

Ergebnispapier zum Forschungsfeld Tribologie

Im Rahmen des Begleitforschungsprojekts EE4InG



Verfasser des Berichts:

ETA-Solutions GmbH
Alexander Uhl



Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhalt

1.	Vorwort.....	4
2.	Bedeutung der Tribologie.....	5
2.1.	Reduzierung der CO ₂ -Emissionen durch tribologische Maßnahmen	5
2.2.	Maßgebende Projekte der vergangenen 12 Jahre.....	6
2.3.	Patentanalyse im Bereich Tribologie mit Fokus auf Industrie	6
2.4.	Publikationsanalyse im Bereich Tribologie mit Fokus auf Industrie	7
3.	Expert:innen-Gespräche	9
3.1.	Entwicklung der Tribologie	9
3.2.	Projekte.....	9
3.3.	Lehre	10
3.4.	Netzwerke und Projektpartner	10
3.5.	Automobilindustrie und Elektromobilität.....	11
3.6.	Wasserstoff.....	13
3.7.	Kältetechnik	15
3.8.	Pneumatik	15
3.9.	Hydraulik.....	15
3.10.	Lebensmittelindustrie	16
3.11.	Produktionsindustrie.....	16
3.12.	Energieindustrie.....	17
3.13.	Medizinindustrie	17
3.14.	Bergbau, Baumaschinen und Werkzeughersteller	17
3.15.	Tribotronik	18
3.16.	Klimaneutrale Fabriken und Simulation des Fertigungsprozesses	19
3.17.	Wasserbasierte Schmiermittel.....	20
3.18.	Wechselwirkung zwischen Oberfläche und Schmierstoff.....	20
3.19.	Tribokonditionierung von Werkstoffen	21
3.20.	Verschleißverbesserte Materialien für Pumpenanwendungen.....	22
3.21.	Mechatronische Kontakte – Steckverbindungen.....	23
3.22.	Keramik als Gradientenwerkstoff	23
3.23.	Trockenschmierung dotierte Kunststoffe	24
3.24.	Supraschmiereffekt im Gleitlager	24
3.25.	Reibungsreduzierung von Zahnrädern mithilfe von wasserhaltigen Fluiden	24
3.26.	Beschichtung von Zahnrädern	25
3.27.	Baukastensystem	25
3.28.	Recycling	25
3.29.	CO ₂ -Emissionen bei der Herstellung von Beschichtungen und Schmierstoffen.....	26
3.30.	Generelle Umsetzungsschwierigkeiten.....	26
3.31.	Mögliche Studien und Leitfäden	27
3.32.	Zusammenfassung der Einzelgespräche	27
3.33.	Unterstützende Themenauswahl für das Fachgespräch	29

4.	Fachgespräch	30
4.1.	BMW-Projekte.....	30
4.2.	Zunehmende Bedeutung der Ressourceneffizienz	32
4.3.	Tribologie aus Sicht der Schmierstoffindustrie	34
4.4.	Hemmnisse bei Übertragung und Entwicklung von effizienteren Technologien	35
4.5.	Forschungsbedarfe und Handlungsansätze für zukünftige Schwerpunkte	35
5.	Zusammenfassung.....	37
6.	Literaturverzeichnis	39

1. Vorwort

Im Rahmen des Projekts „EE4InG“ (Energieeffizienz für Industrie und Gewerbe) wird zur Bewertung von Technologien, welche ein großes Potenzial aufweisen den Energiebedarf sowie Treibhausgasausstoß zu verringern, die am Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung entwickelte EDUAR&D-Methode (EnergieDaten Und -Analyse R&D, siehe Abbildung 1) verwendet. Dieser strukturierte Such- und Analyseprozess verbindet verschiedene Ansätze zur Darstellung, Analyse und Bewertung einzelner Technologien miteinander, wobei abhängig von den vorhandenen Informationen nicht in jeder EDUAR&D-Analyse der komplette Umfang genutzt werden kann. Das Ziel einer jeden EDUAR&D-Analyse sind Handlungsempfehlungen für thematische Schwerpunktsetzungen sowie die Intensivierung bestehender Förderungen für die zukünftige Energieforschung in Deutschland zu entwickeln.

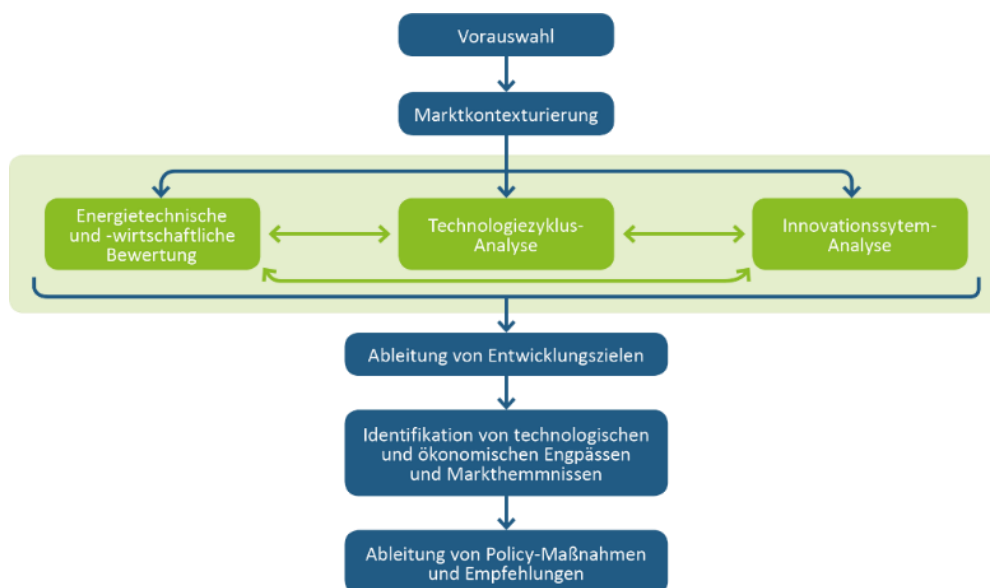


Abbildung 1: Vorgehen in der EDUAR&D-Analyse

Da es sich bei der Tribologie um eine Querschnittstechnologie handelt, die in allen Bereichen mit bewegten Bauteilen Relevanz besitzt und branchenübergreifend stattfindet, ist eine Vorauswahl oder Fokussierung auf einige wenige Technologie nicht zielführend. Aus diesem Grund wird nicht in den ersten drei Schritten der EDUAR&D-Analyse (*Vorauswahl*, *Marktkontexturierung* sowie *dreigliedrige Analyse*) unterschieden, sondern vielmehr aktuelle sowie zukünftige Fragestellungen der Tribologie durch Literaturrecherche (siehe Kapitel 2) und einzelne Gespräche mit Expertinnen- und Experten aus Forschung, Industrie und Verbänden (siehe Kapitel 3) erfasst. Mit Hilfe des breiten Meinungsbildes ist es möglich, Branchen und Technologien zu identifizieren, die bereits hohe energetische Effizienz, hochentwickelte tribologische Systeme oder potenzielle Forschungsthemen aufweisen. Im Konkreten beinhaltet die *energietechnische und -wirtschaftliche Bewertung* zum einen den Einfluss der einzelnen Technologien und Branchen auf den Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen (THG), zum anderen das Kosten-Nutzen-Verhältnis sowie schlussendlich die Einschätzung zur Übertragung bereits eingesetzter energieeffizienterer Technologien in andere Branchen. Die *Technologiezyklus-Analyse* dient dazu die technologische und ökonomische Marktnähe der Technologie abzubilden. Die *Innovationssystem-Analyse* beschäftigt sich mit Komponenten, welche Akteure, Technologien sowie

regulatorische Rahmen inklusive Förderpolitik beinhalten und Relationen, welche die formellen und informellen Beziehungen zwischen diesen Komponenten beschreiben. Die EDUAR&D-Analyse schließt mit der *Ableitung möglicher Entwicklungsziele* sowie der *Identifikation technologischer und ökonomischer Engpässe und Markthemmnisse* aus den vorherigen Analyseschritten. Hieraus können *Handlungsempfehlungen* abgeleitet werden. Diese drei Schritte werden mit Hilfe eines großen Fachgesprächs (siehe Kapitel 4) und weiteren einzelnen Anschlussgesprächen eingehend erarbeitet.

2. Bedeutung der Tribologie

2.1. Reduzierung der CO₂-Emissionen durch tribologische Maßnahmen

Hans Peter Jost [1] war der erste, der durch seine öffentlichen Studien die Bedeutung der Reibung und des Verschleißes für eine Volkswirtschaft ausgedrückte. 1966 veröffentlichte er in Großbritannien seinen Education and Research Report, in welchem er von einem Einsparpotenzial von 5 % des damaligen britischen Energieverbrauchs ausging. 1977 folgte die Strategy for Energy Conservation through Tribology [2] mit Annahmen für die US-Wirtschaft, die das prozentuale Einsparpotenzial zum US-Energieverbrauch mit 10,9 % bewertete. Für die Bundesrepublik Deutschland gab das Bundesministerium für Forschung und Technologie [3] die Verluste durch Reibung und Verschleiß nachträglich für das Jahr 1975 an, jedoch mit 1% prozentual zum Bruttoinlandsprodukt an (Kanada 1984 1,3 % des eigenen BIPs).

Im Gegensatz zu früheren Erhebungen ist ein Ausdruck von Einsparpotenzialen durch tribologische Maßnahmen in Form von CO₂ für gegenwärtige Fragestellungen deutlich transparenter. Mit Hilfe der zwei Studien von Holmberg et al. [4] bzw. Holmberg und Erdemir [5] aus den Jahren 2012 bzw. 2017 ergeben sich durch Reibung bzw. tribologische Kontakte Energieverluste von ca. 23 % der globalen Primärenergie. Mit dem von Holmberg und Erdemir geschätzten langfristigen Einsparpotenzial von ca. 40 % ergibt sich eine Verringerung des Primärenergieverbrauchs um ca. 8,6 %. In der Expertenstudie der Gesellschaft für Tribologie e.V. (GfT) aus dem Jahr 2019 [6] wurde aus dem postulierten Einsparungspotenzial eine Beziehung zu CO₂ aufgestellt, welches für Deutschland von 208 Mt CO₂ bedeuten würde.

In diesem Jahr [7] folgte eine weitere Expertenstudie der GfT mit der Ausrichtung auf Verschleiß und Rohstoffeffizienz. Hier wurden anhand der Werte der Vereinten Nationen aus 2017 und 2019 sowie des OECD aus 2019 bzgl. des globalen Materialfußabdrucks Korrelationen zu Ressourcen gemacht, deren Effizienz durch tribologische Maßnahmen erhöht werden können. Durch u.a. Lebensverlängerung, höhere Verschleißbeständigkeit sowie Recycling reduziert sich wiederum der globale Materialfußabdruck (zumindest pro Person), was sich entsprechend durch CO₂ ausdrücken lässt. Die Berechnung ist im Vergleich zur ersten Studie aufgrund nicht quantifizierbarer Beiträge unpräzise, weshalb die Werte eher als Abschätzung dienen. Global betrachtet könnten tribologische Maßnahmen durch Ressourceneffizienz verglichen mit dem langfristigen Reibungsminderungspotenzial zusätzlich das ein- bis zweifach an CO₂ einsparen. Auch wenn das Potenzial der Tribologie noch nicht in konkreten Zahlen ausgedrückt werden kann, zeigt die Größenordnung was durch tribologische Verbesserungen zukünftig noch machbar ist.

2.2. Maßgebende Projekte der vergangenen 12 Jahre

Seitens des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) wurden seit 2009 vermehrt Projekte mit Fokus auf tribologische Fragestellungen initiiert. Die Projekte **PEGASUS I und II** behandelten die Entwicklung gleitfähiger und verschleißfester Beschichtungen sowie leistungsfähiger Schmierstoffe für Motorenbauteile und liefen insgesamt über einen Zeitraum von sieben Jahren. 2012 und 2018 wurde der Fokus auf die Entwicklung reibungsarmer, korrosions- und verschleißfester Oberflächen im Kontext von Off-Shore-Windenergieanlagen in den Projekten **POSEIDON I und II** gelegt, welche jeweils auf drei Jahre ausgelegt wurden. Von 2015 bis 2019 beschäftigte sich das Projekt **CHEOPS³** mit der Entwicklung von Oberflächen und Schmierstoffen für Trocken- und Minimalmengenschmieranwendungen. Ein Einsatz wurde in Ketten für Landmaschinen oder Gleitlager in Fluidpumpen gesehen. Vor zwei Jahren startete mit **PROMETHEUS** die Effizienzoptimierung von Verbrennungsmotoren für den Verkehr und zur Energieerzeugung (Gasmotor). Hier stand reibungsarme Beschichtungen für Gleitkomponenten und niedrigviskose Motoröle im Fokus. Bereits im ersten Jahr konnte durch die Kombination von Schmierstoff mit abgestimmten Additiven und neuen Oberflächenwerkstoffen samt Strukturierung die Reibung deutlich reduziert werden. Seit zwei Jahren befassen sich die Projektpartner im Dreijährigem **EWARP** mit der Steigerung der Energieeffizienz von wassergeschmierten Reibpaarungen in Pumpen.

Die gewonnenen Erkenntnisse aus den Projekten **PEGASUS** und **POSEIDON** werden seitens der teilnehmenden Schmierstoff- und Schichthersteller bereits in der Serienfertigung eingesetzt und reduzieren die CO₂-Emissionen im Betrieb bereits bis zu 2 %. Eingesetzt im Flugzeugbau kann sogar bis zu 16 % Treibstoff eingespart werden. [8]

2.3. Patentanalyse im Bereich Tribologie mit Fokus auf Industrie

Als probates Mittel hat sich die Analyse transnationaler Patentanmeldungen erwiesen, bei denen Anmeldungen am Europäischen Patentamt oder aber bei der internationalen Patentorganisation WIPO (ohne Doppelzählungen) betrachtet werden. Es handelt sich dabei um Patentanmeldungen, die jeweils in mehreren Ländern angemeldet werden. Dort sind die Anmeldekosten hoch und es wird durch die internationale Anmeldestrategie ein besonders vielversprechender Ertrag erwartet. Es geht damit um besonders wertvolle Patente und in der Statistik sind Länder miteinander vergleichbar.

Für die Analyse zur Tribologie wurden verschiedene Stichwortkombinationen zusammengestellt und Anmeldungen im Bereich Medizintechnik ausgeschlossen, um die Suche auf den industriellen Bereich zu fokussieren (Tabelle 1). Beschichtungen wurden nicht explizit gesucht, da sie sich auch auf Festigkeit bei Werkzeugen, Korrosionsbeständigkeit oder Hitzebeständigkeit richten. Durch die Stichworte *friction* und *wear resistance* sind Patente zu Beschichtungen im Kontext Tribologie eingeschlossen.

Tabelle 1 : Suchstrategie zur Tribologie

L1	5689863 S (EP OR WO)/PC
L2	4696 S L1 AND WEAR RESISTANCE AND (INCREASE OR OPTIMIZE OR IMPROVE?)
L3	38552 S L1 AND WEAR AND (MINIMIZE OR DIMINISH OR LOWER OR DECREASE OR REDUC?)
L4	3838 S L1 AND LUBRICATION AND (OPTIMIZE OR IMPROVE? OR ADJUST?)
L5	73 S L1 AND TRIBOLOGY
L6	23401 S L1 AND FRICTION AND (MINIMIZE OR OPTIMIZE OR REDUCE OR DIMINISH OR IMPROVE? OR EFFICIENCY)
L7	57175 S L2-L6 NOT A61?/IPC

Bei der Beschränkung auf Transnationale Patente (Befehl (EP or WO)/PC) ergibt sich für die Tribologie eine sehr hohe Treffermenge von 57.175 Eintragungen. Hier wird ein Länderranking gemäß Tabelle 2 ermittelt. Deutschland liegt dabei auf dem zweiten Rang. Bemerkenswert ist die starke Position von China und Südkorea, die bisher eher auf Informationstechnik spezialisiert waren.

Tabelle 2: Ranking der Länder mit Patenten zur Tribologie bei Transnationalen Patenten, 2019

USA	749	China	350	Frankreich	134
Deutschland	506	Südkorea	192	Italien	124
Japan	353	Großbritannien	146	Schweden	104

Die Betrachtung des Zeitverlaufs seit 2000 zeigt einen deutlichen Anstieg bis 2012 und anschließend eine Stagnation auf sehr hohem Niveau (Abbildung 2). Aufgrund der gesetzlichen Vorschriften zu Veröffentlichungen von Patentanmeldungen lassen sich aktuell Analysen bis 2019 durchführen.

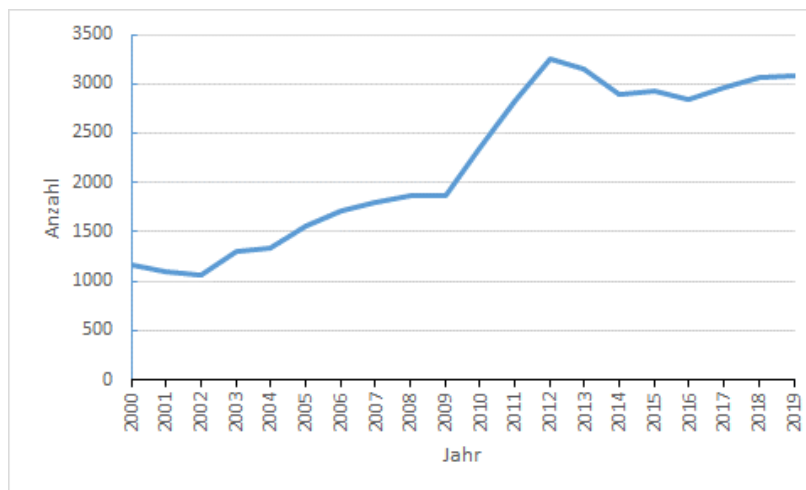


Abbildung 2: Transnationale Patentanmeldungen zur Tribologie weltweit (Quelle: WPI)

Für den Zeitraum bis 2019 lassen sich deutsche Patentanmelder entsprechend Tabelle 3 ermitteln. Auffällig ist die hohe Zahl von an Patentanmeldern mit jeweils nur mäßigen Patentanmeldezahlen.

Tabelle 3: Größte deutsche Patentanmelder von Transnationalen Patenten zur Tribologie, 2019

BOSCH GMBH ROBERT	34	THYSSENKRUPP IND SOLUTIONS AG	7
SCHAEFFLER TECHNOLOGIES AG & CO KG	33	KNORR-BREMSE SYSTEME NUTZFAHRZEUGE GMBH	6
ZF FRIEDRICHSHAFEN AG	13	BAYERISCHE MOTOREN WERKE AG	5
THYSSEN KRUPP AG	10	CONTINENTAL TEVES & CO OHG AG	5
DEERE & CO	8	VOITH PAPER PATENT GMBH	5

2.4. Publikationsanalyse im Bereich Tribologie mit Fokus auf Industrie

Die Recherche wurde mit der Datenbank Web of Science durchgeführt und anhand der Stichworte entsprechend Tabelle 4 vorgenommen.

Tabelle 4: Suchstrategie zur Definition der Tribologie im Web of Science (WoS)

TS=("wear resistance" and (increase or optimize or improve)) or*

TS=(wear and (minimize or diminish or lower or decrease or reduc)) or*

TS=(lubrication and (optimize or improve or adjust*)) or*

TS=tribology or

TS=(friction and (minimize or optimize or reduce or diminish or improve or efficiency)) not WC=biomedical)*

Wie schon bei den Patenten ist ein starker Anstieg zu verzeichnen (siehe Abbildung 3). Die absoluten Zahlen sind markant.

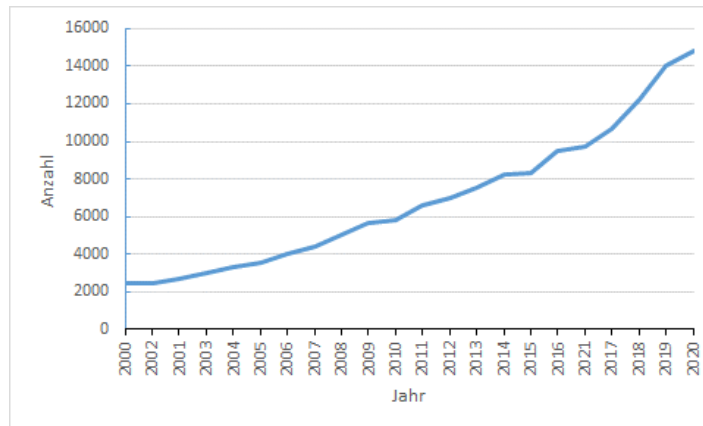


Abbildung 3: Publikationen zur Tribologie (Quelle: WoS)

Bei Betrachtung der Länderbeteiligung ergibt sich eine Rangfolge nach Tabelle 5. Gegenüber der Patentanalyse zeigt sich eine veränderte Reihenfolge. Insbesondere die Position von China hat sich deutlich nach oben entwickelt, Deutschland liegt hingegen auf Rang 5.

Tabelle 5: Rangfolge der Länder bei Publikationen zur Tribologie, 2020 (Quelle: WoS)

PEOPLES R CHINA	5251	FRANCE	413
USA	2045	SOUTH KOREA	390
INDIA	1777	SPAIN	355
ENGLAND	821	POLAND	299
GERMANY	746	SAUDI ARABIA	248
IRAN	519	TAIWAN	238
AUSTRALIA	493	MALAYSIA	221
JAPAN	473	SWEDEN	218
CANADA	429	NETHERLANDS	212
RUSSIA	424	PAKISTAN	201
ITALY	421	SWITZERLAND	179
TURKEY	416	EGYPT	163

Eine Liste der aktivsten deutschen Einrichtungen mit Blick auf Publikationen findet sich in Tabelle 6.

Tabelle 6: Größte deutsche Einrichtungen mit Publikationen zur Tribologie, 2020 (Quelle: WoS)

HELMHOLTZ ASSOCIATION	93	CHARITE MEDICAL UNIVERSITY OF BERLIN	17
RWTH AACHEN UNIVERSITY	45	RUPRECHT KARLS UNIVERSITY HEIDELBERG	17
MAX PLANCK SOCIETY	43	UNIVERSITY OF STUTTGART	17
FRAUNHOFER GESELLSCHAFT	42	UNIVERSITY OF HANNOVER	16
TECHNICAL UNIVERSITY OF MUNICH	38	TECHNICAL UNIVERSITY OF BERLIN	15
KARLSRUHE INSTITUTE OF TECHNOLOGY	36	UNIVERSITY OF HAMBURG	13
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN	27	UNIVERSITY OF KAISERSLAUTERN	13
DORTMUND UNIVERSITY OF TECHNOLOGY	23	EBERHARD KARLS UNIVERSITY OF TUBINGEN	12
FREE UNIVERSITY OF BERLIN	23	JOHANNES GUTENBERG UNIVERSITY OF MAINZ	11
RUHR UNIVERSITY BOCHUM	22	LEIPZIG UNIVERSITY	11
UNIVERSITY OF MUNICH	21	OTTO VON GUERICKE UNIVERSITY	11
HELMHOLTZ ZENTRUM GEESTHACHT	20	TECHNISCHE UNIVERSITÄT CHEMNITZ	11
UNIVERSITY OF KIEL	20	UNIVERSITY OF BREMEN	11
TECHNICAL UNIVERSITY OF DARMSTADT	19	UNIVERSITY OF DUISBURG ESSEN	11
UNIVERSITY OF ERLANGEN NUREMBERG	19	UNIVERSITY OF ROSTOCK	11
UNIVERSITY OF FREIBURG	19	GOETHE UNIVERSITY FRANKFURT	10
HUMBOLDT UNIVERSITY OF BERLIN	18		

3. Expert:innen-Gespräche

Aufbauend auf den Studien der Gesellschaft für Tribologie (GfT) wurden unterschiedlichste Expert:innen aus der Forschung, der Industrie und Verbänden zu ihren persönlichen Einschätzungen bzgl. möglicher Effizienzpotenzialen im Bereich der Tribologie mit Fokus auf die Industrie und das Gewerbe befragt. Aus den einzelnen Expertengesprächen ergibt sich folgendes Bild:

3.1. Entwicklung der Tribologie

Im Bereich der Tribologie wird es laut Expert:in-Meinung aus der Schmierstoffindustrie auch in den nächsten Jahren und Jahrzehnten sehr viel zu tun geben. Als Maschinen aufgrund von Versagen durch Verschleiß in den 60er Jahren ausgefallen sind, lag das meistens an der fehlenden Kenntnis, wie man Maschinen konstruieren und schmieren sollte, damit sie möglichst lange fehlerfrei laufen – der Umgang erfolgte nur rudimentär. Mit der Tribologie wurden anschließend mehrere Disziplinen miteinander vereinigt. Sein Wert wurde am Produktionsausfall bzw. volkswirtschaftlichen Schaden festgemacht. Später kam aufgrund der Energiekrise in den 70er Jahren auch die Reibung in den Fokus. Nun steht mit der Klimakrise die Energieeffizienz sowie nachhaltige Ressourcennutzung im Vordergrund, weshalb die zukünftige Währung CO₂ sein wird. Mit der in diesem Jahr veröffentlichten Studie der GfT erhält zusätzlich das Thema Verschleiß wieder mehr Bedeutung.

Aus der Industrie werden zwei Stoßrichtungen in der Tribologie gesehen. Zum einen reduziert eine geringere Reibung die CO₂-Emissionen direkt, zum anderen kann eine erhöhte Lebensdauer sowie erhöhte Verschleißbeständigkeit von Materialien und Bauteilen den Ressourcenbedarf und -verbrauch mindern und somit indirekt zu weniger CO₂-Emissionen führen. Derzeit liegt der Fokus lediglich auf den „direkten“ CO₂-Footprints, jedoch wird die Relevanz eines nachhaltigeren Umgangs mit Ressourcen zukünftig weiter zunehmen. Die Verfügbarkeit der Materialien, der benötigten Energie bei der Herstellung und steigende Preise werden hier einen großen Einfluss auf die Produktentwicklung haben. Im Automotivbereich sind bereits viele Bauteile auf eine hohe Lebensdauer ausgelegt, weshalb z.B. Lager in der Regel die Gesamtlebensdauer eines Autos überstehen. Im Bereich der Power tools und der weißen Ware geht die Expert:in-Meinung von einer deutlichen Steigerung bzgl. Qualität und Lebensdauer in den nächsten Jahren aus. Durch den öffentlichen Druck nachhaltiger werden zu müssen, können auch neue Geschäftsmodellen entstehen, wie sie zum Teil schon in Form von Abo-Modellen existieren: es wird z.B. nicht mehr das Auto gekauft, sondern die Mobilität. (siehe auch 3.28).

Laut Expert:in-Meinung aus der Forschung kann das tribologische Gesamteffizienzpotenzial (siehe Studie der GfT, 2021) nicht in konkreten Zahlen ausgedrückt werden. Der Beitrag durch Reibungsminimierung lässt sich im Vergleich zum Einsparpotenzial aus Verschleißschutz und nachhaltiger Ressourcennutzung genauer abschätzen. Ein besserer Verschleißschutz inklusive möglicher Ressourceneffizienz könnte rund das Doppelte des Reibungsminimierungspotenzials ausmachen.

3.2. Projekte

Mit der Förderung mehrerer Projekte durch die Bundesrepublik gewann die Tribologie in den 70er und 80er Jahren in Deutschland über einen längeren Zeitraum große Bedeutung, verlor diese aber zum Zeitpunkt der Wiedervereinigung weitestgehend wieder. Erst 2008 (nach 18 Jahre Pause) erkannte die

Politik wieder die Notwendigkeit mit Projekten durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie wie POSEIDON I+II, PROMETHEUS; CHEOPS³ tribologische Fragestellungen zu unterstützen.

Im nun bald startenden Projekt CHEPHREN stehen laut Expert:innen-Aussage eines aus der Forschung die Entwicklung für vollgeschmierte Anwendungen wie z.B. Landmaschinen (mit Kette), Motorenbau mit Getriebe, Industrieketten bis hin zur Rolltreppe im Vordergrund. Hierfür konnten bereits durch CHEOPS³ Grundlagen (Trocken und Minimalmengenschmierung) geschaffen werden. Durch das erfolgreiche Vorgängerprojekt ist es nun z.B. möglich Ketten ohne Nachschmierung zu betreiben. Durch weitere Vorarbeiten konnten auch Grundlagen bzgl. der Supraschmierung gelegt werden. Selbst im Grenzreibungsbereich bei entsprechender Schmierstoff-Beschichtungspaarung waren fast keine Reibungen mehr messbar. Mit CHEPHREN soll die Supraschmierung nun in reale Anwendungen des Maschinenbaus eingebracht werden und auch die Wechselwirkungen aus Beschichtung und Additiven näher betrachtet werden.

3.3. Lehre

Ein:e Expert:in aus der Industrie bemängelt, dass Tribologie kaum an den Bildungsinstituten vermittelt wird. So wird sie bundesweit nur selten in technischen Studienfächern behandelt und dabei meist nur durch andere Institute in Form einer externen Wahlpflichtvorlesung angeboten. Hier gilt es in Zukunft zumindest die Grundlagen in Fächern mit tribologischen Fragestellungen (z.B. in den Bereichen Maschinenbau, Fahrzeug- und Energietechnik, Luftfahrt sowie Schienen- und Schiffverkehr) zu vermitteln.

Ein:e Expert:in aus der Forschung und Lehre hingegen empfindet das Angebot der Tribologie in der Lehre generell als ausreichend und aufgrund der Interdisziplinarität der Thematik auch keinen Sinn in einem eigenen Studiengang Tribologie. Vielmehr sollte sie Bestandteil in den relevanten technischen Studiengängen sein. Den Studierenden soll rechtzeitig die Bandbreite und Relevanz vermittelt werden, damit diese die gewünschte Vertiefung entsprechend ihrer Interessen frühzeitig wählen können.

Jedoch ist es laut einer anderen Expert:in-Meinung aus der Forschung nicht möglich alle Disziplinen gleichermaßen abzudecken, weshalb hier immer abhängig vom Hintergrund der Lehrenden Schwerpunkte gesetzt werden. In der Praxis arbeiten Tribologen nicht allein, sondern bauen vermehrt auf Zusammenarbeit mit verschiedenen Fachrichtungen.

3.4. Netzwerke und Projektpartner

Viele Expert:innen bemängeln, dass sich die Vernetzung im Bereich der Tribologie meist auf konstante 8 – 10 Akteure beschränkt, welche gleichzeitig in den Verbänden vertreten sind. Eine dynamische und übergreifende Netzwerkstruktur wird dadurch nicht gefördert.

Es existieren bundesweit z.B. die Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., die Gesellschaft für Tribologie e.V., der Verband der Schmierstoffindustrie, die Uniti – Bundesverband mittelständischer Mineralölunternehmen e.V., das Forschungsfeld Tribologie (Forschungsnetzwerk Energie) sowie kleinere Konglomerate wie VDI, DGM und Netzwerke einzelner Institute. Durch EU-Vorhaben entwickeln sich auch europaweite Netzwerke.

Die Industrie sieht für die deutsche Volkswirtschaft den Erfolg zum Teil weniger in der Masse, sondern vorwiegend im Können der Entwickler:innen und in der Qualität der Produkte. Hier sind vor allem bei

der Entwicklung im Sinne der Interdisziplinarität verschiedene Ansichtspunkte und Sichtweisen und somit eine größtmögliche Quervernetzung unabdingbar. Durch persönliche Kontakte können zum Teil unbürokratisch bzw. mit niedrigen Hürden weniger konventionelle Ideen getestet und auf Machbarkeit überprüft werden. Die Vernetzung ist jedoch noch nicht abschließend aufgebaut und birgt große Potenziale.

Deutschland hat laut Vertretung der Schmiermittelindustrie eine einzigartige Stärke durch vorwettbewerbliche Gemeinschaftsforschung, welche durch die Forschungsverbände organisiert wird. So hat laut Aussage Verband die FVA z.B. ca. 250 Mitgliedsfirmen aus fast allen Branchen (Getriebe- und Lagerhersteller, Maschinenbau, Windanlagenhersteller, Filterhersteller, Schmierstoff- und Additivhersteller, etc.) - im größten Arbeitskreis *Schmierstoffe und Tribologie* ca. 80 Mitgliedsfirmen. Früher gehörten die deutschen Automobilhersteller dazu, die den Verband aber im Zuge publik gewordener Absprachen (z.B. jüngst Kartellstrafe am 08.07.2021) in der Vergangenheit verließen. Für gemeinsame Forschungstätigkeiten wurden diese Austritte von den befragten Expert:innen als große Verluste bezeichnet (auch die Abkehr von des letzten Automobilherstellers von PROMETHEUS). Zusammen werden branchenrelevante Themen bearbeitet, welche ein einzelnes Unternehmen allein nicht durchführen könnte. Die Ergebnisse stehen anschließend jedem Mitglied zur Verfügung. Da sich die Forschung vorwiegend auf Grundlagen konzentriert, kann somit eine ganze Branche angehoben werden ohne dabei den Wettbewerb untereinander zu schädigen. Finanziert werden diese Projekte durch eigene Mittel bzw. durch öffentliche Förderungen, wie z.B. die AIF (Die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen). Projekte wie das nun bald startende CHEPHREN, welches vom BMWi gefördert wird, hat hingegen den Vorteil ein Thema sehr intensiv zu behandeln. Der Teilnehmendenkreis besteht aus nicht im Wettbewerb stehenden Unternehmen und Institute, was allen Projektpartnern ermöglicht mit allen ihren Produkten sowie derzeitigen Entwicklungen (unter Berücksichtigung der Geheimhaltung gegenüber Dritter) gemeinsam High-Tech-Forschung bis ins letzte Detail zu betreiben. Auch ermöglichen solche Projekte Instituten die Teilnahme, welche sonst als zu weit von der Praxis entfernt betrachtet werden. Das wird expert:innenseitig aus der Schmierstoffindustrie für die Tribologie am Beispiel der Molekulardynamik nochmal als besonders wichtig und positiv hervorgehoben.

3.5. Automobilindustrie und Elektromobilität

Hinsichtlich konventioneller Antriebssysteme ist das Meiste laut Expert:innen-Meinung aus der Schmierstoffindustrie wohl bekannt, wohingegen in den Bereichen von Kältemaschine bis hin zu Stoßdämpfern viel Entwicklungspotenzial liegt. Bei bisherigen Projekten wie PROMETHEUS lag der Fokus auf dem Verbrenner, die E-Mobilität war hingegen kaum Bestandteil – bestimmte Technologien sind hier noch nicht endgültig festgelegt. Gerade aus deutscher Perspektive sollten bessere Systeme angestrebt werden, um Trendsetter in der E-Mobilität zu werden. Durch entsprechende Maßnahmen ließe sich der spezifische Verbrauch noch deutlich verringern und somit die Effizienz steigern bzw. der CO₂-Ausstoß reduzieren. Es gilt „unsere“ Hochtechnologie umzusetzen, da die E-Mobilität zukünftig mindestens einen großen Teil der weltweiten Mobilität ausmachen wird. Während beim Verbrenner ein Tankvorgang schnell abgeschlossen ist, gibt es für Elektrofahrzeuge bisher keine vergleichbaren Lösungen. Gerade die Punkte Reichweite, Batteriekapazität sowie Gewicht stehen derweil im Vordergrund.

Jede Systemkomponente in einem elektrisch betriebenen Fahrzeug muss aus Expert:innen-Sicht der Beschichtungstechnik deshalb so effizient wie möglich sein, da jeder Stromverbraucher die Reichweite reduziert. Derzeit befinden sich die Hersteller noch im Transformationsbereich, weshalb in vielen E-Autos noch alte Systeme eingesetzt werden. Auch bzgl. des Thermalmanagements (Aufwärmung und Kühlung der Batterie, Klimatechnik allgemein) wird auf bestehende Lösungen zurückgegriffen - sie werden kombiniert, jedoch nicht optimal ausgelegt. Hier wird noch sehr viel Potenzial in Hinblick auf Energieeffizienz gesehen.

Bezüglich der Reibungsreduzierung und somit Reichweitenerhöhung wurde aus Sicht der Forschung auf eine intensive Untersuchung jeder einzelnen Komponente hingewiesen. Explizit wurden hier Gelenke und Lager, generell der gesamte Antriebsstrang, die Achsen und Elektromotoren direkt an den Rädern genannt.

Expert:innen aus Schmierstoff- und Beschichtungsindustrie sehen die Bereitschaft zum Einbau von z.B. größeren und zunächst teureren CO₂-Kompressoren trotz größeren Aufwands zunehmen (siehe auch Kältetechnik). Durch die effizientere Arbeitsweise der CO₂-Anlage wird weniger Strom benötigt, wodurch die Reichweite erhöht wird. Diese kommerzielle Überlegung lassen zum Teil bestehende aber noch nicht genutzte Technologien wieder in besserem Licht erscheinen.

Die Schmierstoffindustrie beobachtet den Lithiumpreis mit Sorge. Gerade Deutschland hat bisher keine Vorsorge getroffen bis 2030 seinen Lithium-Bedarf (Abbau an mehreren Orten, aufbereitet meist in China) abzusichern. Eine Aufbereitung in Deutschland und somit Unabhängigkeit wäre erstrebenswert. Bis 2025 wird sich zudem abzeichnen, ob sich neben der Elektromobilität noch andere Technologie etablieren können. Es ist wichtig sich im Bereich der Mobilität weiterzuentwickeln, da die bisherige technische Basis mit dem Verbrenner-Aus verschwinden wird.

Die Forschung erwartet eine Sättigung des E-Mobilitäts-Wachstums durch Ladeprobleme in Städten. Somit würde der Verbrenner noch deutlich länger existieren, weshalb weiterer Forschungsbedarf für sauberere Technik besteht. Das könne über Wasserstoff, Erdgas (als Zwischenstufe) oder durch andere Treibstoffe (z.B. synthetische E-Fuels) bzw. über weiter optimierte Hybrid-Verbrenner geschehen. Auch austauschbare Akkus für E-Fahrzeuge wären vorstellbar.

In diesem Zusammenhang betont eine weitere Expert:innenmeinung aus der Forschung die Wichtigkeit eines breiten Portfolios aus E-Fuels, E-Strom und Wasserstoff für die Zukunft. Die E-Mobilität ist für Stadt und urbanen Bereich sinnvoll, jedoch für den Schwerlast-, Schiffs- und Luftverkehr nicht einsetzbar. Auch wird eine zukünftige Ladeinfrastruktur in Schwellenländern als utopisch angesehen. Positiv ist, dass mit der E-Fuels-Alliance bereits ein Zusammenschluss aus Schmierstoffherstellern, Automobilclubs, Automobilherstellern sowie wissenschaftlichen Instituten existiert, welcher sich mit nachhaltigen Kraftstoffen beschäftigt. Die Herstellung von Wasserstoff könnte mit grüner Technologie vorwiegend durch Solarenergie in sonnenreichen Regionen entstehen. Bestrebungen in diese Richtung gibt es bereits in Saudi-Arabien.

Laut Industrie konnte die Automobilindustrie durch ihren Sonderstatus in Deutschland mit Hilfe von Forschungsprojekten bereits sehr viel CO₂ einsparen. Im Vergleich zu Motoren vor 20-30 Jahren sind heutige Motoren sehr viel effizienter. Leider wird der technologische Fortschritt nicht im Verbrauch widerspiegelt, was vor allem auf immer zahlreich werdende Sonderausstattungen zurückzuführen

ist. Die Fahrzeuge werden trotz Leichtbaus und effizienteren Motoren nicht im gleichen Maße verbrauchsärmer. Auch wird bemängelt, dass bei der Herstellung nicht in Betracht gezogen wird, ob z.B. ein Panoramafenster deutlich mehr CO₂ verbraucht als ein Stahldach.

Die Forschung fügt hinzu, dass die PKW-Industrie vor allem auch durch EU-Vorgaben und entsprechende Strafzahlungen bereits seit Jahren dazu motiviert wurde effizienter zu werden. Auch sieht er noch Potenzial im Verbrenner, sollte der Verbrauch auf 2-3 Liter reduziert werden können, was jedoch durch das derzeitige Paradigma („derzeitige Verkaufsschlager mit 2 Tonnen Gewicht bewegen ca. 70 kg schwere Personen“) unwahrscheinlich erscheint. Mit Hilfe von Leichtbau und einem reduzierten Gesamtgewicht von ca. 500 kg könnten Motoren diesen Verbrauch in der Stadt durchaus erreichen. Jedoch rechnen Expert:innen eher damit, dass der Verbrennungsmotor im PKW bis 2030 verschwinden und nur noch im Bus und LKW überleben wird.

Ferner werden in E-Fahrzeugen zukünftig weitaus weniger komplexe Getriebe verwendet, welche auch die hochdrehenden Drehmomente in den E-Motoren wieder runtersetzen können. Als Schmiermittel für benötigte Lager wird voraussichtlich vorwiegend Fett zum Einsatz kommen. Ein Forschungsbedarf liegt hier im Verständnis, wie diese gefetteten Lager leichter laufen können und wie hoch die Lebensdauer der Fette im Betrieb sein wird.

Aus Sicht der Schmierstoffindustrie entstehen durch die Möglichkeit im E-Fahrzeug die im Verbrenner noch voneinander getrennten Kühl- und Ölkreisläufe miteinander zu kombinieren, weitere Anforderungen an Schmierstoffe bzgl. der Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit. Hier sollen neue Projekte entstehen, welche sich auf wasserhaltige und -ähnliche Schmierstoffe bzgl. der Reaktion auf Metalle und Beschichtungen fokussieren werden.

Auch die Industrie sieht generell noch viel Potenzial im elektrischen Antrieb. Das betrifft vor allem Schmierstoffe zur Reibungsminderung und Steigerung der Energieeffizienz in der E-Mobilität und bei E-Bikes. Forschungsbedarf bzgl. Verbrenner werden weniger gesehen, obwohl der Verbrenner abhängig von der Region durchaus eine Rolle spielen könnte und die Batterieherstellung für E-Fahrzeuge trotz öffentlich positiver Einstellung zur E-Mobilität sehr umweltschädlich ist. Die Verbrennungstechnologie könnte ab dem Zeitpunkt, an dem in Schwellenländern keine ausgemusterten Verbrenner mehr aus Europa und Nordamerika verkauft werden können und es infrastrukturell für die Region eine E-Mobilität keinen Sinn ergibt, wieder Thema für die Automobilindustrie werden.

Die Beschichtungsindustrie sieht bereits ohne konkrete Beispiele zu nennen funktionierende Adaptionen von neuartigen Beschichtungstechniken aus der Automobilindustrie in anderen Industriezweigen. Da überall versucht wird die CO₂-Belastungen zu reduzieren, wird vor allem auf die Beschichtungstechniken zurückgegriffen, welche Systeme langlebiger und verschleißresistenter machen sowie die Reibung minimieren.

3.6. Wasserstoff

Aus Sicht der Beschichtungsindustrie besteht derzeit wenig Erfahrung bzgl. des Wasserstoffs zur Nutzung im Verbrennungsmotor, weshalb sich die Industrie an bestehenden Motoren orientiert. Hier wäre ein Projekt erstrebenswert, welches den Motor von Grund auf neu entwickelt. Weiteres Potenzial

zur Ressourcenschonung liegt in der Möglichkeit eventuell bestehende Produktionsstraßen nutzen zu können.

Der Maschinenbau sieht in der Entwicklung der Brennstoffzelle weniger die typischen tribologischen Fragestellungen. Bei der Wasserstoffverbrennung hingegen ergeben sich zwar durch die sich verändernden tribologischen Systeme neue Anforderungen an Materialien, Beschichtungen und Schmierstoffe, jedoch könnten diese benötigten Technologien sehr nah an der der aktuellen Verbrennern liegen.

Durch das PROMETHEUS-Projekt kam es laut Expert:innen-Einschätzung aus der Forschung zu einem Paradigmenwechsel, wodurch der H_2 -Verbrennungsmotor sowohl für den mobilen Antrieb wie auch für die Energietechnik interessant wurde. Aufgrund anderer Belastungen wie z.B. höherer Kräfte, Temperaturen sowie Druckverhältnisse bedarf es komplett neuer Beschichtungen und Schmierstoffe. Bestehende Lösungen für den Verbrenner sind auf den Anwendungsfall angepasst und entsprechend downgesizt, weshalb sie den neuartigen Herausforderungen nicht standhalten können.

Die Forschung hebt zudem im Bereich des Schmierstoffs den Bedarf an einer Neuspezifikation bzgl. der Wasserstoffverbrennung hervor. Durch den großen Zündbereich von 4-75 % kann der Schmierstoff bei Vorhandensein von Sauerstoff zur Zündquelle werden. Selbst bei Inertisierung kann nicht zu 100 % ausgeschlossen werden, dass eine kritische Luft-Wasserstoff-Schmierstoff-Konzentration vorliegt. Eine Adaption von Verbrennungsmotoren (PKW) wird weniger optimistisch gesehen, da in Deutschland alle Hersteller aus der Forschung ausgestiegen sind und sich komplett auf die E-Mobilität konzentrieren. Nur im Schwerlastbereich (LKW) wird derzeit auf Flüssigwasserstoff mit Reichweiten von bis zu 1000 km geforscht. Jedoch handelt es derzeit noch um ein „Vorzeigeprojekt“. Der Vorteil von flüssigem Wasserstoff liegt in den verhältnismäßig kleineren Tanks, welche sicherheitstechnisch weniger kritisch sind, da sie nicht unter hohem Gasdruck (ca. 700bar) stehen. Besonders bei Unfällen geht von gasförmigem Wasserstoff eine große Gefahr aus, wohingegen bei einer Leckage im Tank des flüssigen Wasserstoffs diese deutlich geringer ist. Hier käme es zu einer langsamen Verdampfung, welche bei Anwesenheit einer Zündquelle lediglich eine kleine Flamme hervorrufen würde. Da in solchen Systemen auf flüssige Schmierstoffe und Fette verzichtet werden müsste, sind reibungsarme Werkstoffpaarungen nötig, die sich bei den entsprechenden Temperaturen bzw. in der neuen Umgebung besser verhalten als in Luft. Polymerkomposite z.B. sind zwar meist fester, behalten jedoch ihre Duktilität und sind somit verschleißfest. Festschmierstoffen (Beimischung von Graphit) sind bereits gut beherrschbar, jedoch wird durchaus weiteres Optimierungspotenzial gesehen. So werden DLC und tetraedischer Kohlenstoff bereits vereinzelt zu Demonstrationszwecken eingesetzt, eine breite großtechnische Nutzung bleibt bisher jedoch aus. In Wasserstofftankstellen sind z.B. Regelventile mit DLC beschichtet (Druck von ca. 900 auf 700 bar im Fahrzeugtank), jedoch bedarf es kostengünstigere Lösungen, um solche Beschichtungen ins komplette Fahrzeug zu überführen (Forschungspotenzial mit Hinblick auf Kostenreduzierung). Im Fall von Brennstoffzellen im PKW müssten vom Tank (auch 700 bar) bis zur Zelle entsprechende Regeleinrichtungen verbaut sein. Bei Anwendungen an Luft wäre eine graphitische Beschichtung (sp²-Kohlenstoff) womöglich zielführend. Die Verflüssigung zu Kryowasserstoff ist anspruchsvoller (bisherige Entwicklungen durch die Ariane-Raketen) und eine Tankinfrastruktur müsste geschaffen werden (zielführende maximale Entfernungen

lägen bei 600 – 800 km). Der Wirkungsgrad eines Wasserstoffverbrenners mittels Kaltgaseinspritzung liegt laut Aussage seitens der Automobilherstellung bei ca. 54 - 55 %.

Aus der Sicht der Schmierstoffindustrie sind die nächsten 3 – 4 Jahre entscheidend darüber, ob sich die Wasserstofftechnik in der mobilen Anwendung in Deutschland durchsetzen kann bzw. zukünftig relevant wird. Potenzial hätte hierfür vorwiegend der Transportbereich. Eine Zurückdrängung des E-Motors im PKW als unwahrscheinlich eingeschätzt.

3.7. Kältetechnik

Die Technik der CO₂-Kälteanlagen ist laut Schmierstoffindustrie bereits seit über 15 – 20 Jahren bekannt. Sie ist zwar aufwendiger, dafür hat sie einen deutlich höheren Wirkungsgrad (und ein harmloseres Kältemittel). Aufgrund höherer Einstiegskosten konnte sich die Technik bislang aber nicht durchsetzen. Überkritisches CO₂ benötigt höhere Drücke (Carnot = hoher Druckdifferenz = höherer Wirkungsgrad) und führt dadurch zu einem effizienteren Betrieb, welcher die höheren Anschaffungskosten in der Praxis egalisiert. Profitieren werden die Verbraucher:innen, die weniger Strom bzw. Kraftstoff benötigen. Bisherig verwendete Technik ist in der Anschaffung günstiger, weshalb im Falle der Automobilindustrie der Hersteller das Fahrzeug der Kundschaft objektiv billiger anbieten kann. Das vermeidlich günstigere Auto ist langfristig jedoch teurer und umweltschädlicher. Das sollte zukünftig transparenter kommuniziert und mitkalkuliert werden.

Die Forschung betonte zusätzlich das große Energieeffizienzpotenzial durch Reibungsminderung von Kältemaschinen – im speziellen bei Hubkolbensystemen (Kolben-Zylinder-Paarung). Bisher besteht kein Kontakt zu dieser Branche. Die Reibungsphänomene sind hier noch nicht erforscht. Eine Vernetzung zur z.B. Automobilindustrie mit ihren bisherigen Erfolgen bzgl. der Reibungsminimierung könnte hier zielführend sein und eine Marktdiffusion einleiten.

3.8. Pneumatik

Dieser Bereich bietet laut Industrie ein sehr großes Energieeffizienzpotenzial, da die Kompressoren dauerhaft laufen und hohe Verluste auftreten durch Leckagen. Die bisherig eingesetzte Technologie ist weitestgehend ausentwickelt und preisgünstig. Durch das Umdenken in der CO₂-Politik kann ein großer Hebel bzgl. der Einsparung von Energie entstehen.

3.9. Hydraulik

laut Forschung kann gerade in der Hydraulik noch viel Energie durch hochwertigere Schmierstoffe eingespart werden. Zwar werden bereits seit 3-4 Jahren zunehmend mehr Aggregate aufgrund gestiegener Anforderungen an die Produkte, Energie und Standzeiten mit hochwertigen Gruppe-2-Öle betrieben, jedoch scheinen in der Industriehydraulik noch vorwiegend Gruppe-1-Öle genutzt zu werden. Zum Teil kommen aber auch höher gruppierte Öle wie PAO¹ (Polyalphaolefine) in Hydraulik, Pumpenaggregaten und Filtrierung zum Einsatz und führen im Tribosystem zu geringeren Reibungskoeffizienten sowie besserem Luftabscheidungsvermögen, was die Effizienz deutlich steigert.

¹ Weitere Branchen wie groß-industrielle Betriebe (Stahl und Zement), der Kunststoff- und Spritzgussbereich, die Automobil- und die Lebensmittelverpackungsindustrie setzen vermehrt auf PAO-Öle. GtL-Öle erhöhen die Standzeiten zusätzlich und sparen weitere Energie ein. Tests sollen das sowie die damit verbundene reduzierte Emission bestätigen haben.

Meist wurde bislang eine Umrüstung auf hochwertigere Öle aufgrund der höheren Einkaufskosten² gepaart mit dem Ausblenden bzw. der Unkenntnis über die möglichen langfristigen Einsparungen (durch Lebensdauererhöhung³, geringere Reibung, Reduktion von Energie und damit niedrigeren Emissionen) blockiert. Durch die zunehmenden Nachhaltigkeitsdebatten, auch unternehmensintern, könnte nun die Bereitschaft steigen zu investieren. Unternehmen mit größeren Maschinenparks könnten Experten durch Tests einzelner Aggregate vor Ort relativ kostengünstig Aufschluss auf das gesamte Werk geben. Gerade in der Hydraulik, Filtrierung und bei Pumpen wird bedeutsames Potenzial gesehen, welches leicht zu heben wäre.

3.10. Lebensmittelindustrie

Aus Sicht der Forschung ist das tribologische Potenzial in z.B. der Lebensmittelindustrie unstrittig, wobei unklar ist, ob globale Lösungen fernab von Einzellösungen erreichbar und umsetzbar sind. So mag die Kombination aus einem speziellen verschleißfesteren Material und Lebensmittel, welches zeitgleich auch als Schmiermittel fungieren kann, gut funktionieren, nur wird sich das aufgrund der Vielfältigkeit der Lebensmittelindustrie nicht in der Breite anwenden lassen. Maschinenkomponenten in direktem Kontakt mit Lebensmitteln benötigen auch in der Verpackungsindustrie aufgrund der weiteren Verarbeitung (Reiben, Schneiden, Portionieren, Konfektionieren) spezielle Schmierstoffe. Leistungsöle können hier nicht verwendet werden, weshalb eine maximale Effizienzsteigerung limitiert ist. Auch der wirtschaftliche Aspekt hat bisher eine Durchdringung von neuen Beschichtungen verhindert. So liegt bzw. lag das Hauptaugenmerk bisweilen wie in den meisten Bereichen auf der ausfallssicheren Produktion. Für nachhaltige Investitionen (mit Amortisierungseffekt in mehreren Jahren) ist meist kein Geld vorgesehen.

In der Lebensmittelindustrie stecken laut Schmierstoffindustrie konventionelle Maschinenelemente wie Wälzlager, Zahnräder, Ketten, usw., welche ggf. durch lebensmitteltaugliche Materialien angepasst sind. Hierfür existieren bereits mit lebensmittelverträglichen Schmierstoffen spezielle Lösungen, wobei laut Einschätzung der Schmierstoffindustrie ein wirkungsgradtechnisch detaillierter Blick bisher ausblieb. Deutlich höhere Effizienzpotenziale werden in den unzähligen Systemen aus E-Maschine und Getriebe in der Produktion (z.B. Fließbank und große Drehrohröfen) vermutet.

3.11. Produktionsindustrie

Die Forschung sieht die Entwicklung zu z.B. leichtgängigeren Lagern für das produzierende Gewerbe und den Maschinenbau noch ganz am Anfang und schätzt hier das Einsparpotenzial als enorm ein.

Durch eine angepasste Auslegung des Tribosystems an die hauptsächlichen Betriebsbedingungen in der Produktion ist noch viel Energie einzusparen. Es wird bemängelt, dass Motoren meist für die höchste Temperatur ausgelegt werden (somit kleinstmögliche Viskosität), jedoch der normale Betrieb bei deutlich niedrigeren Temperaturen stattfindet. Das hat zur Folge, dass Viskosität und Reibung in der meisten Zeit viel zu hoch sind und ein Großteil der Energie verschlingen, welche eigentlich nur für einen

² Die Nutzung von Industrie mit veralteter Technologie in der Produktion wird auch von der Schmierstoffindustrie bestätigt. Zum Teil werden hier noch Schmierstoffe aus den 50er Jahren eingesetzt, da in vielen Betrieben keine Zuständigkeit für Energiefragen und Nachhaltigkeit existiert. Auch wird bemängelt, dass im eigenen Unternehmen einerseits intensive und teure Forschung betrieben wird, aber andererseits in der Produktion nur die Stückkostensenkung zählt, bei der meist nur der Fokus auf günstigste Einkaufspreise von z.B. Schmiermittel gelegt wird.

³ Mit der Senkung der Betriebstemperaturen durch effizientere Schmierstoffe altern diese auch deutlich langsamer.

Betrieb unter höchster Belastung benötigt würde. Problematisch hierbei ist, dass Fertigungsmaschinen für diese hohen Betriebspunkte ausgelegt werden müssen und diese für einen Betrieb nachzuweisen ist.

Gerade im Anlagenbau und bei 24/7-Produktionen sieht die Industrie das größte Energieeffizienzpotenzial. In dem Zusammenhang könnte mit einem besseren Verständnis der Atomphysik unerwünschte Reibungseffekte deutlich reduziert werden.

Im Bereich der Förderanwendungen sind die Bemühungen seitens der Produktion und Logistik hinsichtlich energiesparender Förderketten noch verhalten. Optimierte Führungsmaterialien, Rollen, Beschichtungen, Geometrien und Schmierstoffe haben gerade auf langen Strecken einen höheren Effekt auf die Effizienz als sonstige Leistungssteigerungen. Förderstrecken benötigen nicht selten kilometerlange Ketten, weshalb in einer großen Fabrik durch eine effizientere Kette eine große Menge CO₂ eingespart werden kann. Leider scheint das Interesse seitens der entsprechenden Branchen noch nicht auf den Verbrauch an Förderleistung zu liegen.

3.12. Energieindustrie

Im Bereich der Energietechnik (wie z.B. große Öl- und Gas-Kraftwerksturbinen und der Flugzeugtechnik) wird laut Beschichtungsindustrie und Forschung bereits viel daran gearbeitet, dass Systeme weniger Strom bzw. Energieträger verbrauchen. Das Potenzial wird dennoch weiterhin insgesamt als groß eingeschätzt.

3.13. Medizinindustrie

Der Medizintechnik hingegen wird u.a. aufgrund der Größe kein nennenswertes Energieeffizienzpotenzial zugeschrieben. Mit dem stetigen Wachstum werden dagegen in der Logistikbranche hohe CO₂-Einsparungen vermutet. Neben den Reibungsreduzierungen in den einzelnen Logistikhallen (Sortier- und Verteilungszentren) werden CO₂-Reduzierungen vor allem im Transport über die Schiene sowie in effizienteren LKWs und Schiffe gesehen. Forschungstechnisch gibt es im Zusammenhang mit letzteren auch Bestrebungen für die Brennstoffzellentechnik. In der Chemieindustrie hingegen scheitern neuartige Schichten (z.B. PVD-Schichten) aufgrund der geringen Dicken und der korrosiven Umgebung an einer breiten Verwendung. Kleinste (unvermeidbare) Fehler in den Beschichtungen kreieren Startpunkte für Korrosion und könnten neben einem früheren Ausfall des Materials bzw. Bauteils gravierende Konsequenzen verursachen.

3.14. Bergbau, Baumaschinen und Werkzeughersteller

Der Maschinenbau schätzt je nach Anwendungsfall in der Baumaschinenbranche generell Adaptierungspotenzial von bereits in der Automobilindustrie verwendeten Technologien, ist allerdings unsicher, wie die Branche bzgl. Tribologie aufgestellt ist. In diesem Zusammenhang ist als Projektpartner neben einem großen Baumaschinenhersteller auch ein Werkzeughersteller (für Handgeräte sowie die holverarbeitende Industrie und Tischlereien) gewünscht.

Nach Einschätzung der Industrie treten besonders hohe Reibung und Verschleiß im Umfeld der Materialzerkleinerung auf (z.B. Rohstoffgewinnung und -verarbeitung sowie Werkstoffherzeugung). Hier wäre der Anteil der Kosten für Ersatzbauteile am Bruttosozialprodukt sowie der materielle Anteil

zur Instandsetzung interessant. Diese Branchen haben aufgrund ihrer Anwendungen komplett andere Verschleißmengen und Reibkräfte, welche womöglich gar nicht verhindert bzw. tribologisch gelöst werden können.

3.15. Tribotronik

Laut Beschichtungstechnik werden bereits bezüglich der Tribotronik in einigen Entwicklungsprojekten durch Dünnschichttechnik Sensoren appliziert. Diese sollen die Bauteile unter Betriebsbedingungen untersuchen und verstehen. Predictiv Maintenance (vorausschauende Instandhaltung) und Realtime Measurement (Echtzeitmessung) ermöglichen, zukünftig Ausfälle zu vermeiden und frühzeitig Wartungszyklen anzupassen. Hierdurch wird der Betrieb nachhaltiger und die Kosten langfristig reduziert. Bisher gibt es jedoch noch keine bzw. sehr wenige Einsatzmöglichkeiten aufgrund der prozesstechnischen Komplexität. In der Batterietechnik kann hierfür ein großes Potenzial vorhanden sein, da bisher keine Überwachung der Einzelzelle vorliegt. Dünnschichtsensoren nehmen keinen Bauraum weg und könnten somit punktuell Temperaturmessungen ermöglichen (z.B. kann der innere Kern der Batterie eine Stunde nach dem Abstellen des Fahrzeugs immer noch warm sein). Hinderlich für eine bisherige weitere Verbreitung der Sensorik ist das Unwissen seitens Konstrukteuren, Ingenieuren und Entwicklern darüber, dass bereits Lösungen für Zustandsüberwachungen existieren. Die Bauteile und Konstruktionen könnten bei Implementierung von Sensoren anders ausgelegt werden. In diesem Zusammenhang sollen bereits einige FVA-Projekte laufen, in welchen das BMWi zum Teil involviert sein soll. Für die künstliche Intelligenz sowie Industrie 4.0 wird die Sensorik für die Zustandsüberwachung der tribologischen Kontakte essenziell, da hier das Ziel in der automatischen Gegensteuerungsmaßnahme (z.B. Temperatur zu hoch → Leistung runternehmen) im laufenden System liegt. Diese Thematik ist erst im letzten Jahr angelaufen und bedarf noch Entwicklung.

Die Industrie unterstreicht den Vorteil eines sich im Betriebszustand automatisch einstellendes System, da es permanent laufen kann und eine fast unendliche Lebensdauer aufweist, da es nie in die kritischen Bereiche kommt und somit kein Verschleiß und keine Überalterung entstehen.

Die Forschung fügte in Bezug auf Predictiv Maintenance hinzu, dass diese Art der Überwachung sowohl für die Produktentwicklung wie auch die Fertigung wichtig ist. Zum einen kann in der Entwicklungsphase ein Prozessverständnis erzeugt werden, um die Performance des Systems für den Realbetrieb zu optimieren. Zum anderen verhindert sie in der Fertigung, dass Werkzeuge unvorhergesehen brechen und teure Produkte oder sogar Maschinen zerstören, oder auch dass Werkzeuge mit großer individueller Lebensdauer maximal ausgereizt werden können.

Teils sieht die Forschung das bisherige Kosten/Nutzen-Verhältnis bei Sensoren in den meisten Fällen derzeit nicht gegeben und empfiehlt nach einfacheren Lösungen zu forschen, welche z.B. den Schichtabtrag mittel magnetischer oder elektrischer Felder ermitteln. Auch wird bemängelt, dass gerade Schichtsensoren die eigentliche Struktur unterbrechen und zu Lasten der Mechanik gehen. Hier fehlt es noch an Konzepten.

Die Industrie könnte sich auch ein Projekt bzgl. stabiler Sensoren zur Druckerfassung vorstellen, welche anschließend wälzfest einsetzbar wären.

Bei der Überwachung der Schmierstoffqualität in Windenergieanlagen reicht laut Experten aus der Schmiermittelindustrie derweilen eine regelmäßige Inline-Überwachung aus. Da die Öllebensdauer

mindestens 5 Jahre beträgt (in vielen Fällen 10 Jahren bzw. durch Feldversuche eines der weltgrößten Windenergieanlagenherstellers bereits 15 Jahre) und die Lebensdauer eines Sensors niedriger ist, rentiert sich hier der Einsatz nicht. Generell wird der Aspekt der vermeidlich kurzen Lebensdauer elektrischer Bauteile meist vergessen. Eine Vibrationsüberwachung für Wälzlager wäre hier sinnvoller. Derzeit erfolgen noch optische Untersuchungen des Getriebes und der Zahnflanke durch den Menschen mittels Endoskop. Entwicklungen an Schmierstoffen als Informationsüberträger nutzen zu können, werden bislang kaum verfolgt.

Laut Industrie können mit Hilfe von Sensoren Lager immer im optimalen Drehzahlbereich gefahren werden, um Überlastungen zu vermeiden. Generell gilt, je schwieriger die Wartung, die Instandsetzung und je teurer die Ausfälle, desto eher werden Sensoren und Condition Monitoring eingesetzt. Gerade bei großen Lagerkomponenten in schwerzugänglichen Bereichen sieht der Experte noch Nachholbedarf: z.B. erschweren Rotationen bei Wälzlagern eine sichere Datenübertragung (Kabel werden durch Drehung beeinflusst, siehe 3.21) und auch eine energieautarke Datenübertragung wäre noch zu realisieren.

Laut Maschinenbau sind mittels externer Sensorik z.B. Steuerketten bzgl. des Verschleißes bereits technisch überwachbar. Hier läuft die Kette durch ein Modul, welches regelmäßig die Kettenlänge misst. Auch ergibt sich bei minimalgeschmierten Ketten die Möglichkeit gezielt die Schmiermittelmenge einzustellen. Hierdurch kann die Produktion effizienter betrieben werden und im Notfall rechtzeitig reagiert werden, um Stillstände von Anlagen aufgrund Versagens zu vermeiden. In der Automobilindustrie hingegen wird diese Technik nicht genutzt, da Autohersteller lediglich Mindestanforderungen und eine garantierte Haltbarkeit der Bauteile von Zulieferern erwarten und in weiteren Innovationen selten Vorteil sehen.

In der Robotik können laut der Industrie bei der Produktion, die hohe Genauigkeit benötigt Spiele mit KI-Systemen ausgeglichen werden. Die Datenerfassung erfolgt mittels sensorischer Dünnschicht und die KI regelt das System bei mechanischen Abweichungen nach. Die Sensorik ist jedoch eingeschränkt, und kann Daten nicht immer genau erfassen, weil sie manchmal nur entfernt von tribologischem Kontakt gemessen werden können (Schutz vor Schädigung des Sensors oder Schutz des tribologischen Systems vor negativem Einfluss durch Sensor). Es gibt bereits Weiterentwicklungen, welche aufgrund der hohen Kosten jedoch derzeit zu teuer sind. Somit steht die Tribotronik generell vor der großen Herausforderung Kosten, Genauigkeit und Einsatzmöglichkeit optimal zu verbinden.

3.16. Klimaneutrale Fabriken und Simulation des Fertigungsprozesses

Laut Industrie gibt es bereits Initiativen die Effizienz in der Fertigung zu steigern und den Weg zur klimaneutralen Fabrik zu gehen. Jedoch werden unternehmensinterne Energieverbräuche der Fertigungsmaschinen noch zu selten durch tribologische Maßnahmen reduziert. Vielmehr erfolgen Handlungen durch das Ausstatten der Dächer mit Photovoltaik.

Laut Forschung spielt gerade die Simulation im Bereich der Entwicklung von teuren Produkten und geringer Stückzahl (wie Triebwerksbau) schon seit Jahren eine große Rolle. Die Simulation der Wärmeeinträge und thermischen Verzüge, um die Konturen des Werkstücks nach der Fertigung vorherzusagen, wird hingegen erst jüngst nach und nach verstärkt in der Produktion in Hochtechnologieunternehmen genutzt. Generell steckt im Bereich der Produktion noch sehr viel

einsparbares Energiepotenzial, besonders für die metallverarbeitende Industrie. Hierfür muss zunächst Verständnis generiert werden, um im weiteren Verlauf die Treiber des Energieverbrauchs zu identifizieren und ihnen gegenzusteuern. Mit Hilfe einer gezielten Simulation der Produktion und der damit verbundenen Verringerung von Ausschüssen durch z.B. thermische Verzüge und wegfallende Nachbearbeitungsschritte sowie einer optimierten Abfolge der Fertigungsschritte könnten aus Expert:innen-Sicht mehrere Gigatonnen an CO₂ eingespart werden. Hier befindet sich die Fertigung, vor allem in kleinen und mittleren Unternehmen, aber noch ganz am Anfang.

3.17. Wasserbasierte Schmiermittel

Laut Forschung folgt dem Trend zu immer niedrig viskoserer die Entwicklung wasserbasierter Fluide. Der Vorteil liegt neben der Nachhaltigkeit auch in dem guten Kühlverhalten. Jedoch können diese Fluide deshalb auch nur in Aggregaten mit nahezu konstanten Temperaturen eingesetzt werden (limitiert auf Temperaturen zwischen Schmelz- und Siedepunkt). Additive könnten die Bereiche erweitern, jedoch gegebenenfalls zu Lasten der Nachhaltigkeit.

Für die Schmiermittelindustrie sind wasserhaltige Schmierstoffe speziell für Getriebe interessant. Sie werden bisher meist nur in der Hydraulik in der Metallverarbeitung eingesetzt. Hier müssen Beschichtungen einen dynamischen Korrosionsschutz bieten und vor neuen Effekten im tribologischen Kontakt schützen.

3.18. Wechselwirkung zwischen Oberfläche und Schmierstoff

Laut Industrie wird im Bereich der Wechselwirkung zwischen Schmierstoff und Oberfläche noch zu wenig geforscht. Es gilt durch geschickte Kombination aus Oberfläche und Schmierung ein System zu finden, welches einen möglichst geringen Reibwert aufweist. Hierbei ist jedoch nicht wichtig, ob in der späteren Praxis überall niedrigste Reibung erreicht wird, sondern welche Paarungen⁴ überhaupt in der Lage sind kleinste Reibwerte darzustellen. Die Relevanz ist bekannt, jedoch wird die Thematik noch als am Anfang befindlich betrachtet. Die Voraussetzung für einen Erfolg liegt in der interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen u.a. Oberflächen-Finishern und Schmierstoffherstellern. Herausfordernd ist hierbei, dass bisher noch nicht genug über die oberflächennahen Bereiche im Werkstoff bekannt ist, weshalb der Fokus auf die Oberflächeneigenschaften gerichtet werden muss. Obwohl zumindest auf Seiten der Simulation in den letzten Jahren schon Annäherungen erfolgten, ist es immer noch schwierig Informationen über den genauen Werkstoffzustand der technischen Oberflächen zu erhalten. Da die Mechanismen im oberflächennahen Bereich nicht genau mess- und bestimmbar⁵ sind, fehlen derzeit noch die Voraussetzungen für genauere Simulationen zur richtigen Abbildung des Werkstoffzustandes.

Mit diesem Grundsatzproblem hat auch die mittelständische Industrie zu kämpfen. Die Oberflächen der fertigen Produkte entsprechen zwar den Anforderungen, jedoch können die Hersteller nicht

⁴ Laut Industrie ist nicht jedes System beliebig anpassbar. So kann im Falle eines z.B. dieselbetriebenen Fahrzeugs das Fluid im Tribosystem vorgegeben sein, weshalb eine Schmierstoff-Oberflächen-Wechselwirkung nicht so designt werden kann, wie eventuell gewünscht. Bei Lagern und Getrieben von Elektrofahrzeugen hingegen ergibt sich die Möglichkeit eines unabhängigen Designs des Schmierstoffs und der Beschichtung bzw. Oberfläche, was wiederum neue Chance ermöglicht.

Des Weiteren können je nach Paarung auch harte Schichten mit sonst in anderen Systemen verschleißarm wirkenden Schmiermittel hohen Verschleiß aufweisen. Es ist wichtig, sowohl Beschichtung als auch Schmierstoff aufeinander abzustimmen. Adaptionen sind nicht ohne weiters möglich (siehe Automotoren in Japan)

⁵ Eines der vielen bisher noch nicht (genau) messbaren Phänomene sind laut Forschung u.a. Blitztemperaturen, welche beim Kontakt von (rauen) Oberflächen auftreten. So können sehr kleine Hotspots mit Temperaturen von ca. 200 – 300 °C entstehen, wenn Spitzen der Oberflächenrauheit kollidieren. Es ist derzeit weder möglich diese Temperaturen zu messen noch nachzuvollziehen, was durch diese Blitztemperaturen mit dem Schmierstoff und dem Werkstoff geschieht. Solche Mechanismen und Auswirkungen müssen verstanden werden, um zukünftige Systeme besser einzustellen.

erklären, warum das so ist. Auch der Weg zur abgeschlossenen Fertigstellung ist mit vielen Misserfolgen verbunden.

Die Forschung bemängelt in dem Zusammenhang die noch nicht verstandenen Mechanismen der Grenzreibung im engen Schmierpalt⁶. Es ist z.B. nicht bekannt, wie Additive funktionieren und wie sie um die verschiedenen Oberflächen konkurrieren. Je extremer die Randbedingungen hierbei sind, umso schwieriger gestaltet sich auch die Trail-and-Error-Methode, wie sie bisher größtenteils seitens der Schmierstoffhersteller verwendet wurden. Auch bei den neuen wasserbasierten Schmierstoffen muss noch viel Wissen generiert werden und es ist fraglich, ob jahrzehntelang gesammelte Erfahrungswerte hier auch ein Trail-and-Error-Ansatz ermöglichen. Hier müsste ein interdisziplinäres Team tiefgehend im Bereich der Simulation⁷ (und Multiskalen-Materialmodellierung) und in Grundlagenexperimente forschen.

Des Weiteren werden bezüglich der Skalierung in der Simulation mehrere Größenordnungen noch nicht abgedeckt. So kann z.B. ein Institut zwar bereits auf molekularer Ebene mehrere 100 Atome (Nanometerbereich) im Kontakt abbilden, ein anderes simuliert jedoch „nur“ bis in den Zehntel Millimeterbereich (z.B. vereinfachte Annahmen bzgl. Spannungen, Strömungsverhalten, Interaktion von Additiven mit Oberfläche). Es existiert also noch eine Forschungslücke von bis zu 5 Größenordnungen.

3.19. Tribokonditionierung von Werkstoffen

Bezüglich eines besseren Verschleißschutzes wird seitens der Industrie auch dem Schmiermittel eine entscheidende Rolle zugeschrieben. Da die Beschichtungen bereits als sehr gut entwickelt angesehen werden, geht es vorwiegend darum, wie die Oberfläche des Werkstoffs bzw. der Schicht optimal mit dem Schmierstoff interagiert und wie sie vorkonditioniert werden muss, damit das Tribosystem möglichst wenig beim Einlauf⁸ verschleißt und reibt.

Hierfür muss laut einem Experten aus der Forschung die Oberfläche (mehrere Hundert Nanometer) im Ganzen verstanden und charakterisiert werden, um sie so einstellen zu können, dass die beim Einlauf hochbeanspruchten Stellen gar nicht erst entstehen bzw. falls doch diese sich schnell anpassen und stabilisieren. Die Maschine oder die Bauteile könnte zukünftig in einem kontrollierbaren Tribosystem in einem niedrigerem Steady-State laufen, eine erhöhte Lebensdauer aufgrund von niedrigerem Verschleiß bekommen, niedrigere Reibung aufweisen und im Schmiermittel weniger Fremdpartikel mit sich führen. Letzteres führt wiederum zu verlängerten Wechselintervallen. Auch könnten bereits etablierte Werkstoffe weiter bis zu ihrer Belastungsgrenze ausgereizt werden, was wiederum den

⁶ Mit der Verringerung des Schmierpalts (abnehmende Viskosität des Schmiermittels) kommt das Tribosystem immer öfter in den Bereich der Grenzreibung. Bisherige Berechnungsmethoden (seitens der Automobilindustrie und Forschung) werden dadurch noch weiter erschwert und Lösungen schlechter vorhersagbar.

⁷ z.B. Schmierstoff: Viskosität ist keine Naturkonstante, sondern abhängig von Temperatur, Druck, Scherrate, z.T. auch Spalthöhe (teils messbar, teils rechenbar). Hohe Drücke und Scherraten sind nur mit molekularem Modelling annähernd simulierbar und oft mit hohen Kosten verbunden. Alle simulierten Berechnungen müssen in andere Skalen zur weiteren Berechnung von makroskopischen Eigenschaften (E-Module, Härte) übertragen werden. Seitens des Werkstoffs sind die ersten 100 – 200 Nanometer im oberflächennahen Bereich für das Tribosystem relevant. Erschwerend kommt hinzu, dass auch dieser Bereich sich immer aufs Neue ändert (sich sozusagen auf Belastungsszenarien einstellt) und sich weiter umbaut. Wenn die Extreme nicht zu groß sind, kann das Tribosystem gut funktionieren.

⁸ Erklärung Einlauf/Run-In: wenn Produkte gefertigt und eingebaut werden, treten häufig in den ersten Betriebsstunden erhöhter Verschleiß und Reibung auf. Es kommt zu Veränderungen in den oberflächennahen Bereichen (neben mechanischer Verformung, spielt auch die Chemie eine Rolle: z.B. Stoffe aus der Umgebung werden miteingebracht, es oxidiert, etc.). Die Systeme stellen meist nach einer gewissen Zeit ein stabiles Gleichgewicht her. Jedoch kann es durchaus vorkommen, dass in manchen Anwendungen der Verschleiß und die Reibung so hoch sind, dass die Lebensdauer deutlich reduziert wird oder das Bauteil sogar direkt versagt. Durch Verwendung von vorab konditionierten Bauteilen kann der Einlaufprozess erheblich reduziert werden und somit ein Gleichgewicht bei niedriger Reibung und geringerem Verschleiß schneller erreicht werden. In der Folge wird sowohl die Lebensdauer des Tribosystems und auch der Schmiermittelwechselintervall verlängert.

Bedarf nach neuartigen, mitunter komplexeren Materialien und teuren Legierungselementen reduziert.

Die Thematik eine Oberfläche zu konditionieren bzw. den Einlauf einer Oberfläche schon vor Inbetriebnahme weitestgehend in einem Finish-Prozess vorweg nehmen zu können, sollte ursprünglich ein Teil eines Sonderforschungsbereichs sein, welcher jedoch nicht gefördert wurde. Die Wichtigkeit eines solchen Forschungsprojekts wurde in mehreren Gesprächen sowohl von der Industrie wie auch der Forschung mehrfach und unabhängig voneinander betont. Sollten die Veränderungen in der Randzone zukünftig vorhergesagt werden können, wäre das Energieeffizienzpotenzial und die Ressourceneffizienz groß und könnte tribokonditionierte Werkstoffe wirtschaftlich machen.

In diesem Zusammenhang wird seitens der Industrie gewünscht, dass zukünftig das Tribosystem von anhand der benötigten Oberflächen-Zustände und -strukturen sowie der Wechselwirkungen mit dem Schmierstoff entwickelt wird, und der Werkstoff entsprechend angepasst und ausgewählt wird. Bisher werden die Systeme aus Schmierstoff, Oberfläche, Beschichtung und Werkstoff (zum Teil aufbauend auf bestehenden Lösungen) vorwiegend nach dem Trial-and-Error-Prinzip und mit Hilfe von Erfahrungswerten konzipiert, bis das Bauteil den gewünschten Anforderungen genügt. Zum Teil sind hier im Nachgang noch aufwendige Erprobungen bzgl. der Oberflächenqualität notwendig, um zu überprüfen, ob eine Übertragung in die Anwendung funktioniert. Diese im Expertengespräch als visionär bezeichnete zukünftige Herangehensweise würde umfängliche Tests zukünftig unnötig machen, da die Oberfläche sich vermutlich im Großen und Ganzen nicht mehr ändert.

Um ein besseres Verständnis bezüglich der Tribokonditionierung und der Auswirkungen unterschiedlicher Oberflächenbehandlungen aufbauen zu können, schlägt die Forschung vor, vermehrt bereits gut funktionierende Maschinen sowie Bauteile in ihren Randbereichen zu untersuchen und intensiv zu studieren. Hierfür kämen Untersuchungsmethoden wie das Transmissionselektronenmikroskop (TEM), Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS), Augenelektronen-Spektroskopie (AES) oder auch die Atom Probe Tomography (APT) in Frage. Bei präziser Fragestellung kann sich die Forschung ein gefördertes Projekt mit einem interdisziplinären Team aus z.B. Chemie, Maschinenbau, Materialwissenschaft, Physik und Simulation vorstellen.

3.20. Verschleißverbesserte Materialien für Pumpenanwendungen

Der Maschinenbau weist darauf hin, dass in den BMWi-Projekten PEGASUS, CHEOPS³ und CHEPHREN auch aufgrund der Nähe zur Automobilindustrie immer nur dünne Schichten Bestandteil sind. Dicke Schichten sind mit PVD und CVD nicht herstellbar, weshalb hier weiteres Potenzial im Atmosphären-Plasmaspritzen und Hochgeschwindigkeitsflammspritzen gesehen wird. Zur Anwendung könnten diese dicken und verschleißbeständigeren Schichten in Pumpenlaufrädern und in der Papierindustrie finden.

Im Bereich der Pumpentechnik (auch denkbar für einen Einsatz in der Haustechnik und Produktion) sowie bei Schiffspropellern sieht die Forschung ein großes Potenzial zur Vermeidung von Kavitation⁹ durch einen zusätzlichen Bearbeitungsschritt. Über einen spezifischen Prozess (ähnlich dem

⁹ Kavitation kann bisher nicht komplett vermieden werden. Bisherige Gegenmaßnahmen sind u.a.: geometrisch optimieren und Strömung so zu führen, dass Bläschen sich an verschleißfesterer Stelle sammeln

Reibschweißen) können aus Bronze-Oberflächen Schichten der gleichen Zusammensetzung aber unterschiedlicher Phasenverteilung auf dem Grundkörper aufgetragen werden. Durch den veränderten Gefügestand an der neuen Oberfläche wird somit eine erhöhte Verschleißbeständigkeit gegenüber Kavitation erzeugt. In diesem thermomechanischen behandelten Werkstoffzustand wird die weiche Phase kleiner (lamellar oder runde Körner) und es erhöht sich die Grenzfläche zu der umgebenden harten und stabilisierenden Phase. Bei ersten Kavitationsexperimenten zeigte sich nach einer zunächst verlängerten Ermüdungsphase, dass bevorzugt der weiche Gefügebestandteil versagt. Insgesamt verhält sich der Werkstoff robuster. Erstrebenswert wäre hier eine Langzeitstudie bezüglich der Werkstoffhaltbarkeit in Pumpen oder Propelleranwendung mit einem Partner aus der Industrie. Abhängig der Ergebnisse könnte die Wirtschaftlichkeit aufgrund einer höheren Lebensdauer gegeben sein.

3.21. Mechatronische Kontakte – Steckverbindungen

Expert:innen aus Forschung und Maschinenbau sehen viel Energieeffizienzpotenzial in Steckverbindungen (Kontakte in mechatronischen Bauteilen). Diese werden im großen Stil in der modernen Fahrzeugtechnik sowie auch in elektrischen Antrieben verbaut (auch in jedem Roboter und überall im produzierenden Gewerbe zu finden). Gerade in Leistungsmechatroniken, wo hohe Ströme übertragen werden sollen, ist die Zuverlässigkeit von entscheidender Bedeutung. Diese stoff- oder kraftschlüssigen Steckverbindungen kombinieren die Stromzufuhr mit der Steuerungs- und Regelungseinheit (quasi Schnittstelle zwischen Elektrik und Mechanik), wobei der Widerstand hier maßgeblich die Funktion beeinflussen kann. Unabhängig vom ursprünglichen Widerstand kann dieser durch mechanische und chemische Belastungen¹⁰ im Laufe des Betriebs weiter erhöht werden, was im Endeffekt die Leistungsfähigkeit reduziert und neben Fehlfunktionen auch ein Versagen der Maschine verursachen kann. Diesem Fretting-Phänomen¹¹ wird bislang dadurch begegnet, dass zur Bestimmung der Lebensdauer die Mechatronik als Ganzes im Prüfstand zur Vibration gebracht wird und der Zeitpunkt festgehalten wird, zu dem der Strom zur Versorgung nicht mehr ausreicht. Hier wird großes Verbesserungspotenzial gesehen. Derzeit gibt es kein tribologisches Forschungsfeld in Deutschland, welches sich mit mechatronischen Bauteilen beschäftigt. Könnte die Zuverlässigkeit in mechatronischen Bauteilen erhöht werden, wären zukünftig größere Ströme mit allen damit verbundenen Vorteilen (z.B. bessere Beschleunigung) und eine erhöhte Lebensdauer denkbar sowie weniger Material (Ressourceneffizienz) notwendig.

3.22. Keramik als Gradientenwerkstoff

Die Forschung sieht ein großes Forschungspotenzial in der Möglichkeit mit Hilfen der Additiven Fertigung Keramiken gezielt zu gradieren. Keramiken werden meist in einem zweistufigen Prozess gefertigt, wobei in diesem Fall die Formgebung des Grünkörpers durch einen additiven Fertigungsschritt ersetzt werden könnte, der nur unwesentlich länger dauern soll. Der Vorteil ist, dass der Grünkörper für einen Vorsinterschritt gezielt durch Variation der Aufspritzmasse designt werden

¹⁰ Bauteile bewegen sich (dicke Kabel, die an der Mechatronik hängen, wackeln), Verbinder lösen sich und es kommt zu kleinen Hin- und Herbewegungen von ungeschmierten Elementen

¹¹ Hiermit beschäftigen sich derzeit überwiegend Turbinenhersteller

kann, damit die spätere Keramik ihre gewünschten Eigenschaften¹² erhält – die Möglichkeiten sind hier vielfältig. Somit können Keramiken mit ihrem geringeren Gewicht und ihren positiven tribologischen Eigenschaften vermehrt zum Einsatz kommen, da einem Spröbruch durch Gradierung einer Metallschicht im Verbund gegengesteuert werden kann. Ein weiterer Vorteil neben der Energieeffizienz ist die Rohstoffeffizienz: bei keramikgerechter Konstruktion ist von einer hohen Lebensdauer auszugehen und die dafür notwendigen Rohstoffe sollen zukünftig ausreichend verfügbar sein. Mögliche Projektpartner werden in den Bereichen Keramik, additive Fertigung und Simulation gesehen.

Aus Sicht der Forschung eröffne sich einem Lager¹³, welches fast reibungs- und wartungsfrei laufen würde sowie langlebig wäre, ein branchenübergreifender 100-Milliarden-Euro-Markt.

3.23. Trockenschmierung dotierte Kunststoffe

Laut Forschung entwickelt derzeit ein Hersteller ein Getriebe für Elektromotoren, welches eine intrinsische Schmierung aufweisen soll. Der Vorteil liegt darin, dass keine Dichtungen benötigt werden und zukünftige Schmiermittelwechsel entfallen. Zum Einsatz können diese Getriebe branchenweit in Pumpen, in Druckereien und in der Lebensmittelindustrie kommen – dort wo Kontamination durch Schmiermittel unerwünscht sind (auch Schiffswinden, Zementmischer und Aktoren im PKW wären denkbar). Vorstellbar wären hier ein mit sehr weichen Kunststoffen dotiertes Material, welche an der Kontaktstelle austreten können, um diesen zu schmieren¹⁴. Erste Grundlagen wurden hier durch ein Reinhart-Koselleck-Projekt gelegt, weshalb nun weiteres Verständnis generiert werden muss, um in die Breite zu gehen. Gegenstand der damaligen Untersuchung war Sinter-Stahl mit minimalem Schmiermittel. Durch Übertragung dieser Technologie auf Kunststoffe könnte eine erhebliche Menge an Schmierstoff obsolet werden, sofern der Schmierstoff keine Kühlfunktion haben soll. Im Fahrzeugbetrieb¹⁵ wäre ein Einsatz als leistungsübertragendes Getriebe aufgrund der hohen Leistungsdichte somit nicht möglich.

3.24. Supraschmiereffekt im Gleitlager

Der Supraschmiereffekt wird nach Aussage der Forschung bereits in einem internen Projekt erforscht. Hier wird versucht diesen Effekt im Tribosystem eines Gleitlagers nutzbar zu machen, um ähnlich geringe Reibung wie bei einem Wälzlager zu erreichen. Folglich könnten zukünftig Baukosten und Gewicht reduziert, das Lager stabiler gefahren und White Etching Cracks (WEC¹⁶) vermieden werden.

3.25. Reibungsreduzierung von Zahnrädern mithilfe von wasserhaltigen Fluiden

Die Forschung sieht großes Potenzial in wasserhaltigen Fluiden, welche zum ganzheitlichen Thermomanagement inkl. der Schmierung eingesetzt werden können. Diese Thematik beinhaltete bereits das Projekt Speed4E, jedoch standen die Fluide nicht im Fokus. Bisher konnte an

¹² Zum Beispiel könnte bei einem Lager ein Rand gezielt mit Porosität, welcher dem Schmiermittel im Kontakt zur Verfügung steht, versehen und der äußere Rand mit Hilfe von Verbundwerkstoffen verstärken werden. Da es sich bei keramischen Lagern generell bislang nicht um einen Massenmarkt handelt, sind sie derzeit noch recht kostspielig, können aber durch den Qualitätsgewinn (gute tribologische Eigenschaften, wie geringe Reibung und Verschleiß, etc.) zukünftig an Bedeutung gewinnen. Mit Hilfe solcher Lager könnten z.B. Windkraftträder zukünftig unter Vollast laufen.

¹³ Im Zusammenhang mit Adaption einer Technologie aus der Automobilindustrie erwähnte er hier aber das Wälzlager

¹⁴ Ähnlich wie bereits existierende Kunststoffverbundwerkstoffe, in denen kleine Teflonflockchen beigemischt sind, die dann an die Oberfläche treten und schmieren. Die Wirkungsweise ist auch vergleichbar mit Grauguss und seinen Graphitbestandteilen.

¹⁵ für intermittierende Anwendungen wie z.B. Sitzverstellung hingegen denkbar

¹⁶ besonders relevant in der Windenergie

unterschiedlichen Prüfständen eine 70 – 90 % Reibreduzierung an Zahnrädern gezeigt werden. Forschende stehen noch vor einigen Herausforderungen bzgl. Korrosion, Lebensdauer, Umgang mit verdampfendem Wasser, Dichtungen sowie Anpassung der Verzahnung und Lager. Diese Punkte werden nur am Rande betrachtet, weshalb sich die Forschung hier ein fokussiertes Projekt mit u.a. den Bereichen Maschinenbau und Tribosimulation vorstellen kann.

3.26. Beschichtung von Zahnrädern

Laut Einschätzung der Forschung weisen Zahnräder bereits einen Wirkungsgrad von fast 99 % mit herkömmlichen Fluiden auf, weshalb Reibungsminderungsmaßnahmen durch neue Konstruktionen nicht sinnvoll sind. Vielmehr ist das Verständnis bzgl. Vollschnierung, Flüssigkeitsfilm und Schmierfilmdicke relevanter. Für eine Lebensdauersteigerung und höhere Verschleißbeständigkeit können Beschichtungen wie z.B. mittels PVD nicht zufriedenstellend abgeschieden werden. Die Ionen scheiden sich aufgrund der Steilheit der Zähne und der Komplexität des Zahnrads nicht gleichmäßig im Zahnfußbereich ab. Hier könnte ein Forschungsvorhaben bzgl. einer für Beschichtungsverfahren angepasste Geometrie mit z.B. flacheren Zähnen interessant sein. Die Thematik wurde bereits in den Projekten CHEOPS³ und PEGASUS aufgegriffen, jedoch ohne Fokus auf eine neue Verzahnungsgeometrie – so sollten bisher die Beschichtungsverfahren dem Zahnrad angepasst werden, dessen Design seit ca. 50 Jahren in Größe und Ganzen unverändert blieb.

3.27. Baukastensystem

Ein Forschungsinstitut arbeitet derzeit an einer Art Baukastensystem für Lager. Dies soll zukünftig abhängig von den Anforderungen der Kund:innen (bekanntes Lastkollektiv, tolerierbare Schmierstoffe) ein anwendbares Supraschmier-System vorschlagen, welches direkt verbaut werden kann und einen energieeffizienteren Betrieb ermöglicht. Dieser Baukasten kann zukünftig auch branchenübergreifend anwendbar und sollte gerade in der 24/7-Produktion und bei steigenden CO₂-Preisen wettbewerbsfähig sein. Sollte sich dieses Projekt bewähren, kann ein Industrieprojekt folgen, um das System in die Anwendung zu bringen. Der Experte kann sich ein BMWi-Anschlussprojekt in zwei Jahren gut vorstellen.

3.28. Recycling

Seitens eines Experten aus der Industrie werden sich in der Zukunft vermehrt Verkäufe von Produkten durch Abo-Modelle ersetzt. Da der Hersteller nur noch eine Produktfunktion anbietet, bleibt er Besitzer des Produktes, welches er allein aus Eigeninteresse mit wertigen, robusten und langlebigen Bauteilen auslegen wird. Das Geschäft mit Ersatzteilen würde entfallen, weshalb die Marche allein davon abhinge, möglichst wenig bzw. günstig zu reparieren. Mit steigender Befürwortung nach mehr Ressourceneffizienz könnte dieser Trend noch mehr an Fahrt aufnehmen. Die Relevanz des Recyclings wird in Zukunft nicht nur aufgrund der Nachhaltigkeit, sondern auch aufgrund steigender Werkstoffpreise sowie Nachfrage nach nicht beliebig verfügbaren Rohstoffen weiter zunehmen. Forschungstechnisch sollte diese Thematik schon heute intensiver angegangen werden.

3.29. CO₂-Emissionen bei der Herstellung von Beschichtungen und Schmierstoffen

Seitens der Schmiermittelindustrie ist die Einsparung an CO₂ in der Nutzungsphase so dominant, dass eventuell höhere auftretende CO₂-Emissionen bei der Herstellung von effizienteren Schmierstoffen vernachlässigbar sind. In einer Studie eines namenhaften Chemiekonzerns über Hydraulikfluide verschiedener Leistungsstufen (gerechnet auf 10.000-30.000 Betriebsstunden) dominierte z.B. die Nutzungsphase bereits massiv bei einer Effizienzsteigerung von nur 0,5 %.

Die Forschung ist der Meinung, dass es sich lohnt, gerade in der Entwicklung neuer High-Tech-Produkte mit Blick auf Energieeffizienz schon zu Beginn mit einem großen interdisziplinären Team zu arbeiten. Die dadurch entstehenden Kosten und auch der zusätzlichen benötigte Energieaufwand bei der Entwicklung durch Misserfolge würden um ein Vielfaches durch die resultierende energiesparende Nutzungsphase¹⁷ ausgeglichen.

Im Falle von PVD-Beschichtungen kann die Beschichtungstechnik hierzu nur schwer Aussagen treffen, da Beschichtungshersteller nicht das System (Betriebsbedingungen) für das zu beschichtende Bauteil auslegen und somit keine Vergleiche möglich sind. Subjektiv gesehen wiegt der Aufwand bei der Herstellung die Nutzungsphase aber auf. Während eines Beschichtungsvorgangs können mehrere Teile gleichzeitig beschichtet werden: Zahnräder mit einem Durchmesser von 50 cm sind hierbei kein Problem (für Windkraft sind sie teils noch größer; Automobilbereich 10-30 cm, wobei letzteres für den Rennsport Formel E verwendet wird). PVD-Beschichtungen erfolgen in hochenergetischen Prozessen, welche nach Möglichkeit durch grüne Energie realisiert werden sollen. Jedoch ist hier eine zuverlässige Energieversorgung unabdingbar, weshalb bereits ein Stromausfall von 1s den Komplettausfall aller Beschichtungsanlagen zur Folge hätte. Deshalb wird im Fall der Beschichtungsindustrie die Energieversorgung am Standort im europäischen Ausland durch ein eigenes Kraftwerk realisiert. Backuplösungen funktionieren nicht, da Energiespeicher zu träge sind und keine konstante Stromzufuhr ermöglichen. Die Beschichtungsanlagen werden durch ein unternehmenseigenes Entwicklungsteam selbst konzipiert und fortwährend effizienter und nachhaltiger gestaltet. Rückführbare bzw. weiterverwendbare Energie ist nicht vorhanden, da keine nennenswerte Wärme austritt – vergleichbar mit einer Pulverbeschichtung mittels thermischen Spritzens (Plasmaspraygun direkt in Bauteilnähe).

3.30. Generelle Umsetzungsschwierigkeiten

Laut Schmierstoffindustrie können bereits jetzt mit bekannten Bauteilen, welche nicht dem High-Tech-Bereich zugehörig sind (z.B. eine drehzahlgeregelte Pumpe), kostengünstig Einzelmaßnahmen durchgeführt werden. Leider scheint das bisher noch nicht überall umgesetzt worden zu sein. Aus Sicht eines Maschinenbauherstellers werden selbst langfristige, effizientere Produktionsumstellungen ohne bauliche Änderungen nicht durchgeführt, weil die dafür erforderliche Verwendung eines wertigeren Schmierstoffs zunächst teurer erscheint. Hierfür werden die bisherigen betrieblichen Strukturen, (wie Trennung der Einkaufskostenstelle von der Energiestelle) verantwortlich gemacht. In dem geschilderten Beispiel wurde eine Gesamtkostenanalyse bzgl. aller Motoren- und

¹⁷ Beispiel: Niederdruckturbine für das GP7000 Triebwerk für den Airbus A380 (MTU). Das Triebwerk verbraucht 1 % weniger Treibstoff als der Mitbewerber, was pro Jahr und Flugzeug ca. 1 Mio. Dollar bedeutet (das wurde seitens Airbus dem Mitbewerber bestätigt).

Getriebekombinationen in den Produktionsanlagen (mehrere hundert Geräte) eines namenhaften deutschen Automobilherstellers durchgeführt. Das Einsparungspotenzial an Strom war enorm und die Investitionskosten wären schnell amortisiert worden. Studien sollen belegen, dass oft anfänglich teure Produkte sich langfristig als günstiger herausstellen (über die Produktlaufzeit). Hierzu gilt es das Bewusstsein zu schärfen, wieviel Strom und CO₂ durch solche Maßnahmen einsparbar werden. Das ist auch die Grundvoraussetzung dafür, dass Ansätze aus z.B. den BMWi-geförderten Projekten CHEOPS³, PROMETHEUS etc. in der Industrie genutzt werden.

Dadurch, dass CO₂ direkt mit einem Preis assoziiert wird, können die Effizienzvorteile auch bei der Kalkulation von neuen Investitionen im Bereich der Produktion berücksichtigt werden.

3.31. Mögliche Studien und Leitfäden

Da sich das Potenzial eines besseren Verschleißschutzes und durch lebensverlängernde Maßnahmen bisher nur recht grob abschätzen ließ, wurde seitens der Forschung explizit ein gefördertes Projekt vorgeschlagen, in welchem die Stoffströme weiter präzisiert werden. Bisherige Quellen, wie z.B. OECD, Vereinte Nationen und Internationale Energieagentur liefern zwar bereits Zahlen, welche aber nicht kohärent sind. Der Tribologie können anhand der Stoffströme entsprechende Nutzwerte und somit auch CO₂-Werte zugeordnet werden. Auch eine Umrechnung von Gigatonnen in Energie (z.B. Exajoule) könnte somit erfolgen. Die Stahl-, Aluminium- sowie Siliziumindustrie liefert bzgl. der CO₂-Werte bereits sehr präzise Zahlen. Daten seitens der Kunststoffindustrie sind dagegen eher vage. In diesem Zusammenhang gilt es eng mit den entsprechenden Industrieverbänden zusammen zu arbeiten. Eine Förderung mit 400.000 – 500.000 Euro könnte für die Quantifizierung ausreichend sein.

Die Schmiermittelindustrie empfiehlt deutschlandweit in Hinblick auf eine Erleichterung der Umstellung zu energieeffizienteren Maßnahmen eine Ausarbeitung neuer Richtlinien für die Industrie. Mit Erstellung eines Leitfadens, für den vorwiegend viel Recherchearbeit notwendig ist, kann Anwender:innen die Einsparung für Unternehmen aufgezeigt werden. Zunächst müsste auf bereits vorhandene Ergebnisse Zugriff ermöglicht werden. Anhand des Beispiels Hydraulik wäre zunächst in Erfahrung zu bringen, welche Architektur und welche Maschine vorliegen und wie diese sich kategorisieren ließen. Des Weiteren müssten weitere Ergebnisse für bestimmte Kombinationen aus unterschiedlichsten Maschinen und Architekturen erzeugt werden, damit eine allgemeingültige Aussage getroffen werden kann. Schlussendlich könnten Unternehmen anhand solcher Empfehlungen z.B. das Schmiermittel¹⁸ mit der passenderen Viskosität wählen, welches durch entsprechende Additive bei den geforderten Temperaturen funktionsfähig läuft. Das geschätzte Energieeffizienzpotenzial wird auf 5 % geschätzt. Der Effizienzgewinn wäre in der Breite durchführbar, da hierfür nur ein Ölwechsel erforderlich ist. Gerade in der Produktionslandschaft könnte durch den Masseneffekt der Beitrag durch die Einsparung bedeutend sein.

3.32. Zusammenfassung der Einzelgespräche

Die Meinungen mit Fokus auf Energieeffizienzpotenziale in der Industrie und der Forschung der im Rahmen des Begleitforschungsprojekts EE4InG befragten Expertinnen und Experten spiegeln auf den

¹⁸ In dem Zusammenhang betonte die Forschung, dass ein Einsatz von bestimmten Grundöltypen auch abhängig vom Dichtungsmaterial sein kann. Hierfür gilt es Ölempfehlungen auch auf Dichtungen abzustimmen um Leckagen, Dichtungsunverträglichkeiten sowie ineffiziente Systeme und die damit verbundenen Reklamationen zu vermeiden.

ersten Blick die bereits 2017 beschriebenen Trends des „2017 Report on Emerging Issues and Trends in Tribology and Lubrication Engineering“ der „Society of Tribologists and Lubrication Engineers, STLE“ wider.

Während jedoch 2017 noch Uneinigkeit bezüglich der sich durchsetzenden Technologien im Bereich der Mobilität bestand, zeichnet sich aus den geführten Gesprächen und Interviews beim PKW ein Trend zur E-Mobilität ab, zumindest in Europa. Jedoch wird für eine maximale Marktdurchdringung immer noch die größte Herausforderung in der Reichweiterhöhung gesehen. Da in manchen Regionen der Welt von einer mangelhaften flächendeckenden Ladestruktur sowie nicht genügender Strommenge zum Laden auszugehen ist, werden auch Optimierungen im Verbrennungsmotor womöglich weiterverfolgt. Bei LKWs und Flugzeugen zeigen sich hingegen eher Themen wie Wasserstoff und E-Fuels auf. Auch Weiterentwicklungen im Bereich der Schmiermittel sowie Fette sind für neuartige Technologien in der Mobilität entscheidend.

Im Bereich Energie bestätigen die Expertinnen und Experten die hohen Investitionskosten im konkreten Falle von Windkraftenergieanlagen. Zwar werden die hochbeanspruchten Lager bereits jetzt schon tribotronisch überwacht, jedoch kann noch immer nicht die maximale Leistung aufgrund der zu geringen Langzeitstabilität einiger Materialien abgerufen werden. Hier sehen die Befragten Potenziale in sowohl verbesserter, aber kostspieligeren Tribotronik, wie auch in neuartigen Materialien für z.B. Lager. Hingegen der noch in Jahr 2017 bemängelten zu günstigen fossilen Rohstoffe wird zumindest in Deutschland aufgrund der CO₂-Besteuerung diese bereits teurer. Somit könnte z.B. der Kohlestrom bereits vor seinem offiziellen politischen Aus schon vorher vom Markt verschwinden und abhängig von der Ausrichtung der nächsten Bundesregierung die Windenergie an Fahrt gewinnen.

Mit der Tribotronik gibt es laut Aussage der Expertinnen und Experten bereits gute Überwachungsmethoden, um die Effizienz bei der Fertigung zu steigern. Hier entscheidet aber schlussendlich immer noch die Wertigkeit des Produkts, wie umfänglich Sensorik und Robotik eingesetzt werden. Es wurde auch bestätigt, dass nicht nur in Produktionsindustrie, sondern branchenübergreifend aufgrund des Preisdrucks weiterhin veraltete und energieineffiziente Technik genutzt wird. Oftmals sparen Unternehmen hier zudem am falschen Ende: so kommen zum Beispiel weiterhin ineffizientere Schmiermittel zum Einsatz, obwohl ein Wechsel zu hochwertigeren trotz höherer Investitionskosten langfristig in allen Belangen nachhaltiger wirken und Kosten sparen würde. Ein Umdenken scheint schrittweise einzusetzen, sei es dadurch, dass Unternehmen bürokratische Hindernisse zwischen Produktion und Kostenstelle abbauen, oder durch die zunehmenden Nachhaltigkeitsdebatten vermehrt Handlungsbedarf gesehen wird. Einige interviewte Expertinnen und Experten sehen auch mit Hilfe der Additiven Fertigung eine neue Chance für Werkstoffen mit bisher limitiertem Einsatz. In designten Verbundwerkstoffen könnten somit alle positiven Eigenschaften der einzelnen Materialklassen bestehende Anwendungen optimieren oder sogar neue ermöglichen. Generell wird noch viel Effizienzpotential in der Optimierung einzelner Bauteile sowie im System mit Schmierstoffen gesehen.

Im Bereich Simulation und Modellierung schlummert für die befragten Expertinnen und Experten das größte Potenzial für die zukünftige Tribologie. Durch die Verknüpfung des atomaren Verhaltens mit großflächigem Systemverhalten und dem Verständnis, was genau in einem Tribosystem passiert, kann eine neue Grenze der Tribologie geschaffen werden. Hiermit würde die Effizienz zukünftiger Systeme

nochmal auf ein neues Level gehoben. In den einzelnen Gesprächen und Interviews wurden Untersuchungen von Oberflächenfaktoren auch durch immer leistungsfähigere Simulationen als notwendig erachtet. Der Trend im STLE-Bericht bestätigt diesen Eindruck und stellt in Aussicht, dass ein solcher Entwicklungsprozess zwar über 10 Jahre dauern kann, das Tempo jedoch stark von den Förderungen abhängt.

3.33. Unterstützende Themenauswahl für das Fachgespräch

Für das Fachgespräch wurden anhand der Expertinnen- und Expertenmeinungen zu Forschungsideen mit Bezug auf Energieeffizienz in der Industrie- und dem Gewerbe folgende Themen¹⁹ stichpunktartig zusammengefasst. Diese sollten unter Anderem in der großen Diskussionsrunde auf Relevanz und Machbarkeit diskutiert werden.

1. Wechselwirkung von Oberfläche und Schmierstoff (siehe 3.18)

Relevante Disziplin:	Simulation, Chemie, Werkstofftechnik, Physik
Gegentand der Forschung:	Mechanismen und gegenseitige Beeinflussung im Tribosystem
Ziel:	maximale Energieeffizienz und Lebensdauer
Schwierigkeit:	sehr hoch
Branchen	branchenübergreifend, Grundlagen

2. Tribokonditionierung von Werkstoffen (siehe 3.19)

Relevante Disziplin:	Simulation, Chemie, Werkstofftechnik
Gegentand der Forschung:	Veränderungen durch Einlauf und deren Reduzierung
Ziel:	Verschleiß und Reibung in System optimieren, Lebensdauer erhöhen
Schwierigkeit:	sehr hoch
Branchen	Fertigungsindustrie und Maschinenbau

3. Keramik als Gradientenwerkstoff (siehe 3.22)

Relevante Disziplin:	Keramik, Additive Fertigung
Gegentand der Forschung:	Gradierung einer Keramik im Verbund
Ziel:	neue Anwendungsbereiche, Kombination tribologischer Vorteile
Schwierigkeit:	hoch
Branchen	unbekannt

4. Leitfaden für Schmierstoffe (siehe 3.31)

Relevante Disziplin:	Chemie, Maschinenbau
Gegentand der Forschung:	Handbuch zur Umstellung auf kompatible Schmiermittel
Ziel:	Energieeffizienz in der Produktion
Schwierigkeit:	mittel
Branchen	branchenübergreifend

5. Mechatronische Kontakte – Steckverbindungen (siehe 3.21)

Relevante Disziplin:	Maschinenbau, Mechatronik
Gegentand der Forschung:	Optimierung der Verbindung und genauere Prüfstände
Ziel:	Zuverlässigkeit und Lebensdauererhöhung
Schwierigkeit:	mittel
Branchen	Robotik, Windkraft, mechatronische Anwendungen

6. Wasserbasierte Schmiermittel (siehe 3.17)

Relevante Disziplin:	Chemie, Simulation, Werkstofftechnik
Gegentand der Forschung:	Mechanismen und Reaktion mit Umgebung (z.B. Korrosion)
Ziel:	nachhaltige Schmiermittel und Reibungsreduzierung
Schwierigkeit:	hoch
Branchen	branchenübergreifend

¹⁹ Diese Forschungsthemen wurden in den einzelnen Gesprächen am deutlichsten konkretisiert, wobei weitere Themen und Anwendungen wie Pumpen, Hydraulik deshalb aber nicht von der Diskussion ausgeschlossen waren.

4. Fachgespräch

Insgesamt nahmen 27 Teilnehmende den Termin des virtuellen Fachgesprächs am 01.09.2021 wahr. Neben Expertinnen und Experten aus der Forschung beteiligten sich Industrievertreterinnen und -vertreter an der dreistündigen Onlineveranstaltung. Mit drei externen Beiträgen wurde die Bedeutung der Tribologie aus der Perspektive des Kurators des Forschungsfeldes Tribologie, der Gesellschaft für Tribologie e.V. (GfT) sowie der Schmierstoffindustrie aufgezeigt. Abschließend wurden anhand von Handlungsansätzen zukünftige Schwerpunkte diskutiert. In seinem Beitrag gewährte Herr Dr. Weihnacht, Kurator des Forschungsfeldes Tribologie, Einsicht in die seitens des BMWi geförderten Projekte der letzten 12 Jahren. Herr Dr. Woydt von der GfT betonte anschließend die neben dem Energieeinsparpotenzial durch Reibungsminimierung zukünftig zunehmende Bedeutung der Ressourceneffizienz durch Verschleißreduzierung und der Lebensdauererhöhung. Im letzten Impulsvortrag schilderte Herr Luther die Entwicklung der Tribologie aus Sicht der Schmierstoffindustrie. Kapitel 4.4 und 4.5 beinhalten zusätzlich die Ergebnisse aus den Nachgesprächen, welche abschließend an das Fachgespräch mit den einzelnen Expertinnen und Experten zur Vollendung des Forschungsberichts stattfanden.

4.1. BMWi-Projekte

Das Forschungsfeld Tribologie ist bereits seit 12 Jahren in wechselnder Besetzung aktiv. Herr Dr. Weihnacht nimmt hierbei die Position des Kurators ein und fungiert als Bindeglied zum BMWi und Projektträger Jülich. Der Fokus des Forschungsfeldes liegt auf der Senkung von Reibungsverlusten in mechanischen Gleitsystemen und somit auch auf der CO₂- sowie Energieeinsparung. Im Vordergrund stehen hierbei konkrete Endprodukte und das damit verbundene grundlegende Verständnis der daran geknüpften tribologischen Vorgänge. Insbesondere aufgrund ihrer Interdisziplinarität fordert Tribologie eine Vernetzung von Forschungsschwerpunkten und strebt weitere Übertragungsanwendungen bereits vorhandener Entwicklungen an.



Abbildung 4: Einteilung tribologischer Fragestellungen

In einem Workshop zum Forschungsbedarf im Jahr 2017 in Erlangen wurde zur Vereinfachung ihrer Komplexität die Tribologie in drei Felder gegliedert, welche von tribologischen Zuständen über Einzelbetrachtungen bis hin zu globalen Lösungsansätzen reichen. Hieraus resultierten die Expertenempfehlungen für das 7. Energieforschungsprogramm. Da zunehmend festgestellt wurde,

dass Einzelmaßnahmen schnell an ihre Grenzen stoßen und antagonistische Effekte aufweisen, geht die Arbeitsweise in den jüngsten Projekten nun hin zu globalen Betrachtungen (siehe Abbildung 4), in welcher nicht mehr die einzelnen „Stellschrauben“ voneinander getrennt optimiert, sondern das komplette System und seine Einzelteile aufeinander abgestimmt werden.

Mit den tribologischen Zuständen beschäftigten sich zunächst die Projekte PEGASUS I+II, POSEIDON I+II, CHEOPS³ sowie EWARP, welche die Grundlagen für die globale Betrachtungen schafften. Aufbauend auf den Ergebnissen aus PEGASUS I+II können mit Hilfe des Projekts PROMETHEUS die einzelnen Komponenten durch Optimierung der Schmierstoffe, Oberfläche, Beschichtung und Abstimmung untereinander im konkreten Beispiel des Verbrennungsmotors deutlich effizienter und langlebiger arbeiten. Das jüngst startende CHEPHREN profitiert hierbei von den Resultaten aus CHEOPS³. Die Erfolge solcher Verbundprojekte zeigen auch, dass es bei Forschungsvorhaben unerlässlich ist die komplette Prozesskette (Anlagenhersteller, Komponentenzulieferer bis hin zum Endanwender) einzubeziehen.

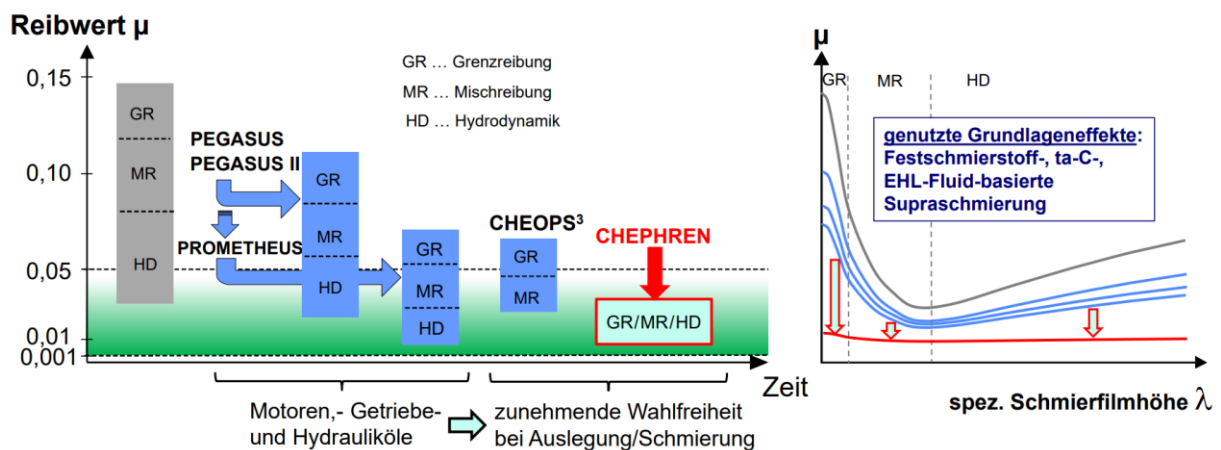


Abbildung 5: Entwicklung des Reibwertes μ in Abhängigkeit von BMWi-Projekten

Durch die verschiedenen Projekte konnte der Reibwert eines tribologischen Systems nach und nach verringert werden. Abbildung 5 zeigt die Verringerung der Reibwerte in Abhängigkeit der letzten Projekte. So wurde es bereits durch die Arbeit an PEGASUS I+II möglich die Grenzreibung unter einen Reibwert von 0,1 zu bringen, welcher vormals nur in der Hydrodynamik zu finden war. PROMETHEUS konnte durch systematische Optimierungen die einzelnen Zustände nochmals auf tiefere Reibwerte verschieben. Das im September diesen Jahres bewilligte Projekt CHEPHREN soll die Zustände der Misch- und Grenzreibung sowie Hydrodynamik sogar bis in die Bereiche der Ultra- und Supraschmierung herunterfahren. Durch die Arbeit an CHEOPS³, welches sich mit Trocken- und Minimalmengenschmierung beschäftigte, konnte gezeigt werden, dass dieses Ziel durchaus realistisch ist. Zukünftig sind unabhängig von der Schmierfilmhöhe niedrigste Reibwerte denkbar, was bei der Auslegung tribologischer Systeme mehr Freiheiten gewährt, da die Reibung in den einzelnen Anwendungen nahezu eliminiert wird. Um die immer geringer werdenden Reibwerte noch erfassen zu können, wurde Ende 2020 das Projekt SULUTRIB gestartet. Hierin soll die Messmethodik der Tribometer so weiterentwickelt werden, dass supraniedrige Reibung unter anwendungsnahen Bedingungen in Modellkontakten vermessen werden kann.

Die Entwicklungen der unterschiedlichen Projekte lassen sich folgenden (zukünftigen) Anwendungen zuordnen:

1. Verbrennungsmotor-Komponenten (Verkehr, Energieerzeugung): PEGASUS I+II sowie PROMETHEUS
2. Lageranwendungen (korrosive Bedingungen): POSEIDON I+II
3. Maschinenkomponenten (Land-, Industrie- und Baumaschinen sowie Elektroautos und – bikes): CHEOPS³ und CHEPHREN
4. Pumpenkomponenten (Wasserpumpen): EWARP
5. Messtechnik/Methodik (Tribometer-Entwicklung aufgrund niedriger Reibwerte): SULUTRIB

Die Projekte zeigen, dass die aus ihnen resultierenden Lösungsvorschläge umsetzbar sind und sie die aktuellen wirtschaftlichen sowie gesellschaftlichen Herausforderungen bewältigen (siehe Abschnitt 3.2). Der Verbrennungsmotor wird hierbei bereits hinreichend berücksichtigt, wohingegen für den Maschinenbau (z.B. Werkzeugmaschinen, Maschinen für die Papier- und Textilindustrie sowie Anlagen der Luft- und Kältetechnik) noch viel Potenzial besteht, welches zum Teil auch durch Adaption der neuen Entwicklungen aus dem Automobilbereich erschlossen werden kann. Generell ist es wichtig für diese bestehenden Lösungen den Anwendungshorizont stetig branchenübergreifend zu erweitern.

4.2. Zunehmende Bedeutung der Ressourceneffizienz

Aus Sicht der Gesellschaft für Tribologie e.V. (GfT) erfährt die Tribologie weder in der Öffentlichkeit noch bei Projektträgern und Fördermittelgebern die Aufmerksamkeit, welche für die heutige Zeit notwendig wäre. Während sich die Reibungsreduzierung direkt in niedrigeren CO₂-Emissionen bemerkbar macht, sind verbesserter Verschleißschutz und Lebensdauererlängerungen bislang noch nicht in Zahlen abbildbar. Aus diesen Gründen entschied sich die GfT zwei voneinander getrennte Studien zu entwickeln und neben dem Einfluss von Reibungsreduzierung auch Maßnahmen zur Steigerung der Rohstoffeffizienz in Form von CO₂-Einsparungen abzuschätzen. Die Studien erschienen dreisprachig und die hohen Downloadzahlen lassen auf ein zunehmendes Interesse am Thema schließen.

Um einen Überblick über den Einfluss tribologischer Maßnahmen in Form von Verschleißschutz und Lebensdauererhöhung auf die Nachhaltigkeit zu erhalten, müssen zunächst die Stoffströme bekannt sein. Zahlen liegen hier seitens internationaler Organisationen wie dem OECD, der Vereinten Nationen, internationalen Energieagenturen und verschiedener Industrieverbände zwar vor, jedoch beziehen sie sich auf Zeiträume von vor 2-3 Jahren.

Beispielsweise wurden 2017 [7] weltweit 100,6 Gt an Rohstoffen umgesetzt, wovon 92,063 Gt verbraucht und 8,6 Gt in Form von Rezyklaten bzw. 0,04 Gt als raffinierte Schmierstoffe zurückgeführt wurden. 43,834 Gt fielen hierbei auf nichtmetallische Mineralien, 9,12 Gt auf Metallerze und ca. 24,062 Gt auf nachwachsende Biomassen (Holz, Tiere, Algen und Nahrungsmittel). 15,047 Gt wurden als fossile Energieträger genutzt und auf diese wird gegenwärtig meist der Fokus im Rahmen von Nachhaltigkeitsdebatten gelegt. Die Unterteilung des weltweiten Materialverbrauchs in lang- und kurzlebige Produkte nach Abzug nicht regenerierbarer und kreislaufwirtschaftsfähigen Materialien ergibt ca. 17,6 Gt an Rohstoffen, die durch tribologische Maßnahmen potenziell effizienter genutzt werden könnten. Wie sind diese Massen zu differenzieren? Sollte ein älteres Auto mit höheren Verbrauchswerten bzw. CO₂-Emissionen nochmals aufgearbeitet werden (unter Umständen zur

Einhaltung von Abgasvorschriften) oder wäre eine Neuanschaffung nachhaltiger? Im Falle des Versagens eines Lagers muss berücksichtigt werden, inwiefern die Masse des Subsystems betrachtet wird, da mit dem Ausfall unter Umständen auch das Getriebe getauscht werden müsste und das als Motorschaden womöglich das gesamte Auto betrifft. Welche Masse müsste zum Beispiel bei einem Ausfall einer Batterie im Elektrofahrzeug erfasst und wieviel davon könnte der Tribologie zugeordnet werden?

Um die wichtigsten Werkstoffe und Materialien, welche sowohl direkte als auch indirekte tribologische Relevanz haben, in Beziehung zu CO₂-Werten zu setzen, können branchenabhängig anhand der CO₂-Äquivalenten (CO_{2eq}) Abschätzungen getroffen werden. Hierfür liefert die Aluminium- und Stahlindustrie gute, valide und realistische Zahlen. Mit den bekannten Tonnagen aus den Jahren 2018²⁰ und 2019 können den vier häufigsten Materialien Zement, Stahl, Kunststoff und Aluminium bei einer Gesamtproduktion von ca. 6,4328 Gt zwischen 8,94 und 11,96 Gt CO_{2eq} zugeordnet werden. Bei einem globalen CO_{2eq}-Ausstoß von 47,55 Gt CO_{2eq} [9] (davon ca. 36,65 Gt CO₂ [10]) verursacht die Rohstoffgewinnung und -verarbeitung somit einen großen Anteil. Insgesamt machen die vier Werkstoffe ca. 96,8% der im Vortrag präsentierten weltweiten Tonnagen²¹ aus. Das CO_{2eq}-Einsparpotenzial durch Erhöhung der Lebensdauer und verbesserten Verschleißschutz sowie der damit verbundenen Verringerung des jährlichen Bedarfs an Material kann somit bedeutsam sein. Schon eine durchschnittliche um 12,5%²² erhöhte Rohstoffeffizienz könnte den Ausstoß um ca. 1 bis 1,33 Gt CO_{2eq} reduzieren. Bei einer 66%²² Erhöhung könnte der globale CO_{2eq}-Ausstoß um 10% verringert werden.

Präzisere Zahlen zu realistischen Einsparpotenziale müssen zunächst über weitere Studien erarbeitet werden. Es lassen sich nicht alle Mengen an Material beliebig effizienter ausnutzen, sofern sie überhaupt tribologisch relevant sind. So mag eine Berechnung für Wolfram leicht fallen, da ca. 70% als Wolframcarbid als Verschleißschutz genutzt werden. Schwieriger wird es allerdings durch den sich verändernden Strommix (Beispiel Aluminiumbranche), welcher Einfluss auf die Äquivalente hat und sich von Land zu Land unterscheidet. Im Fall von Zement geht ein Großteil in Strukturteile wie Gebäude und ist damit tribologisch gesehen nicht relevant. Mit ca. 22 - 33% (China bzw. USA) geht Zement Form von Beton in den Straßenbau zur Instandsetzung schnell verschleißender Straßendecken. Experten sehen hier eine Verdopplung der Lebensdauer als realistisch. Im Bereich Stahl fallen Stahlträger im Gebäudebau weg, jedoch könnten in der Haustechnik z.B. Lüfter, Ventilatoren sowie Pumpen langlebiger und tribologisch beständiger ausgelegt werden.

Der Beitrag im Rahmen des Fachgesprächs konnte bereits mit vagen Zahlen aufzeigen, dass neben der Reibungsreduzierung auch die Erhöhung der Rohstoffeffizienz in Form von verschleißbeständigeren Materialien mit längerer Haltbarkeit eine tribologische Maßnahme sein kann, um zukünftige Systeme energieeffizienter zu machen und den CO₂-Ausstoß merklich zu verringern. Das Potenzial, welches in der Rohstoffeffizienz steckt, wird auf bis zu 200% der mittelfristigen Reibungsreduzierung geschätzt. Für weitere Studien werden unter anderem nuancierte und aktuelle Flussdiagramme benötigt, anhand derer die Potenziale besser zu bestimmen wären, um Fördermittel zukünftig noch gezielter und effizienter einsetzen zu können.

²⁰ Durchschnittliches Verhältnis einer Tonne Primärmaterials vom Abbau/Gewinnung bis zur Verarbeitung lag im Jahr 2018 bei 1,39 – 1,86 CO_{2eq}/Tonne

²¹ Mitaufgezählt wurden auch: Neodymium, Lithium, Wolfram, Molybdän, Mangan, Silizium, Titan, Nickel, Chrom, Magnesium, Blei, Zink, Kupfer, Bitumen

²² Rechenbeispiele seitens des Autors, unter der Voraussetzung, dass der Bedarf an Produkten nicht (durch eine steigende Weltbevölkerung) zunimmt

4.3. Tribologie aus Sicht der Schmierstoffindustrie

Die Inlandsablieferungen von Schmierstoffen lagen in Deutschland 2019 bei ca. 976.879 Tonnen, von denen rund 25% in Form von Motorölen verwendet wurden. Den größten Anteil des Marktes bildet der industrielle Bereich mit z.B. Prozess-, Maschinen-, Hydraulik- und Getriebeöle sowie Industrieöle ohne Schmierfunktion. Basisöle kommen auf 13% und Schmierfette haben mit derzeit 4% einen noch sehr geringen Marktanteil, welcher jedoch durch den Wandel zu mehr Elektromobilität zulasten der Motoröle in den nächsten 10- 20 Jahren zunehmen wird.

Aus Sicht des Schmierstoffherstellers rücken zukünftig die verschiedenen Industriebereiche, welche bisher aufgrund geringen Volumens nicht als relevant erachtet wurden, vermehrt in den Fokus. Aufgrund des politischen Drucks und der CO₂-Gesetzgebung in den letzten Jahren wurde bisher vor allem die Automobilindustrie in den Blick genommen, um die Effizienz zu steigern und CO₂-Werte zu reduzieren. Unter anderem aus diesem Grund werden Motorenöle stetig dünner, was ab einem gewissen Punkt wiederum die Gefahr birgt die Mischreibungsanteile und damit den Verschleiß in konventionellen Materialien zu erhöhen. Somit müssen Schmierstoffe entweder mit Antiwear-Additiven, speziellen Friction-Modifiern und neuartigen Polymeren versetzt werden oder sollten nur mit tribologisch angepassten Bauteilen in Kontakt kommen. Hier muss bereits im Anfangsstadium der Konstruktion interdisziplinär zusammengearbeitet werden, um das tribologische System aus Schmierstoff und verschleißschützenden Schichten entsprechend auslegen zu können (siehe auch PROMETHEUS).

Des Weiteren hat die Optimierung des Einlaufverschleißes dauerhafte Auswirkungen auf Langzeitenergieverluste im tribologischen System. Gerade die ersten Stunden im Betrieb haben maßgeblichen Einfluss auf den langfristigen Verbrauch und den Verschleiß und sind somit auch mitentscheidend für die Lebensdauer. Versuche die Zylinderlaufbahn mit verschiedenen Bearbeitungsschritten (z.B. Honen, Polieren, Feinschleifen und Laserhonen) in Kombination mit verschiedenen Kühlschmierstoffen zu optimieren wiesen deutliche Unterschiede auf. So konnte z.B. die Verschleißgeschwindigkeit in den ersten Stunden des Einfahrprozesses im Vergleich zur ursprünglichen Bearbeitung bei ca. 70 nm/h durch die Laserhonung auf 5 nm/h reduziert werden. Die optimierte Bearbeitung in der Anfangszeit sorgt somit für eine höhere langfristige Effizienz des Motors aufgrund des geringeren Verschleißes. Im Gegensatz zu der Automobilindustrie, welche grundsätzlich Einfahrhinweise gibt, sind solche in industriellen Anwendungen weniger üblich. Hilfreich wäre somit zukünftig den Einlaufverschleiß in die Produktion vorzulagern.

Zukünftig könnte Wasser die Basis eines neuen Grundschmierstoffs werden. Der Grund hierfür liegt nicht im gesellschaftlichen Druck bzgl. einer zukünftigen Abkehr vom Öl, sondern vielmehr in den technischen Vorteilen, wie z.B. durch die Kühlungswirkung und geringe Reibung. Jedoch können wasserhaltige Schmierstoffe nicht ohne weiteres als Drop-In-Lösung verwendet werden. Hierfür müssen die technischen Probleme, welche Wasser mit sich bringt interdisziplinär durch entsprechende Kombination aus Material und Konstruktion behoben werden. Große Effizienzpotenziale werden sowohl auf der Straße (E-Mobilität) wie auch in technischen und industriellen Anwendungen gesehen.

4.4. Hemmnisse bei Übertragung und Entwicklung von effizienteren Technologien

Die Schwierigkeiten neue Technologien zu entwickeln und vorhandene effizientere technische Lösungen sowohl in der gleichen Branche als auch branchenübergreifend einzusetzen, wurden bereits in den Einzelgesprächen besprochen, bevor sie in den Vorträgen sowie den nachfolgenden Diskussionen ausführlich behandelt wurden.

Es existieren zum Teil Vorbehalte bei Einführung neuer Technologien, unter anderem aufgrund negativer Erfahrungen in der Vergangenheit. Die Entwicklungsarbeiten (Auslegung, Werkstoff, Schmierstoff, Beschichtung) sind aufwendig sowie zeitintensiv und scheitern oft an der geringen Risikobereitschaft der Unternehmen, was sowohl personell als auch durch die hohe Komplexität tribologischer Maßnahmen bedingt sein kann. Bei größeren Projekten mit mehreren Beteiligten ist es durchaus möglich, dass es mehrere Jahre dauert, bis der Idee die Umsetzung folgt. So steigen zunächst begeisterte Partner eines potenziellen Verbundprojekts aufgrund des langwierigen Planungsprozesses oder der eigenen Unternehmenspolitik oftmals verfrüht aus. Neue Technologien sind zusätzlich mit sehr hohen Investitionskosten verbunden, welche sich, sofern sie später tatsächlich erfolgreich eingesetzt werden können, erst in ein paar Jahren amortisieren – eine Beschichtungsentwicklung kann z.B. schnell eine Größenordnung von Millionen Euro erreichen. Die Kosten-Nutzen-Rechnung fällt erst langfristig positiv aus, weshalb eine Entwicklung mit hohen Investitionskosten erst bei zunehmender Stückzahl wirtschaftlich wird. Dies ist auch ein Grund dafür, weshalb die Automobilindustrie bisher die Rolle des Vorreiters bei tribologischen Entwicklungen einnehmen konnte. Bislang rentierte sich zudem für viele Unternehmen sowie ihre Kundschaft eine energieeffizientere Lösung unter anderem aufgrund der verhältnismäßig günstigen Energiepreise der letzten Jahren nicht in dem Maße sich merklich zu mehr Sparsamkeit zu bewegen. Die fehlenden Anreize könnten nun durch den steigenden CO₂-Preis und dem gesellschaftlichen Druck zu mehr Nachhaltigkeit und Umweltschutz entstehen.

4.5. Forschungsbedarfe und Handlungsansätze für zukünftige Schwerpunkte

Bereits in den zahlreichen Einzelgesprächen vor dem Fachgespräch zeichnete sich ab, dass es noch viele ungenutzte Möglichkeiten zur Verbesserung tribologischer Systeme gibt. Da die Tribologie überall dort relevant ist, wo sich Bauteile gegeneinander bewegen, bieten sich unzählige Einsatzbereiche an, die sich in der Stückzahl zum Teil erheblich unterscheiden. Dementsprechend gilt es Technologien mit hohem Massecharakter zu priorisieren und durch Vernetzung auch branchenübergreifend einsetzbar zu machen. Die einzelnen Forschungsideen sind in Abschnitt 3 ausführlich beschrieben und beinhalten auch Themen, welche anderen Forschungsfeldern zugeordnet werden können: so kann es zu Überschneidungen in den Bereichen von Wasserstoff und Windenergie kommen.

Im Fachgespräch wurden zur Unterstützung der Diskussion die ersten vier der sechs vorgeschlagenen Handlungsbedarfe besprochen. Einigkeit besteht darin, dass für das tribologische Verständnis noch viel Forschungsarbeit notwendig ist. Mit dem Wissen über die Wechselwirkungen gerade in den oberflächennahen Bereichen (Nanometerbereich) zwischen den Kontakten, könnten zukünftige Auslegungen noch verschleiß- und reibungsärmer gestaltet werden und der Einlaufverschleiß deutlich reduziert werden (siehe Handlungsbedarfe 1 und 2 auf Seite 29). Einigkeit bestand auch darüber, dass für die zukünftige Arbeit des Forschungsfelds Tribologie konkrete Anwendungen und Produkte im Vordergrund stehen müssen. Das Verständnis tribologischer Vorgänge (z.B. mittels Simulation) ist hier

eher Mittel zum Zweck, genügt allein genommen nicht und muss über andere Grundlagenförderprogramme, wie z.B. durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), finanziert werden. Bei der Initiierung neuer Projektideen steht also zwingend der erreichbare CO₂-Einsparungseffekt in den prognostizierten Anwendungen im Vordergrund. Initial sind somit Anwendungen mit hohem Reibungsminderungspotenzial und möglichst großer Verbreitung in der Industrie zu suchen. Somit werden von den Beteiligten des Fachgesprächs und der Einzelinterviews für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsvorhaben fernab der Grundlagenforschung priorisiert Maßnahmen zur branchenübergreifenden Adaptierung empfohlen, welche im besten Fall auch in großer Stückzahl zur Anwendung kommen.

Sowohl in den Vorträgen wie auch in den Diskussionen des Fachgesprächs und der nachfolgenden Einzelgespräche wird das **größte Energieeffizienzpotenzial in den Bereichen Kompressoren, Kühl- und Kältetechnik, Hydraulik, Wärmepumpen und Elektroantrieb sowie E-Mobilitätskomponenten** gesehen. Gerade für Hub-Kolben-Anwendungen, welche der Technik im Verbrennungsmotor sehr ähneln, könnte durch weitere Forschungs- und Entwicklungsprojekte bisherige Errungenschaften aus dem Automobilbau adaptiert werden. Das BMWi hat hierfür bereits durch die Projekte PEGASUS I+II und PROMETHEUS erste Grundvoraussetzungen geschaffen, welche den entwickelten technischen Lösungen eine baldige Marktdiffusion ermöglichen. In diesem Zusammenhang wurde in einem der nachfolgenden Gespräche nochmals die Wichtigkeit der Weiterentwicklung tribologischer Beschichtungen hervorgehoben. Gerade Plasmabeschichtungen wie diamantartiger Kohlenstoff (DLC), Hartstoffschichten sowie triboaktive Schichten stehen neben der Schmierstoffentwicklung an der Spitze einer langen Entwicklungskette tribologisch belasteter Komponenten im Verbrennungsmotor (z.B. Kraftstoffpumpe, Einspritzung, Ventiltrieb, Kolbenring und Kolbenbolzen). Die dort auftretenden kritischen Kontaktbedingungen können nur mit einem perfekt abgestimmtem tribologischen System beherrscht werden. Dasselbe gilt für Anwendungsbereiche außerhalb der Automobilindustrie, in welchen das Optimum erreicht werden soll. Die Herausforderungen in der Schichtentwicklung liegen in der Anpassung an neue Materialien (Kunststoff, Keramik, Verbundwerkstoffe), Konturen und topografische Anforderungen. Für eine synergistische Reibungsoptimierung ist eine konsistente Abstimmung von Schmierstoff- und Schichtentwicklung unerlässlich.

Die Beteiligten des Fachgesprächs erhoffen sich zukünftig mehr Input und Zusammenarbeit seitens der Industrie, für welche aber erst eine engere und breitere Vernetzung geschaffen werden muss. Einige technische Lösungen existieren bereits, jedoch fehlen konkrete Bedarfe aus der Industrie und dem Gewerbe. Zwar wird zum Teil Interesse und die Notwendigkeit seitens verschiedenster Industriebereiche (konkret wurde hier die Kühl- und Kältetechnik genannt) signalisiert, eine vertiefte Zusammenarbeit über die Absichtserklärungen hinaus bleibt jedoch derzeit noch aus. Explizit wurde in diesem Zusammenhang gewünscht, die **einzelnen Branchen und die Forschung im Bereich Tribologie weiter zu vernetzen**, um den Austausch zu vereinfachen und auch den Kontakt zu Industrieunternehmen, welche bislang nichts von den Möglichkeiten durch tribologische Maßnahmen wissen, aufzubauen und zu vertiefen. Das Forschungsfeld Tribologie selbst hat diesbezüglich weder personell noch zeitlich die Möglichkeit ein so breites Netzwerk aufzubauen, zu organisieren und zu pflegen, weshalb ein entsprechendes Projekt von den Beteiligten der Einzelgespräche und des Fachgesprächs befürwortet wird.

Eine Art Schmierstoff-Leitfaden bzw. -Handbuch könnte Energieeffizienzpotenziale für Anwender von Maschinen direkt nutzbar machen. Hier ist nicht die Tribologie selbst das Hindernis, sondern vielmehr die Unkenntnis bzw. fehlende Ansprechpersonen. Schon allein durch die Verwendung qualitativ hochwertiger Öle in den in der Industrie weit verbreiteten Aggregaten könnten kurzfristig ohne großen Aufwand Energieeinsparungen im Bereich von 2-5% erreicht werden. Zum einen werden weniger Strom oder fossile Energieträger benötigt, zum anderen reduziert sich die Betriebstemperatur. Kürzere Anlaufzeiten ermöglichen Prozessänderungen und bessere Bauteilqualität. Dieses Potenzial scheint im Maschinenbau noch ungenutzt zu sein. In der Regel werden höherwertige Schmierstoffe nur aus Zwang aufgrund von notwendigen hohen Betriebstemperaturen verwendet. Solche Industrierichtlinien und Leitfäden könnten durch Zusammenarbeit von Industrieverbänden geschaffen werden. Der nächste Schritt ist mittels Monitoring die Wechselwirkung von Systemen und Schmierstoffe in der Breite zu erfassen. Durch den Aufbau zu einer großen Datenbank (auch mit Erkenntnissen aus vergangenen Projekten) können die einzelnen Daten für die Simulation nutzbar gemacht werden, um zukünftig Vorhersagungen über die Lebensdauer und den Verschleiß machen sowie Mechanismen systematisch für weitere Entwicklungen betrachten und verstehen zu können. In diesem Zusammenhang wurde bereits das Projekt i-TRIBOMAT auf EU-Ebene ins Leben gerufen. Mit Auslaufen des Projekts sollte diese Thematik national weiterverfolgt werden.

5. Zusammenfassung

Die Tribologie beschäftigt sich mit Reibung, Schmierung und Verschleiß und erfordert tiefgehende Kenntnisse aus den Bereichen Physik, Chemie sowie weiteren Ingenieurwissenschaften. Nur durch eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit können tribologische Systeme für ihren Anwendungsfall umfassend optimiert und Phänomene der dort stattfindenden Vorgänge verstanden werden.

Das BMWi hat daher in den letzten 12 Jahren tribologische Fragestellungen mit mehreren Verbundprojekten gefördert, wobei mit den Forschungsprojekten PEGASUS I+II, POSEIDON sowie CHEOPS³ zunächst tribologische Zustände im Vordergrund standen. Mit den Projekten PROMETHEUS (2019 – 2021) und dem im September 2021 gestarteten CHEPHREN werden nun vermehrt globale Lösungsansätze verfolgt, da zunehmend festgestellt wurde, dass Einzelmaßnahmen schnell an ihre Grenzen stoßen und antagonistische Effekte aufweisen. Für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten steht somit die Anwendung bzw. das Produkt im Vordergrund.

Der Fokus der Forschung lag bislang vermehrt auf der Reduzierung der Reibung. Die von der Gesellschaft für Tribologie (GfT) im Jahr 2019 veröffentlichte Studie zeigt, dass eine Reibungsminderung von 40% den Primärenergieverbrauch um 8,6% senken könnte. Für Deutschland bedeutet das ein Einsparpotenzial von ca. 208 Milliarden Tonnen CO₂/Jahr. Während sich die Reibungsreduzierung direkt in niedrigeren CO₂-Emissionen bemerkbar macht, kann der Einfluss durch verbesserten Verschleißschutz und Lebensdauerverlängerung bislang nicht in präzisen Zahlen ausgedrückt werden. Mit ihrer zweiten Studie Anfang des Jahres 2021 schätzte die GfT das Energieeinsparpotenzial und die damit verbundene Emissionsreduzierung grob ab, welche bei ca. dem Doppelten des Potenzials der Reibungsreduzierung vermutet wird. Somit ist neben der Verringerung der Reibung auch die Rohstoffeffizienz für eine nachhaltigere Zukunft von entscheidender Bedeutung. Deshalb empfiehlt es sich durch weitere Studien die Einsparpotenziale zu präzisieren, um darauf

aufbauend frühzeitig durch gezielte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten den Verschleißschutz sowie die Lebensdauer zu erhöhen und Bauteile optimal auszunutzen.

Die größten Energieeffizienzpotenziale werden in den Bereichen Kompressoren, Kühl- und Kältetechnik, Hydraulik, Wärmepumpen und Elektroantrieb sowie E-Mobilitätskomponenten vermutet. Gerade für Hub-Kolben-Anwendungen, welche der Technik im Verbrennungsmotor sehr ähneln, können bisherige Errungenschaften aus dem Automobilbau mit Hilfe weiterer Forschungs- und Entwicklungsprojekte adaptiert werden. Das BMWi hat bereits durch die Projekte PEGASUS I+II und PROMETHEUS erste Grundvoraussetzungen geschaffen, welche den entwickelten technischen Lösungen eine baldige Marktdiffusion ermöglichen. Generell sind Technologien zu priorisieren, die für Anwendungen mit großer Stückzahl und durch Vernetzung auch branchenübergreifend einsetzbar sind. Zwar wird zum Teil bereits Interesse und Bedarf seitens verschiedenster Industriebereiche signalisiert, eine vertiefte Zusammenarbeit über die Absichtserklärungen hinaus bleibt allerdings oftmals aus. Explizit wurde in diesem Zusammenhang ein interdisziplinäres Projekt gewünscht, welches die einzelnen Branchen und Forschungszweige im Bereich Tribologie weiter vernetzt. Hierdurch soll der Austausch untereinander vereinfacht und weitere Kontakte zu Industrieunternehmen, welche bislang nur wenig von den Möglichkeiten durch tribologische Maßnahmen wissen, aufgebaut bzw. vertieft werden. Vorbehalte, welche bisher den Umstieg auf energieeffizientere Maßnahmen oder die Entwicklung besserer tribologischer Systeme verhindert und gehemmt haben, können hierdurch ausgeräumt werden.

Zudem gibt es weitere Forschungsideen in der Tribologie, welche jedoch in der Grundlagenforschung zu verorten und noch nicht anwendungsorientiert ausgerichtet sind. Diese sollten von Fördergemeinschaften wie z.B. der DFG unterstützt werden. Dazu zählen unter anderem folgende Thematiken: Keramik als Gradientenwerkstoff, Mechatronische Steckverbindungen, Tribokonditionierung von Werkstoffen, Wechselwirkungen zwischen Oberfläche und Schmierstoff sowie mögliche Studien und Leitfäden.

6. Literaturverzeichnis

- [1] H. P. Jost, „Lubrication (Tribology). Education and Research Report. London: Dept. Education and Science, Her Majesty’s Stationary Office; 1966“.
- [2] „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“.
- [3] „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“.
- [4] „K. Holmberg, P. Andersson and A. Erdemir, Global Energy Consumption due to Friction in Passenger“.
- [5] „ K. Holmberg and A. Erdemir, Influence of tribology on global energy consumption, costs and Emissions, FRICTION 5(3): 263–284 (2017)“.
- [6] „M. Woydt, T. Gradt, T. Hosenfeldt, R. Luther, A. Rienäcker, F.-J. Wetzel, C. Wincierz, Tribologie in Deutschland – Querschnittstechnologie zur Minderung von CO2-Emissionen und zur Ressourcenschonung, Gesellschaft für Tribologie e.V. (2019)“.
- [7] „M. Woydt, T. Hosenfeldt, R. Luther, C. Scholz, M. Bäse, C. Wincierz, J. Schulz, Tribologie in Deutschland – Verschleißschutz und Nachhaltigkeit als Querschnittsherausforderung, Gesellschaft für Tribologie e.V. (2021)“.
- [8] „Zwischenfazit Forschungsfeld Tribologie; 10. Januar 2020 von Dr.-Ing. Volker Weihnacht“.
- [9] „https://de.wikipedia.org/wiki/Treibhausgas#Treibhausgase_des_Kyoto-Protokolls“.
- [10] „<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/37187/umfrage/der-weltweite-co2-ausstoss-seit-1751/>“.