche durch Produkte mit dem Europäischen Umweltzeichen für Schmierstoffe der zweiten Novelle unmittelbar erfüllt werden.

Gelangen „Bio-Schmierstoffe“ in die Umwelt, so sind sie im ersten Moment ähnlich problematisch wie „Mineralöle“, auch wenn ihre toxikologische Wirkung und Verweilzeit auf Grund der schnellen biologischen Abbaubarkeit sehr viel geringer ist. Problematisch an allen flüssigen Schmierstoffen, die leichter als Wasser sind, ist deren „Aufschwimmfähigkeit“ (Dichtekriterium). Damit einher gehen Gefahren für die direkte Kontamination von See- und Meerestieren. Dieses sogenannte Floater-Kriterium hat dazu geführt, dass die aktuelle deutsche „Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen“ [43] auch Bio-Schmierstoffe generell in die Wassergefährdungsklasse 1, also als „schwach wassergefährdend“ einstuft.

Im Allgemeinen werden schnell biologisch abbaubare Schmierstoffe nicht aus Mineralölen oder synthetischen Kohlenwasserstoffen formuliert. Die in Frage kommenden Grundöle bestehen zumeist aus natürlichen und synthetischen, biogenen Estern, aber auch aus Polyalkylenglykolen. Beide können aus „Biomasse“ oder nachwachsenden Rohstoffen synthetisiert werden, wobei biogene Polyalkylenglykole am Markt bisher kaum verfügbar sind. Sogenannte Bioolefine, die aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden und als relativ gut biologisch abbaubar gelten, können in Zukunft ggf. marktgängig werden.

Bio-Schmierstoffe werden überwiegend von unabhängigen, nicht petrochemisch rückwärtsintegrierten Schmierstoffherstellern angeboten. Aufgrund der allgemeinen Anwendungserfahrungen und des erarbeiteten Wissens um die Additivierungen wird mittlerweile anerkannt, dass Maschinenbauer entlang der Wertschöpfungskette und Endkunden kaum noch Rücksicht auf die Werkstoffauswahl für den Einsatz dieser

Grundöle nehmen müssen; einzig bei polymeren Werkstoffen ist eine spezifische Auswahl weiterhin angezeigt.

Der interdisziplinäre Ansatz der Tribologie hat die Markteinführung der Bio-Schmierstoffe begünstigt, zumal da sich herausstellte, dass viele ester- & polyglykolbasierte Schmierstoffe besonders niedrige Reibbeiwerte aufweisen. Darüber hinaus können als weitere technische Vorteile von Bio-Schmierstoffen der relativ hohe Viskositätsindex sowie ein geringer Verdampfungsverlust angesehen werden (interessant bei Absenkung der Viskosität) – damit sind sie für die aktuellen Herausforderungen bei Energieeffizienz und CO₂-Reduktion besonders interessant. Bisher allerdings sind Bio-Schmierstoffe in der mengenmäßig größten Marktgruppe der Auto-

mobilschmierstoffe (Motor- und Getriebeöle) noch nicht marktgängig, auch wenn es verschiedene Produktvorschläge gab, insbesondere für umweltverträgliche Motorenöle.

Die Schmierstoffmenge entspricht ca. 1% der Kraftstoffmenge in Deutschland. Die Rohstoffe für die an sich langlebigen Schmierstoffe können aus Biomassen synthetisiert werden, wobei die verschiedenen Syntheserouten Ester, Polyglykolen und Kohlenwasserstoffe erlauben. Bioschmierstoffe haben zusätzlich einen positiven Einfluß auf die Wasserqualität, wenn diese in die Umwelt gelangen, und auf die Reibungsminderung.

D3. UMWELTPOLITISCHE EINFLUSSNAHMEN DURCH DEN GESETZGEBER

Es gibt eine Vielzahl von weit verbreiteten und bewährten Beschichtungen für Reibungs- und Verschleißschutzaufgaben, z. T. mit vor Korrosion schützender Wirkung. Im Zuge der EU-Verordnung EC/1907/2006 (REACH = Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals) entsteht ein Substitutionsdruck für viele in Schmierstoffen gebräuchliche Funktionsadditive und auch für eingeführte Beschichtungen, wie z. B. Chrom (Cr^{VI+}) und Chromate, aber auch für Werkstoffe mit Cobalt- und Nickel-Anteilen, die alle über einen breiten und bewährten Funktionsraum verfügen. Die Tribologie leistet hier nicht nur einen Beitrag zur Erfüllung der klassischen, funktionalen Aufgaben, sondern auch für die Entwicklung von alternativen, metallurgischen Lösungen, die gleichzeitig die Erfüllung der funktionalen und toxikologischen Anforderungen erlauben.

Metallurgische Alternativlösungen für die Ausgestaltung der Tribosysteme umfassen reibungsmindernde Dünnschichten aus diamantähnlichem Kohlenstoff (DLC, ta-C), aber auch CrN_x oder MoN_x, organisch gebundene Gleitlacke oder mit Nickel gebundenes Niobcarbid. Hinsichtlich der Bioschmierstoffe (siehe Kapitel D2), anders als in den USA, haben der europäische Gesetzgeber keine bindenden und die nationalen Gesetzgeber nur in wenigen Teilbereichen zwingende Anwendungsvorschriften erlassen.

D3.1. FEINSTAUBPARTIKEL AUS ABRIEB

Straßenverkehrsemissionen ohne Emissionen aus Verbrennungsmotoren (non-exhaust emissions), insbesondere der mengenmäßig bedeutende Reifen- und Bremsenabrieb, sind zweifellos nicht nur ein dekoratives Ärgernis, sondern tragen zu ca. 90% zu den Partikelemissionen des Straßenverkehrs bei [44]. Reifen und Bremsen werden auch in batterie- und Brennstoffzellen betriebenen Fahrzeugen vorhanden sein. Je nach Fahrweise und Fahrprofil liegt der Reifenabrieb zwischen 0,04 und 0,5 g/km [45]. In Tabelle 5 werden homologe Abriebmengen für Bremssysteme zusammengefasst [46].

Tabelle 5: Gesamtverschleißmasse der Bremsscheibe und der Bremsbeläge im NEFZ-Fahrzyklus

Tribologische Kenngröße	ECE-1 - NEDC Cycle: 1 - 20	ECE-1- NEDC Cycle: 21 - 40
Verschleißbetrag der Beläge [g]	3,45	1,75
Verschleißbetrag der Scheibe [g]	5,75	3,45
Gesamtverschleißbetrag [g]	9,20	5,20
Spezifische Verschleißrate [mg/Zyklus-km]	42,0	24,0



Bild 11: Porsche Surface Coated Brake (PSCB) mit einer Reibfläche aus Wolframcarbid (PORSCH SE)

Die Tribologie kann hier einen Beitrag zur Minderung der Partikelemissionen über verschleißbeständigerer Werkstoffe unter Beibehaltung der anderen, funktionalen Eigenschaften leisten. Bereits im Herbst 2002 hatte der voll funktionsfähige Demonstrator „ELLYPSE“ von der RENAULT SaS aufgezeigt [47], dass Wechselintervalle für Reifen und Bremssysteme auf 100.000 km ausgedehnt werden können. Derartige Lösungsansätze sollten wieder aufgegriffen werden.

Zur Minderung des Bremsenabriebs hat PORSCH SE erstmals Ende 2017 eine mit Hartmetall beschichtete Graugussbremsscheibe (siehe Bild 11) vorgestellt, die Porsche Surface Coated Brake (PSCB) [48], welche ca. 90% weniger „Bremsstaub“ generiert.

Straßenbahnen und Eisenbahnen tragen auch zu den Partikelemissionen bei [49], über:

- a. Pentagraphen (Stromabnehmer),
- b. Radreifen (auch wenn aus Stahl!) und
- c. Bremsen.

D3.2. WOLFRAMCARBID UND VERSCHLEISSCHUTZ

Wolframcarbid (WC, „Hartmetall“) dominiert seit Jahrzehnten den Verschleißschutz und ist der Standardwerkstoff in der Zerspaltung, wobei 80% des global gewonnenen Wolframs aus China stammen, welches als eine kritische Ressource eingestuft ist [50]. Wolframcarbid vereint ca. 70% des verbrauchten Wolframs auf sich. Mit zunehmenden, toxikologischen Bedenken gegenüber Cobalt-gebundenem WC und der Abhängigkeit von Wolfram-Vorkommen in China hat das Interesse an Niobcarbid (NbC) als Alternative deutlich zugenommen [51]. Niobcarbid und Nioboxid (Nb_2O_5) sind vollständig REACH registriert. Niob ist ein Biomaterial. Im Verschleißschutz sind ebenfalls sog. STELLITE™, hoch cobalt- & chromhaltige Legierungen, weit verbreitet. Die Batterieanwendungen fördern die Nachfrage nach dem begrenzt aus Bypass-Produktion zur Verfügung stehenden Cobalt und sorgen für hohe Rohstoffpreise, wobei das toxikologische Profil von Cobaltverbindungen zusätzlich vielerorts Sorgen bereitet. Für eine fertigungsorientierte Volkswirtschaft ist daher die Verfügbarkeit an Zerspaltungswerkstoffen essentiell, ebenso solche zum Verschleißschutz. Die Erschließung von mit Nickel gebundenem NbC¹¹ als Substitutionsalternative zum zumeist mit Cobalt gebundenem WC ist eine metallurgische-tribologische Herausforderung, um den über 90-jährigen Erfahrungshorizont von Wolframcarbid (WC) zu erreichen.

¹¹ Brasilien bildet mit einer Förderung von ca. 85% des global gewonnenen Niobs (ca. 100.000 Tonnen in 2018) auch ein Oligopol aus, welches immerhin eine Alternative darstellt und nicht als so „kritikal“ angesehen wird, wie Wolfram aus China. Unter der Annahme, dass NbC auch das gesamte Volumen an WC übernehme, so ergibt die Mächtigkeit der aktuellen, nachgewiesenen und nicht ausgebeuteten Vorkommen eine Reichweite für viele Hundert Jahre für Niob. Ausbeutungswürdige Niobvorkommen in Deutschland sind quasi nicht vorhanden, aber in der EU, z. B. Motzfeldt oder Sarfartoq, beide in Grönland (Dänemark).

E. LEHRE UND FORSCHUNG

Viele Universitäten und Hochschulen vermitteln tribologische Inhalte. Allerdings gibt es nur sehr wenige Vorlesungen, die sich ausschließlich mit Tribologie beschäftigen. Diese findet sich eher innerhalb von Lehrveranstaltungen zu Maschinen-

elementen wieder. Im Folgenden soll die Situation exemplarisch anhand der größten Lehrstühle mit hauptsächlich tribologischen Inhalten dargestellt werden, die in überwiegender Mehrzahl institutionelle Mitglieder der GfT sind.

E1. GfT-STUDIE „TRIBOLOGIE AN UNIVERSITÄTEN UND HOCHSCHULEN“

Bereits im Jahr 2014 wurde von der GfT eine Studie [52] zur Ermittlung der tribologischen Aktivitäten an deutschen Hochschulen durchgeführt. Recherchiert wurde damals anhand der bereits bekannten Adressen, im inzwischen nicht mehr verfügbaren „Vademecum“ der deutschen Forschungseinrichtungen, in den Vorlesungsverzeichnissen der deutschen Universitäten und Hochschulen und allgemein im Internet. Erfasst wurden:

- a. 82 Institute an 36 Universitäten und Technischen Hochschulen,
- b. 76 Fachbereiche/Institute/Fächer an 38 Fachhochschulen und
- c. 20 Forschungszentren und Forschungsinstitute.

Zu den angebotenen Vorlesungen ergab die Studie, dass Teilaspekte der Tribologie überwiegend in übergeordneten Veranstaltungen (z. B. Maschinenelemente) behandelt werden, zu meist im Rahmen der Grundlagenfächer in den ersten Semestern und somit nicht der breiten Studentenschaft der Ingenieurwissenschaften vermittelt werden. Eigenständige Tribologie-Vorlesungen mit einer Übersicht über alle Gebiete der Tribologie machten nur rund 20% der Lehrveranstaltungen aus und wurden vorwiegend im Rahmen von Wahlfächern angeboten. Die Schmierungstechnik war in der Lehre nur marginal vertreten. An dieser Situation dürfte sich bis heute wenig geändert haben. Bei den laufenden F&E-Projekten befassten sich erwartungsgemäß die meisten mit Fragestellungen zu Maschinenelementen und zur Antriebstechnik (Wälz- und Gleitlager, Dichtungen, Freiläufe, Kettentriebe und Kupplungen). An zweiter Stelle standen werkstoff- und oberflächentechnische Entwicklungen und Optimierungen. Eine Vielzahl von Projekten befasste sich mit speziellen Fragestellungen rund um den Verbrennungsmotor und Getrieben. Wie in der Lehre,

spielen Schmierstoffe und Schmierungstechnik sowie auch die Medizintechnik in der Hochschulforschungslandschaft eine eher untergeordnete Rolle.

In der Studie von 2014 wurden auch Prüfstände mit der zugehörigen Mess- und Analysetechnik erfasst. Die Schwerpunkte der eingesetzten Standard-Prüfverfahren lagen bei Verzahnungen, Wälzlagern, Dichtungen und Gleitlagern. Die Hälfte der eingesetzten Prüfstände waren angepasste anwendungsspezifische Eigenkonstruktionen, wie sie für den Maschinenbau typisch sind. Von den Standard-Prüfgeräten waren FZG-Prüfstand, Stift-Scheibe-Tribometer, Zweischeibenprüfstand und das SRV-Gerät am häufigsten vorhanden (siehe Tabelle 6). Von den 28 kategorisierten Prüfständen in der GfT-Prüfstands-Datenbank wurden allerdings tatsächlich nur 17 eingesetzt.

In der Lehre vieler Hochschulen und Universitäten werden durchaus tribologische Inhalte vermittelt, jedoch nicht in einer hinreichenden Breite und Tiefe. Vor dem Hintergrund der volkswirtschaftlichen und ökologischen Bedeutung der Tribologie sowie deren „Omnipräsenz“ in allen Maschinenelementen und Fachdisziplinen erscheint es geboten, die Vermittlung der Grundlagen von Reibung, Verschleiß und Schmierung in den Studiengängen zu verstärken.

Die Gesellschaft für Tribologie baut im Rahmen ihrer Möglichkeiten ein eigenes Weiterbildungssystem mit Zertifikat und Prüfungen auf, um den Wissenshorizont über Tribologie breit zu implementieren. Dennoch genügt dies bei weitem nicht, um den anerkannt hohen Bedarf an Aus- und Weiterbildung, insbesondere im Bereich der Hochschulbildung, zufriedenstellend zu decken.

E2. FORSCHUNG

E2.1. FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Von 1960-1969 förderte die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) mit 4,5¹² Mio. DM das Schwerpunktprogramm „Grundlagenforschung Verschleiß, Reibung und Schmierung“ [53]. Anschließend förderte das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) schwerpunktmäßig „Tribologie“ von 1978 in 181 Einzelvorhaben mit einem Fördervolumen von 49¹³ Mio. DM über acht Jahre. Von 1986 bis 1991 führte das BMFT den Förderbereich „Tribologie“ mit einem Fördervolumen von 21,3¹⁴ Mio. DM weiter. Danach gab es bis 2017 keine weiteren derartigen Programme.

E2.2. SCHWERPUNKTPROGRAMME UND SONDERFORSCHUNGSBEREICHE DER DFG

In vielen Schwerpunktprogrammen (SPP) und Sonderforschungsbereichen (SFB) der DFG befaßten sich Teilprojekte mit tribologischen Fragen. Die nachfolgenden SPP hatten oder haben die Tribologie zum Kerninhalt:

- » Bearbeitungsbedingte Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften keramischer Bauteile, SPP 322 697
- » Systemdynamik und Langzeitverhalten von Fahrwerk, Gleis und Untergrund, SPP 1015
- » Ressourceneffiziente Konstruktionselemente, SPP 1551
- » Fluidfreie Schmiersysteme mit hoher mechanischer Belastung¹⁵, SPP 2074

E2.3. FÖRDERUNG DURCH DAS BMWI

Nachdem es über 25 Jahre keine größeren Förderprogramme im Bereich der Tribologie mehr gab, wurde 2017 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) das Forschungsfeld Tribologie initiiert und vernetzt seitdem branchenübergreifend die Akteure aus Wissenschaft und Industrie. Als Schnittstelle zwischen Politik, Forschung und Wirtschaft bündelt das Forschungsfeld alle Forschungsaktivitäten des Schlüsselthemas Tribologie für eine energieeffiziente Industrie der Zukunft.

Spezialisten aus Hochschulen, Forschungsinstituten und Unternehmen zusammenzubringen, ist eine anspruchsvolle Aufgabe, aber machbar. Die Wissenschaftler der geförderten Vorhaben bringen ihre gewonnenen Erfahrungen und Erkenntnisse aus Forschung und Entwicklung in das Fachgebiet der Tribologie ein. Der Netzwerkgedanke soll darin weiter fortgeführt und ausgebaut werden, um Anreize für eine übergreifende Forschung zu schaffen: Tribologische Fragestellungen weisen eine große volkswirtschaftliche Bedeutung auf. So werden die durch Reibung und Verschleiß verursachte monetäre, volkswirtschaftliche Aufwendungen in Industrieländern zwischen 1 und 2 Prozent des Bruttosozialprodukts abgeschätzt (siehe Tabelle 1), wobei ökologische Treiber unberücksichtigt bleiben.

¹² Entspr. einer Kaufkraft in 2018 von 19,7 Millionen Euro.

¹³ Entspr. einer Kaufkraft in 2018 von 111,1 Millionen Euro.

¹⁴ Entspr. einer Kaufkraft in 2018 von 36,3 Millionen Euro.

¹⁵ Neben den vielfältigen Beiträgen flüssiger Schmierstoffen wird weiteres Optimierungspotenzial gesehen in durch eine breitere Anwendung von so genannten Festschmierstoffen, welche beispielsweise als integrierte Bestandteile von Oberflächenbeschichtungen zum Einsatz kommen können. In einem in 2018 initiierten Schwerpunktprogramm 2074 der DFG stehen im Fokus unter anderem hochbelastete Wälzlagerungen.

E3. TRIBOLOGISCHE PRÜFTECHNIK (TRIBOMETRIE)

Zur Abrundung der vorliegenden Studie soll im Folgenden noch auf die in Forschung und Industrie eingesetzte Prüftechnik eingegangen werden. Eine umfassendere Aufstellung tribologischer Prüfstände ist auf der Webseite der Gesellschaft für Tribologie e.V. (www.gft-ev.de) unter „Publikationen“ zu finden.

Tribometer oder Geräte zur Messung von Reibung und Verschleiß bilden die Grundlage in den meisten tribologischen Untersuchungen. Der Zweck eines Tribometers ist die Simulation von Reibung und Verschleiß unter kontrollierten Bedingungen zur Ermittlung des funktionalen Profils einer geschmierten oder ungeschmierten Paarung. Eine auf Anwendungen übertragbare und validierte

Tribometrie beschleunigt Produktentwicklungen und senkt Kosten sowie gibt Richtungssicherheit und sichert die Innovationskraft ab.

Tabelle 6 gibt tribologische Prüfgeräte mit internationaler Durchdringung wieder, welche ihren Ursprung in Deutschland haben. Eine große Anzahl verschiedener Prüfnormen in internationalen Normungsorganisation deckt diese Prüftechnologien ab und unterstreicht die Vielseitigkeiten dieser genormten Prüfkonzepte. Zu älteren Tribometerkonzepten aus Deutschland mit internationaler Bedeutung zählten die Almen-Wieland-Prüfmaschine und der Gleitwertindikator nach TANNERT (DIN E 51387).

Tabelle 6: Bedeutende tribologische Prüfgeräte mit internationaler Durchdringung

Tribometrisches Prüfgerät	Prüfkategorie	Prüfnormen
SHELL-Vierkugel-Apparat (VKA)	Modellprüfstand	DIN 51350, Teile 1-6, ISO 20623, ASTM D2266, ASTM D2596, ASTM D2783, ASTM D4172, ASTM D5183, CEC L-45-A-99, IP 239, PSA D55 1136, Renault D55 1994
SRV® translatorisches Oszillations-Prüfgerät	Modellprüfstand	DIN 51834, Teile 1-4, ISO 19291; ASTM D5706, ASTM D5707, ASTM D6425, ASTM D7217, ASTM D7420, ASTM D7421, ASTM D7594, ASTM D8227, SAC SH/T 721, SAC SH/T 784, SAC SH/T 847, SAC SH/T 882, SAC SH/T 920
Stift-Scheibe-Tribometer	Modellprüfstand	DIN 50324, ISO 20808, ASTM G99
Schmierstoffprüfgerät nach BRUGGER	Modellprüfstand	DIN 51347
FZG Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine	Bauteilprüfstand	DIN 51354, ISO 14635, ASTM D4998, ASTM D5182, CEC L-07-95, CEC L-84-02, DGMK 377, DGMK 575, DGMK 623, FVA 2, FVA 54, FVA 345, FVA 371
FE8 Wälzlagerschmierstoff-Prüfgerät	Bauteilprüfstand	DIN 51819, Teile 1-3
FE9 Wälzlagerschmierstoff-Prüfgerät	Bauteilprüfstand	DIN 51821, Teile 1-2
V104C Flügelzellenpumpentest	Bauteil/Aggregatprüfstand	DIN EN ISO 20763, DIN 51389, Teile 1-3, ASTM D7043
Reibwertmaschine für Naßkupplungen	Bauteilprüfstand	CEC L-11-A-98, FVA 626, SAE 2

FVA= Forschungsvereinigung Antriebstechnik; CEC= The Coordinating European Council; SAC= Standardization Administration of China; DGMK= Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V.; ASTM= American Society for Testing and Materials

BIBLIOGRAPHISCHE REFERENZEN ZUM NACHLESEN

- [1] H. P. Jost, Lubrication (Tribology). Education and Research Report. London: Dept. Education and Science, Her Majesty's Stationary Office; 1966
- [2] H. P. Jost and J. Schofield, Energy savings through tribology: a techno-economic study, Proc. Instn. Mech. Eng., 1981, 195(16):151–73.
- [3] O. Pinkus and D. F. Wilcock, Strategy for Energy Conservation through Tribology, 1977, The American Society of Mechanical Engineers, New York, NY 10016-5990, USA; www.asme.org
- [4] K. Richter, Verluste durch Reibung und Verschleiß, in: „Tribologie – Reibung, Verschleiß, Schmierung – 1. Fortschreibung der Studie Tribologie, Bestandsaufnahme und Orientierungsrahmen, BMFT (Herausgeber), Köln, April 1985, S. 19-45 ff
- [5] W. J. Bartz, Energieeinsparung durch tribologische Maßnahmen, 6. Int. Colloquium Tribology, 1988, Vol. I, 1.2-1/1.2.12, ISBN 3-924813-19-1
- [6] J. Mølgaard, Economic losses due to friction Research and development strategies, National Research Council Canada, Associate Committee on tribology, (a workshop report), 1984
- [7] A Strategy for tribology in Canada – Enhancing reliability and efficiency through the reduction of wear and friction, National Research Council Canada. Associate Committee on Tribology (Wear, Friction and Lubrication), 1986, NRCC Number: 26556
- [8] K. Holmberg, P. Andersson and A. Erdemir, Global Energy Consumption due to Friction in Passenger Cars, Tribology International 47 (2012) 221–234
- [9] Autorenkollektiv, Data and Developments Concerning Germany and Global Energy Supplies, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), BGR Energy Study No. 21, December 2017, https://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Energie/Downloads/energiestudie_2017_en.pdf;jsessionid=9AE6B98EB22A616403B346DEF4E4A026.1_cid331?__blob=publicationFile&v=2
- [10] K. Holmberg and A. Erdemir, Influence of tribology on global energy consumption, costs and Emissions, FRICTION 5(3): 263–284 (2017)
- [11] Key World Energy Statistics 2017, International Energy Agency, Paris, www.iea.org
- [12] BP Statistical Review of World Energy, June 2018, 67th edition
- [13] Klimaschutz in Zahlen, Ausgabe 2018, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU), Berlin
- [14] K. Michaelis, J. Geiger, K. Moser, Stahl. K., J. Beulshausen, S. Pischinger, Low Friction Powertrain, Gesamtbericht zum Forschungscluster Low Friction Powertrain, Abschlussbericht, FVV Heft 1000, 2013, Frankfurt am Main
- [15] J. Schommers, H. Scheib, M. Hartweg und A. Rosler, Reibungsminderung bei Verbrennungsmotoren, Motortechnische Zeitschrift (MTZ), 2013, 74. Jahrgang, 07-08, p. 566-573
- [16] T. Nakamura, Improvement of fuel efficiency of passenger cars by taking advantage of tribology, Tribology Online, Vol. 12 (3), 2017, S. 76-81
- [17] M. Nagasaki, T. Satoh, K. Moriki and K. Kubo, Formulation effects on engine oil performance, Part-1: The effect of engine oil viscosity with varying phosphorus concentrations on engine friction and wear control performance, Proc. Int. Tribology Conference, Nagoya, 29.10-02.11.2000, Vol. I, ISBN 4-9900139-4-8, p. 189-192
- [18] Y. Okuyama, D. Shimokoji, T. Sakurai and M. Maruyama, Study of low-viscosity engine oil on fuel economy and engine reliability, SAE 2011-01-1247
- [19] K. Ishizaki and M. Nakano, Reduction of CO2 Emissions and Cost Analysis of Ultra-Low Viscosity Engine Oil, Lubricants 2018, 6, 102
- [20] J. Cuthbert, A. Gangopadhyay, L. Elie, Z. Liu, D. McWatt, E. D. Hock, A. Erdemir, Engine Friction and Wear Performances with Polyalkylene Glycol Engine Oils, SAE Technical Paper 2016-01-2271, 2016, <https://doi:10.4271/2016-01-2271>
- [21] D. E. Sander, C. Knauder, H. Allmaier, S. Damjanović-Le Baleur and P. Mallet, Friction Reduction Tested for a Downsized Diesel Engine with Low-Viscosity Lubricants Including a Novel Polyalkylene Glycol, Lubricants 2017, 5, 9, <https://doi:10.3390/lubricants5020009>
- [22] F. Lauterwasser, P. Hutchinson, C. Wincierz., S. Ulzheimer, D. Gray, The Role of VI Improvers in the Formulation of Fuel Efficient Engine Oils with Long Oil Drain Intervals, 18. International Colloquium Tribology, 2012, Esslingen
- [23] D. Smolenski, Is Fuel Economy Hiding SAE J300?, Lubes and Greases, March 2015, p. 29-32
- [24] Chr. Brecher (Hg.), Effizienzsteigerung von Werkzeugmaschinen durch Optimierung der Technologien zum Komponentenbetrieb, EWOTeK (2012)
- [25] M. Alibert, T. Schimmel, The contribution of hydraulic fluid properties to hydraulic system efficiency, 20. International Colloquium Tribology, Esslingen, 2016
- [26] F. Lauterwasser, M. Alibert, R. Kolb, Formulation of energy efficient hydraulic fluids for injection moulding, 20. International Colloquium Tribology, Esslingen, 2016
- [27] F. Makansi, Untersuchung des Einflusses verschiedener Hydrauliköle auf den Energiebedarf von Hydraulikaggregaten, Master Thesis, TU Darmstadt, PTW, 2019.

- [28] C. Wincierz, K. Hedrich, M. Mueller, Formulation of Multigrade Gear Oils for High Efficiency and Low Operating Temperature; Society of Automotive Engineers, 2002-01-2822, 2002.
- [29] S. Douvartzides and I. Karmalis, Working fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) exhaust heat recovery of an internal combustion engine power plant, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 161 (2016) 012087
- [30] R. B. Laughlin, Pumped thermal grid storage with heat exchange, J. Renewable Sustainable Energy 9, 044103 (2017); <https://doi.org/10.1063/1.4994054>
- [31] Global EV Outlook 2018 – Towards Cross-Modal Electrification, OECD/IEA May 2017, www.iea.org
- [32] U. Albrecht, P. Schmidt, W. Weindorf, R. Wurster and W. Zittel, Kraftstoffstudie: Zukünftige Kraftstoffe für Verbrennungsmotoren und Gasturbinen, FVV Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen, Heft 1031, 2013
- [33] R. Müller-Eberstein und S. Sigemund, Nachhaltige Mobilität mit Erdgas und Biomethan. Marktentwicklung 2015/2016, Deutsche Energie-Agentur GmbH, Berlin, 2016, www.dena.de
- [34] Zukunft LNG- Flüssiges Erdgas als sauberer Kraftstoff für schwere Lkw und Flottenfahrzeuge, Hrsg. DVGW, Bonn
- [35] Firmenbroschüre: Schmierstoffe für stationäre Gasmotoren“, FUCHS Europe Schmierstoffe GmbH, Mannheim, 2012
- [36] Whitepaper „Next Generation Gas Engine Oils for Improved Sustainability in the Power Generation Market“, ExxonMobil
- [37] M. F. Eltantawy, A. A. Bosila, Wearing Effect of Using Natural Gas in Gasoline Engine Components, Australian J. Basic and Appl. Sci. 6(3), 2012, 28-37
- [38] Umweltbundesamt, Integration von Power to Gas/Power to Liquid in den laufenden Transformationsprozess, ISSN 2363-829X, März 2016
- [39] K.-U. Kolshorn, P. Wiesert, R. Götz und G. Rippen, Ermittlung von Ölvermeidungspotentialen, Forschungsbericht 103 60 11, UBA-FB 97-034, ISSN 0722-186X.
- [40] Bericht über biologisch schnell abbaubare Schmierstoffe und Hydraulikflüssigkeiten“, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Bonn, November 1999
- [41] V. Monier, E. Labouze, Critical review of existing studies and life cycle analysis on the regeneration and incineration of waste oils, European Commission, DG Environment A2, December 2001
- [42] Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe, FNR-Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 34, 2014, ISBN 978-3-942147-18-7
- [43] Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen vom 18. April 2017 (BGBl. I S. 905)
- [44] T. Grigoratos and G. Martini, Non-exhaust traffic related emissions. Brake and tyre wear PM, European Commission, – Joint Research Centre – Institute for Energy and Transport, EUR 26648 EN – Scientific and Technical Research series – ISSN 1831-9424 (online), ISSN 1018-5593 (print), ISBN 978-92-79-38302-1 (PDF), ISBN 978-92-79-38303-8 (print)
- [45] Councell et al., Tire-Wear Particles as a Source of brake dust particles, Environmental Science and Technology, 2004, Vol. 38, p. 4206-4214
- [46] K. Augsburg et al., Measuring and characterization of brake dust particles, Proc. EuroBrake 2017, ISBN 978-0-9572076-8-4, paper EB2017-VDT-040
- [47] N. N., Renault SAS, Zukunftssichere Entwicklung–“ELLYPSE”–Radikal konstruiert, Das Magazin für Forschung und Entwicklung, No. 26, Oktober 2002, Renault S. A., F-92100 Boulogne-Billancourt, Frankreich, <http://www.planeterenault.com/1-gamme/9-concept-cars/215-ellypse-2002/> (besucht am 11.06.2019)
- [48] PORSCHE News – Christophorus – 5/2017 – Hart wie Diamant
- [49] VTI rapport 917A „Particles in road and railroad tunnel air; Sources, properties and abatement measures“, published 2016, Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), www.vti.se
- [50] M. L. Grilli, T. Bellezze, E. Gamsjäger, A. Rinaldi, P. Novak, S. Balos, R. R. Piticescu and M. L. Ruello Solutions for Critical Raw Materials under Extreme, Conditions: A Review, Materials 2017, 10, 285; <https://doi.org/10.3390/ma10030285>
- [51] M. Woydt, S. Huang, E. Cannizza, J. Vleugels and H. Mohrbacher, Niobium carbide for machining and wear protection – Evolution of properties, Metal Powder Report, 2019, Vol. 74, No. 2, p. 82-89
- [52] R. W. Schmitt: „Studie zur Ermittlung der tribologischen Aktivitäten an deutschen Hochschulen“, Gesellschaft für Tribologie e.V., Aachen, 2014, www.gft-ev.de
- [53] K. Kirschke, H. Czichos, K.-H. Habig und P. Studt, Tribologie – Forschungsbericht zum Schwerpunktprogramm Reibung, Verschleiß, Schmierung; 1971, Franz Steiner Verlag GmbH, Wiesbaden

