



Tribologie in Deutschland

# Verschleißschutz und Nachhaltigkeit als Querschnittsherausforderungen





# Tribologie in Deutschland

## Verschleißschutz und Nachhaltigkeit als Querschnittsherausforderungen

Eine Expertenstudie der Gesellschaft für Tribologie e.V.  
2021

### Autoren

**Mathias Woydt** (Gesamtredaktion),  
MATRILUB, Berlin

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

**Rolf Luther**,  
FUCHS Schmierstoffe GmbH, Mannheim

**Christian Scholz**  
OERLIKON Balzers Coating Germany GmbH,  
Bingen

**Mirjam Bäse**  
Magna Powertrain GmbH&Co KG, Lannach, A

**Christoph Wincierz**,  
Evonik Resource Efficiency GmbH, Darmstadt

**Joachim Schulz**  
FUCHS WISURA GmbH, Bremen

## **IMPRESSUM**

### **Herausgeber und Vertrieb:**

Gesellschaft für Tribologie e.V.

E-Mail: [tribologie@gft-ev.de](mailto:tribologie@gft-ev.de) – Internet: [www.gft-ev.de](http://www.gft-ev.de)

### **Gestaltung und Satz:**

pulcinello

Marcus Depenbusch

Kamperstr. 20 – 52064 Aachen

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

E-Mail: [info@pulcinello.de](mailto:info@pulcinello.de) – [www.pulcinello.de](http://www.pulcinello.de)

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

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

## INHALT

<b>1. Ausgangssituation .....</b>	<b>10</b>
<b>2. Definition der Nachhaltigkeit .....</b>	<b>10</b>
<b>3. Beitrag der Tribologie zur Nachhaltigkeit .....</b>	<b>11</b>
3.1. Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen	11
3.2. Materialfußabdruck	13
3.3. Das „Wedges“-Modell zur Minderung von CO <sub>2</sub> -Emissionen	14
<b>4. Volkswirtschaftliche Bedeutung der Tribologie .....</b>	<b>15</b>
4.1. Ökonomische Betrachtungen	16
4.2. Verbrauch von Ressourcen	18
4.3. CO <sub>2</sub> -Emissionen der Gewinnung von Primärmetallen	18
<b>5. Nullverschleiß als Möglichkeit zur Nachhaltigkeitssteigerung .....</b>	<b>19</b>
<b>6. Verschleißschutz .....</b>	<b>22</b>
<b>7. Zustandsüberwachung .....</b>	<b>22</b>
7.1. Tribotronik	24
7.2. Smart Fluids	26
7.3. Vorausschauende Zustandsüberwachung	27
7.4. Inline Zustandsüberwachung von Schmierstoffen	28
7.5. Ölidentifizierungssystem	29
<b>8. Beispiele zur Steigerung der Nachhaltigkeit .....</b>	<b>30</b>
8.1. Feinstaubpartikel aus Abrieb	30
8.2. Windenergieanlagen (WEA)	31
8.3. Ressourcenschonung in der Zerspanungs- und Umformtechnik durch Tribologie	32
8.4. Kettenantriebe	35
8.5. Bioschmierstoffe	35
8.6. Reraffinate aus Altöl	37
8.7. Longlife Motorenöle	37
8.8. Lebenszyklusanalyse eines effizienzsteigernden Hydraulikfluids	39
<b>9. Schlussfolgerungen .....</b>	<b>40</b>
<b>10. Bibliographische Referenzen zum Nachlesen .....</b>	<b>42</b>

## ZU DIESER STUDIE

In der öffentlichen Wahrnehmung ist die Ressourcenfrage bislang der CO<sub>2</sub>-Frage untergeordnet und die Klimaerwärmung ist in aller Munde, während der Begriff Nachhaltigkeit für viele diffus bleibt. Da die Tribologie in beiden Feldern bereits einen bedeutenden Beitrag leistet und darüber hinaus ein großes Potential besitzt, Lösungen für CO<sub>2</sub>-Reduktionen und Ressourcenschonung zu schaffen, ist es von großer Bedeutung, diese wichtigen Optionen der Gesellschaft allgemeinverständlich zu vermitteln.

Nachdem die Gesellschaft für Tribologie e.V. im Jahr 2019 eine Studie „Tribologie in Deutschland – Querschnittstechnologie zur Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und zur Ressourcenschonung“ vorgestellt hat, in welcher vielen Nicht-Experten der unbekannte Wirkzusammenhang zwischen Reibungssenkung und CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung übersichtlich dargestellt wurde, thematisiert die vorliegende Studie den Beitrag des Verschleißschutzes zur Nachhaltigkeit, welcher bislang die gesellschaftliche Diskussion nicht erreichte. Die Betrachtungen lehnen sich an den 17 Nachhaltigkeitszielen der Vereinten Nationen von 2015 an.

Tribologie ist eine technisch-wissenschaftliche Disziplin mit einer sehr breiten industriellen Basis. Ziel ist es aufzuzeigen, welche Beiträge tribologische Forschungen und Entwicklungen zur Nachhaltigkeit mittels Verschleißschutz, Zustandsüberwachung, Instandhaltung und Wiederverwertung für die Ressourcenschonung und Materialeffizienz leisten können. Diese betreffen den gesamten Materialverbrauch über alle Industriebranchen, Konsumgüter und Lebensbereiche hinweg und sind nicht nur auf die Mobilität beschränkt. Die Tribologie ist eine interdisziplinäre Schlüsseltechnologie zur Minderung des bis 2040 bzw. 2050 erwarteten CO<sub>2</sub>-Überhanges. Reibungsminderungen können mittelfristig helfen 8-13% der Primärenergie einzusparen, während der Verschleißschutz und das Condition Monitoring einen ähnlich hohen, aber heute noch nicht quantifizierbaren, indirekten Beitrag zur Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen ermöglicht, weil die längere Nutzungsdauer von Maschinen und deren Komponenten zu geringerem Materialverbrauch führt und so die mit der Extraktion und Weiterverarbeitung der Rohstoffe verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen reduziert. Diese Studie benennt ausgewählte Lösungsansätze und konkrete Arbeitsachsen auf Basis verfügbarer Technologien.

[Die GfT-Studie 2019 „CO<sub>2</sub>&Reibung“ ist auch als englisch-&französischsprachige Fassungen verfügbar. Die Links für den Download befinden sich auf der Webseite der GfT ([www.gft-ev.de](http://www.gft-ev.de)).]

## KURZZUSAMMENFASSUNG DER GfT-TRIBOLOGIESTUDIE 2020 „VERSCHLEISSCHUTZ UND NACHHALTIGKEIT“

*TRIBOLOGIE, die Lehre von Reibung, Schmierung und Verschleiß, ist eine Querschnittstechnologie von volkswirtschaftlicher Bedeutung, in der Verschleißschutz und Nachhaltigkeit untrennbar miteinander verbunden sind, wie auch der Zusammenhang der CO<sub>2</sub>-Emission mit der Reibung. Sie ermöglicht als Grundlagentechnologie Materialeffizienz und Ressourcenschonung durch langlebiger Produkte und in dieser Folge geringerem Materialverbrauch, was letztendlich auch eine Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bedeutet. Verschleiß ist der irreversible Verlust von Material aus Oberflächen unter mechanischer Einwirkung in dessen Folge der Funktionsverlust eintritt.*

Anders als der einfach nachvollziehbare Wirkzusammenhang „CO<sub>2</sub> und Reibung“ ist der Zusammenhang zwischen „Verschleißschutz und Nachhaltigkeit“ komplexer: Zum einen weil die Nachhaltigkeit so viele Aspekte hat, zum anderen weil der Einfluss zumeist indirekt ist.

### Nachhaltigkeit und Tribologie

Nachhaltigkeit ist eines der wichtigsten globalen Ziele für die heutige Gesellschaft und für die Zukunft. Eine längere Haltbarkeit und Funktionsfähigkeit einer Maschine durch den Verschleißschutz der darin integrierten Komponenten führt dazu, da für dieselbe Produktions-, Transport- oder anderen Leistungen weniger Ersatzmaschinen eingespart werden können. Dadurch sinkt der Bedarf der für die Herstellung notwendigen Materialien, Primärenergie und Arbeitsleistungen sowie der damit verbundenen Emissionen. In der Technosphäre der Kreislaufwirtschaft bedeutet das, dass eine intensivere Nutzung von Materialien in den Gebrauchsprodukten realisiert wird.

***Die durch geringeren Verschleiß erhöhte Produktlebensdauer leistet also einen wichtigen Beitrag, das Wirtschaftswachstum vom Materialverbrauch zu entkoppeln.***

In der öffentlichen Wahrnehmung dominiert die Klimaerwärmung, während die Ressourcenfrage derzeit in den Hintergrund gerückt ist. Der Material-Fußabdruck der Menschheit stieg im Jahr 2017 auf 92,1 Gigatonnen an Masse zzgl. 8,6 Gi-

gatonnen Rezyklaten. Davon entfielen 15,047 Gigatonnen auf fossile Energieträger und 24,062 Gigatonnen auf Biomassen. Die globalen fossilen CO<sub>2</sub>-Emissionen 2019 betragen 33,3 Gigatonnen nur durch Verbrennung und insgesamt 37,9 Gigatonnen CO<sub>2</sub> unter Einbeziehung industrieller Nichtverbrennungsprozesse, z.B. der Zement- und Ziegelherstellung. Im Materialverbrauch stecken CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Der verbleibende potentielle Ressourcenpool, bei welchem tribologische Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer zur Anwendung kommen können, liegt bei ca. >17,6 Gigatonnen verbrauchter Ressourcen pro Jahr. Der Beitrag von Lebensdauererlängerungen infolge eines verbesserten Verschleißschutzes und moderner Zustandsüberwachungen ist derzeit nur schwer bezifferbar, da die eingesparten Tonnagen an Ressourcen nicht quantifizierbar sind und nicht direkt zugeordnet werden können.

***Eine hypothetische Verdoppelung der Lebensdauer ergäbe eine Einsparung im Ressourcenverbrauch von 8,8 Gigatonnen pro Jahr, welche ein CO<sub>2</sub>-Äquivalent in ähnlicher Größenordnung hat.***

Die Prognosen gehen bis 2060 von einem Zuwachs des Material-Fußabdruckes auf 167 Gigatonnen (OECD) bzw. 190 Gigatonnen (UNEP-IRP) aus. Zur Lebensdauererlängerung von verschlissenen Gütern gehört auch die Reparaturfreundlichkeit.

Die Lebensdauererlängerung durch verschleißschutzverbessernde Maßnahmen, durch Tribotrikonik und Zustandsüberwachung für die Verbesserung der Materialeffizienz und Ressourcenschonung ist genauso von Bedeutung, wie die Reibungsminderung für die CO<sub>2</sub>-Senkung als Beitrag zur Energieeffizienz. Beides sind Kernthemen der Tribologie. In der Industrie und Wissenschaft bestehen zur Nachhaltigkeit verschiedene Definitionen und Ansichten, wenngleich diese einem ständigen Wandel unterliegen. Die Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung aus dem Jahr 2017 basiert auf den drei Leitprinzipien oder drei Dimensionen der Nachhaltigkeit „Wirtschaft-Soziales-Umwelt“, welche auch als die drei Di-

mensionen der Nachhaltigkeit bekannt sind und sich weiter in die 17 globalen Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen vom Oktober 2015 aufgliedern. Daran sollte sich das globale Verständnis von Nachhaltigkeit in ihrem Wesen und in ihrem Nutzen orientieren. Die Tribologie strahlt auf mindestens sechs dieser 17 Nachhaltigkeitsziele aus. Verschleißschutz steigert die Ressourceneffizienz und bringt damit die Nachhaltigkeitsziele voran. Daneben darf die volkswirtschaftliche Bedeutung des Verschleißes nicht unberücksichtigt bleiben



*Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen mit einem unmittelbaren Bezug zur Tribologie*

„Wedges“ sind Arbeitsachsen zur Stabilisierung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes in der Atmosphäre und der globalen Oberflächentemperatur sowie zum Erreichen der Klimaziele. Je nach „Schule“, bestehen diese aus 7, 12 oder 31 Wedges, allerdings ohne bislang die Beiträge durch die Tribologie zur berücksichtigen. Der Anteil der Reibungsverluste an den globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen liegt in Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Emissionen von 37,9 Gigatonnen CO<sub>2</sub> in 2019 zwischen 7,58 und 11,4 Gigatonnen CO<sub>2</sub> mit einem langfristigen Senkungspotential von 2,66 bis 4,93 Gigatonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr oder mindestens einem Wedge entsprechend? Der Beitrag von Lebensdauererlängerungen infolge eines verbesserten Verschleißschutzes und modernen Zustandsüberwachungen ist derzeit nur schwer möglich, da die eingesparten Tonnagen an Ressourcen nicht quantifizierbar sind.

**Die Dimension der Beiträge der Tribologie zur CO<sub>2</sub>-Minderungen liegt im Bereich mehrerer „Wedges“, oder im Bereiche von >11 Gigatonnen CO<sub>2</sub> bzw. von >29% von den in 2019 global emittierten 37,9 Gigatonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten und zwar durch:**

- a. **die Einsparung an Primärenergie über die Reibungsminderung und**
- b. **die Ressourcenschonung über die Verlängerung der Nutzungsdauern.**

Korrosion und Tribologie wirken beide an den Grenzflächen zweier sich berührender Oberflächen, bei gleichzeitigem Auftreten beider Phänomene spricht man von Tribokorrosion. Korrosion und Verschleiß sind für irreversible Material- und Funktionsverluste verantwortlich. Das volkswirtschaftliche Einsparpotential liegt für Maßnahmen des Verschleißschutzes und des Korrosionsschutzes jeweils zwischen 1,5% und 3% (absolut) des Bruttosozialprodukts. Die dabei durch Lebensdauererlängerungen eingesparten Materialmengen mindern die CO<sub>2</sub>-Emissionen, den Materialverbrauch und die Abfallmengen.

## Nachhaltigkeit und Schmierstoffe

Schmierstoffe sind rein technische und hochfunktionale Formulierungen zur Erfüllung komplexer Anforderungen mit unterschiedlich detaillierten Lastenheften variierender Stringenz. Schmierstoffe werden aus einer „rein technischen Erfüllung von Funktionen“ weiterentwickelt und müssen die gesellschaftspolitischen Diskussionen aufnehmen und in ihren ökotoxikologischen Eigenschaftsprofile verbessert sowie in Nachhaltigkeitskriterien charakterisiert und optimiert werden. Ungefähr 1990 kamen die ersten umweltverträglichen Schmierstoffe auf. Nach 30 Jahren verbleibt nur eine geringe Marktdurchdringung von etwa 3% bis 4%. Die ökotoxikologischen Kriterien schränken die Auswahlmöglichkeiten bei den Grundölen und Additiven ein. Der Hauptgrund für diesen kleinen Marktanteil liegt kaum in der Leistungsfähigkeit der umweltverträglichen Alternativen begründet, sondern am höheren Rohstoffpreis. Die wichtigsten Schemata sind:

- a. European ecolabel gemäß EC/2018/1702 (3. Novelle),
- b. Second issuance of U.S. Vessel General Permit (VGP bzw. VIDA) und
- c. Bioschmierstoffe gemäß EN16807.

Schmierstoffe auf Basis von Biomassen bzw. nachwachsenden Rohstoffen haben den Vorteil, dass sie mittlerweile das gleiche funktionale Profil offerieren, wie petrochemische Produkte bei

allerdings deutlich besserer Umweltbilanz. Nachhaltige Schmierstoffe auf Basis der 17 SDGs der Vereinten Nationen bilden folgende Zusatzeigenschaften ab:

- » Reibungsminderungen senken CO<sub>2</sub>-Emissionen (Energieeffizienz).
- » Verlängerte Ölwechselintervalle mindern Abfallmengen und schonen den Ressourcenverbrauch.
- » Grundöle und Additive auf Basis nachwachsender Rohstoffe schonen den Ressourcenverbrauch auf CO<sub>2</sub>-neutraler Basis (Lösungen: Ester, Polyalkylenglykole und Bio-Olefine).
- » Schnelle biologische Abbaubarkeit verbunden mit niedriger Toxizitäten gegenüber Flora, Fauna und Leben.
- » Vollständige Altölerfassung mit einem stofflichen Wiederverwertungskonzept.

**Die verschiedenen Schmierstoffgruppen können zu ihren bekannten Premiumattributen weitere Funktionalitäten integrieren, wie Bio-No-Tox-Eigenschaften und Nachhaltigkeit.**

## Der Begriff „Tribologie“ (Tribology)

Sir Peter Jost begründete erstmals 1966 den Begriff „Tribology“. Die englische Originaldefinition lautet:

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

Sinngemäß kann man diese Definition nach Czichos ins Deutsche folgendermaßen in Deutsche übertragen:

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

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

## Der Begriff „Verschleiß“ (Wear)

Von der International Research Group on Wear of Engineering Materials der OECD<sup>1</sup> von 1969 wurde definiert:

*“The progressive loss of substance from the operating surface of a body occurring as a result of relative motion at the surface.”*

Diese Definition deckt sich mit dem Begriff „Verschleiß“ aus der DIN 50320.

*„Verschleiß ist der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d. h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers.“*

### Hinweise:

- a. Die Beanspruchung der Oberfläche eines festen Körpers durch Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers wird als tribologische Beanspruchung bezeichnet.
- b. Verschleiß äußert sich im Auftreten von losgelösten kleinen Teilchen (Verschleißpartikel) sowie in Stoff- und Formänderungen der tribologisch beanspruchten oberflächennahen Bereiche.
- c. In der Technik ist Verschleiß normalerweise unerwünscht, d.h. wertmindernd. In Ausnahmefällen, wie z.B. bei Einlaufvorgängen, können Verschleißvorgänge jedoch auch technisch erwünscht sein. Bearbeitungsvorgänge als wertbildende technologische Vorgänge gelten in Bezug auf das herzustellende Werkstück nicht als Verschleiß, obwohl im Grenzflächenbereich zwischen Werkstück und Werkzeug tribologische Prozesse, wie beim Verschleiß, ablaufen.

<sup>1</sup> OECD = Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (Organisation for Economic Co-operation and Development, [www.oecd.org](http://www.oecd.org))

## 1. AUSGANGSSITUATION

Monetäre Kriterien bewerteten die Langlebigkeit bzw. den Verschleißschutz in der Vergangenheit, während heutzutage die Primärenergieeinsparung und ökologische Aspekte gleichberechtigt ins Spiel kommen, wie der Materialverbrauch. Auf der einen Seite entwickeln die Hersteller immer neuere, effizientere Geräte, mit denen die Verbraucher Geld für ihre Energiekosten sparen und damit einen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Minderung leisten. Andererseits schützt ein hochentwickelter Verschleißschutz die Langlebigkeit der Investitionen des Endbenutzers und vermeidet Neuinvestitionen, auch wenn die bestehende „Maschinerie“ hinsichtlich Energieverbrauch suboptimal ist.

In der öffentlichen Diskussion und Wahrnehmung ist die Ressourcenfrage bislang der CO<sub>2</sub>-Frage untergeordnet. Ökonomische Zwänge und ökologische Gesetzgebung sind durch die Ressourcennutzung eng miteinander verbunden. Es entsteht eine ökologische und ökonomische Bilanz zwischen Energieeffizienz sowie Materialeffizienz und Ressourcenschonung<sup>2</sup>. Hier muss parallel zwischen verschlissenen und veraltet unter-

schieden werden. Es ist im Einzelfall zu prüfen, ob beim weiteren Einsatz eines älteren Fahrzeuges ggf. mehr Ressourcen gespart werden können, selbst wenn ein neues Fahrzeug einen geringeren Kraftstoffverbrauch aufweist und der Kunde zu verbrauchsärmeren Fahrzeugen wechselt.

Am Ende des Diskussionsspektrums ist für den Eigentümer/Betreiber ein geringerer Kraftstoffverbrauch von Vorteil. Kraftstoffeinsparungen bewirken ökonomische Vorteile. Hier ist die Balance zwischen dem Ressourcenverbrauch der Neuinvestition, Energieeinsparung und Produktivitätsgewinn von Bedeutung. Auf der anderen Seite dieser Effizienzgleichung ist der Verschleißschutz jedoch sowohl für umfassende Nachhaltigkeitsanstrengungen als auch für die Rentabilität beim Endverbraucher gleichermaßen wichtig, denn Haltbarkeit/Verschleißschutz und der Einsatz von Ressourcen für die Herstellung von Gerätschaften hängen auch unmittelbar mit den CO<sub>2</sub>-Emissionen zusammen, wobei es noch andere, verbundene Schadstoffemissionen gibt.

## 2. DEFINITION DER NACHHALTIGKEIT

Der Begriff der Nachhaltigkeit hat seinen Ursprung in der Forstwirtschaft des 18. Jahrhunderts. Die gesellschaftspolitische Klimadiskussion hat kaum einen Begriff in den letzten Jahrzehnten so stark weiterentwickelt, wie den der Nachhaltigkeit. Die heutigen Definitionsansätze implizieren nicht nur den Schutz natürlicher Ressourcen, sondern beziehen auch den langfristigen Fortbestand der Bezugsobjekte von Mensch und Natur mit ein.

Die World Commission on Environment and Development (WCED) der Vereinten Nationen mit dem Titel „Our Common Future“ veröffentlichte nachfolgende Definition von Nachhaltigkeit:

*„Sustainable development is development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.“*

*(WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT 1987, S.41)*

Nachhaltigkeit bedeutet im vorangegangenen Definitionsansatz, dass soziokulturelle, ökologische und ökonomische Ressourcen nur soweit verwendet werden, dass sie auch zukünftigen Generationen in der gleichen Qualität und Quantität zur Verfügung stehen. Wenig Beachtung findet in der öffentlichen Diskussion die Tatsache, dass einige Ressourcen quantitativ so oder so irreversibel verbraucht werden, selbst wenn dies ökologisch und/oder nachhaltig geschieht. Die Verlagerung der Definitionsansätze von ökonomischen Bewertungen hin zu ökologischen verändert die Wirtschaftsweise grundlegend. Das globale Bevölkerungswachstum, verbunden mit Streben nach Lebenskomfort, steigert den Verbrauch an Ressourcen und Primärenergie unweigerlich, wenn nicht gegengesteuert wird. Nachhaltigkeit wird weltweit auf unterschiedlichem Niveau berücksichtigt, mit unterschiedlicher Intensität und aufgrund unterschiedlicher Bedürfnisse. Bis heute fehlt ein globales und einheitliches Verständnis von Nachhaltigkeit in ihrem Wesen und in ihrem Nutzen.

<sup>2</sup> Die Ressourcenschonung wird über die Gesamtrohstoffproduktivität gemessen.

Die Tribologie, in diesem Kontext bezogen auf den Verschleißschutz, trifft sich mit der Nachhaltigkeit als Querschnittsherausforderung. Verschleißschutz und Nachhaltigkeit sind äußerst beliebte Begriffe, aber praktisch kann man beiden Begriffen nicht gleichzeitig zu 100% gerecht werden (Siehe auch Kapitel 6 „Nullverschleiß“).

Die Nachhaltigkeit kann grundlegend zwischen drei Strategien wählen:

- » der Effizienzstrategie,
- » der Konsistenzstrategie und
- » der Suffizienzstrategie.

In der *Konsistenzstrategie* geht es um die Verträglichkeit von anthropogenen Stoff- und Energieströmen mit der Natur in dem Sinne, dass vorzugsweise keine Abfälle entstehen, welche von der Natur nicht „verdaut“ werden können. Kreislaufwirtschaft, nachwachsende Rohstoffe und erneuerbare Ressourcen sind die tragenden Säulen der Konsistenzstrategie.

Bei der *Suffizienzstrategie* legt ein Unternehmen sozial- und umweltverträgliche Obergrenzen für seine wirtschaftlichen Aktivitäten fest und verabschiedet sich von Anfang an vom „Immer-mehr-Wollen“. Um dem Prinzip der Nachhaltigkeit zu genügen, müssen sich Produktverbesserungen und Erfindungen dann in ihrer Entwicklung, Herstellung und Nutzung am Maßstab der Umweltverträglichkeit orientieren. Dazu gehören die ressourcenschonende Gewinnung von Grundstoffen und Produktion.

In der *Effizienzstrategie* müssen Energie- und Ressourcenverbrauch sowie die Verkehrsleistung vom Wirtschaftswachstum entkoppelt werden. Zugleich ist anzustreben, dass der wachstumsbedingte Anstieg der Nachfrage nach Energie, Ressourcen und Verkehrsleistungen durch Effizienzgewinne und Gewinne in der Nutzungsdauer mehr als kompensiert wird. Vor allem darauf bezogen leistet die Tribologie einen substantiellen Beitrag.

Der übermäßigen Ausbeutung natürlicher Ressourcen folgen später unvermeidliche Rückgänge des Wirtschaftswachstums. Deshalb muss auch die Abschreibung des Naturkapitals<sup>3</sup> bei der Bewertung des Wohlstands berücksichtigt werden. Wenn wir heute zuviel Naturkapital in der Produktion der Wirtschaft einsetzen, haben wir zu einem späteren Zeitpunkt zu wenig davon für die Produktion.

Andererseits kann man nach wie vor ökonomisch argumentieren ohne in einen Widerspruch zum ökologischen Ansatz zu geraten. **Nachhaltigkeit** ist ein Handlungsprinzip der Ressourcennutzung und nicht valorisierte Ressourcen kosten Geld in einer zukünftigen Welt, in der Rohstoffe knapper und deshalb teurer werden. Dies stellt den regulatorischen Ansatz beim Wirtschaften dar.

Die Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung 2017 basiert auf drei Leitprinzipien oder drei Dimensionen der Nachhaltigkeit<sup>4</sup> „Wirtschaft-Soziales-Umwelt“, welche sich weiter in die 17 globalen Nachhaltigkeitszielen [1] der Vereinten Nationen von 2015 (Agenda 2030) aufgliedern zu 169 Zielvorgaben.

### 3. BEITRAG DER TRIBOLOGIE ZUR NACHHALTIGKEIT

#### 3.1. NACHHALTIGKEITSZIELE DER VEREINTEN NATIONEN

Die Tribologie strahlt auf sieben der 17 Nachhaltigkeitsziele (**Sustainable Development Goals = SDG**) der Vereinten Nationen und mehreren Zielvorgaben aus, wobei der Verschleißschutz insbesondere direkt die SDG-Ziele #8, #9 und #12 [1] abdeckt:

„Nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster sicherstellen.“

<sup>3</sup> Dies ist der Wert der Nettoverluste an natürlichen Ressourcen, wie Mineralien, fossilen Brennstoffen, Wäldern und ähnlichen Quellen für Material- und Energieerträge in unserer Wirtschaft.

<sup>4</sup> Aktienbewertungen können auch Nachhaltigkeitsgedanken beinhalten. Der Dow Jones Sustainability Index (DJSI World; bzw. „grüner“ Aktienindex) wurde 1999 gegründet und dient als Benchmark für Anleger, die Nachhaltigkeitsaspekte und sozio-ökologische Kriterien in ihre Portfolios integrieren.

Tabelle 1: Die Ausstrahlung der Tribologie auf die 17 globalen Nachhaltigkeitsziele in der Agenda 2030 der Vereinten Nationen vom Oktober 2015.

Globales Ziel	Zielvorgaben	Attribute und Beiträge
#3: Ein <b>gesundes Leben für alle Menschen</b> jeden Alters gewährleisten und ihr Wohlergehen fördern	#3.9: <b>Verschmutzung und Verunreinigung von Luft, Wasser und Boden</b> erheblich zu verringern	Bioschmierstoffe: Minderung der Partikelemissionen über verschleißbeständigere Werkstoffe. Harte Dünnschichten zum Ersatz von Chrom <sup>VI+</sup>
#6: Verfügbarkeit und <b>nachhaltige Bewirtschaftung von Wasser</b> und Sanitärversorgung für alle gewährleisten	#6.3: .... die Wasserqualität durch Verringerung der Verschmutzung, <b>Beendigung des Einbringens und Minimierung der Freisetzung gefährlicher Chemikalien und Stoffe</b> , .... und eine beträchtliche Steigerung der Wiederaufbereitung und ... weltweit verbessern	Bioschmierstoffe
#7: Zugang zu <b>bezahlbarer, verlässlicher, nachhaltiger und moderner Energie</b> für alle sichern	#7.2: Bis 2030 den Anteil <b>erneuerbarer Energie am globalen Energiemix</b> deutlich erhöhen	Energieeffizienz; Langlebige Getriebe und Lager in Windenergieanlagen, Systeme zur Rekuperation von Abgaswärme
	#7.3: Bis 2030 die weltweite <b>Steigerungsrates der Energieeffizienz verdoppeln</b>	Energieeffizienz durch Reibungsminde- rung bedeutet eine CO <sub>2</sub> -Reduktion, langlebige Windenergieanlagen
#8: <b>Dauerhaftes, inklusives &amp; nachhaltiges Wirtschaftswachstum</b> , produktive Vollbeschäftigung und menschenwürdige Arbeit für alle fördern	#8.4: Bis 2030 die weltweite <b>Ressourceneffizienz in Konsum und Produktion</b> Schritt für Schritt verbessern und die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Umweltzerstörung anstreben, im Einklang mit dem Zehnjahres-Programmrahmen für <b>nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster</b> , ....	Ressourceneffizienz durch Verschleißschutz; adaptive Zustandsüberwachung, Tribotronik Produktivitätssteigerung von Baumaschinen durch effiziente Hydraulikfluide.
#9: Eine widerstandsfähige Infrastruktur aufbauen, inklusive und <b>nachhaltige Industrialisierung fördern und Innovationen unterstützen</b>	#9.4: Bis 2030 die Infrastruktur modernisieren und die Industrien nachrüsten, um sie <b>nachhaltig</b> zu machen, mit <b>effizienterem Ressourceneinsatz</b> und unter <b>vermehrter Nutzung sauberer und umweltverträglicher Technologien und Industrieprozesse</b> , wobei alle Länder Maßnahmen entsprechend ihren jeweiligen Kapazitäten ergreifen	Verschleißschutz = Materialeffizienz und Ressourcenschonung sowie Minderung von Feinstaub durch weniger Verschleißpartikel
#12: <b>Nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster</b> sicherstellen	#12.2: Bis 2030 die <b>nachhaltige Bewirtschaftung und effiziente Nutzung der natürlichen Ressourcen</b> erreichen.	Schmierstoffe und Additive auf Basis nachwachsender Rohstoffe
	#12.4: Bis 2020 einen <b>umweltverträglichen Umgang mit Chemikalien und allen Abfällen</b> während ihres gesamten Lebenszyklus in Übereinstimmung mit den vereinbarten internationalen Rahmenregelungen erreichen und ihre <b>Freisetzung in Luft, Wasser und Boden erheblich verringern</b> , um ihre nachteiligen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt auf ein Mindestmaß zu beschränken.	Bioschmierstoffe, verschleißarme Bremssysteme und Reifen, Wiederaufarbeitung von Tribosystemen
	#12.5: Bis 2030 das <b>Abfallaufkommen durch Vermeidung, Verminderung</b> , Wiederverwertung und Wiederverwendung deutlich verringern.	Verschleißschutz = technische Langlebigkeit und Lebensdauerverlängerungen mindern das Abfallaufkommen, Reraffinate – Zweitraffination von Gebrauchtöl
	#12.6: Die Unternehmen, insbesondere große und transnationale Unternehmen, dazu <b>ermutigen, nachhaltige Verfahren</b> einzuführen und in ihre Berichterstattung Nachhaltigkeitsinformationen aufzunehmen.	
#13: Umgehend <b>Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und seiner Auswirkungen</b> ergreifen		Energieeffizienz durch Reibungsminde- rung bedeutet eine CO <sub>2</sub> -Reduktion, Schmierstoffe aus nachwachsenden oder wiedergewonnenen Rohstoffen

Tabelle 1 fasst die direkten und indirekten Ausstrahlungen der Tribologie auf sechs der 17 globalen Nachhaltigkeitsziele mit den konkreten Beiträgen zusammen. Die Ressourceneffizienz kann nicht allein auf die Optimierung der Produktionsverfahren gemäß SDG #12 beschränkt bleiben. Schlankere Produktionsprozesse reduzieren zwar den Anteil an Produktionsabfällen, jedoch offeriert der Ansatz einer Lebenszyklusbeurteilung größere Potenziale zum Schutz und zur Einsparung von Ressourcen in der Nutzungsphase hergestellter Produkte. Hier greift die Tribologie über den Verschleißschutz:

*„Wer Produkte länger nutzt, spart damit Ressourcen jeglicher Art.“*

Die Bioschmierstoffe decken die SDGs #3, #6 und #12 ab. Die Tonnage an Schmierstoffen entspricht ca. 1% der Kraftstoffmenge, weswegen Schmierstoffe, bestehend aus Grundölen und Additiven, im Hinblick auf die verfügbaren Biomassen, für die Nutzung von Ressourcen aus nachwachsenden Rohstoffen prädestiniert. Dieser Ansatz deckt die SDG-Zielvorgabe #12.2 „nachhaltige Bewirtschaftung und effiziente Nutzung der natürlichen Ressourcen“ ab.

### 3.2. MATERIALFUSSABDRUCK

Weltweit wuchs der Material-Fußabdruck<sup>5</sup> der Menschheit, als globale Rohstoffentnahmen bzw. Extraktion von Allem gerechnet, zwischen 2000 und 2010 von 48,5 auf 69,3 Gigatonnen und erreichte 92,1 Gigatonnen 2017 (Tabelle 2) [2, 3], Tendenz steigend. Dieser sind noch 8,65 Gigatonnen aus der Kreislaufwirtschaft hinzu zu rechnen. Davon entfielen 15,047 Gigatonnen auf fossile Energieträger und 24,062 Gigatonnen auf Biomassen<sup>6</sup>. Biomassen können erst einmal als CO<sub>2</sub>-neutral eingestuft werden. 7,189 Gigatonnen an Masse betrug 2017 zum Vergleich die gesamte Rohstoffentnahme der EU28.

Tabelle 2: Globale Rohstoffentnahme 2017

Extraktion nach Materialgruppe	Gigatonnen
Erze für Metalle	9,120
Fossile Energieträger	15,047
Mineralische Rohstoffe (nicht-metallisch)	43,834
Biomassen jeglicher Art	24,062
<b>Gesamt</b>	<b>92,063</b>
zzgl. Rezyklate	8,600

Die OECD schätzt in ihrer Studie „Global Material Resources Outlook to 2060“ [3], dass der globale Materialverbrauch von 92,1 Gigatonnen im Jahr 2017 auf mehr als 167 Gigatonnen in 2060 anwachsen wird, während das International Resource Panel der UNEP [2] sogar 190 Gigatonnen erwartet. Die Anwendung bekannte Nachhaltigkeitsstrategien wird den Zuwachs auf ca. 143 Gigatonnen begrenzen. Nichtmetallische Mineralien (Baustoffe), wie Sand, Kies und Kalkstein, etc., stellen dann mehr als die Hälfte des gesamten Materialeinsatzes dar.

Insgesamt besteht ein weltweiter Materialverbrauch oder Stoffstrom von 100,6 Gigatonnen inkl. Recycling [4], welche sich in 47,7 Gigatonnen langlebige Produkte und 52,9 Gigatonnen kurzlebiger Produkte aufteilen (Siehe Tabelle 3). Ein Teil dieser extrahierten Gigatonnen sind nicht kreislaufwirtschaftsfähige und nicht regenerierbare Materialien, wie 15,047 Gigatonnen fossile Energieträger, die in der Mobilität oder Energieerzeugung verbrannt werden. Innerhalb der Biomassen ist ein unbekannter Anteil recyclingfähig oder kann durch Maßnahmen in seiner Nutzungsdauer verlängert werden.

Tabelle 3: Kreislaufwirtschaftsfähiger Ressourcenverbrauch zur Verbesserung dessen Langlebigkeit mittels tribologischer Maßnahmen

Art der Nutzung	Kreislaufwirtschaftsfähig	Nachwachsend
Kurzlebige Produkte (Short-lived products)	13,816 GT	24,062 GT (Biomassen)
Langlebige Produkte (Products that last)	47,646 GT	–

<sup>5</sup> Der „Material-Fußabdruck“ bezeichnet die Menge der gewonnenen Rohstoffe, die zur Deckung der Endnachfrage eingesetzt werden. Er ist ein Maß für die Belastung, der die Umwelt ausgesetzt wird, damit die Wirtschaft wächst und die materiellen Bedürfnisse der Menschen befriedigt werden.

<sup>6</sup> Wasserkraft, Solar und Geothermie erzeugen zumeist direkt „grünen“ elektrischen Strom und sind getrennt von den stofflichen und nachwachsenden Ressourcen, wie Biomasse, zu betrachten.

Von den Materialien, die jedes Jahr in die Weltwirtschaft gelangen, wird die Mehrheit (52,925 Gigatonnen) von der Gesellschaft in kurzlebigen Produkten verwendet, wie Biomassen, Textilien oder fossile Energieträger, die normalerweise nach einem Jahr Gebrauch das Nutzungsende erreichen. Die anderen 47,646 Gigatonnen an Materialien werden langfristig als Produkte gespeichert, die lange im Gebrauch sind. Diese sind hauptsächlich Gebäude, Infrastruktur, Maschinen sowie Investitionsgüter, aber auch elektronische Güter.

Aus Mineralien und Erze hergestellt Gebäude, Infrastruktur und Investitionsgüter sind gesellschaftlich als „Ressourcen-Lagerbestände“ oder „CO<sub>2</sub>-Vermögenswerte“ gespeichert, solange sie genutzt werden und stehen als Sekundärrohstoff augenblicklich nicht zur Verfügung. Es ist daher von größter Bedeutung, dass die Reibungseffizienz und Nutzungsdauer von Gebäuden, Straßen sowie Maschinen und Anlagen durch Tribologie maximiert und später bei Erreichen der Lebensdauerergrenze sollte die vollständige Wiederverwertung aller Anlagen, Maschinen und Produkte erfolgen. Der potentielle Ressourcenpool, bei welchem tribologische Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer zur Anwendung kommen können, liegt bei ca. >61,4 Gigatonnen verbrauchter Ressourcen pro Jahr. Von dieser Menge muß man Produkte abziehen, welche keinen Bezug zur Tribologie haben, wie 43,8 Gigatonnen nichtmetallische Mineralien (Baustoffe, Sand, Kies und Kalkstein, etc.) [3].

- » Der verbleibende potentielle Ressourcenpool, bei welchem tribologische Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer zur Anwendung kommen können, liegt bei ca. >17,6 Gigatonnen verbrauchter Ressourcen pro Jahr verbunden mit einem zu spezifizierenden Äquivalent an CO<sub>2</sub>-Emissionen (Siehe Tabelle 6).

Im Materialverbrauch stecken unweigerlich CO<sub>2</sub>-Emissionen (Siehe Tabelle 6). Hier wird deutlich, dass die Lebensdauererlängerung durch den Verschleißschutz für die Verbesserung der Materialeffizienz und Ressourcenschonung genauso von Bedeutung ist, wie die Reibungsminderung für die CO<sub>2</sub>-Senkung als Beitrag zur Energieeffizienz [5].

Verschleißschutz ist insofern von Bedeutung, da technische Produkte nicht regenerierbar sind, wie biologische Systeme, aber immerhin stofflich recycelbar. Verschleißschutz, wobei der Korrosionsschutz gleichermaßen hineinspielt, ermöglicht langlebigere Produkte, wodurch die Abfallgenerierung mit der Ressourcennutzung abnimmt bzw. der Ressourcenabbau infolge des Materialhungers. Verschleißschutz verzögert stark verschleißbedingte Ersatzbeschaffungen und minimiert so den Konsum und die Abfallmengen. Verschleißschutz steigert die Ressourceneffizienz und bringt die Nachhaltigkeitsziele voran.

Eine bessere Produktgestaltung unter Nutzung der Möglichkeiten des Verschleißschutzes ist ein systemischer Ansatz, um Produkte und Materialien in Gebrauch zu halten und damit einen wirtschaftlichen und ökologischen Mehrwert zu erzielen.

Ein weiterer Aspekt zum Verschleißschutz ist die Minderung der Generierung von Verschleißpartikeln und damit von Feinstaub (Siehe „Nullverschleiß“) und bedient das globale Ziel Nr. 3 der Vereinten Nationen „Ein gesundes Leben für alle Menschen jeden Alters gewährleisten und ihr Wohlergehen fördern“ und im speziellen die Zielvorgabe #3.9 „Verschmutzung und Verunreinigung von Luft, Wasser und Boden erheblich zu verringern“. Die Europäische Union hat die Struktur der 17 globalen Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen von 2015 übernommen, benennt aber explizit die „Belastung durch Luftverschmutzung mit Schwebstaub“. Bioschmierstoffe leisten hier einen konkreten Beitrag für das Ziel der Vereinten Nationen nach einem „Pollution-free Planets“ [6] über die SDGs #3 und #12.4., aber auch SDG #6.

### 3.3. DAS „WEDGES“-MODELL ZUR MINDERUNG VON CO<sub>2</sub>-EMISSIONEN

Die zwei Princeton-Professoren, Robert Socolow und Stephen Pacala, hatten den „Wedges“-Ansatz eingeführt [7], um die Treibhausgasemissionen in den folgenden 50 Jahren ab 2005 (mit dem Inkrafttreten vom KYOTO-Protokoll) auf dem Niveau von 2004 zu stabilisieren und die Klimaziele von 500 ppm CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre nicht zu überschreiten und die mittlere Oberflächentemperaturerhöhung von 2°C nicht zu erreichen.

Die Autoren nannten jede ihrer Achse zur Minderung von Emissionen einen „Wedge“. Sie haben 7 Wedges alternativer Technologien mit 15 möglichen Optionen zur Reduzierung der Kohlenstoffemissionsrate bis zum Jahr 2054 um je 1 Gigatonne Kohlenstoff/Jahr entsprechend 3,67 Gigatonnen CO<sub>2</sub>/Jahr identifiziert, aber nur im Wedge „Energieeffizienz und -einsparung“ unter der Option 1 „effiziente Fahrzeuge“ ergäbe sich ein Bezug zur Tribologie. Sie schlugen 2004 vor, die Reichweite von 30 Meilen pro Gallone (mpg; 7,84 L/100 km) auf 60 mpg (3,92 L/100km) zu erhöhen. Zum Vergleich: nach der U.S. EPA betrug in 2019 der Flottenverbrauch bei Neufahrzeugen 25,5 mpg (9,22 L/100 km. In einem späteren Ansatz von Steve J. Davis et al. [8] von der University of California müßte die Anzahl der Wedges auf 31 erhöht werden (12 bislang unbeachtete, weitere 9 zur Stabilisierung der Emissionen und 10 zum Ausstieg aus den Emissionen), um die Klimaziele noch zu erreichen, denn es gilt auch das zukünftige Wachstum an CO<sub>2</sub>-Emissionspotentialen infolge des weiteren Bevölkerungs- und Wohlstandszuwachsens zu vermeiden, aber die Tribologie ist immer noch nicht „auf deren Radar“.

Die Gewinnung und Verarbeitung von Rohstoffen erzeugt zwangsläufig CO<sub>2</sub>. Die Reduzierung des Materialbedarfs und des Abfalls durch Verlängerung

der Lebensdauer von Produkten über verbesserte Verschleißbeständigkeit sollte diesen Modellen hinzugefügt werden, wie auch die Reibungsminderung.

Der Anteil der Reibungsverluste am globalen Primärenergieverbrauch bzw. an den globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen von 33,3/37,9 Gigatonnen (Siehe Fußnote 8) liegt zwischen 24-33% oder zwischen 7,99 und 12,5 Gigatonnen CO<sub>2</sub> [5] mit einem langfristigen Senkungspotential von 2,66-4,93 Gigatonnen CO<sub>2</sub>, einem „Wedges“ entsprechend.

Die Bezifferung des Beitrags von Lebensdauer-Verlängerungen infolge eines verbesserten Verschleißschutzes und moderner Zustandsüberwachung ist derzeit nur schwer möglich, da die eingesparten Tonnagen an Ressourcen nicht quantifizierbar sind. In der hypothetischen Annahme einer Lebensdauer-Verlängerung durch verschiedenste tribologische Maßnahmen halbiert sich potentielle Ressourcenpool von >17,6 Gigatonnen auf 8,8 Gigatonnen verbrauchter Ressourcen pro Jahr. Unter der Annahme eines konservativen Äquivalentes von 1 Tonne CO<sub>2</sub> pro Tonne Metall/Plastik (Siehe Tabelle 6) ergeben sich mehrere „Wedges“ als Beitrag der Tribologie zur CO<sub>2</sub>-Minderung über den Verschleißschutz.

## 4. VOLKSWIRTSCHAFTLICHE BEDEUTUNG DER TRIBOLOGIE

Insbesondere abrasive und adhäsive Verschleißmechanismen bestimmen die ökonomischen Verluste, also die irreversiblen Werkstoffverluste der Tribosysteme. Die volkswirtschaftliche Bedeutung von „Verschleiß“ beschränkte sich in den Studien der 1980iger Jahre [9-16] auf ökonomische Betrachtungen, wie Stillstandzeiten, Wartungskosten und Ersatzbeschaffungen, aber auch um die Minderung von Importabhängigkeiten. Die Ressourcenschonung und Materialeffizienz sowie Energieeinsparungen bzw. CO<sub>2</sub>-Emissionen wurden unter ökologischen Gesichtspunkten nicht betrachtet.

Tabelle 4: Das Bedeutungsverhältnis der Verlustgrößen Reibung und Verschleiß

Autoren	Betrachtetes Jahr	Betrachtungsgrößen	Verhältnis zwischen	
			Reibung	Verschleiß
National Research Council of Canada (NRC) [9]	1982	Kosten (in der Industrie)	1	3
Holmberg et al. [18]	1997	Kosten (Abrasion)	1	2,2
Holmberg et al. [17]	2014	Primärenergie (global)	7,66	1

## 4.1. ÖKONOMISCHE BETRACHTUNGEN

Tabelle 4 fasst das Wirkungsverhältnis zwischen Reibung und Verschleiß für verschiedene Betrachtungsgrößen zusammen. Das National Research Council of Canada (NRC) [9] ermittelte für 1982 volkswirtschaftlichen Schäden durch Reibung und Verschleiß in Höhe von 5,1 Milliarden Can-\$ bzw. 1,3% des Bruttoinlandsproduktes (BIP) von 1982, welche sich auf 3,9 Milliarden Can-\$ für verschleißbedingte Schäden und auf 1,2 Milliarden Can-\$ für Reibungsverluste aufteilten bzw. einer Kostenrelation zwischen Reibung und Verschleiß von ca. 1:3. Die Betrachtung des NRC galten nur für die Industrieaktivitäten ohne den Individualverkehr und den Privatkonsum zu berücksichtigen. Zu vergleichbaren Ergebnissen kommt Holmberg et al. [18] für die Minenindustrie, wo zumeist ungeschmierte und abrasiv beanspruchte Geräte betrieben werden. Wechselt man von einer ökonomischen zu einer energetischen Betrachtung, so dreht sich das Verhältnis im Ressourcenverbrauch zwischen Reibung und

Verschleiß mehr als um (Siehe Tabelle 4). Folglich ist die Reibungsminderung innerhalb der Nutzung von Primärenergie für die Minderung von CO<sub>2</sub>-Emissionen von großer Bedeutung.

Tabelle 5 fasst die Spanbreite des verschleißbedingten Anteils am Bruttoinlandsprodukt und anderen Kenngrößen zusammen. Im Auftrag der staatlichen Plankommission der Deutschen Demokratischen Republik (DDR) ging die Kommission für Schmierungstechnik (KfS) 1961 in einer vorsichtigen Hochrechnung von einem Einsparpotential in der Industrie in Folge von Verschleiß und Havarien von rund einer Milliarde Mark der DDR aus [10], was in etwa 1,25% des Bruttoinlandsproduktes<sup>7</sup> entsprach, wenn konsequent eine planmäßige Schmierung eingeführt wird. Die KfS ging sogar von „Milliardenbeträgen in jedem Jahr durch Vernachlässigung der Schmierungstechnik“ [11] aus. Die Schmierungstechnik fand in der DDR Eingang in die Gesetzgebung [12, 13] und wurde in die Lehrpläne der Universitäten aufgenommen.

Tabelle 5: Verbrauch von ökonomischen und ökologischen Ressourcen durch Verschleiß

Studien	Betrachtetes Jahr	Aufwendungen für Folgen des Verschleißes, Instandhaltungen, Reparaturen [%]	Bezugsgröße
<b>Einsparpotentiale</b>			
Deutschland (DDR)	1960	>1,25	Bruttoinlandsprodukt
China (nur Industrie#)	2006	1,55	Bruttoinlandsprodukt
<b>Gesamtaufwendungen</b>			
United States*	1976	>2,4	Bruttoinlandsprodukt
Deutschland (BRD)	1980	11,8	Bruttoinlandsprodukt
Canada (nur Industrie)	1982	0,9	Bruttoinlandsprodukt
Finnland [18]	1997	15,2	Umsatz der Minenindustrie
<i>Minenindustrie [18]</i>	<i>2014</i>	<i>6,2</i>	<i>Globaler Primärenergieverbrauch</i>

\*O.T.A. of U.S. Congress, nur für Automobil, Luftfahrt und Bahn= „Transportation“; # acht Industriebranchen

Die Materials Group des United States Office of Technology Assessment (OTA) bezifferte für 1975 die Kosten für Instandsetzungen und Reparaturen [14, 15] für Automobile, Flugzeugen und Eisenbahnen, also allein nur für „Transportation“, auf 46,8 Milliarden US-\$ oder 2,4% der Bruttoinlandsproduktes und sah ein Einsparpotential von 25-30%.

In der Bundesrepublik von 1982 wurden ca. 102 Milliarden € (200 Milliarden DM) für Instandhaltungen, Reparaturen und Folgen des Verschleißes aufgewendet [16] bzw. 11,8% des Bruttoin-

landsproduktes (BIP) der Bundesrepublik Deutschland in 1982 von 860 Mrd. €. In Finnland betragen 1997 die Instandhaltungskosten in der Minenindustrie 15,2% des Jahresumsatzes [18].

Insgesamt verbrauchten 2014 nach Holmberg et al. [17] Reibstellen bzw. tribologische Kontakte ca. 23% der globalen Primärenergie, welche sich auf die Überwindung der Reibung mit ca. 20 absoluten Prozent und mit ca. 3 absoluten Prozent für die Instandsetzung verschlissener Bauteile aufteilen. Der Anteil der Energieverluste durch Abnutzung in der Industrie wurde anhand der

<sup>7</sup> Das Bruttoinlandsprodukt der DDR betrug 1960= 79,4 Mrd. Mark der DDR.

Daten aus dem Bergbau berechnet [18] und stellt eine Obergrenze dar, da die Minenindustrie verschleißintensiv ist. Die Bergbau- und Minenindustrie ist ein grundlegender Teil der Weltwirtschaft und ein bedeutender CO<sub>2</sub>-Emittent. In dieser energetischen Betrachtungsweise hat die Instandsetzung bzw. der Verschleiß einen dreiprozentigen Anteil am globalen Primärenergieverbrauch und unter Berücksichtigung eines Anteils an erneuerbaren Energieträgern von derzeit 14% (IEA, 2018) dann einen 2,5%igen Anteil an den globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen<sup>8</sup> oder von derzeit ca. 827 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>.

Die volkswirtschaftliche Bedeutung der Tribologie beziffert eine umfassende zweijährige Untersuchung in China durch die Chinese Tribology Institution (CTI) [19]. Auf Basis der möglichen Ersparnisse von acht Branchen (Metallurgie, Energiewirtschaft, Eisenbahn, Automobilindustrie, Landwirtschaft, Schifffahrt) ergeben für die gesamte Volkswirtschaft konservativ geschätzte Einsparungen von 41,4 Milliarden US-Dollar pro Jahr zu Preisen von 2006, was Einsparungen in China von 1,55% des BIP (Bruttoinlandsprodukt 2006 von 2.774 Milliarden US-Dollar) entspricht [19, 20]. Als eine der Ursachen für die volkswirtschaftlichen Schäden werden Wissensmängel und fehlende Sensibilisierungen identifiziert, da auch in China Tribologie praktisch nicht unterrichtet wird.

Hingegen wird der Verbrauch an Primärenergie der weltweiten Minenindustrie auf 6,2% [18] des gesamten globalen Energieverbrauchs geschätzt oder rechnerischen 2,05 Gigatonnen CO<sub>2</sub>. Der Anteil der Minenindustrie inklusive anderer Grundstoffe am globalen Primärenergieverbrauch beträgt insgesamt ca. 9% [17], zusammengesetzt aus der Überwindung der Reibung und des Verschleißes, oder ca. 2,98 Gigatonnen CO<sub>2</sub>.

Ungefähr 38-43% der im Bergbau verbrauchten Energie wird zur Überwindung von Reibung verwendet, da sehr viele Tribosysteme (Reibstellen) nur ungeschmiert betrieben werden können. Darüber hinaus werden ca. 25% Primärenergie da-

für verwendet, um abgenutzte Teile wiederaufzubauen, auszutauschen sowie Ersatzteile und Ausrüstung vorzuhalten, die aufgrund von verschleißbedingtem Versagen spontan benötigt werden, womit sich ein Anteil von 1,6% am globalen Primärenergieverbrauch ergibt.

Korrosion und Tribologie sind als Oberflächeneigenschaften über die Tribokorrosion miteinander verbunden und bilden eine Schnittmenge. Beide sind für irreversible Material und Funktionsverluste verantwortlich. Die Schätzung der Kosten zur Korrosion von Metallen in der US-Wirtschaft erfolgte durch die Studie *Economic Effects of Metallic Corrosion* in den USA [21]. Die von Battelle Columbus Laboratories und dem National Institute of Standards and Technology (NIST) durchgeführte Studie ermittelte für 1975 Mehraufwendungen in Höhe von 82 Milliarden US-\$ oder 4,9% des Bruttoinlandsproduktes bzw. 382 Milliarden US-\$ umgerechnet in Preise von 2018. Man ging davon auf, dass ca. 60% dieser Summe unvermeidlich waren. Dagegen begründen Wissenslücken in der Oberflächentechnik, der Metallurgie und Elektrochemie die als vermeidbar angesehenen ca. 40% bzw. 33 Milliarden US-\$ oder 154 Milliarden US-\$ umgerechnet in Preise von 2018. Hingegen errechnen sich 1.000 Milliarden US-\$, wenn man den 4,9%igen Anteil der Korrosionsschäden am Bruttoinlandsprodukt der USA in 2018 von 20,5 Trillionen US-\$ anwendet. Zwischen 1999 und 2001 hat die CC Technologies im Auftrag der Federal Highway Administration (FHWA) und der National Association of Corrosion Engineers (NACE) für Kosten durch Korrosion ermittelt. Die gesamten direkten Kosten durch Korrosion für Infrastruktur, Versorgung, Transport, Produktion und Fertigung sowie bei Regierungsbehörden wurden auf die nationale Ebene hochgerechnet. Die Studie (U.S. Corrosion Costs study) kam zu dem Schluss, dass allein die direkten Kosten von Korrosion die US-Wirtschaft ungefähr 279 Milliarden US-Dollar pro Jahr kostet [22], was 3,1 % des Bruttoinlandsproduktes entspricht. Die Chinese Society for Corrosion and Protection beziffert für 2014 die Kosten von korrosionsbedingten Schäden auf 3,37% der Bruttoinlandsproduktes [23].

<sup>8</sup> Es gibt verschieden zusammengesetzte Emissionsmengen. Die globalen, energiebedingten (Öl, Gas und Kohle) CO<sub>2</sub>-Emissionen betragen 2018 (ohne die int. Luftfahrt) 33,3-33,9 Gigatonnen CO<sub>2</sub>. Unter Einbeziehung industrieller Nichtverbrennungsprozesse, wie der Baustoffproduktion (Zement, Ziegeln), erreichten 2018 die globalen CO<sub>2</sub>-Emission 37,9 Gigatonnen. Die gesamten, globalen Treibhausgasemissionen betragen 2018 ca. 51,8 Gigatonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten (U.N. Emissions Gap Report 2019). Die Differenz zu den CO<sub>2</sub>-Emissionen ergibt sich u.a. aus dem Anteil an anthropogenen, nicht CO<sub>2</sub>-Treibhausgasemissionen (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, SF<sub>6</sub>, FKW, NF<sub>3</sub>). Mit Einbeziehung der Emissionen aus Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft emittierte die Menschheit 2018 55,3 Gigatonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten an Treibhausgasen.

## 4.2. VERBRAUCH VON RESSOURCEN

Sowohl fossile, als auch CO<sub>2</sub>-neutrale Energieträger gehen bei einer energetischen Endnutzung letztlich einfach als CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre. Abgesehen von den Ressourcen, die Mobilitätsträger und Industriemaschinen verbrauchten, entsteht eine zu entsorgende Abfallmenge nach deren Stilllegen, die gesammelt, verarbeitet und recycelt oder deren Reststoffe endgelagert werden müssen, sodass mehr Ressourcen verbraucht werden müssen... und der Zyklus geht weiter; welche zuvor CO<sub>2</sub> in ihrer Genese erzeugte.

In der öffentlichen Diskussion und Wahrnehmung zur CO<sub>2</sub>-Frage werden technische Produkte ökologisch erst wahrgenommen, wenn „sie vor einem stehen“ („Tank-to-Wheel“) und die Frage, wieviel Ressourcen in deren Genese stecken, bleibt unbetrachtet, wie auch der Recyclingaspekt. Eine „cradle-to-grave“-Betrachtung beinhaltet die Herstellung, Nutzung bzw. Langlebigkeit und Entsorgung/Recycling und macht bei ernsthaften Betrachtungen Sinn.

Eine hohe Langlebigkeit stellt sicher, dass ein Gerät über einen längeren Zeitraum funktioniert und nicht häufig ausgetauscht werden muss. Eine lange und wartungsarme Lebensdauer spart stoffliche und monetäre Ressourcen, die für Ersatz(Neu)beschaffungen anfallen.

In der breiten Wahrnehmung der Öffentlichkeit nimmt man ein Fahrzeug oder eine Maschine erst wahr, wenn diese dasteht und übersieht den Verbrauch an metallurgischen Ressourcen, Primärenergie und Wasser, welche im gesamten Herstellungsprozess aufgewandt wurden, abgesehen vor der Entsorgung. Ausgangspunkt ist die „Bereitstellung“ der Hardware, welche materielle und energetische Ressourcen verbraucht. Folglich muss in einer ökologischen Valorisierung auch die Gestehung berücksichtigt und eine große Langlebigkeit angestrebt werden. Dieser Ansatz gilt für alle Arten von Geräten und Maschinen, die in der gesamten Industrie, Stromerzeugung und von Verbrauchern weltweit eingesetzt werden.

## 4.3. CO<sub>2</sub>-EMISSIONEN DER GEWINNUNG VON PRIMÄRMETALLEN

Tribosysteme werden aus Werkstoffen aufgebaut. Der weltweite fossile CO<sub>2</sub>-Ausstoß erreichte 37,9 Gigatonnen (GT= Gigatonnen) in 2018 [24]. Der globale Materialfußabdruck der „Metalle“ in 2017 betrug 9,120 Gigatonnen [25]. Bei der Gewinnung von Metallen, die zur Herstellung von Maschinenelementen bzw. Reibstellen (Tribosysteme) notwendig sind, entstehen Prozessemissionen, welche sich aus einem kumulierten Energieaufwand (KEA) und Rohstoffaufwendungen (KRA) in der Gewinnungsphase zusammen-

Tabelle 6: Durchschnittliche CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Primärerzeugung einer Tonne Primärmetall [26,27,28,29,30,31]

Primärmetall	CO <sub>2</sub> -Äquivalent [Tonne Metall]	Globale Produktion 2018 in tausend Tonnen	Rechnerische CO <sub>2</sub> -Emissionen aus der Primärerzeugung in tausend Tonnen
Titan	45	7.200	324.000
Nickel	42	2.330	97.860
Chrom	25	12.300	307.500
Magnesium	20-26	1.100	>22.000
Aluminium	14 (EU27)	64.800	907.200
Zink	9,8	13.400	131.320
Molybdenum	3,4-14,8	259	881-3.788
Kupfer*	5,5-9,5	23.600	129.800-224.200
Plastik+	~3,4	360.000	~1.224.000
Stahl (Eisen)	>1,8	1.808.000	>3.254.400
Zement	0,6-1,3	4.200.000	2.520.000-5.460.000
Zum Vergleich			
Deutschland 2019 <sup>9</sup>	–	–	684.000
Globale CO <sub>2</sub> -Emissionen 2018 <sup>9</sup>	–	–	37.900.000

\* aus Konzentraten, „open pit“ Mine; + Plastik= Thermoplaste, Polyurethane, Duroplaste, Elastomere, Klebstoffe, Beschichtungen und Dichtungsmittel sowie Polypropylen-Fasern.

<sup>9</sup> Die Treibhausgasemissionen in Deutschland betragen 2018 858,3 Megatonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten oder 755,3 Megatonnen CO<sub>2</sub> (ca. 88%) und mit Berücksichtigung des Luftverkehrs 888,3 Megatonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Die Treibhausgasemissionen gingen 2019 auf 805 Megatonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente (ohne Luftfahrt) bzw. 683,8 Megatonnen CO<sub>2</sub> zurück. Siehe Fußnote 8.

setzen. Aus beiden entstehen CO<sub>2</sub>-Emissionen bzw. CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Tabelle 6 fasst die CO<sub>2</sub>-Äquivalente für ausgewählte Metalle zusammen. Darüber hinaus entstehen aus industriellen Nichtverbrennungsprozessen ebenfalls CO<sub>2</sub>-Emissionen, wie in der Zement- und Ziegelherstellung (Siehe Fußnote 8). Auf der anderen Seite ist die Metallurgie sehr bemüht, ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen durch optimierte und neue Prozesse zu mindern, aber auch andere klimaschädliche Emissionen, wie SF<sub>6</sub> oder SO<sub>2</sub>, zu reduzieren. Ca. 50% der Stahlproduktion gehen in die Bauwirtschaft und Infrastruktur. Die OECD [3] geht davon aus, dass

bis 2060 die unweigerliche Zunahme des Materialverbrauchs von Metallen (Al, Cu, Fe, Mn, Ni, Cu, Pb, Zn) und mineralischen Ressourcen auf ca. 21% der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen ansteigen wird. Verlängerte Nutzungszeiten für diese Rohstoffe durch verbesserten Verschleiß- & Korrosionsschutz nutzen der CO<sub>2</sub>-Minderung.

Aus den CO<sub>2</sub>-Äquivalenten für ausgewählte Metalle und Grundstoffe in der Tabelle 6 kann man konservativ mindestens eine Tonne CO<sub>2</sub> pro Tonne Metall/Grundstoff annehmen.

## 5. NULLVERSCHLEISS ALS MÖGLICHKEIT ZUR NACHHALTIGKEITSSTEIGERUNG

Die Attribute „Lebensdauer/Haltbarkeit/Lebenszyklus“ sind in Bezug auf den Ressourcenverbrauch und die zukünftige CO<sub>2</sub>-Reduzierung erst einmal unscharf. „Nullverschleiß“ bzw. „Keinverschleiß“ kann als technologie- und fortschrittsfeindlich angesehen werden. Anlässlich einer Verschleißtagung 1938 (!) des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) wurde folgende Erklärung abgegeben [32]:

*„Die Verschleißforschung kann nie darauf gerichtet sein, der Erhaltung technisch und wirtschaftlich nicht mehr gerechtfertigter Betriebseinrichtungen zu dienen. Nur ein Kurzsichtiger wird daher ihr Ziel mit der Auffindung eines nicht verschleißenden Werkstoffes gleichsetzen ....“ (1938)*

In dieser interessanten Betrachtung muss man zwischen Verschleiß<sup>10</sup> und Veralten<sup>11</sup> trennen. Ein durch was auch immer veraltetes Gut muss ersetzt werden, während dies für ein nur verschlissenes, aber aktuelles Gut nur unnötig den Ressourcenverbrauch anheizt. Dies setzt die Reparierbarkeit und Verfügbarkeit an Ersatzteilen voraus. Folglich sollte der nachhaltige Verschleißschutz oder die Instandhaltung nicht das Leben

von veralteten Gütern verlängern, sondern dann auch eine Modernisierung des Gesamtsystems beinhalten, um der Veralterung vorzubeugen.

Zum Gesamtkonzept der Kreislaufwirtschaft gehört das vorgelagerte Produktdesign und Entwicklung von Dienstleistungen, um die Produktlebensdauer zu verlängern [33] und periodisch zu modernisieren, um den Verbrauch natürlicher Ressourcen zu verringern. Auf der anderen Seite muss man sich beim Übergang zu einer CO<sub>2</sub>-neutralen Gesellschaft vermehrt mit „verlorenen Vermögenswerten<sup>12</sup>“, also veralteten Gütern, betriebswirtschaftlich auseinandersetzen, ob diese modernisierbar sind.

§23 Abs. 2 Nr. 1 des Deutschen Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) fordert die Produktverantwortung als ein Nachhaltigkeitsfaktor ein, dass Erzeugnisse „mehrfach verwendbar und technisch langlebig“ sein müssen. Folglich verstärken sich politische Forderungen nach „Mindestanforderungen an die Produzenten, insbesondere für Konsumprodukte, für die Schaffung einer „längst-möglichen Haltbarkeit von Produkten“ im Sinne von Gestaltungsgrundsätzen zur Ressourcenschonung und als Gegenstand staatlicher Nachhaltigkeitssteuerung. Zum Themenkomplex der Lebensdauerverlängerung von

<sup>10</sup> Technischer oder physischer Verschleiß, werkstoffliche Obsoleszenz: Die werkstoffliche Obsoleszenz liegt in der mangelnden Leistungsfähigkeit von Materialien und Komponenten begründet, aber auch in einer extensiven oder intensiven Nutzung.

<sup>11</sup> Funktionale Obsoleszenz, moralischer Verschleiß: Ursachen der funktionalen Obsoleszenz sind die sich rasch verändernden technischen und funktionalen Anforderungen an ein Produkt oder infolge der Überalterung durch den technischen Fortschritt.

<sup>12</sup> Verlorene Vermögenswerte („stranded assets“) sind Vermögenswerte, die vorzeitig veraltet sind oder keine Erträge mehr erbringen und daher abgeschrieben werden müssen. Sie können vermehrt als Folge von Gegenmaßnahmen zum Klimawandels auftreten. Verlorene Vermögenswerte bedingen einen erhöhten Kapitalbedarf für Neuinvestitionen, der durch Instandsetzungen (Fußnote 15) und Leistungssteigerungen gemindert werden kann.

verschlissenen Gütern gehört auch die Reparaturfreundlichkeit („easy-to-dismantle-design“). Erstausrüster (OEMs) und Endkunden nehmen „Nullverschleiß“ unterschiedlich wahr:

- » **Endkunden:** Wartung und Stillstand bestimmen die Betriebskosten der Endbenutzer. Umweltschutz und Neuanschaffungen gehen durch deren Geldbeutel
- » **OEMs:** Ersatzteile, Dienstleistungen und Zubehör leisten einen bedeutenden Beitrag zum Gewinn der OEMs
- » **Gesellschaft:** Ressourcenschonung und Materialeffizienz sind heute politische und wirtschaftliche Treiber.

Die Lösung dieses Dilemmas mag u.a. in der technischen Auslegung der Reibstellen (Tribosysteme) begründet sein:

Eine hohe oder zu hohe Verschleißbeständigkeit von Tribomaterialien oder Beschichtungen kann durch eine signifikante Erhöhung des PxV-Wertes<sup>13</sup> unter Gleiten, hohen Hertzschen Kontaktpressungen unter Wälzreibung, über angehobene Leistungsdichten, Betriebstemperaturen oder in der Betriebszeit ohne Wartung aufgebraucht werden. Dieser Ansatz fördert auch den Leichtbau mit einem verminderten Materialeinsatz bzw. verbesserter Ressourcenschonung.

Die tribologischen Leitprinzipien für zukünftige und nachhaltige Produktentwicklungen sind:

#### **Energieeffizienz, Verschleißschutz, Sicherheit, Erschwinglichkeit, Performance.**

- » **Energieeffizienz.** Kraftstoffverbrauch, abgesehen von steigenden Motorleistungen, hatte in den letzten Jahrzehnten die Entwicklung der Motorentechnologie geprägt, was heutzutage in CO<sub>2</sub>-Emissionen gemessen wird.
- » **Verschleißschutz.** Verschleißschutz ist ein Synonym für Materialeffizienz und Ressourcenschonung. Es gewinnt eine stärkere Bedeutung vor dem Hintergrund der Zunahme an Antriebstechnologien und Mobilitätsformen. Endkunden und Verbraucher wollen, brau-

chen und erwarten alternative Lösungen, welche nachhaltig sind und auch nachhaltig funktionieren.

- » **Sicherheit.** Natürlich ist der sichere Gebrauch von alternativen Antrieben und Energieträgern die Grundvoraussetzung für Passagiere und Betreiber. Sie definiert auch das wichtigste Entwicklungsziel; den Schutz vor Versagen von Maschinenelementen durch die Tribologie und Schmierungstechnik.
- » **Erschwinglichkeit.** Abgesehen von der technischen Funktionsfähigkeit stellt die Wirtschaftlichkeit einer alternativen Lösung die größte Hürde für deren globale Marktdurchdringung dar und definiert den technologischen Entwicklungsbedarf zu deren Kostensenkung.
- » **Performance.** Die Leistungsfähigkeit bzw. „Fit for Purpose“ ist die industrielle Grundvoraussetzung einer jeden neuen Technologie.

Es sind verschiedene Visionen und Geschäftsmodelle zur Nutzung vom „Nullverschleiß“ vorstellbar. Hierzu zählt auch „Zeronize“ [34] oder „Green Tribology“ [35] genauso wie das Thema „Upycling“. „Zeronize“ symbolisiert die Bemühungen zur Minimierung negativer und nachteiliger Auswirkungen der Energieumwandlung und/oder der Mobilität auf die Umwelt. Der Begriff „Green Tribology“ erweitert die klassischen Ziele der Tribologie, wie Reibungsminderung, Verschleißschutz und Optimierung der Schmierung, um neue Attribute, wie Energie- und Materialeffizienz, Ressourcenschonung, Emissionsminderungen, umweltverträgliche Schmierstoffe. Eine allseits bekannte Maßnahme für die Wiederverwertung von Rohstoffen, welche als Abfallprodukte definiert sind, ist das „Recycling“. Mit diesem Begriff ist nicht nur in den Köpfen unserer Gesellschaft, sondern auch in der praktischen Umsetzung derzeit noch in vielen Fällen eine Abwertung der Rohstoffqualität verbunden, als ein „downcycling“. Um im Ergebnis der Abfallverwertung wenigstens einen Recyclingstand und somit die gleiche Ausgangsfunktionalität des Rohproduktes bzw. eine Nutzbarkeit des Abfallproduktes in einem neuen Produktverbund zu erreichen, müssen dem Abfallprodukt Primärrohstoff-

<sup>13</sup> Der PxV-Wert stellt eine tribologische Belastungsgröße dar. Sie ist das Produkt aus der mechanischen Kontaktspannung mal der Gleitgeschwindigkeit.

fe zugeführt werden. Damit ist wiederum ein erhöhter CO<sub>2</sub>- und Materialaufwand verbunden. Ebenso erfordert die stoffliche Verwertung von Abfallprodukten im „Downcycling“ Prozess oft einen hohen Energieaufwand, um Abfallprodukte in ihre Einzelbestandteile zu zerlegen.

Eine Alternative zur Reduktion der zusätzlichen Primärrohstoffnutzung und den für die Primärrohstoffherstellung notwendigen CO<sub>2</sub> Ausstoß im „Recycling“-Prozess bei gleichzeitiger Reduktion des innerhalb der Abfallverwertung im „Downcycling“ Prozess zu verzeichnenden CO<sub>2</sub>, stellt das „Upcycling“ dar. Damit ist die Nutzung von scheinbar nutzlosen Materialien für neuwertige Produkte gemeint: alte Auto-Gummireifen werden zu Flip-Flop Sohlen, Holzpaletten dienen als Rohkonstruktion von Betten, Nylonstrumpfhosen werden als Haargummis genutzt und alte Glasflaschen werden zum Bau von Häusern verwendet. Vor allem in Entwicklungsländern finden „Upcycling“ Konstruktionen notgedrungen seit Jahrzehnten Anwendung. Mittlerweile entwickelt sich aber auch in den Industrienationen ein Verständnis für das Potential von „Upcycling“ zum Schutz der Umwelt und somit auch zum Schutz der Menschheit selbst. Glücklicherweise birgt dieses Potential parallel auch wirtschaftliche Vorteile, wobei einige Industriebetriebe diesen Kontext zusätzlich bereits mit der Tribologie verknüpft haben. So werden beispielsweise bereits gebrauchte Industrieschmierstoffe zu neuen Grundölen mit deutlich besserem Viskositäts-Temperaturverhalten re-raffiniert. Die Ausbeute an neuen Grundölen aus Gebrauchtölen liegt mit

diesem Verfahren bei 70%, wohingegen bei der Erstraffination aus Rohöl lediglich 2 % nutzbare Grundöle entstehen. Allein dadurch wird ein erheblicher CO<sub>2</sub> und Materialanteil zur Herstellung brauchbarer Grundölen eingespart. Weiterhin fallen bei der Herstellung und Verwertung von neuen Industrieschmierstoffen ausgehend von der Raffinierung bis hin zur Verbrennung 2,7 Tonnen CO<sub>2</sub> an. Somit wird beim „Upcycling“ der Gebrauchtöle mindestens auch der in dieser Summe beinhaltete CO<sub>2</sub> Ausstoß des Verbrennungsprozesses eingespart, der innerhalb der Schmierstoffverwertung anfällt [36].

Zugegebenermaßen müssen Grundöle aus Reraffinaten auch mittels Additiven funktionalisiert werden. Aber auch hier ergeben sich Potentiale innerhalb der tribologischen Forschung und Entwicklung entsprechende Additive als „Upcycling“ Produkte zu designen. Ein Beispiel findet sich in der Aufwertung von PTFE Materialien. Dabei konnte in Forschungsarbeiten bereits durch Nutzung tribologischer Untersuchungsmethoden festgestellt werden, dass das zu Nanopartikeln verarbeitete PTFE Sekundärmaterial in unterschiedlichen Grundölen eine geringere Reibung erzeugt, als das in gleichen Grundölen zu Nanopartikeln verarbeitete PTFE Neumaterial. PTFE Neu- und Sekundärmaterialien hatten dabei vergleichbare Verschleißigenschaften, die besser als die verwendeten Grundöle ohne Nanopartikelzusatz waren [37]. Zusammenfassend wird anhand der Beispiele deutlich, dass tribologische Kenntnisse zur Entwicklung von Produkten mit Upcycling-Charakter unabdingbar sind.

## 6. VERSCHLEISSCHUTZ

Gesetzgeber und Aufsichtsbehörden versuchen mit Vorschriften weltweit die Nachhaltigkeit auf ein breites Produktspektrum anzuwenden, welche sich zumeist an den CO<sub>2</sub>-Emissionen orientiert. Fahrzeuge (Boden-, See- und Lufttransporte), die während ihrer gesamten Lebensdauer mit gleichbleibender Effizienz betrieben werden, sind ein wichtiger Teil des Puzzles.

Es ist wichtig, sich auch daran zu erinnern, dass Haltbarkeit bzw. Verschleißschutz untrennbar mit Nachhaltigkeit verbunden ist, und Nachhaltigkeit eines der wichtigsten Ziele für die heutige Gesellschaft ist. Langlebigere Produkte valorisieren auch die darin eingebetteten Materialien, Primärenergie und Arbeitsleistungen besser. Die Verlängerung der Lebensdauer erlaubt eine intensivere Nutzung von Ressourcen in den Gebrauchsprodukten in der Technosphäre der Kreislaufwirtschaft.

Die Anforderungen an Emissionen<sup>14</sup> und Kraftstoffverbrauch haben die Weiterentwicklungen, insbesondere in der Mobilität, stark gefördert. Neben einer robusten Auslegung ist die Zustandsüberwachung bzw. das Wartungskonzept ein integraler Bestandteil des Verschleißschutzes. Insbesondere kann kein Mobilitätsträger seine beabsichtigten Emissions- und Kraftstoffverbrauchswerte aufrechterhalten, ohne regelmäßig zum richtigen Zeitpunkt mit frischen Hochleistungsflüssigkeiten befüllt zu sein. Hoch-

leistungsschmierstoffe bilden hier einen Teil der Antwort für die Erhöhung der Lebensdauer und damit zur Nachhaltigkeit bei allen Arten von Industriemaschinen und -ausrüstungen. Schmierstoffe verfügen, insbesondere in Deutschland, über einen seit Jahrzehnten angestammten Kreislauf zur stofflichen Wiederverwertung. Die Schmierstoffindustrie und die Werkstofftechnik müssen weiterhin nach leistungsfähigeren Produkten streben, und dabei die Bedeutung von Haltbarkeit und Nachhaltigkeit zu betonen.

Z.B. werden die zukünftigen E-Schmierstoffe und E-Fluide die E-Mobilität ökonomisch unterstützen, da erwartet wird, dass diese während des gesamten Lebenszyklus des Fahrzeugs funktionieren (ein Konzept, das als „Lebensdauer-schmierung“ bzw. „Fill-for-life“ bezeichnet wird). Die hier erforderlichen Technologien müssen selbst für die gesamte Nutzungsdauer des Fahrzeugs gebrauchstauglich sein und gleichzeitig ihre tribologischen Schutzwirkungen über denselben Zeitraum beibehalten.

Neben den Schmierstoffen zählen die Materialauswahl und geeignete Oberflächenbehandlungen, wie Nitrieren, Nitrocarburieren, Dünn-schichttechnik und die gezielte Oberflächenstrukturierung, zu wichtigen und beeinflussbaren Stellgrößen eines tribologischen Systems, um es langlebig und somit auch nachhaltig auszuliegen.

## 7. ZUSTANDSÜBERWACHUNG<sup>15</sup>

Große Investitionsgegenstände, wie sie beispielsweise in einem Automobil-Stanzwerk vorhanden sind, stellen große Kapitalinvestitionen dar und erfordern erhebliche Ressourcen, um sie zu ersetzen, wenn die Haltbarkeit der Anlagen und der Werkzeuge nicht den Anforderungen entspricht. Frühzeitig Ausfälle durch ungünstige Betriebsbedingungen oder eskalierender Schäden gilt es daher unbedingt zu vermeiden. Anderer-

seits ist eine große Turbine in einem Wasserkraftwerk auf eine Lebensdauer von Jahrzehnten ausgelegt – so lange deren Korrosions- und Verschleißzustände unkritisch sind.

Das Spektrum der Nutzungsprofile ist kundenspezifisch und zeitlich veränderlich. Folglich können Komponenten in einem Produkt nie gemeinsam das Nutzungsende erreichen und es wird

<sup>14</sup> Emissionen von Schwefeloxiden, Stickoxiden und Partikeln, abgesehen von CO<sub>2</sub>, aus Verbrennungsprozessen, die durch die Kraftstoffzusammensetzung beeinflusst werden können. Vorschriften regeln den Schwefelgehalt von Kraftstoffen, die in solchen Anwendungen verwendet werden. Alle unterliegen daher gesetzlichen Kontrollen. Die Hochseeschifffahrt hat hier gegenüber dem Landtransport einen Nachholbedarf.

<sup>15</sup> Synonym verwandte Begriffe sind: Wartung, Unterhaltung und Instandsetzung, sowie Maintenance, Repair&Overhaul (MRO); Reuse, repair, redistribute, refurbish&remanufacture.

ohne Zustandsüberwachung ein erhebliches Potential an Nutzungsdauer als Ressourcenverbrauch verschenkt. Unerkannter oder unerwarteter Komponentenverschleiß führt zu enorm hohen Kosten und einem steigenden Unfall-/Ausfallrisiko. Die konventionelle Instandhaltungsplanung ist hauptsächlich als

- a. reaktive Instandhaltung (Wartung nach Ausfall) oder
- b. präventive Instandhaltung (Wartung nach Historiendaten) ausgelegt,

wobei zukünftig

- c. die vorausschauende Instandhaltung (Wartung nach Echtzeitdaten)

an Bedeutung gewinnen wird, wobei die ausfallorientierte Instandhaltung oder „Bruchwartung“ als passive Strategie hinzugehört. Die wichtigsten Methoden zur Zustandsüberwachung stellen die Körperschall- und Schmierstoffanalysen dar.

Bei der jahrzehntelang praktizierten Methode der vorbeugenden Instandhaltung werden Teile ersetzt, deren Abnutzungsvorrat bei weitem noch nicht verbraucht ist. Das verursacht nicht nur Kosten, sondern unterläuft das Handlungsprinzip der Ressourcenschonung. Dagegen ermittelt die vorausschauende Instandhaltung die verbleibende Lebensdauer jeder Hauptkomponente, um einen langfristigen Betrieb zu ermöglichen, möglichst über die Designlebensdauer hinaus.

Die Beurteilung des Gebrauchszustandes von Schmierstoffe erfolgt zumeist über analytische Methoden an periodisch entnommenen Proben. Sobald Erfahrungsgrenzen eines oder mehrerer Kenngrößen erreicht sind, erfolgt die Empfehlung zum Schmierstoffwechsel. Die moderne technische Entwicklung geht dahin, dass viele der zur Bewertung benötigten analytischen Messparameter Sensor basiert gemessen und damit online ermittelt werden können. Diese Entwicklung ermöglicht eine feinmaschigere Beobachtung und damit letztendlich nicht nur eine verbesserte Ressourcenausnutzung durch eine wirklich bedarfsgerechte Wartung, sondern die Möglichkeit Trends zu erkennen und damit eine vorausschauende Instandhaltung (Wartung nach Echtzeitdaten) zu etablieren. Es sind verschiedene Messmethodiken (onboard sensor) entwickelt

worden, welche im Schmierstoff auf Basis der Messung

- a. der Schallgeschwindigkeit,
- b. der dielektrischen Eigenschaft,
- c. der magnetischen Eigenschaft
- d. der elektrischen Leitfähigkeit,
- e. der Dämpfung piezoelektrisch angeregter Oberflächenwellen,
- f. das Adsorptionsspektrum in nahen Infrarotbereich
- g. oder
- h. die Werkstoffermüdung durch
- i. Schallemissionsanalysen (Vibrationen) und auch
- j. auf Basis von Nutzprofilalgorithmen,

sowie Kombination davon, die spezifischen Parameter zur Ölalterung während des Betriebs verfolgen, um die Zeitpunkt bzw. den Induktionszeitpunkt zu erfassen, ab welchem die Ölalterung beschleunigt fortschreitet. Natürlich werden diese Systeme auch mit den vorgefundenen Widrigkeiten konfrontiert. So können beispielsweise Kontaminationen der Sensoroberflächen die Meßstabilität dieser „onboard labs“ mindern. Weder im Labor noch onboard werden bislang tribologische Kenngrößen zur verbliebenen Fresstragfähigkeit oder Verschleißbeständigkeit gemessen. In der Regel werden hier „indirekte“, analytische Stoffeigenschaften zur Beurteilung herangezogen. Die Möglichkeit Reibung über Reibmomente der Komponenten zu bestimmen oder entsprechende Veränderungen indirekt über die Messung von Temperaturen zu ermitteln, ist Stand der Technik.

Neben der beschriebenen Schmierstoffanalyse sind Körperschallmessungen die wichtigsten Methoden zur Zustandsüberwachung von Bauteilen. Mittels Körperschall können Schäden in ihrem Frühstadium erkannt werden. Es ist dadurch möglich eskalierende Schäden, wie sie langfristig zum Beispiel durch einen Lagerschaden in einem Getriebe entstehen würden, abzuwenden. Sehr hochauflösende Verfahren bieten hier zudem die Möglichkeit einer Früherkennung indem bereits Anrisse erkannt werden und damit in Grenzen eine planbare Instandsetzung mit kurzen Stillstandszeiten möglich ist. Grundsätzlich spricht man bei der dem Vorgehen über die ausfallorientierte Instandhaltung auch von „Bruchwartung“.

## 7.1. TRIBOTRONIK

Aktuelle tribologische Kontakte sind in der Regel passiv ausgelegt, ohne dass im Betrieb Einfluss auf eine Veränderung des Tribosystems genommen werden kann. Tribotronik bezeichnet den kombinierten Einsatz von Tribologie und Elektronik zur aktiven Steuerung und Überwachung tribologischer Systeme und „Echtzeit“. Die Tribotronik berücksichtigt nicht nur die in Echtzeit gemessenen Leistungsparameter, wie Reibungszahl, Verschleißbetrag, Schallemissionen oder Vibrationen, sondern beeinflusst bewusst zusätzlich diese über eine elektronische Steuerung und Anpassung der Betriebsweise [38]. Unter Tribotronik versteht man die Anwendung mechatronischer/elektronischer Systeme in tribologischen Anwendungen, zusätzlich ausgestattet mit einer intelligenten Komponente, die es ermöglicht datenbasiert durch tribologische Algorithmen Vorhersagen zu treffen, um zum Beispiel die Zielgröße Lebensdauer des Systems zu optimieren.

Die Ziele sind:

- die Lebensdauer, Leistung, Effizienz, Zuverlässigkeit zu erhöhen,
- die verbleibende Lebensdauer vorherzusagen und
- das Ausfallrisiko des tribologischen Systems sicher und frühzeitiger vorhersehen.

Ein tribotronisches System besteht folglich im Wesentlichen aus den vier Komponenten:

- » Sensoren zur Generierung und Bereitstellung von tribologischen Zustandsdaten an die tribotronische Informationszentrale,
- » Tribologische Datenbanken die Vorhersagen ermöglichen und Algorithmen, die eine erforderliche Aktion berechnen können,
- » Computer und Software, als eine elektronische Steuereinheit zur Echtzeit Datenverarbeitung und dem Abgleich mit tribologischen Algorithmen und
- » Aktuatoren zum aktiven Eingriff in das Tribosystem, geregelt durch die elektronische Steuereinheit.

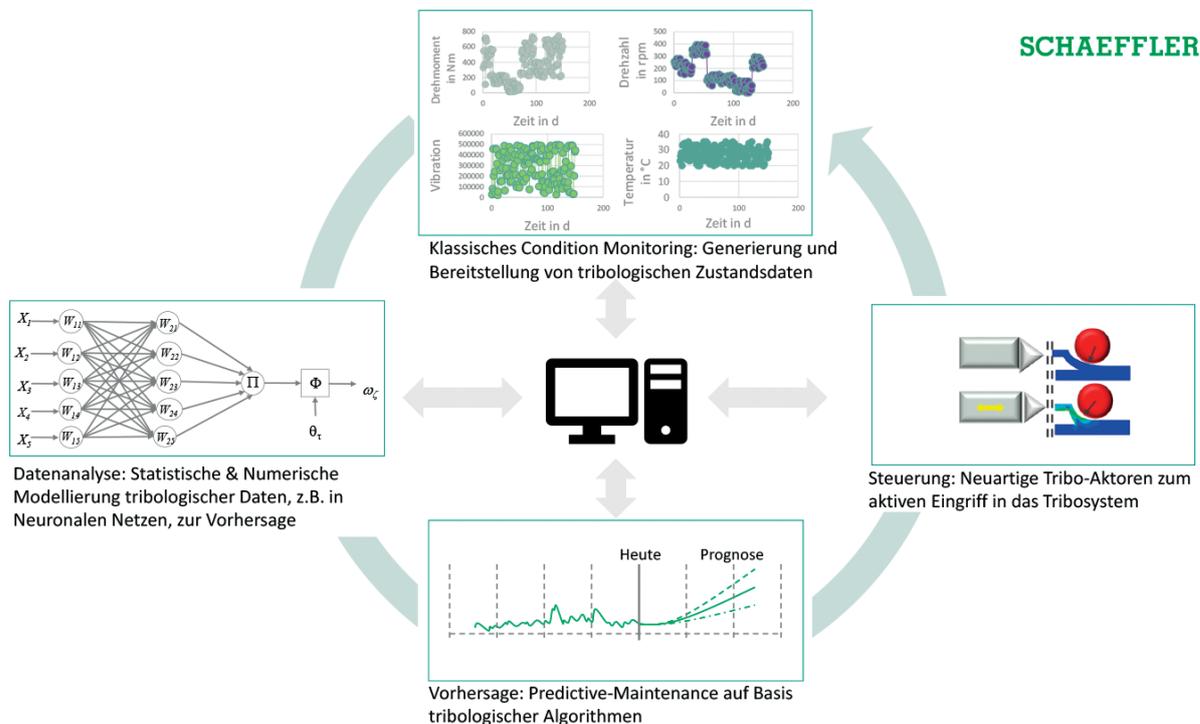


Bild 1: Regelkreis eines tribotronischen Systems (SCHAEFFLER AG)

In der Tribotronik wird das Bauteil zum Sensor oder Aktor - oder anders ausgedrückt: Der Sensor oder Aktor wird zum Bauteil. Dies eröffnet der Dünnschichtsensorik ein völlig neues Anwendungsspektrum. Die Oberfläche liefert Daten über die Funktionszustände in Echtzeit. Auf diese Weise können Beanspruchungsparameter wie Kraft, Drehmoment und Temperatur, Vibrationen, Additivkonzentration und Umgebungfeuchtigkeit eines Bauteils Vorort gemessen werden, an denen herkömmliche Sensoren, wie z. B. geklebte Dehnungsmessstreifen, nicht verwendet werden können, da sie durch Alterung des Materials oder Signalverschiebung der Polymerklebstoffe oder Transferfolien gefährdet sind. Metall- oder kohlenstoffbasierte Dünnschichtsensoren bieten eine zukunftsweisende Strategie für die Entwicklung intelligenter Sensoren mit den Vorteilen niedriger Kosten, einfacher Anwendung und hervorragender Empfindlichkeit, welche nicht nur der Investitionsgüterindustrie vorbehalten bleibt, sondern auch beim Endverbraucher Einzug findet. Darüber hinaus können Messungen in bisher nicht zugänglichen Bereichen auf Bauteilen (embedded sensors, Siehe Bild 2) oder direkt im tribologischen Kontakt selbst vorgenommen werden, da Dünnschichtsensoren nicht nur wenig Bauraum, sondern auch einen geringen Eigenenergieverbrauch vorweisen.

Tribotronik ermöglicht adaptive und/oder aktive Betriebsweisen tribologischer Systeme. Tribotronik eröffnet eine völlig neue Palette von Anwendungen für Dünnschichtsensortechnologien. Durch die Kombination von Kraftwandlern, Datenübertragung und Übertragungsstrukturen für die Energieversorgung und Energieerzeugung werden autonome Messsysteme zukünftig auch für rotierende Teile möglich.

Tribotronik identifiziert das Überlasten bzw. Überlastungen und liefert Lastkollektivdaten für Algorithmen zur Hochrechnung der Restlebensdauer und schließt den Kreis zum Condition Monitoring und zur Predictive Maintenance. Die Tribotronik leistet somit einen unverzichtbaren Beitrag für die Nachhaltigkeit über Lebensdauerverlängerungen und Effizienzsteigerungen.

Die Kolbengruppe im Verbrennungsmotor ist nicht nur die Kernkomponente, sondern hat auch mit ca. 50% den größten Anteil an der Reibungs-



Bild 2: Dünnschichtsensorik in einem Radlager (Schaeffler SensoTect, oben) und auf einem Polymersubstrat zur Temperatur und Dehnungsmessung (Oerlikon Balzers Diarc Senso, unten)

verlustleistung. Eine denkbare Anwendung der Tribotronik ist zum Beispiel im Kolbenring/Zylinderlaufbahn-Kontakt, wo lokal der Kolbenverschleiß kontinuierlich gemessen wird, eine elektronische Steuereinheit zu etablieren, die durch Tribo-Aktuatoren Öl-Einspritzdüsen steuert, die das Schmiermittel so verteilen, dass Reibung oder Verschleiß reduziert wird. Ein tribologischer Algorithmus kalkuliert dabei die Menge, des zu alimentierenden Schmiermittels, um dadurch einen effizienten Einsatz eines bestimmten Schmiermittels zu garantieren, unter Berücksichtigung des minimalen Verschleißes [39].

Eine weitere Ausführungsform wäre zum Beispiel im Wälzlager die Schmiegun der Laufbahn so zu verändern, dass die Anwendung stetig im optimalen Bereich, mit minimaler Reibung bei veränderlich, der Belastung angepassten Tragfähigkeit, betrieben werden kann. Weitere denkbare Einsatzmöglichkeiten im Automobilbereich sind dar-

über hinaus Temperaturmessungen zur Zustandsüberwachung von Elektromotoren, Drehmoment und NVH-Überwachung (Noise, vibration and harshness) in Getrieben und die Überwachung von Betriebszuständen von kritischen Motorenkomponenten (Ventiltrieb, Pumpen).

Die zielorientierte Kombination des gesammelten Wissens in Tribologie, Elektronik, Steuerungstechnik und Mechatronik schafft dadurch die Möglichkeit für die Entwicklung neuer Arten von eingebetteten tribotronischen Systemen. Mit der Tribotronik wird somit nicht nur die Funktionsleistung von Industriemaschinen verbessert, es eröffnen sich weiterhin auch innovative Lösungen für bestehende Technologien, um die Nutzungsdauer und Verfügbarkeit zu steigern, Reibungsverluste zu senken sowie tribologische Kenngrößen direkt zur Betriebsarteinstellung mechanischer Systeme zur nutzen.

Zustandsüberwachung kann darüber hinaus auch im Reifen eingesetzt werden. In der Fahrpraxis werden viele Pneu deutlich früher ersetzt, nämlich jeder zweite Pneu schon bei 3 Millimeter Restprofil oder früher (Siehe Kapitel 8.1). Mit den im Reifen integrierten Laufflächenabnutzungssensoren [40] können Reifen sicher bis zur gesetzlichen Verschleißgrenze von 1,6 mm abgenutzt werden, was in Europa ca. 6,6 Megatonnen CO<sub>2</sub> einsparen würde. Dies bedeutet eine Einsparung von ca. 25 Millionen Reifen in Europa [41].

## 7.2. SMART FLUIDS

Ein anderer Ansatz zur aktiven Beeinflussung tribologischer Systeme während des Betriebs kann durch „intelligente Fluide“ (*Smart Fluids*) realisiert werden. *Smart Fluids* ermöglichen beispielsweise die Änderung der Viskosität einer Flüssigkeit durch Anlegen eines elektrischen oder magnetischen Feldes.

Die heute am weitesten entwickelten *Smart Fluids* sind Flüssigkeiten, deren Viskosität steigt, wenn ein Magnetfeld angelegt wird (MRF). Ein weiterer wichtiger Typ sind elektrorheologische Flüssigkeiten (ERF), deren Strömungswiderstand durch ein angelegtes elektrisches Feld schnell und drastisch verändert werden kann [42].

Andere intelligente Flüssigkeiten ändern ihre Oberflächenspannung bei Vorhandensein eines elektrischen Feldes. Dieser Effekt wurde z.B. verwendet, um sehr kleine steuerbare Linsen herzustellen: Ein Tropfen dieser Flüssigkeit, der von Öl umgeben ist, dient als Linse, deren Form durch Anlegen eines elektrischen Feldes geändert werden kann.

Magneto-rheologische Flüssigkeiten (MRF) sind funktionelle Arbeitsmedien, deren Fließverhalten durch Anlegen eines permanenten bzw. variablen elektromagnetischen Feldes in weiten Bereichen verändert werden können. Die Zusammensetzung einer magneto-rheologischen Flüssigkeit besteht grundsätzlich aus einer Trägerflüssigkeit, ferromagnetischen Partikeln sowie optionalen Zusätzen zur Verbesserung bestimmter anwendungstechnischer Eigenschaften der jeweiligen Produkte; insbesondere werden Zusätze (Additive) benötigt, um die Sedimentationsneigung der spezifisch schwereren Magnetpartikel zu minimieren. Das angelegte Magnetfeld bewirkt, dass sich die magnetischen Dipole ausrichten und Ketten bilden, die die Viskosität erhöhen.

MRF-Produkte sind anwendungstechnisch vielseitig sowohl für hydrodynamische bzw. hydrostatische als auch schmiertechnische Aufgaben einsetzbar. Bekannte Anwendungspotentiale liegen in den Bereichen der adaptiven Dämpfung, Kupplung und programmierbaren Bremssysteme, aber auch zur Fixierung von Verschleißschutzmitteln wie auch als Dichtungsmedium für bewegte Wellen. MRF werden in der Federung einiger Automodelle eingesetzt. Abhängig von den Straßenverhältnissen wird die Viskosität der Dämpfungsflüssigkeit angepasst; theoretisch kann dadurch der Verschleiß von Reifen und Straßenbelag reduziert werden, insbesondere bei schweren Fahrzeugen.

Als Nachteile der MRF sind insbesondere Kosten und Gewicht zu nennen. MRF-Lösungen sind teurer als herkömmliche Systeme, bieten jedoch schnellere Steuerungsmöglichkeiten. Zur Bereitstellung der notwendigen Magnetfeldstärken werden relativ große ferromagnetische Konstruktionen mit entsprechendem Gewicht benötigt. Diese Nachteile haben einen größeren Einsatz von MRF immer wieder behindert.

Elektro-rheologische Flüssigkeiten (ERF) sind nicht-abrasive Mischungen aus (i.A.) Silikonöl und Mikrometergroßen Polyurethan-Partikeln. Unter dem Einfluss äußerer elektrischer Felder bilden die Partikel faserartige Mikrostrukturen, die die Fließeigenschaften der Flüssigkeit verändern (kontrollierbare Rheologie). Damit werden neue Steuerungssysteme für Industrie- und Automobilanwendungen denkbar; ERF können perspektivisch zur Steuerung der Kraft- und Drehmomentabgabe durch externe elektrische Ansteuerung oder für Bewegungs- und Vibrationskontrollsysteme eingesetzt werden.

Der Hauptnachteil von ERF liegt in den für den Betrieb erforderlichen sehr hohen elektrischen Spannungen, die einen Einsatz im Automobilbereich stark begrenzen.

### 7.3. VORAUSCHAUENDE ZUSTANDS-ÜBERWACHUNG

Nach der ISO 17359 gibt es verschiedene Instandhaltungsstrategien. Zu den zukunftsgerichteten gehören die zustandsorientierte und vorausschauende Zustandsüberwachung sowie die Tribotronik. Die vorausschauende Instandhaltung reduziert ungeplante Ausfallzeiten, wobei die Investitionskosten eines Systems zur vorausschauenden Instandhaltung in keinem Verhältnis zu den Steigerungen in der Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit stehen. Derartige Systeme erlauben eine kontinuierliche Kontrolle des Zustandes

der Komponenten und das Anzeigen abnormaler Betriebszustände, wobei parallel eine Abschätzung der Restlebensdauer des Systems erfolgt. Auf dieser Basis können die Wartungsintervalle auf den tatsächlichen Bedarf optimiert und notwendige Reparaturen zu passenden Zeiten vorgenommen werden. Auf Basis der gesammelten Daten kann die Betriebsweise optimiert werden, wodurch Überlastungen vermieden werden.

Bild 3 verdeutlicht die Vorwarnzeiten verschiedener Schädigungszustände und Ausfallerscheinungen. Die Zustandsüberwachung mittels Körperschallspektren detektiert Schäden im frühen Stadium, wobei der Nachteil darin besteht, dass eine gewisse Schädigung der Reibflächen eingetreten sein muss, damit ein Signal erfasst werden kann. Dagegen detektiert ein Schmierfettsensor (Siehe Bild 2) relevante Zustandsänderungen des Fettes bevor es zu Schädigungen im Wälzlager kommt. Der Fettwechsel wird sich somit zukünftig am tatsächlichen Gebrauchszustand orientieren, sodass ein Lagertausch mit Stillstandzeiten vermieden wird.

Konkrete Zahlen am Beispiel einer 2,3 Megawatt Windenergieanlage machen dies deutlich: Die zeitliche Verfügbarkeit einer Windenergieanlage von 95 Prozent im ersten Jahr sinkt auf ca. 82 Prozent im 20. Lebensjahr mit einem Median von 88,5 Prozent [44]. Gleichzeitig sinken auch die Erträge einer Windenergieanlage aufgrund sinkender kWh-Preise um etwa 7 Prozent pro Jahr. Die

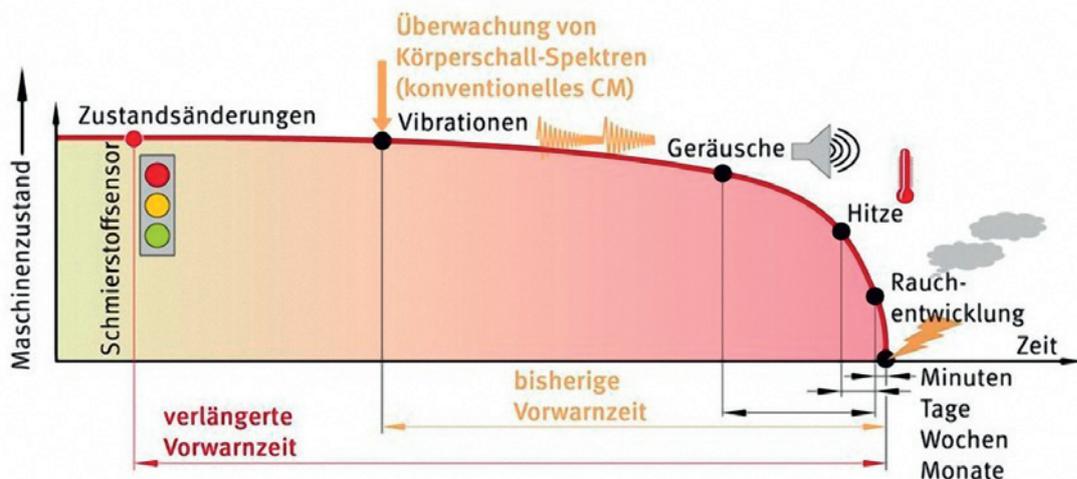


Bild 3: Vorwarnzeiten von Methoden und Ereignissen für verschiedene Zustände der Maschine [43, FAG GreaseCheck]

Betriebskosten machen ca. 75 Prozent der gesamten Erstinvestition in den zwanzig Lebensjahren aus. Ungefähr 50 Prozent der Betriebs- und Wartungskosten entfallen auf nicht geplante Eingriffe. Konkret heißt dies, dass für einen 2,3 Megawatt Windgenerator in 20 Jahren Betriebskosten in Höhe von ca. 1,6 Mio. Euro veranschlagt werden, von denen bis zu 1,1 Mio. Euro auf außerplanmäßige Reparaturen und Wartung zurückzuführen sind. Mit Hilfe der vorausschauenden Instandhaltung können die Betriebskosten also um bis zu 60 Prozent gesenkt werden, wenn sich der Schaden durch die Früherkennung auch vermeiden lässt.

#### **7.4. INLINE ZUSTANDSÜBERWACHUNG VON SCHMIERSTOFFEN**

Ein Aspekt der Ölzustandsüberwachung ist das ökologisch und ökonomisch erstrebenswerte Ausreizen der tatsächlichen Leistungsreserven der unterschiedlichen eingesetzten Schmierstoffe in der jeweiligen Anwendung. Insbesondere für Bio-Öle ist das ein wichtiger Gesichtspunkt, da es z.B. zwischen Schmierstoffen auf Basis ungesättigter Triglyceride und solchen basierend auf vollgesättigten Syntheseestern sehr große Unterschiede in der Alterungsstabilität gibt, die aber dem Anwender nicht immer kommuniziert werden.

Ein weiterer Aspekt ist die verstärkte Ölbelastung, die durch höhere Leistungsdichte, längere Standzeit und geringeres Ölvolumen gegeben ist. Den technischen Anforderungen wurden die Schmierstoffe kontinuierlich verbessert. Im Zusammenhang mit dem Ziel, das Leistungs- und Haltbarkeitspotential von Schmierstoffen optimal zu nutzen, steht der zunehmende Wunsch vieler Anwender nach einer Überwachung der Schmierstoffe.

Allgemein lässt sich der Zustand von Schmierstoffen labortechnisch (offline) durch Probennahme bestimmen oder direkt durch Sensorik (Online) verfolgen. Ausgehend von Anwendungen mit großen Umlaufmengen, z. B. in der Metallbearbeitung, werden Maßnahmen zur „vorbeugenden Instandhaltung“ für immer kleinere Aggregate angewendet. Zunächst war es der „Offline“-Service, durch den die Schmierstoffqualität überwacht werden konnte: Regelmäßige Probenahme und Untersuchung der wichtigsten Kenndaten im

Labor liefert Ölkennwerte wie Viskosität, Neutralisationszahl, Additivgehalt, Kontaminationen etc., die vom Fachmann interpretiert werden. Dies ist einerseits kostenintensiv, andererseits besteht im Intervall zwischen zwei Untersuchungen keine Möglichkeit, plötzliche Änderungen am Schmierstoffzustand zu detektieren. In einem ersten Schritt in Richtung Online-Überwachung kamen für sehr große Anlagen automatisierte Laborverfahren direkt an den überwachten Anlagen zum Einsatz. Dabei werden die teilweise genormten Labormethoden direkt „automatisiert“ nachgebildet. Diese Ansätze haben sich aufgrund hoher Kosten allerdings nicht in der Breite durchgesetzt.

Die Überwachungsmethode muss immer im Zusammenhang mit dem „Wert“ der überwachten Aggregate und Schmierstoffe gesehen werden: Sind potentielle Folgeschäden durch unvermittelt versagende Schmierstoffe sehr groß (z.B. durch Produktionsausfall bei Windenergieanlagen), wird der Aspekt der planbaren, vorbeugenden Instandhaltung als deutlich wichtiger angesehen als die Verlängerung von Ölwechselintervallen.

Demgemäß ist der Wunsch von beiden Seiten – dem Vertreiber wie dem Anwender – ausgeprägt, den Schmierstoff so lange wie technisch möglich zu verwenden, aber auch, ihn rechtzeitig auszutauschen: Gerade auch der Schmierstoffhersteller ist daran interessiert, dass seine „besseren“ Produkte von „schlechteren“ zu unterscheiden sind.

Erst mit mikroelektronischen Sensoren haben sich Möglichkeiten zur weiteren Verbreitung ergeben – allerdings teilweise zulasten der direkten Vergleichbarkeit mit herkömmlichen Laborverfahren. Hierzu müssen die Daten geeigneter Sensoren, die ggf. mehrere Parameter berücksichtigen, mit den Ölkennzahlen der herkömmlichen „Offline“-Analytik korreliert werden. Es müssen also neue Beurteilungskriterien eingeführt werden, beispielweise bei Überwachung der dielektrischen Eigenschaften von Schmierstoffen – derartige kapazitive Sensoren sind kostengünstig, zuverlässig und heute am Markt etabliert; vordem hat die Dielektrizitätszahl im Labor keine Bedeutung gehabt. Auch Viskositätsensoren (Oberflächen-Scherschwinger, Surface Acoustic Wave) und Feuchtesensoren sind ver-

füßbar, teilweise zu Multisensoren zusammengefasst. Darüber hinaus haben auch spektroskopische Verfahren, allerdings in reduzierter Form, den Einzug in die Online-Überwachung von Schmierstoffen gefunden. Beispielsweise sind (auf wenige Wellenzahlen beschränkte) IR- oder auch NIR-Sensoren relativ kostengünstig verfügbar. Eine gute Übersicht findet sich in [45].

Es wurde aber auch gezeigt, dass diese Messgrößen teilweise schwer interpretierbar sind und/oder nicht ausreichen, um den Zustand eines Gebrauchtöls zuverlässig zu charakterisieren. Deshalb sind weitere Ansätze zur Ölüberwachung erforderlich. Als ein spezielles System sei hier auf sogenannte elektronische Nasen (Siehe Bild 4) hingewiesen, mit denen mittels Gassensoren flüchtige Alterungsprodukte des Schmierstoffs (semi-)quantitativ nachgewiesen und quantifiziert werden können: Fast jeder Tribologe weiß aus der Erfahrung, dass gebrauchte Schmierstoffe anders riechen als die entsprechenden Frischöle [46].

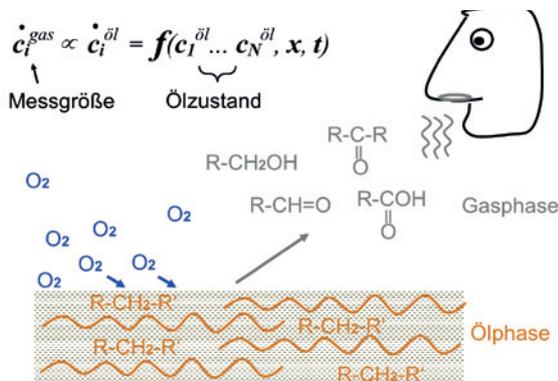


Bild 4: Elektronische Nase: Detektion verdampfbarer Alterungsprodukte

Künftig werden weitere Fortschritte erwartet, indem verschiedene Sensorprinzipien intelligent verknüpft werden. Multisensorielle Ölzustandsanalysen erfordern mathematische Auswerteverfahren, z.B. die multivariate Datenanalyse, mit der auch nicht wissensbasierte Mustererkennungen möglich werden. Weiterhin versucht man mit modernen Simulationsverfahren, sogenannte digitale Zwillinge zu schaffen, die im „Dialog“ mit Online-Sensorsignalen die Einschätzung des Maschinenzustands nochmals deutlich verbessern können.

Ein weiterer bisher nur unzureichend genutzter Aspekt von Schmierstoffen ist die Möglichkeit, die flüssige, ständig umlaufende Ölphase als „Informationsvermittler“ über Vorgänge im Aggregat zu nutzen – auch für solche Vorgänge, die mit dem Schmierstoffeinsatz selbst zunächst nicht in Verbindung stehen, z.B. Kühlwassereinbruch, Kraftstoffverdünnung, Eintrag von Kondenswasser, Staub, Verschleißpartikeln oder anderen Substanzen.

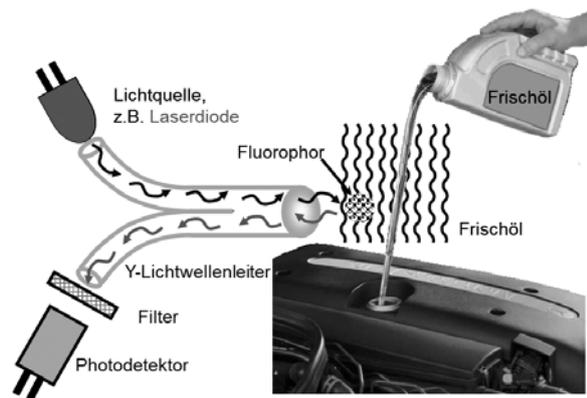


Bild 5: Identifizierung von Schmierölen beim Einfüllvorgang durch Fluoreszenzanalyse

Ein grundsätzliches Problem aller im Schmierstoff messenden Sensoren soll noch angesprochen werden: Die Verschmutzung der Sensoren während des Betriebs muss in die Betrachtung aufgenommen werden; die Lebensdauer des Sensors darf natürlich nicht geringer sein als die Lebensdauer des überwachten Schmierstoffs. Allgemeine Beachtung verdienen auch die elektronische Drift bei Sensoren sowie deren mangelnde Kalibrierbarkeit. Zum letzten Punkt kann Abhilfe geschaffen werden durch Identifizierung der Schmierstoffe und Kalibrierung des Sensors auf hinterlegte Schmierstoffdaten.

## 7.5. ÖLIDENTIFIZIERUNGSSYSTEM

Die Identifizierung von Hochleistungsölen sowie in Zukunft von umweltfreundlichen und nachhaltigen Schmierstoffen vor dem Einfüllen stellt in Zukunft eine Herausforderung dar, da das hohe Preisniveau dieser Schmierstoffklassen Missbrauch fördert. Im Falle eines Ölwechsels sollte sichergestellt werden, dass nur freigegebene und umweltfreundliche Schmierstoffe eingefüllt werden. Um optimale Betriebssicherheit einer Anlage

zu garantieren, müsste also das Konstruktionselement Schmierstoff identifizierbar sein – auch unter dem Aspekt, dass die Signale der Ölzustandssensorik dadurch kalibrierbar werden: Nur wenn der Ölzustandssensor „weiß“, welcher Schmierstoff vorliegt, kann er anhand hinterlegter Schmierstoffdaten Soll/Ist-Vergleiche durchführen (Siehe Bild 5).

Zur Identifizierung von Schmierstoffen werden verschiedene Systeme beschrieben; ein Sensorprinzip, das den Schmierstoff online (also beim Einfüllvorgang) identifizieren kann, basiert auf der Fluoreszenzspektroskopie: Ein zuvor entsprechend markiertes Öl kann in Echtzeit erkannt werden – dies allerdings nur mit Frischöl, wenn die komplexe Matrix im „Gebrauchöl“ nicht stört [47].

## 8. BEISPIELE ZUR STEIGERUNG DER NACHHALTIGKEIT

### 8.1. FEINSTAUBPARTIKEL AUS ABRIEB

Straßenverkehrsemissionen<sup>16</sup> ohne Emissionen aus Verbrennungsmotoren (non-tailpipe), insbesondere der mengenmäßig bedeutende Reifen-, Bremsen und Fahrbahnabrieb, sind zweifellos nicht nur ein dekoratives Ärgernis, sondern tragen zu ca. 90% zu den Partikelemissionen des Straßenverkehrs bei [48]. Reifen und Bremsen werden auch in mit Batterie- und Brennstoffzellen betriebenen Fahrzeugen vorhanden sein. Die Tonnage an Reifen betrug 2018 in der EU 5,1 Millionen Tonnen [49] und von 24,8 Millionen neu produzierten LkW-&Busreifen werden ca. 4,3 Millionen (17,3%) runderneuert und dieses stellt einen Beitrag zur Vermeidung von Abfällen dar.

In einem Ballungsraum, wie Paris (Île-de-France), beträgt der für Feinstaub als PM<sub>10</sub> relevante Abrieb von Reifen und Straßen ca. 1,8 kg pro Einwohner und Jahr, während es in ganz Europa ca. 1 kg pro Einwohner und Jahr sind [50, 51]. Insgesamt entstehen in der Europäischen Union ca. 1.327.000 Tonnen Reifenabrieb pro Jahr und in Deutschland ca. 133.000 t/a [52] bzw. ca. >160 Gramm Reifenabrieb pro Straßenmeter<sup>17</sup> und Jahr. Davon gelangten 2017 nur ca. 4.500 Tonnen als PM<sub>2,5</sub> und ca. 6.300 Tonnen als PM<sub>10</sub> in die Luft [53]. In Frankreich ist der derzeitige Anteil der für den Transport emittierten PM<sub>10</sub>-Partikel mit 33.400 Tonnen der niedrigste seit 1990 [54]. Diese Zahlenfakten verdeutlichen die Einwirkung des Verschleißes bzw. dann Verschleißschutzes für Bremsen&Reifen auf das SDG #3. Je nach Fahrzeugart, Fahrweise und Fahrprofil liegt der Reifenabrieb zwischen 0,04 und 0,5 Gramm/km [55].



Bild 6: Porsche Surface Coated Brake (PSCB) mit einer Reibfläche aus Wolframcarbid (PORSCHE SE)

<sup>16</sup> Die PM<sub>10</sub> Feinstaubemissionen betragen 2017 in Europa ca. 2.850.000 Tonnen, wovon 227.000 Tonnen (~8%) auf den Straßenverkehr entfielen [European Environmental Agency, air pollutant emissions data viewer].

<sup>17</sup> Die Länge der Straßen des überörtlichen Verkehrs beträgt insgesamt 223.000 km (www.bmvi.de), wobei das gesamte Straßennetz ca. 830.000 km lang ist.

So verwundert es nicht, dass die Laufleistung und der Abrieb als Parameter in die Kennzeichnung von Reifen in Bezug auf die Kraftstoffeffizienz und andere wesentliche Parameter in die Novelle Verordnung EU/1222/2009 bzw. EU/740/2020 aufgenommen werden sollen, sofern geeignete Prüfmethoden verfügbar sind, da Reifen durch Abrieb unbeabsichtigt erhebliche Mengen an Mikroplastik in die Umwelt abgeben.

In 2017 emittierten in Deutschland Fahrzeugbremsen [53] ca. 3.000 Tonnen als  $PM_{2,5}$  und ca. 7.500 Tonnen als  $PM_{10}$ , wobei die Gesamtmenge an Bremsenabrieb bei ca. 111.000 Tonnen [56] liegt. Das darin enthaltene Kupfer, Chrom, Zink und Blei ergeben zusätzliche Umweltbelastungen für Gewässer und Böden.

Die Tribologie kann hier einen Beitrag zur Minderung der Partikelemissionen über verschleißbeständigerer Werkstoffe unter Beibehaltung der anderen, funktionalen Eigenschaften leisten. Bereits im Herbst 2002 hatte der voll funktionsfähige Demonstrator „ELLYPSE“ von der RENAULT SaS aufgezeigt [57], dass Wechselintervalle für Reifen und Bremssysteme auf 70.000 km bzw. 100.000 km ausgedehnt werden können, was in diesem Fall die fahrzeugbedingten Feinstaubemissionen um 42-66% senkt.

Zur Minderung des Bremsenabriebs hat PORSCHÉ erstmals Ende 2017 eine mit Hartmetall beschichtete Graugussbremsscheibe vorgestellt, die Porsche Surface Coated Brake (PSCB) [58], welche ca. 90% weniger „Bremsstaub“ generiert. Derartige Lösungsansätze sollten wieder aufgegriffen werden, da sie Minderungspotentiale beim fahrzeugbedingten Feinstaub von 50-75% offenbaren. Die  $PM_{10}$ - und  $PM_{2,5}$ -Konzentrationen in U-Bahnstationen liegen zumeist über denen vom Straßenverkehr [59, 60]. Straßenbahnen und Eisenbahnen tragen auch zu den Partikelemissionen bei [61] über:

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

Der Verschleißschutz deckt über eine verlängerte Lebensdauer von Reifen und Bremsen sowie Stromabnehmern das SDG #3 ab.

## 8.2. WINDENERGIEANLAGEN (WEA)

Die global bis Ende 2019 installierte Gesamtleistung von Windenergieanlagen betrug ca. 651 Gigawatt, wobei die durchschnittliche Leistung einer WEA ca. 2,5 MW betrug. Die größten in 2020 in Europa installierten WEAs hatten 12-14 MW Leistung und Windparks mit 20 GW sind in der Planung. In Deutschland erzeugte in 2018 die Windenergie ca. 17,5% der Elektrizität. Auf dem Markt sind Windenergieanlagen mit und ohne Getriebe<sup>18</sup> erhältlich. Beide werden hinsichtlich Leistung, Zuverlässigkeit und Lebensdauer kontinuierlich weiterentwickelt, um die Stromentstehungskosten zu senken.

WEAs sind für eine Nutzungsdauer von ca. 20 Jahren ausgelegt. Frühzeitige Ausfälle belasten deren Wirtschaftlichkeit. Das Enser Versicherungskontor (EVK) untersuchte die Schäden an rund 4.500 Windenergieanlagen (WEA) [62]. Innere Betriebsschäden machen knapp 67% aller gemeldeten Schäden aus, gefolgt von Blitzeinschlag mit knapp 18%. Bei den inneren Betriebsschäden kommen die beiden Hauptkomponenten des Triebstranges – **Generator (1/3)** und **Getriebe (2/3)** – zusammen auf etwa 30% der Schäden. Schäden an den Rotorblättern haben bei den inneren Betriebsschäden nur einen Anteil von 5%. Die Reparatur oder der Tausch von Großkomponenten in „luftiger“ Höhe ist aufwendig. Aus der Datenbank des National Renewable Energy Laboratory (NREL) ergibt sich für den Zeitraum von 2009-2016 [63, 64], dass ca. 76% der Getriebeschäden durch die Wälzlager und ca. 17% durch die Zahnflanken verursacht waren. Zusammengerechnet ergibt sich für das Getriebe einen Anteil an den Schäden von ca. 13 %.

### Neue Legierungen

Primäres Ziel ist die Entwicklung neuer Werkstoffe und Wärmebehandlungsverfahren. Eines der höchstbelasteten Glieder im Antriebsstrang einer WEA sind Wälzlager. Der Antriebsstrang enthält

<sup>18</sup> Der Wegfall von Getrieben erfordert Dauermagnete (z.B. aus gesinterten Nd2Fe14B-Legierungen) für die permanent erregten Synchrongeneratoren, welche das Seltene Erden „Neodym“ enthalten. Derartige Direktantriebe verbrauchen ca. 200 kg Seltene Erden pro MW.

typischerweise 20-25 (Groß)Wälzlager. Das am häufigsten auftretende Schadensphänomen von Wälzlagern in Windenergieanlage sind sog. „White Etching Areas“ (WEA), „White Structure Flaking“ (WSF) oder „White Etching Cracks“ (WEC).

## Beschichtungen

Verschleißbeständige Randschichtbehandlungen (z.B. Carbonitrieren) oder Beschichtungen mit wolframhaltige amorphe, wasserstoffhaltige Kohlenstoffschichten (a-C:H:W), gewähren zusätzlichen Schutz gegen Mikropitting (Graufleckigkeit) und bei Schmierungsproblemen. Der Eintrag von Wasserstoff fördert durch eine Kombination mehrerer Faktoren die WECs. Die Minimierung chemischer Einflüsse („Passivierung“) und die Minderung der Wasserstoffdiffusion in den Lagerstahl verringert das Risiko für WEC-bedingte Ausfälle. Durchgesetzt hat sich hier das „Brünieren<sup>19</sup>“. Brünieren verbessert auch den Verschleißschutz unter Mangelschmierung. Ein bedeutender Vorteil vom Brünieren ist auch dessen Anwendungsfähigkeit bei Großlager, z.B. in Windkraftanlagen.

## Zustandsüberwachung

Ca. 70% der Schmierstoffmenge (global ca. 54.000 Tonnen) in einer WEA entfallen bislang auf das Getriebe. Die Tribologie leistet über Zustandsüberwachung, neuen Legierungen für Wälzkontakte und Wärmebehandlungsprozessen sowie Beschichtungen einen entscheidenden Beitrag, damit die Windenergie sich zu einer vollständig kommerzialisierten, nichtsubventionierten Technologie entwickelt.

## 8.3. RESSOURCENSCHONUNG IN DER ZERSPANUNGS- UND UMFORMTECHNIK DURCH TRIBOLOGIE

Lange Standzeiten nebst der Aufarbeitung von Werkzeugen und Formen stellen einen Beitrag zur Ressourcenschonung und Materialeffizienz durch die industrielle Fertigung dar. Diese Beiträge sind initial betriebswirtschaftlich motiviert. Darüber hinaus fördert die Innovationskraft der industriellen Fertigung die Markteinführung von neuen Hochleistungswerkstoffen.

<sup>19</sup> Das Brünieren („black oxide“) nach DIN 50 938 erzeugt auf Eisenbasiswerkstoffen eine dünne Eisenoxidschicht ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , Magnetit; Farbe: schwarz).

## Beschichtung von Werkzeugen

Die wichtigste Motivation für die Beschichtung von Werkzeugen ist die Steigerung der Produktivität durch höhere Schnittgeschwindigkeiten und Vorschübe. Zugleich werden die Fertigungskosten durch deutlich längere Werkzeugstandzeiten und gleichbleibende Zerspanungsqualität gesenkt. Insbesondere die Erhöhung von Werkzeugstandzeiten kann einen integralen Beitrag zur Nachhaltigkeit in der mechanischen Fertigung und bei Umformprozessen bieten [65].

## Zerspanungswerkzeuge

Hartstoffschichten werden seit den 1970er-Jahren zur Verbesserung der tribologischen Eigenschaften von Werkzeugen eingesetzt, um z.B. den Schneidkantenaufbau zu reduzieren [66], und stellen die Standardlösung heutzutage dar bei



Bild 7: Werkzeuge beschichtet mit BALINIT® A (TiN, oben) und BALINIT® ALCRONA PRO (AlCrN, unten)

Bohr- und Fräswerkzeuge, Wendeschneidplatten, Verzahnungswerkzeuge, Gewinde-, Reib- und Räumwerkzeuge. Das goldfarbene TiN ist historisch betrachtet die erste Beschichtung zumeist von HSS- und Hartmetallwerkzeugen. Einlagig, mehrlagig oder nanostrukturierte PVD-Schichten aus TiCN, TiAlN oder AlCrN mit  $Al_2O_3$  kommen heute zum Einsatz (Bild 7). Die Bearbeitung von hoch abrasiven Konstruktionswerkstoffen (z.B. CFK, GFK), wie sie heute vermehrt im Flugzeug- und im Fahrzeugbau eingesetzt werden, ist oft nur mit WC-Hartmetallwerkzeugen möglich, welche mit CVD-Diamant beschichtet sind.

### Umform- und Urformwerkzeuge

Die Umformung von Metallen stellt einen Kernbereich der industriellen Fertigung dar, wie auch die Zerspanung. Ihr Beitrag zur Ressourcenschonung wird unterschätzt. Das betrifft zum einen die tribologisch anspruchsvollen Umformvorgänge selbst und zum anderen die Möglichkeit sehr langlebige verschleißarme Produkte herzustellen. Umgeformte Teile weisen durch Kaltverfestigung während des Herstellprozess deutlich höhere Verschleißseigenschaften auf als vergleichbare Teile, die rein durch Zerspanung hergestellt wurden, sodass umgeformte Teile zumeist eine längere Gebrauchsdauer haben. In der Wertschöpfungskette stellt die Umformung einen Zwischenschritt beginnend von der Herstellung der Metalle bis zur finalen Fertigung dar. Damit besteht die Möglichkeit durch endkonturnahe Umformverfahren (Near Net Shape) [67] schon im Umformvorgang viel Material einzusparen und nachfolgende Zerspanvorgänge auf ein Minimum zu begrenzen.

Neue höherfeste Materialien führen zu Materialeinsparung – Reduzierung der Bauteildicke und damit des Gewichts bei gleichzeitig höherer Festigkeit – längerer Lebensdauer und erhöhtem Verschleißschutz der gefertigten Teile. Ausgangspunkt für mehrlagigen Schichten und Nanokomposite-Schichten ist größtenteils die Automobilindustrie zur Steigerung der Standzeiten bei der Verwendung höherfeste Materialien, wie Presshärter oder hot stamping steels. Mit duktilen chrombasierten Schichten (z.B. mehrlagiges CrN) kann auch die Standzeit von Schmiedewerkzeugen – ein Beispiel aus der Warmumformung – erfolgreich erhöht werden. Halbwarm- und Warmumformung führen hier, trotz des notwendigen

Energieaufwands bei der Vorwärmung der Teile, zu einer deutlichen Einsparung der Energie im gesamten Umformprozess und im Endprodukt.

Die Oberflächenbehandlung umformender und urformender Werkzeuge durch PVD- oder PACVD-Verfahren steigert zudem die wirtschaftliche Effizienz und die Präzision der hochlegierten Werkzeuge um ein Vielfaches und verbessert die Qualität der gefertigten Teile. Zudem reduziert sie die Anzahl an Fehlteilen und den Verbrauch an Schmierstoffen und Trennmitteln und wirken insgesamt ressourcenschonend. Damit einhergehend zeigen neuere Forschungen, dass der Schmierstoff im tribologischen Kollektiv – Werkzeug, Werkstück, Schmierstoff – entscheidend zur Erhöhung der Werkzeugstandzeit und damit zum Verschleißschutz beitragen kann (Siehe Bild 8). Dabei kommt es darauf an, dass die Additive im Schmierstoff so kombiniert werden, dass die Wechselwirkungen mit den Oberflächen von Werkzeug und Werkstück optimal sind und synergetische Effekte voll ausgenutzt werden.

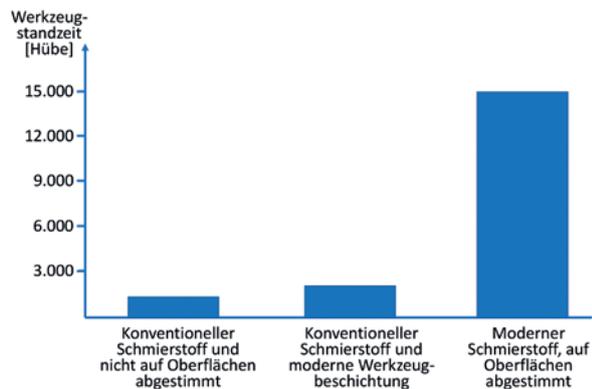


Bild 8: Feinschneiden von rostfreiem Stahl [FUCHS WISURA]

In Bild 8 sind Praxisversuche zum Feinschneiden von rostfreiem Stahl dargestellt, aus welchem die tribologische Interaktion zwischen der Dünn-schicht, dem Werkstück und dem Schmierstoff deutlich wird. In der alten Kombination (rostfreier Stahl/Schmierstoff im Stand der Technik/TiCN-Beschichtung) konnten 500-1000 Hübe bis zur Wartung des Werkzeugs erreicht werden. Die Umstellung auf eine modernere AlCrN-Schicht erbrachte nur eine geringere Standzeiterhöhung, wobei erst die Anpassung des Schmierstoffs an die Oberflächenmetallurgie sowohl des rostfreien Stahls als auch an die AlCrN-Beschichtung die Vervielfachung der Standzeit des Werkzeugs ermöglichte.

## Werkzeuge für die Metallumformung

Bei Werkzeugen für die formgebende Metallverarbeitung ist neben dem Verschleißschutz eine geringere Anhaftung (Adhäsion) des zu verarbeitenden Materials der Hauptgrund für das Beschichten. Ein optimierter Schmierstoff, der mit der Beschichtung und dem umzuformenden Material wechselwirkt und dadurch eine stabile Trennschicht bildet, unterstützt diesen Effekt massiv. Die Beschichtung ergeben produzierte Teile mit geringeren Oberflächenfehlern und die Werkzeuge weisen deutlich längere Standzeiten auf. In einigen Anwendungen mit langen Standzeiten bekommt zusätzlich die Minderung des Ermüdungsverleißes eine Bedeutung.

Neben der traditionellen TiN-Schicht, die sich lange in der kalten Stahlumformung bewährt hat, sind heute chrom- und aluminiumbasierte Schichten führend. Chrombasierte AlCrN Schichten senken die Intensität der Materialanhaftungen, aluminiumbasierte TiAlN-Schichten schützen hochgradig vor abrasivem Verschleiß und sind oxidationsbeständig. Derart beschichtete Werkzeuge können deshalb bei höheren Fertigungstemperaturen erfolgreich eingesetzt werden. Bei Werkzeugen für die Aluminiumumformung (NE-Metallumformung) werden die chrom- und aluminiumbasierten Schichten heute von DLC-Dünnschichten übertroffen. Für die Oberflächenbehandlung großer Formwerkzeuge war das Hartverchromen für lange Zeit die gängige Methode zum Verschleißschutz.

Die PPD®-Technologie (Pulsed-Plasma Diffusion, siehe Bild 9) vermeidet sowohl gefährliche Prozessgase als auch Chemikalien sowie substituiert im Laufe der Verwendungsdauer vom Werkzeug bis zu zehn galvanische Hartnachverchromungen. Ein „Ärgernis“ beim Druckguss stellen mögliche Verklebungen zwischen der Form und dem Werkstück und erschweren die Entformung. Um Verklebungen zu minimieren, werden neben den traditionellen Trennmitteln zunehmend Beschichtungen der Formoberflächen eingesetzt (z.B. DLC, AlCrN und vanadiumbasierte Schichten). Geeignete Beschichtungen schützen auch vor dem Anlösen der Form durch die Legierungsschmelze. Das Plasmanitrieren der Formen vor dem Beschichten mindert die Rissbildung durch thermische Wechselbeanspruchungen.

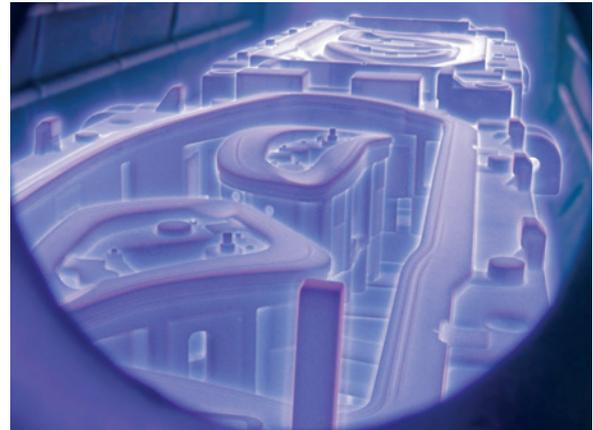


Bild 9: Oberflächenbehandlung von Umformwerkzeugen mittels BALITHERM® PPD

## Werkzeuge für die Kunststoffverarbeitung

Bei der Kunststoffformung, einem Urformverfahren, unterliegen die Kontaktflächen der Formen und Plastifiziereinheiten verschiedenen Beanspruchungen. Dies trifft für das Spritzgießen, die Extrusion, das Kalandrieren, das Schäumen sowie das Rotations- und Blasformen. Die drei wichtigsten Anforderungen im Bereich des direkten Kunststoffkontakts ergeben sich aus:

- » Abrasion (bei mit Partikeln und Kurzfasern gefüllten Kunststoffen),
- » Formbelag (Anlagerung von Partikeln, Inselbildungen bis hin zu einer geschlossenen Fremdbelegung der Oberfläche),
- » Korrosion (Flächenkorrosion, Lochfraßkorrosion).

Aufgrund der hervorragenden Korrosionsschutz und der Antihafteigenschaft wurden a-CH:Si-O-Schichten zu einer der am besten bekannten Beschichtungen.

## Wiederaufbereitung von Werkzeugen

Für bestimmte Werkzeuge ist nach Abnutzung der Beschichtung eine Wiederaufbereitung möglich. Dadurch können bis zu 50 % der Gesamtkosten von Hochleistungswerkzeugen eingespart werden. Bei diesem Vorgang werden die verschlissenen Werkzeuge geprüft, nachgeschliffen

(optional auch entschichtet), gereinigt und wiederbeschichtet, sodass sie wieder das Leistungsniveau eines neuen Werkzeugs erreichen. Nicht nur die Einsparung einer Werkzeugneuanschaffung wirkt sich kostensenkend aus, sondern auch der auf ein Minimum reduzierbare Lagerbestand von Werkzeugen.

Durch Ausnutzung aller Effekte, neue Materialien, optimierte Werkzeuglegierung und -konstruktionen, Oberflächenbeschichtungen sowie maßgeschneiderte Schmierstoffe kann die Umformung einen großen Beitrag zur Ressourcenschonung und Materialeffizienz bei kritikalsten Legierungselementen durch Verschleißreduzierung, sowohl in der Umformung selbst, als auch bei den gefertigten Teilen liefern.

#### 8.4. KETTENANTRIEBE

Kettenantriebe sind weit verbreitete und leistungsfähige Antriebs-, Steuer- und Transportelemente. Sie werden im allgemeinen Maschinenbau, Bauindustrie, in der Minenindustrie und Metallurgie ebenso eingesetzt, wie im Automobilbau und der Transport- und Fördertechnik.

Das wesentliche Verschleißmaß der Gebrauchsdauer ist die Kettenlängung, wobei die Schmierung die Gebrauchsdauer bestimmt. Kettenantriebe sind offen und der Schmierstoff gelangt als Verlustschmierung unweigerlich in die Umwelt.

Staub und Witterung bestimmen die Verschleißintensität der Antriebsketten von Motorrädern. Die M Endurance-Kette von BMW Motorrad ist erstmalig wartungsfrei für den Kunden (Siehe Bild 10). Die Dauerschmierstofffüllung zwischen Hülsen und Bolzen entfällt wie auch die bisher notwendige zusätzliche Schmierstoffzugabe für die Rollen. Die Reibstellen sind beschichtet mit hartem, tetraedisch amorphem Kohlenstoff (ta-C), welcher die Trockenreibung senkt und quasi verschleißfreie Tribosysteme ausbildet. Dank der ta-C-Schicht entfällt das von Zeit zu Zeit notwendige Nachspannen aufgrund der Kettenlängung infolge des üblichen Verschleißes.

Diese wartungsfreie Antriebskette unterbindet Schmierstoffeintrag in die Umwelt entsprechend dem SDG #3 und verlängert die Nutzungsdauer als Beitrag zur Ressourcenschonung gemäß SDG #9.

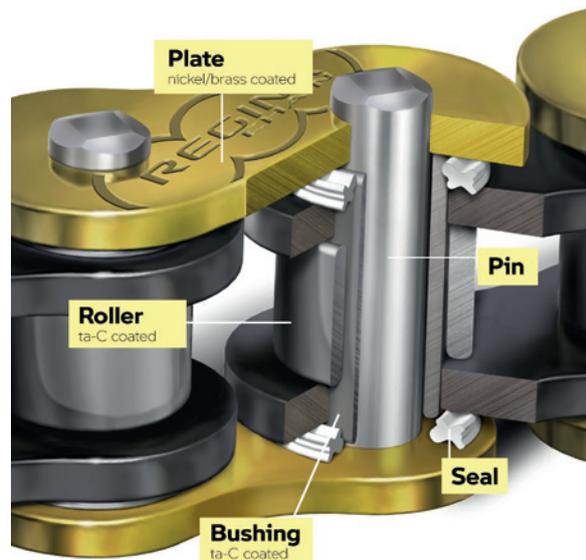


Bild 10: *Wartungsfreie* Endurancekette von BMW Motorrad [68]

#### 8.5. BIOSCHMIERSTOFFE

Die Flüssigschmierung ist die Zentraltechnologie der Tribologie zur Reibungsminderung und zum Verschleißschutz. Der globale Schmierstoffmarkt umfasst über alle Produktgruppen ca. 38-41 Millionen Tonnen p.a.. Tabelle 7 teilt den deutschen Schmierstoffmarkt (2019) nach Produktgruppen auf mit einem Gesamtverbrauch von rund einer Million Tonnen. Über die explizit genannten Kfz-Betriebsstoffe hinaus gibt es erhebliche Mengen an Getriebeölen und Hydraulikfluide (Stoßdämpferöle, Bremsflüssigkeit mit ca. 30.000t) und Kompressorenöle (Kältemaschinenöle), die als Betriebsstoffe in Kraftfahrzeugen zum Einsatz kommen. Weiterhin werden für die Motorenkühlung oder Kühlung von Batterien große Mengen Kühlerfrostschutz benötigt. In der Summe werden deutlich mehr als 50% der in Deutschland eingesetzten Schmierstoffe dem Automotive Bereich zugeordnet.

Tabelle 7: Schmierstoffmarkt in Deutschland nach Produktgruppen [69]

Schmierstoffgruppe/Anwendung	Tonnage in 2019
Motorenöle	245.800
Getriebeöle Kfz.	102.600
Getriebeöle Industrie	25.500
Schmierfette	32.800
Hydraulikfluide	62.800
Metallbearbeitungsfluide*	81.400
Kompressorenöle	8.800
Turbinenöle	1.400
Elektroisolieröle	12.200
Maschinenöle	69.900
Andere Industrieöle nicht zum Schmieren, Prozessöle etc.	333.900
<b>Gesamt</b>	<b>977.100</b>

\* (Härteöle, wassermischbare und nicht wassermischbare Kühlschmierstoffe, Korrosionsschutzöle)

Von der verkauften Inlandsschmierstoffmenge werden in Deutschland ca. 60 % über die Altölsammlung zurückgewonnen [70, 71, 72]. Diese Einschätzung hat sich in den letzten 20 Jahren nicht wesentlich geändert. Ein weiterer Anteil davon wird also als Resultat von innermotorischer Verbrennung, Verlustschmierung, Leckagen, Undichtigkeiten oder anderen systembedingten Gründen in die Umwelt gelangen. Insgesamt geht man in Deutschland von einer verbleibenden Restmenge aus von ca. 20%, die über unbekannte Eintrittspfade in die Umwelt gelangen. Die Sortengruppen in Tabelle 7 enthalten 245.800 Tonnen aus der Altölaufbereitung [69].

Ein Einfluss dieser Eintrittspfade von Schmierstoffen in die Umwelt, insbesondere auf die Wasserqualität, ist seit langer Zeit bekannt und unstrittig. Die ersten Spezifikationen zu schnell biologisch abbaubaren Schmierstoffen erschienen im Jahre 1994 mit den VDMA-Einheitsblättern 24568 und 24569 für Hydraulikölen, woraus im Jahre 2002 schließlich die DIN ISO 15380 „Umweltverträgliche Hydrauliköle“ entstand. Parallel dazu wurden verschiedene deutsche Umweltzeichen „Blauer Engel“ für einige Schmierstoffgruppen entwickelt, welche ab 2012 zum RAL-UZ 178

„Biologisch abbaubare Schmierstoffe und Hydraulikflüssigkeiten“ zusammengeführt wurden. Im Nachgang wurde im Jahre 2005 ein Europäisches Umweltzeichen (European Ecolabel, Euro-Margerite) für Schmierstoffe eingeführt, ab 2005 als Richtlinie 2005/360/EC, ab 2011 unter 2011/381/EU und zuletzt ab 2020 unter 2018/1702/EU. Die DIN EN 16807:2016 definiert den Begriff „Bio-Schmierstoff“. Auf dieser Basis wurde 2015 eine eigene Zolltarifnummer für Bio-Schmierstoffe vergeben – der CN-Code lautet 3403 19 20 [73]. Derzeit liegt der normale, vertragsmäßige Zollsatz (Regelzoll) gleichauf mit dem für petrochemische Schmierstoffe. Eine künftige, gesetzliche Bevorzugung umweltverträglicher Bio-Schmierstoffe ist derzeit für Europa nicht erkennbar.

Alle diese Ansätze haben in differenzierter Form die öko-toxikologischen Grundanforderungen an schnell biologisch abbaubare Schmierstoffe (Bioschmierstoffe) international verfestigt und bestehen Kern aus:

- schnelle biologische Abbaubarkeit (vollständige Mineralisierung; kein Primärabbau),
- 2-3 aquatische Toxizitäten gemäß OECD 201, 202 und 203 sowie
- Ggfs. ein Mindestanteil an nachwachsenden Rohstoffen von 25% oder 50%.

Für den allgemeinen Einsatz sind Bioschmierstoffe gesetzlich in Europa nicht vorgeschrieben, weshalb der Marktanteil umweltverträglicher Schmierstoffe in den letzten 10 Jahren nicht über die erreichten 3-3,5% (ca. 120.000 t/a) hinausgekommen ist [74].

Die USA beschritt, als „Nachzügler“ bei umweltverträglichen Schmierstoffen (EAL = Environmentally Acceptable Lubricants), einen anderen Weg. Dort wurde mit der „Vessel General Permit (VGP) for discharges incidental to the normal operation of vessels“ ab dem 19.12.2013 eine bindende Richtlinie erlassen, die den Einsatz von umweltverträglichen Schmierstoffen auf Schiffen in den Territorialgewässern der USA („water to sea in-

<sup>20</sup> Bioolefine können aus Biomassen mittel thermochemischen „Biomass-to-Liquid“-Prozessen oder als  $\beta$ -Farnesene direkt aus Zucker, Lignozellulose oder Stärke mittels genetisch modifizierter Hefe oder als Botryococcene aus Algen (per „Synthese“) gewonnen werden.

<sup>21</sup> Estolide sind sog. sekundäre Ester und werden aus Hydroxyfettsäuren z.B. von Rizinusöl (auch aus Lesquerellaöl) gewonnen. Sie stehen damit nicht im Wettbewerb mit der Nahrungsmittelkette. Ihr Eigenschaftsprofil entspricht API Group III Ölen.

terfaces“) zwingend vorschreibt, was ein Vorbild für Europa darstellen kann.

Im Allgemeinen werden schnell biologisch abbaubare Schmierstoffe nicht aus Mineralölen oder synthetischen Kohlenwasserstoffen formuliert. Die in Frage kommenden Grundöle bestehen zumeist aus natürlichen und synthetischen, biogenen Estern, aber auch aus Polyalkylenglykolen. Beide können aus „Biomasse“ oder nachwachsenden Rohstoffen synthetisiert werden, wobei biogene Polyalkylenglykole am Markt bisher kaum verfügbar sind. Sogenannte Bioolefine<sup>20</sup> oder Estolide<sup>21</sup>, die aus nachwachsenden Rohstoffen gewonnen werden und als gut biologisch abbaubar gelten, können in Zukunft ggf. marktgängig werden. Da die Schmierstoffmenge ca. 1% der Kraftstoffmenge entspricht, kann diese Menge, unabhängig von der avisierten Grundölchemie, aus Biomassen synthetisiert werden. Die technisch eingeführten Bioschmierstoffe leisten somit einen Beitrag zur Erfüllung der UN-Nachhaltigkeitsziele #3, #12.2 und #12.4. Die heute bedeutendsten Schemata für umweltfreundliche Schmierstoffe (Bioschmierstoffe)

- a. Europäisches Umweltzeichen für Schmierstoffe gemäß EC/2018/1702,
- b. Second issuance of U.S. Vessel General Permit (VGP) und
- c. Bioschmierstoffe nach EN16807,

schreiben einen variierenden Anteil an nachwachsenden Rohstoffen vor.

## 8.6. RERAFFINATE AUS ALTÖL

Gewisse ökologische Bedenken bestehen nicht nur beim Gebrauch von Schmierstoffen (Siehe Bioschmierstoffe als Alternative), sondern generell auch am Nutzungsende, sobald Frischöle zu Altölen werden. Altöle werden als Sonderabfälle eingestuft und fallen unter die Abfallstromkategorien Y8<sup>22</sup> und Y9<sup>23</sup> sowie die Ressourcenquelle

R9<sup>24</sup> nach dem Basler Übereinkommen [75]. Altöle fallen unter Artikel 21 der EU-Abfallrichtlinie 2008/98/EC, geändert durch die 2018/851/EC, mit dem Ziel, Altöle verstärkt der Kreislaufwirtschaft zu zuführen, was eine Reraffination bedeutet. Zweitraffination bildet die UN Zielvorgabe 12.5 ab, welche zum Ziel hat, bis 2030 die Abfallerzeugung durch Vermeidung, Reduzierung, Recycling und Wiederverwendung erheblich zu reduzieren.

Die Aufbereitung von Altölen trägt seit Jahrzehnten schon zur Defossilierung bei, indem die recycelten Grundöle mit einem deutlich geringeren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck in Frischölen genutzt werden. Die politischen Entscheidungsträger erwägen die Einführung von Emissionsgutschriften für den Regenerationssektor, da Reraffinate ca. 30% weniger Primärenergie verbrauchen, als Frischöle. *ReMade in Italy*<sup>®</sup> beziffert den ökologischen Gewinn von Zweitraffinaten mit einer Einsparung von 609 kg CO<sub>2</sub> pro Tonne Zweitraffinat<sup>25</sup>.

Es ist ein Fakt, dass Altöl, welches zu einem Reraffinat verarbeitet worden war, nicht in der Umwelt die Wasserqualität gefährdet. Altöl von gebrauchten Schmierstoffen stellt nicht nur eine Gefährdung der Gewässer dar, sondern sind auch eine Ressourcenquelle. Man geht von einem grundsätzlichen und verfügbaren Altölaufkommen von ca. 50% des verkauften Frischöles aus. Der Rest<sup>26</sup> gelangt in die Umwelt. Die Ausbeute an Reraffinat aus Altöl beträgt ca. 70% mit einem Anteil der reraffinierten Grundölen von etwa 13% am Gesamtvolumen aller in der EU verbrauchten Grundöle für Schmierstoffe (GEIR). Es gibt Bestrebungen, diesen Anteil bis 2025 EU-weit auf etwa 34% anzuheben, wobei zu bedenken ist, dass deren Eignungsfähigkeit für niedrigviskose und Hochleistungsmotorenöle umstritten ist. Andererseits stellen die Reraffinate ein leuchtendes Beispiel dafür dar, dass „Abfälle“ (hier: Altöl) in gleichwertige Neuprodukte überführt werden können.

<sup>22</sup> Waste stream Y8 = Waste mineral oils unfit for their originally intended use

<sup>23</sup> Waste stream Y9 = Waste oils/water, hydrocarbons/water mixtures, emulsions

<sup>24</sup> R9 = Used oil re-refining or other reuses of previously used oil

<sup>25</sup> ReMade in Italy<sup>®</sup> ist ein Zertifizierungssystem für Produkte der Kreislaufwirtschaft, welche aus den Abfallströmen stofflich gewonnen wurden. <https://www.urbanwins.eu/remade-in-italy/>

<sup>26</sup> Die bedeutendsten Eintrittspfade in die Umwelt sind illegale Entsorgung, Mitverbrennung (z.B. in Motoren), Leckagen, etc.

<sup>27</sup> Nach der API 1509 (API= American Petroleum Institute) sind Group I&II-Öle Mineralöle. Group II+-Öle haben einen höheren Viskositätsindex als Group II-Öle.

In der geographischen Region Europas beträgt der Motorölabsatz ca. 2.800.000 Tonnen. Die aktuelle Gesamtkapazität der Reraffineure in der EU (inkl. GB) zum Verarbeiten von Altöl beträgt 2.000.000 Tonnen, wobei nur 1.220.000 Kapazitätstonnen für Schmierstoffgrundöle (zumeist Group<sup>27</sup> I&II, aber auch II+) zur Verfügung stehen. Unter Berücksichtigung der 70%-igen Ausbeute beträgt das Potential für Grundöle aus Reraffinaten ca. 840.000 Tonnen bzw. vom europäischen Frischölmarkt.

Die Regeneration von Altöl zur Rückgewinnung von Grundölen führt zu einer erheblichen Ressourcenschonung und ökologischen Entlastungen, insbesondere aquatischer Milieus [76, 77].

## 8.7. LONGLIFE MOTORENÖLE

Um die Jahrtausendwende erzielten Hochleistungsmotorenöle auf Basis von synthetischen Kohlenwasserstoffen Ölwechselintervalle von 30.000 km und mehr, welche sich danach durch stark ansteigenden Literleistungen (downsizing) und aufwendigeren Abgasnachbehandlungssysteme reduzierten.

Parallel stellte die Schmierstoffindustrie schnell biologisch abbaubare Motorenöle nach Leis-

tungsspezifikationen gemäß ACEA, API und Spezifikationen der Automobilhersteller auf Basis von Estern und Gemischen aus Estern mit Kohlenwasserstoffen vor. Produkte, wie Castrol Green-tec LS, ELF Victory HTX 822 oder BP Vistra 7000 und FUCHS Titan GT1 schafften praktisch keine Marktpenetration (Siehe Bild 11), was vermutlich am rohstoffbedingten Preis und fehlender gesetzlicher Vorgaben lag.

Beides zusammengenommen führt zur Erkenntnis, dass zwar die technischen Möglichkeiten und Kenntnisse für lange bzw. sehr lange Ölwechselintervalle bestehen, sogar für biologisch schnelllabbaubare Motorenöle, jedoch keinerlei Marktakzeptanz und Nachfrage vom Endkunden vorhanden sind.

Die Motorenöle Castrol Edge BIO-SYNTHETIC-Reihe enthalten 25% Grundöle auf Basis nachwachsender Rohstoffe, welches aus Zuckerrohr über eine biogene Synthese gewonnen wurden. Wenn entsprechend nachgefragt, kann die Tribologie bzw. Schmierungstechnik einen Beitrag zur Nachhaltigkeit mittels langer bzw. sehr langer Ölwechselintervalle, sogar als biologisch schnelllabbaubare Motorenöle mit niedriger aquatischen Toxizitäten (sog. bio-no-tox-Motorenöle) und auf Basis nachwachsender Rohstoffe erbringen. Das



Bild 11: Beispiele von schnell biologisch abbaubaren Hochleistungs-Longlife-Motorenölen

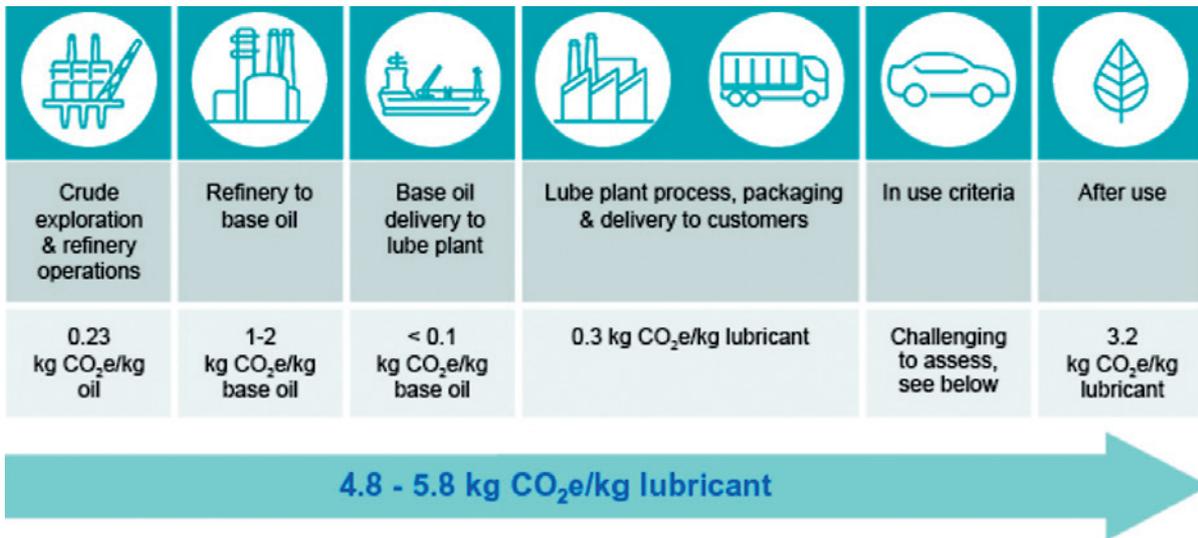


Bild 12: Carbon footprint of fossil-based engine oil production [79]

Motorenöl FUCHS Titan GT1 0W-20 in Bild 11 besteht sogar zu mehr als 50% aus nachwachsenden Rohstoffen.

Es ist neuerdings zu beobachten, dass ein Marktführer in der USA nun ein PkW-Motorenöl auslobt [78], für welches dieser einen Ölwechselintervall von 20.000 Meilen garantiert, was eine bemerkenswerte Steigerung der Nutzungszeit darstellt, und folglich eine Abfallminderung bedeutet für einen Markt, in welchem der typische Ölwechselintervall bei ca. 5.000 Meilen liegt. Diese Vervierfachung der Nutzungsdauer stellt einen deutlichen Beitrag zur Ressourcenschonung dar.

Ein einfaches Beispiel verdeutlicht den Beitrag von Schmierstoffen zur Nachhaltigkeit (Siehe Bild 12). Wir nehmen den europäischen (EU28) Durchschnittsverbrauch von Neufahrzeugen aus 2018 mit 120,6 gr. CO<sub>2</sub>/km bzw. 5,2 L/100 km. Auf einer Fahrstrecke von 30.000 km ist zumeist ein Ölwechsel erforderlich, sodass insgesamt 1.560 Liter verbranntem Kraftstoff und 10 Liter Motorenöl gebraucht werden. Es ist technisch möglich, mit hochwertigerem Motorenöl auch ein Ölwechselintervall von 30.000 km und eine Kraftstoffersparnis von 1% über Serienstand zu ermöglichen. Folglich mindert über 30.000 km sich der Verbrauch um 15,6 Litern Kraftstoff und 5 Litern Motorenöl. Nach einer Studie von NESTE Oyj [79] beträgt der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Motorenöl aus fossilen Ressourcen (Group I-III, PAO, GTL) 4,5 bis 5,5 CO<sub>2</sub> eq./kg (Äquivalente). Die CO<sub>2</sub>-Er-

sparnis beträgt 60 ± 2,5 kg CO<sub>2</sub> über 30.000 km mal einem Fahrzeugbestand von 268 Millionen Personenkraftfahrzeugen (2018) in der EU28.

## 8.8. LEBENSZYKLUSANALYSE EINES EFFIZIENZSTIEGERNDEN HYDRAULIKFLUIDS

Hydrauliköle machen 8-10% der Tonnage des Schmierstoffmarktes aus. Hochscherstabile Mehrbereichshydraulikfluide mit einem hohen Viskositätsindex haben sich in der Praxis bewährt als eine der wirkungsvollsten Maßnahmen, die Produktivität zu steigern und den Energiebedarf zu senken. Insbesondere für Baumaschinen konnte diese Verbesserung gegenüber Einbereichsölen in zahlreichen Feldversuchen gezeigt werden. Dabei spielen neben der Produktivitätssteigerung die deutlich verlängerten Ölwechselintervalle aufgrund höherer Lebensdauer sowie der Entfall des Ölwechsels zwischen Sommer und Winter eine große Rolle. Trotz dieser Vorteile werden in den meisten Baumaschinen immer noch Einbereichsöle verwendet.

Bild 13 vergleicht in einer Lebenszyklusanalyse die eingesparten CO<sub>2</sub>-Emissionen als CO<sub>2</sub>-Fußabdruckes und -Handabdruckes eines herkömmlichen Einbereichshydraulikfluids (Referenz) mit einem hochscherstabilen Mehrbereichshydraulikfluid mit einem hohen Viskositätsindex. Die verlängerte Öllebensdauer wurde allerdings noch nicht berücksichtigt, sondern nur die Ge-

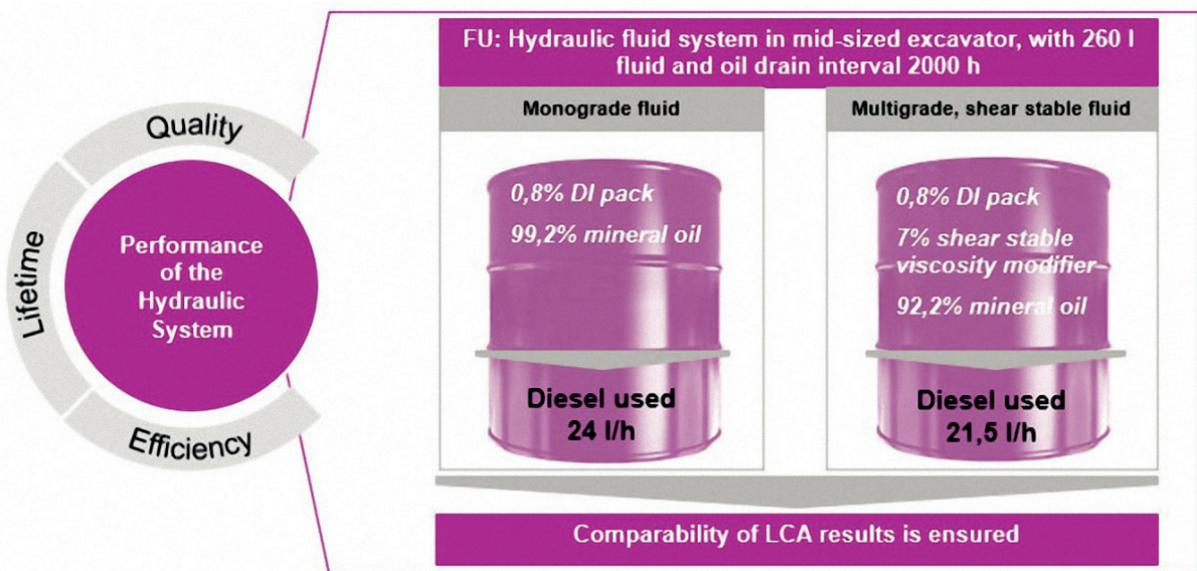


Bild 13: Parameter für die Lebenszyklusanalyse von Hydraulikölen in einem Bagger mittlerer Größe während 2000 Betriebsstunden (EVONIK) [80]

brauchsdauer über 2000 Stunden in einem Bagger mittlerer Größe. Basis waren mehrere statistisch ausgewertete Feldversuche, die Kraftstoffeinsparungen zwischen 8 und 13% ergaben. Für die Rechnung wurde der Durchschnitt von 10,5% Kraftstoffeinsparung (Diesel) angesetzt. Für dieselbe Arbeit benötigte ein Bagger mit dem Einbe-

reichsfluid 24 l Diesel pro Stunde, während mit dem Mehrbereichsöl nur 21,5 l Diesel pro Stunde verbraucht werden.

In den folgenden Bildern 14 und 15 ist die Ökobilanz für die beiden Fälle eines Hydrauliksystems mit Einbereichsöl und mit effizientem Mehrbereichsöl dargestellt. Aufgrund der Verwendung von mehr Funktionsadditiven im Mehrbereichsöl ergibt sich ein etwas höherer CO<sub>2</sub>-Fußabdruck in der Herstellung, als für das Einbereichsöl. Würde man die drei- bis vierfach höhere Öllebensdauer berücksichtigen, würde sich ein positiveres Bild ergeben. Allerdings fällt das für die Betrachtung der Lebenszyklusanalyse kaum ins Gewicht, weil

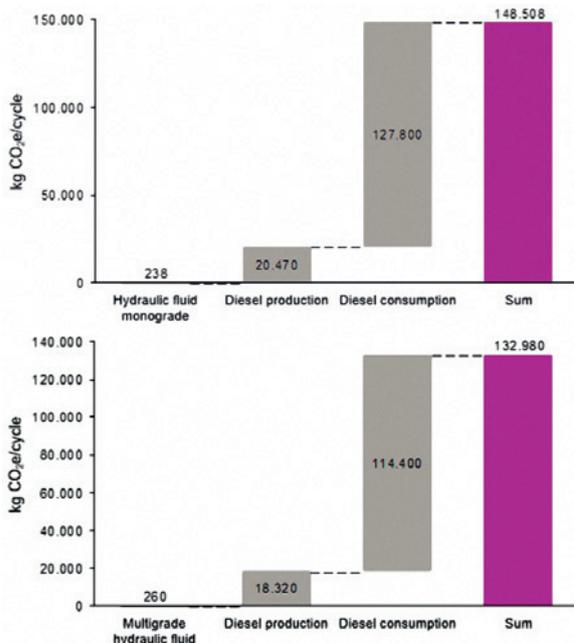


Bild 14: CO<sub>2</sub>-Gesamtemissionen [CO<sub>2</sub>eq./cycle] für ein Einbereichshydrauliköl (oben) und effizientes Mehrbereichshydrauliköl (unten)

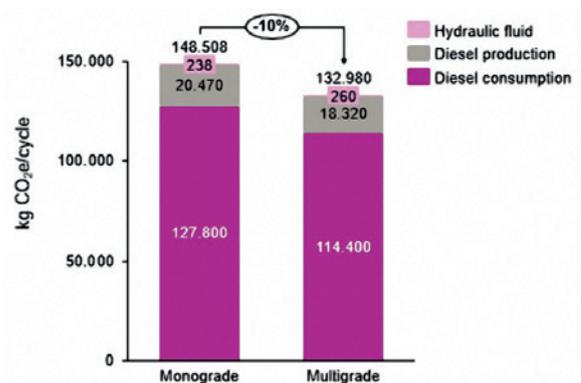


Bild 15: Vergleich der CO<sub>2</sub>-Gesamtemissionen [CO<sub>2</sub>eq./cycle] für ein Einbereichshydrauliköl (links) und effizientes Mehrbereichshydrauliköl (rechts) über 2000 Betriebsstunden

die Unterschiede im Kraftstoffverbrauch bei weitem überwiegen.

Leider werden diese langfristigen, ökologischen und durchaus auch monetären Vorteile der Gebrauchsphase aufgrund der Unkenntnis und des häufig kurzfristigen Denkens in der Praxis noch viel zu wenig realisiert: Es zählt der Einkaufspreis des Hydraulikfluides. Diese effizienten Hydraulikfluide sind auch rückwärtskompatibel und entfalten in älteren, ineffizienteren Maschinen eine noch positivere Wirkung. Es ist erstaunlich, an wie vielen Stellen sich Verbesserungen erzielen lassen durch die simple Maßnahme eines Austauschs des Hydraulikfluides.

## 9. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die CO<sub>2</sub>- und Nachhaltigkeitsdebatte übersieht den Wirkzusammenhang zwischen Reibung und CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie zwischen Verschleißschutz und Nachhaltigkeit und damit auch den Zusammenhang von Verschleißschutz mit CO<sub>2</sub>-Emissionen. Dabei wird das Potential des Fachgebietes Tribologie, das sich bekanntermaßen mit der Reduktion von Energieverbrauch und Materialverlusten beschäftigt, bislang in der politischen Diskussion noch nicht berücksichtigt.

Die Tribologie offeriert bedeutende CO<sub>2</sub>-Minderungspotentiale von mindestens 3 Wedges durch:

- a. CO<sub>2</sub>-Minderung durch Reibungsminderungen (Energieeffizienz)

und

- b. Minderung des Materialfußabdruckes (Ressourcenschonung, Materialeffizienz).

Ein angenommenes Einsparpotential von 30-40% der Reibungsverluste mindert die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen um 2,66-4,93 Gigatonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr.

Eine hypothetische Verdoppelung der allgemeinen Lebensdauer über Verschleißschutz und Condition-Monitoring erspart rechnerisch ca. 8,8 Gigatonnen Ressourcen pro Jahr verbunden mit einem Äquivalent von >1 Tonne CO<sub>2</sub> pro Tonne Ressource/Grundstoff.

In der Addition ergeben sich mittel-/langfristige Minderungspotentiale durch Tribologie von >11 Gigatonnen CO<sub>2</sub> oder >29% von den in 2019 global emittierten 37,9 Gigatonnen CO<sub>2</sub> bzw. >1,1 Gigatonnen CO<sub>2</sub> von den in 2018 emittierten 3,76 Gigatonnen CO<sub>2</sub> der EU27 (ohne G.B.).

## Danksagungen

Die GfT e.V. dankt Herrn Prof. Dr. habil. Heinz Gläser für die Beschaffung von Dokumenten der Kommission für Schmierungstechnik (KfS) von der staatlichen Plankommission der Deutschen Demokratischen Republik (DDR). Ebenso dankt die GfT e.V. Herrn Prof. Dr. You-Bai Xie (Professor an der Shanghai Jiao Tong Universität und der Xi'an Jiaotong Universität) für die Überlassung der Originalstudie „Tribology in industrial energy conservation, consumption and emission reduction“ der Chinese Tribology Institution (CTI). Herrn Dr. Jürgen Gierl und Dr. Marcus Wolf, Schaeffler AG, gilt besonderen Dank für die Überarbeitung des Kapitels Tribotronik.

## 10. BIBLIOGRAPHISCHE REFERENZEN ZUM NACHLESEN

- [1] Vereinte Nationen, siebzigste Generalversammlung, Resolution der Generalversammlung, 70/1 Transformation unserer Welt: die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung, verabschiedet am 25. September 2015, <https://www.un.org/depts/german/gv-70/band1/ar70001.pdf>
- [2] United Nations Environment, Global Resource outlook 2019, A Report of the International Resource Panel, ISBN: 978-92-807-3741-7, Full report: [https://www.resource-panel.org/sites/default/files/documents/document/media/unep\\_252\\_global\\_resource\\_outlook\\_2019\\_web.pdf](https://www.resource-panel.org/sites/default/files/documents/document/media/unep_252_global_resource_outlook_2019_web.pdf) Short: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/Overview/>
- [3] OECD (2019), Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>.
- [4] C. Schmidt, G. Van Begin, F. Van Houten, C. Close, D. McGinty, R. Arora, J. Potočník, N. Ishii, P. Bakker, M. Kituyi, F. Sijbesma, A. Wijkman, The Circularity Gap Report 2020, <https://www.circularity-gap.world/2020>
- [5] M. Woydt, T. Gradt, T. Hosenfeldt, R. Luther, A. Rienäcker, F.-J. Wetzel and Chr. Wincierz: Tribology in Germany – Interdisciplinary technology for the reduction of CO<sub>2</sub>-emissions and the conservation of resources, German and English, publisher: German Society for Tribology, [www.gft-ev.de](http://www.gft-ev.de), Adolf-Fischer-Str. 34, D-52428 Jülich, September 2019; pour Français, visiter svp le site de Techniques de l'Ingénieur <https://www.techniques-ingenieur.fr/>, <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mecanique-th7/frottement-et-usure-42464210/tribologie-frottement-et-emissions-de-co2-tri140/>
- [6] United Nations Environment Assembly of the United Nations Environment, Programme Towards a pollution-free planet, Report of the Executive Director, United Nations Environment Assembly of the United Nations Environment Programme, Third session, Nairobi, 4–6 December 2017, UNEP/EA.3/25
- [7] R. Socolow, R. Hotinski, J.B. Greenblatt and S. Pacala, Solving the Climate Problem – Technologies Available to Curb CO<sub>2</sub> Emissions, ENVIRONMENT, December 2004, p. 8-19 [https://cmi.princeton.edu/wp-content/uploads/2020/01/climate\\_problem.pdf](https://cmi.princeton.edu/wp-content/uploads/2020/01/climate_problem.pdf)
- [8] S.J. Davis, L. Cao, K. Caldeira and M.I. Hoffert, Perspective - Rethinking wedges, Environmental Research Letters, 8 (2013) 011001, doi:10.1088/1748-9326/8/1/011001
- [9] N.N., A Strategy for Tribology in Canada – Enhancing Reliability and Efficiency through the Reduction of Wear and Friction, National Research Council Canada 1986, NRC Number: 26556
- [10] M. Baier, Technisch-ökonomische Probleme der Schmierung in Industriebetrieben, Freiburger Forschungshefte, A251, 3. Symposium Schmierstoffe und Schmierung, Teil II, 27.-30.06.1961, in Dresden; Akademie Verlag, 1962
- [11] W.S. Scheel, Probleme der Schmierung, Die Technik, 16. Jg., Heft 9, September 1961, p. 654-656
- [12] Anordnung über die Organisation der Schmierungstechnik, Gesetzblatt der Deutschen Demokratischen Republik (DDR) Teil II, 1967, Seiten 649- 651, Nr. 87, Ausgabetag: 21. September 1967.
- [13] Anordnung über die Durchsetzung einer effektiven Schmierungstechnik in der Volkswirtschaft, Gesetzblatt der Deutschen Demokratischen Republik (DDR) Teil I, 1981, Seiten 62-64, Nr. 4, Ausgabetag: 23. Dezember 1980
- [14] S. Bahadur, The economic impact of wear on society, J. of Lubrication Technology, April 1978, Vol. 100, p. 145-147

- [15] Martin J. Devine (editor), Proc. of a workshop on wear to achieve product durability, 23.-25.02. 1976, Washington D.C., USA; sponsored by the Office of Technology Assessment, United States Congress
- [16] K. Richter, W.J. Bartz, J. Wiedemeyer und N.-T. Nguyen, Verluste durch Reibung und Verschleiß, 1. Fortschreibung der Studie Tribologie – Bestandsaufnahme und Orientierungsrahmen, April 1985, Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT), p. 21-35
- [17] K. Holmberg and A. Erdemir, Influence of tribology on global energy consumption, costs and Emissions, *FRICITION* 5(3): 263-284 (2017)
- [18] K. Holmberg, P. Kivikytö-Reponen, P. Härki-saari, K. Valtonen and A. Erdemir, Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. *Tribology International*, 115:116–139 (2017)
- [19] Si-Wei Zhang and You-Bai Xie (eds.). *Tribology Science Industrial Application Status and Development Strategy*. 2008. The investigation on position and function of tribology in industrial energy conservation, consumption and emission reduction (Report of 2 year Chinese Investigation). Higher Education Press, ISBN 978-7-04-026378, Beijing, 2009
- [20] Si-Wei Zhang, *Tribological Application in China and Green Tribology*, Kapitel 19; in: *Reflexionen über Tribologie*, 2014, Beijing, Tsinghua University Press, ISBN 978-7-302-37022-2
- [21] J.H. Payer, D.G. Dippold, W.K. Boyd, W.E. Berry, E.W. Brooman, A.R. Buhr, and W.H. Fisher, *Economic Effects of Metallic Corrosion in the United States*, NBS special publication 511-2, May 1978
- [22] G.H. Koch, M. Brongers, N.G. Thompson, Y.P. Virmani and J.H. Payer, *Corrosion costs and preventive strategies in the United States*, report by CC Technologies Laboratories, Inc. to Federal Highway Administration (FHWA), FHWA-RD-01-156, March 2002; <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/40697>
- [23] B. Hou, *The Cost of Corrosion in China*, Springer/Science Press, 2019, ISBN 978-981-32-9353-3
- [24] M. Crippa, G. Oreggioni, D. Guizzardi, M. Muntean, E. Schaaf, E. Lo Vullo, E. Solazzo, F. Monforti-Ferrario, J.G.J. Olivier, E.Vignati, *Fossil CO<sub>2</sub> and GHG emissions of all world countries – 2019 Report*, EUR 29849 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-11100-9, doi:10.2760/687800, JRC117610
- [25] [https://environmentlive.unep.org/indicator/index/12\\_2\\_1](https://environmentlive.unep.org/indicator/index/12_2_1)
- [26] T. Wyns and G. Khandekar, *Metals for a Climate Neutral Europe – A 2050 Blueprint*, The Institute for European Studies (IES) at the Vrije Universiteit Brussel (VUB),
- [27] G.M. Mudd, Z. Weng, R. Memary, S.A. Northey, D. Giurco, S. Mohr and L. Mason L. (2012) *Future greenhouse gas emissions from copper mining: assessing clean energy scenarios*, 2012, cluster research report No. 1.12, ISBN 978-1-922173-48-5.
- [28] P. Nuss and M. J. Eckelman, *Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis*, *PLOS One*, July 2014, Vol. 9, issue 7, e101298
- [29] M. Schmitz, *Rohstoffrisikobewertung – Magnesium (Metall)*, 2019, DERA Rohstoffinformationen 38, Berlin, ISBN: 978-3-948532-00-0 (PDF)
- [30] H. Pilz, B. Brandt and R. Fehring, *The impact of plastics on life cycle energy consumption and greenhouse gas emissions in Europe*, Summary report, June 2010, Plastics Europe, Brussels, <https://www.plastics-europe.org/application/files/9015/1310/4686/september-2010-the-impact-of-plastic.pdf>
- [31] W. Wei, P. B. Samuelsson, A. Tilliander, R. Gyllenram, P. G. Jönsson, *Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions During Ferromolybdenum Production*, *Journal of Sustainable Metallurgy* (2020) 6:103–112

- [32] E. Siebel und M. Würges, Verschleißforschung (Wear Research), Vorträge der VDI-Verschleißtagung „Reibung und Verschleiß“, 28.-29.10.1938, Stuttgart, VDI-Verlag GmbH, Berlin NW7, S. 1-3
- [33] S. Prakash, G. Dehoust, M. Gsell, T. Schleicher und R. Stamminger, Einfluss der Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltwirkung: Schaffung einer Informationsgrundlage und Entwicklung von Strategien gegen „Obsoleszenz“, Umweltbundesamt, Februar 2016, UBA-FB 002290, ISSN 1862-4804
- [34] S. Toyoda, All Toyota tribological innovation to realize „Zeronize“ and „Maximize“ society, Tribology Online, 2, 1, 2007, 19-22.
- [35] Si-Wei Zhang, Green tribology: Fundamentals and future development, Friction 1(2): 186-194 (2013); and as chapters #19&#20 in reference [19]
- [36] H. Mali, Industrieschmierstoffe – Vom Alt zum Wertstoff, X-Technik Fertigungstechnik, Mai 2013, p. 84-85, [https://www.x-technik.at/downloads/flipbook/fertigungstechnik/2013/FT\\_02\\_2013\\_screen.pdf#page=84](https://www.x-technik.at/downloads/flipbook/fertigungstechnik/2013/FT_02_2013_screen.pdf#page=84)
- [37] T. Hoffmann, M. Heller, T. Engelhardt, A. Taeger, H. Marks and D. Lehmann, trahlen-chemisches Recycling von PTFE-Materialien, Gummi Fasern Kunststoffe 65 (2012) 784-789
- [38] S. Glavatskih and E. Höglund, Tribotronics – Towards active tribology, Tribology International 41 (2008) 934-939
- [39] C. Richard, Tribotronics – Nouveaux champs d’applications pour la tribologie (Tribotronic – Neue Anwendungsmöglichkeiten für die Tribologie), Techniques de l’Ingénieur, 10. Januar 2020, TRI350 V1
- [40] Continental In-Tire Sensors Read Tread Depth, <https://www.continental.com/en/press/press-releases/2014-05-07-tpms-profile-104542>
- [41] MICHELIN, La stratégie d’innovation du groupe MICHELIN au service de la mobilité durable (Die Innovationsstrategie der MICHELIN-Gruppe für nachhaltige Mobilität), Septembre 2016,
- [42] D. R. Ringle, A Review of Electromagnetic Material Properties, <https://studylib.net/doc/5897770/advancements-in-electromagnetic-material-properties>
- [43] SCHAEFFLER Monitoring Services GmbH, Handbuch Condition Monitoring Praxis, 2019, ISBN 978-3-7830-0419-9
- [44] S. Michel, Condition Monitoring Kooperation von Bonfiglioli mit Schaeffler halbiert Betriebskosten, Maschinenmarkt, 01.08.2019, <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/kooperation-von-bonfiglioli-mit-schaeffler-halbiert-betriebskosten-a-851927/>
- [45] T. Meindorf, Sensoren für die Online-Zustandsüberwachung von Druckmedien und Strategien zur Signalauswertung, Dissertation, ISBN 978-3-8322-4441-5
- [46] T. Meindorf and F. Plenert, A new, quasi-continuous measuring technique to determine the condition of hydraulic fluids, O + P »Ölhydraulik und Pneumatik« 47 (2003) Nr. 7
- [47] R. Luther, Identifizierung von Schmierstoffen – ein neuer Ansatz, MTZ 01/2008 Jahrgang 69, S. 34-40
- [48] T. Grigoratos and G. Martini, Non-exhaust traffic related emissions. Brake and tyre wear PM, European Commission, – Joint Research Centre – Institute for Energy and Transport, EUR 26648 EN – Scientific and Technical Research series – ISSN 1831-9424 (online), ISSN 1018-5593 (print), ISBN 978-92-79-38302-1 (PDF), ISBN 978-92-79-38303-8 (print)
- [49] European Rubber and Tyre Industry Statistics, edition 2019, [www.etrma.org](http://www.etrma.org)

- [50] K.M. Unice, M.P. Weeber, M.M. Abramson, R.C.D. Reid, J.A.G. van Gils, A.A. Markus, A.D. Vethaak, J.M. Panko, Characterizing export of land-based microplastics to the estuary - Part I: Application of integrated geospatial microplastic transport models to assess tire and road wear particles in the Seine watershed, *Science of The Total Environment*, Vol. 646, 1 January 2019, p. 1639-1649
- [51] M. Jekel, Scientific Report on Tyre and Road Wear Particles (TRWP) in the aquatic environment, 17.07.2019, <https://www.tyreandroadwear.com/news/scientific-report-on-tyre-and-road-wear-particles-trwp-in-the-aquatic-environment/>
- [52] S. Wagner, T. Hüffer, P. Klöckner, M. Wehrhahn, T. Hofmann and T. Reemtsma, Review, Tire wear particles in the aquatic environment – A review on generation, analysis, occurrence, fate and effects, *Water Research*, Vol. 139, 1 August 2018, p. 83-100
- [53] Umweltbundesamt, German Informative Inventory Report, file:///G:/1.A.3.b%20vi%20-%20Road%20Transport%20%20Automobile%20Tyre%20and%20Brake%20Wear%20-%20IIR%20DE%202019.htm
- [54] Particules inférieures à 10 µm (format Section), CITEPA (Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique), 42 rue de Paradis – 75010 Paris, <https://www.citepa.org/fr/2019-pm10/>
- [55] Councell et al., Tire-Wear Particles as a Source of Zinc to the Environment, *Environmental Science and Technology*, 2004, Vol. 38, p. 4206-4214
- [56] T. Hillenbrand, D. Toussaint, E. Böhm, S. Fuchs, U. Schere, A. Rudolphi, M. Hoffmann und J. Kreißig, Einträge von Kupfer, Zink und Blei Gewässer und Böden, Analyse der Emissionspfade und möglicher Emissionsminderungsmaßnahmen, UBA Texte 19-05, August 2005, ISSN 0722-186X
- [57] N. N., Renault SAS, Zukunftssichere Entwicklung – “ELLYPSE” – Radikal konstruiert, Das Magazin für Forschung und Entwicklung, No. 26, Oktober 2002, Renault S. A., F-92100 Boulogne-Billancourt, Frankreich, <http://www.planeterenault.com/1-gamme/9-concept-cars/215-ellypse-2002/> (besucht am 28.11.2020)
- [58] PORSCHE News – Christophorus – 5/2017 – Hart wie Diamant, <https://www.porsche.com/international/aboutporsche/christophorusmagazine/archive/384/articleoverview/article03/>
- [59] T. Moreno et al., Improving air quality in the subway environment, 2017, ISBN: 978-84-697-5167-1, 48 pp. Barcelona, Spain
- [60] M. Loxham and M.J. Nieuwenhuijsen, Health effects of particulate matter air pollution in under-ground railway systems – a critical review of the evidence, *Particle and Fibre Toxicology* (2019) 16:12, <https://doi.org/10.1186/s12989-019-0296-2>
- [61] VTI rapport 917A „Particles in road and railroad tunnel air; Sources, properties and abatement measures“, published 2016, Swedish National Road and Transport Research Institute (VTI), [www.vti.se](http://www.vti.se)
- [62] T. Schulte und B. Boller, Aus Schäden wird man klug – Wie maßgeschneiderte Versicherungslösungen WEA-Betreibern schützen, *Versicherungspraxis*, 3/2019, p. 10-12
- [63] Statistics Show Bearing Problems Cause the Majority of Wind Turbine Gearbox Failures, September 17, 2015, U.S. Dept. of Energy, <https://www.energy.gov/eere/wind/articles/statistics-show-bearing-problems-cause-majority-wind-turbine-gearbox-failures>
- [64] S. Sheng, Wind Turbine Gearbox Reliability Database, Operation and Maintenance Research Update, National Renewable Energy Laboratory, 2017, NREL/PR-5000-68347, <https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/68347.pdf>

- [65] J. Vetter, M. Berger, V. Derflinger, S. Krassnitzer, Plasmagestützte Beschichtungsverfahren, Bibliothek der Technik Band 394, Verlag Moderne Industrie, 2017
- [66] B. Fotovvati, N. Namdari, A. Dehghanghadikolaei, On Coating Techniques for Surface Protection: A Review, *J. Manuf. Mater. Process.* 2019, 3(1), 28; <https://doi.org/10.3390/jmmp3010028>
- [67] D. Marini, D. Cunningham and J.R. Corney, Near net shape manufacturing of metal: A review of approaches and their evolutions, on *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture* 232(4) 650-669 May 2017
- [68] BMW Motorrad präsentiert die M Endurance Kette, 27.08.2020, BMW Group, <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0314749DE/bmw-motorrad-praesentiert-die-m-endurance-kette?language=de>
- [69] Clean Fuels for all – Unser Beitrag für ein klimaneutrales Europa, Jahresbericht 2020, Mineralölwirtschaftsverband e.V. Berlin, September 2020, [https://www.mwv.de/wp-content/uploads/2020/09/MWV\\_Mineraloelwirtschaftsverband-e.V.-Jahresbericht-2020-Webversion.pdf](https://www.mwv.de/wp-content/uploads/2020/09/MWV_Mineraloelwirtschaftsverband-e.V.-Jahresbericht-2020-Webversion.pdf)
- [70] K.-U. Kolshorn, P. Wiesert, R. Götz und G. Rippen, Ermittlung von Ölvermeidungspotentialen, *Forschungsbericht* 103 60 11, UBA-FB 97-034, ISSN 0722-186X.
- [71] Bericht über biologisch schnell abbaubare Schmierstoffe und Hydraulikflüssigkeiten, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Bonn, November 1999
- [72] V. Monier, E. Labouze, Critical review of existing studies and life cycle analysis on the regeneration and incineration of waste oils, European Commission, DG Environment A2, December 2001
- [73] Official Journal of the European Union, Legislation, Volume 58, L 285, Annex I – Combined Nomenclature, p. 272 (30.10.2015)
- [74] Marktanalyse Nachwachsende Rohstoffe, FNR-Schriftenreihe „Nachwachsende Rohstoffe“, Band 34, 2014, ISBN 978-3-942147-18-7
- [75] United Nation Environmental Programme, BASEL CONVENTION, Protocol on liability and compensation for damage resulting from transboundary movements of hazardous wastes and their disposal, 1989
- [76] Ecological and energetic assessment of re-refining used oils to base oils: Substitution of primarily produced base oils including semi-synthetic and synthetic compounds. GEIR - Groupement Européen de l'Industrie de la Régénération, 2005, [http://www.geir-rerefining.org/documents/LCA\\_en\\_short\\_version.pdf](http://www.geir-rerefining.org/documents/LCA_en_short_version.pdf).
- [77] N. Abdalla and H. Fehrenbach, LCA for regeneration of waste oil to base oil, April 2018, <https://www.geir-rerefining.org/lca-for-regeneration-of-waste-oil-to-base-oil/>
- [78] Mobil 1™ Annual Protection limited warranty, <https://www.mobil.com/en/lubricants/for-personal-vehicles/our-products/mobil-limited-warranties/mobil-1-annual-protection-oil-warranty>
- [79] Neste prioritises sustainability, INFINEUM Insight, 13.08.2019, <https://www.infineuminsight.com/en-gb/articles/base-stocks/neste-prioritises-sustainability/>
- [80] T. Krapfl, E. Bielmeier, D. Sepoetro, C. Merz: Life cycle assessment of an efficient hydraulic fluid, *Proc. 22nd International Colloquium Tribology*, 28.-30. January 2020, TAE, Ostfildern, Germany



