



Wirkungen der Tribologie auf die CO₂-Emissionen in der Nutzungsphase von Produkten

Beiträge der Tribologie zur Defossilisierung

Tribologie in Deutschland

Wirkungen der Tribologie auf die CO₂-Emissionen in der Nutzungsphase von Produkten

Beiträge der Tribologie zur Defossilisierung

Eine Expertenstudie der Gesellschaft für Tribologie e.V.
2023

Autoren

Mathias Woydt (Gesamtredaktion),
MATRILUB, Berlin, D

Eberhard Bock,
FREUDENBERG Sealing Technologies, Weinheim, D

Tim Hosenfeldt,
SCHAEFFLER AG, Herzogenaurach, D

Vasilios Bakolas,
SCHAEFFLER AG, Herzogenaurach, D

Rolf Luther,
FUCHS Lubricants Germany GmbH, Mannheim, D

Christoph Wincierz,
EVONIK Operations GmbH, Darmstadt, D

IMPRESSUM

Herausgeber und Vertrieb:

Gesellschaft für Tribologie e.V.
Adolf-Fischer-Str. 34, D-52428 Jülich, Deutschland
E-Mail: tribologie@gft-ev.de – Internet: www.gft-ev.de

Gestaltung und Satz:

pulcinello
Marcus Depenbusch
Kamper Str. 20 – 52064 Aachen
Telefon: (0241) 400 87 46 – Telefax: (0241) 400 87 54
E-Mail: info@pulcinello.de – www.pulcinello.de

Das Urheberrecht an dieser Studie verbleibt bei der Gesellschaft für Tribologie 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 e.V. darf die Studie weder übersetzt, kopiert, noch vervielfältigt oder in Portalen, Netzwerken und digitalen Medien gepostet werden.

© Juni 2023, v1

INHALT

Zu dieser Studie	6
Das Leitthema dieser Studie	7
1. Wechselwirkung der Reibung mit CO₂-Emissionen	8
2. Verschleißschutz & Nachhaltigkeit	9
2.1. CO ₂ -Rucksack in materiellen Ressourcen	9
2.2. Zuordnung der Stoffströme zur Tribologie	11
2.3. Relevante, materielle Stoffströme zu den CO _{2eq.} -Minderungen durch Verschleißschutz	13
2.4. Hierarchische Zuordnung der Materialströme zur Tribologie	14
2.5. Aufarbeitung von verschlissenen Bauteilen	15
3. Einbeziehung der Tribologie in die Klimaberichterstattung	16
3.1. Tribologie als nachhaltige Wirtschaftstätigkeit innerhalb der Taxonomie	16
3.2. Bepreisung von CO ₂ -Emissionen	17
3.3. Volkswirtschaftliches Preisschild für die Defossilisierung	18
3.4. Scope 4 „avoided emissions“ – Tribologie als CO ₂ -Vermeidungstechnologie	19
4. Scope 3, Category 11, Downstream Emissionen	23
4.1. Scope 3 Emissionen von Fahrzeugen	24
4.2. Ein holistischer Beitrag moderner Dichtungstechnik zur Nachhaltigkeit	24
4.3. Abschätzung des globalen Energieverbrauchs von Wälzlagern	28
4.4. Einsparungen an Energie in Hydrauliksystemen	33
4.5. Optimierte Motorenöle zur Reibungsminderung	38
Schlussfolgerungen	40
Danksagungen	41
Bibliographische Referenzen zum Nachlesen	42

ZU DIESER STUDIE

Die Menschheit beansprucht die Ressourcen der Natur durch die kostenlose Entnahme von Rohstoffen und nutzt die Natur als Abfallsenke. Tribologische Aspekte werden nur indirekt als maßgebliche Folgen menschlicher Aktivitäten wahrgenommen, die überall und jederzeit auftreten. Dieser Erkenntnismangel könnte erklären, warum Reibung und Verschleiß, die beide während der Nutzungsphase bewegter Systeme auftreten, nicht als eigenständige Faktoren Eingang in das Treibhausgasprotokoll, die Taxonomie und den Emissionshandel gefunden haben.

Das Wachstum der Menschheit und ihres Wohlstands haben erhebliche Auswirkungen auf unseren Ressourcenbedarf aus der Natur. Hier kommen die Angebote der Tribologie durch Langlebigkeit (Ressourceneffizienz und -schonung) und Reibungsreduktion (Energieeffizienz) zum Tragen. Energie wird nicht nur für die Überwindung der Reibung aufgewendet, sondern die daraus resultierenden Beanspruchungen in den sich berührenden Oberflächen führen zu irreversiblen Verschleiß und damit zur Notwendigkeit des Austauschs von Teilen oder der Erneuerung der Anlage. Reibung, als irreversibler Verlust bzw. irreversible Energieumwandlung in Wärme, ist derzeit noch weitgehend proportional zu den Kohlendioxidemissionen. Langlebigkeit, beispielsweise durch Verschleißschutz oder durch Zustandsüberwachung, verlängert die Nutzungsphase von Gütern und Anlagen, was die Entnahme natürlicher Ressourcen und dem damit verbundenen CO₂-Rucksack dieser Ressourcen reduziert sowie der Materialeffizienz und Ressourcenschonung entspricht.

Aus den beiden Studien der Gesellschaft für Tribologie e.V.

- » „Tribologie in Deutschland – Querschnittstechnologie zur Minderung von CO₂-Emissionen und zur Ressourcenschonung“ (2019) und
- » „Verschleißschutz und Nachhaltigkeit als Querschnittsherausforderungen“ (2021)

leiten sich mittel- bis langfristige Einsparungen von jährlichen 3,9-11,3 Gigatonnen CO_{2eq.} ab, weswegen die Tribologie in das Portfolio umweltverträglicher Technologien zur Nettoemissionsminderungen bei Treibhausgasen und in den Emissionshandel aufgenommen werden sollte. Reibung und Verschleiß treten überall entlang der Wertschöpfungskette auf. Tribologie bietet deshalb technische Handlungsoptionen zur Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre mit hohen Umsetzungschancen, da sie insbesondere in der Nutzungsphase (downstream) technischer Systeme wirkt, weil in der Nutzungsphase (downstream) eingespartes CO₂ nicht in der Erzeugungsphase (upstream) erzeugt werden muss.

Reibungsreduzierung und Langlebigkeit sind „industrielle Strategien zur Dekarbonisierung“ oder „gesellschaftlichen CO₂-Sequestrierung“, weil CO_{2eq.}-Einsparungen durch Tribologie überall und zu jeder Zeit stattfinden sowie die nötige Energie zur Bewegung von Maschinenelementen upstream nicht bereitgestellt werden muss. Reibungsreduzierung und Langlebigkeit sind deshalb als „negative Emissionstechnologien“ (NET) zu betrachten, da sie während des Betriebs weniger CO₂ erzeugen bzw. insofern CO₂ einsparen – und zumal sie als Drop-in-Lösung leicht umzusetzen sind.

Tribologie ist eine technisch-wissenschaftliche Disziplin mit einer sehr breiten industriellen Basis. Die Tribologie ist eine interdisziplinäre Schlüsseltechnologie zur Minderung des bis 2050 erwarteten CO₂-Überhangs. Reibungsreduzierung und Langlebigkeit sind zwei der wesentliche Bausteine der Nachhaltigkeit.

Die dritte GfT-Studie benennt ausgewählte Lösungsansätze, schätzt den CO₂-Wert ausgewählter, tribologischer Lösungen ab und detailliert konkrete Arbeitsachsen auf Basis verfügbarer Technologien. Überwiegend beziehen sich die Zahlen auf das Jahr 2019, weil es als das letzte „normale“ Wirtschaftsjahr vor der Covid19-Pandemie angesehen wird.

[Die GfT-Studien 2019 „CO₂ & Reibung“ und 2021 „Nachhaltigkeit & Verschleißschutz“ sind auch als englisch- & französischsprachige Fassungen verfügbar.]

DAS LEITTHEMA DIESER STUDIE

Das 21. Jahrhundert wird immer noch „materiell“ geprägt sein, bevor es möglicherweise im darauffolgenden Jahrhundert vieles virtuell wird mit Bits & Bytes & Bitcoins sowie künstlicher Intelligenz. Weit darüber hinaus wird es Maschinen und Geräte mit beweglichen Elementen geben, die aus Materialien bestehen und die für eine niedrige Reibung und Langlebigkeit, und damit verminderte Downstream CO_{2eq.}-Emissionen, geschmiert werden müssen. Wohlstand und Bevölkerungswachstum heizen den Energie- und Materialhunger an. Folglich gibt es keine Alternative zur Annahme der Angebote der Tribologie zur Minderung des Energiebedarfs und zur Steigerung der Langlebigkeit, da nur so aus den vorhandenen und von der Natur kostenlos abgegebenen Ressourcen mehr Nutzwerte generiert werden können. CO_{2eq.}-Emissionen, welche Downstream nicht entstehen, gebraucht oder vermindert werden, müssen Upstream nicht generiert werden. Somit kann die Tribologie einen signifikanten Beitrag dazu leisten, die Balance zwischen der Natur und der anthropologischen Ressourcenentnahmen wieder herzustellen.

**DIE WEITEN MEERE, DIE OFFENE ATMOSPHÄRE UND DIE ERDKRUSTE
SIND FREI ZUGÄNGLICHE RESSOURCEN!**

**DIE MENSCHHEIT MUSS DIESE KOSTENLOSEN ANGEBOTE DER NATUR SCHÄTZEN,
WERTSCHÄTZEN UND HOCH IM NUTZEN VALORISIEREN
OHNE DABEI DIE NATUR ZU KOMPROMITTIEREN.**

1. WECHSELWIRKUNG DER REIBUNG MIT CO₂-EMISSIONEN

Der gesamte, globale Primärenergieverbrauch wird von 584 Exajoule im Jahr 2019 [1] auf über 700 Exajoule im Jahr 2040 [2] steigen. Darüber hinaus schätzt die U.S. Energy Information Administration (EIA), dass der jährliche Energieverbrauch bis 2050 um bis zu 50 % steigen wird [3]. Der fossile CO₂-Anteil an der weltweiten Primärenergieerzeugung betrug 2019 84 %.

Resolutionen des US-Kongresses (nicht angenommen!) [4] und Studien von Holmberg et al. [5, 6] gehen davon aus, dass 20-23% (absolut) des gesamten Primärenergieverbrauchs durch Reibung verloren gehen und das geschätzte, langfristige Einsparpotenzial 30-40% davon beträgt. Aus den verschiedenen Studien in Tabelle 1 ergibt sich eine Spannbreite an absoluten Potenzialen zur Reduzierung des Primärenergieverbrauchs durch Reibung [7, 8]:

Jost¹ 1966: 5%; Holmberg 2019: 8%; Holmberg 2017: 8,6%; A.S.M.E. 1977: 10,9%; U.S. Congress 2016: 12%; A.R.P.A.-E 2017: 24%.

Einigkeit erzielten diese Studien hinsichtlich des langfristigen Einsparpotentials des Reibungsan-

teils im Primärenergieverbrauch durch tribologische Maßnahmen, welches auf zwischen 30-40 % eingeschätzt wird. Die fossilen (also anthropogenen), direkten oder energiebedingten CO₂-Emissionen² kumulierten sich 2019 auf 33,6 Gigatonnen CO₂ [9] zzgl. 4,4 Gigatonnen für prozessbedingte CO₂-Emissionen (non-energy related). Daraus ergibt sich ein rechnerisches und absolutes CO₂-Reduktionspotenzial im Bereich von 2,7 Gigatonnen bis 8,1 Gigatonnen oder 8-24 % der globalen und direkten CO₂-Emissionen. Unabhängig von der Nutzung „grüner“ Energieerzeugung helfen Einsparungen durch Reduzierung der Reibung in jedem Fall. Entweder wird die Klimaneutralität (net zero) früher erreicht, oder wir generieren aus gleicher Menge an Primärenergie mehr Nutzwerte.

Es ist zu beachten, dass durch die Einbeziehung nicht energiebedingter CO₂-Emissionen, wie Zement- und Ziegelfertigung, zu den 33,6 Gigatonnen CO₂ weitere +4,4 Gigatonnen CO₂ hinzukommen. Die Emissionen anderer Treibhausgase (THG), wie Methan (CH₄), Stickstoffoxid (N₂O), Schwefelhexafluorid (SF₆), teilfluorierte Kohlenwasserstoffe, fluorierte Ether und perfluorierte

Tabelle 1: Einsparpotentiale an Primärenergie durch Reibungsminderungen [7,8]

Studie	Jahr des Erscheinens	Einsparpotential an Primärenergie	
		In % von Primärenergieverbrauch	In EJ bezogen auf den Primärenergieverbrauch des benannten Jahres
Jost (G.B.)	1966	5	0,4 EJ
A.S.M.E. (USA), Pinkus & Wilcock	1977	10,9	10 EJ (93 EJ)
Holmberg et al.	2017	8,6	
A.R.P.A.-E (USA)	2017	24	24,1 EJ (von 102,9 EJ)
Holmberg et al.	2019	8,0	

1 Exajoule (EJ)= 10¹⁸ Joules; A.S.M.E.= The American Society of Mechanical Engineers; Primärenergieverbrauch (Total primary energy supplies (TPES)) in 2019: global= 584 EJ. USA= 105,7 EJ. Deutschland= 13,1 EJ; A.R.P.A.-E= U.S. Advanced Research Projects Agency-Energy.

¹ Die Studie von Sir Peter Jost ließ Potentiale durch Reibungsminderungen außer Acht und konzentrierte sich auf Verschleißschutz, Wartung und Lebensdauererlängerungen.

² Es ist zu beachten, dass es verschieden zusammengesetzte Werte der CO₂-Emissionen gibt. Ausgangspunkt für z.B. 2019 sind die direkten oder energiebezogenen CO₂-Emissionen von 33,6 Gigatonnen. Diese Menge erhöht sich um weitere + 4,4 Gigatonnen CO₂ von nicht-energiebedingten CO₂-Emissionen bzw. CO₂-Emissionen, welche aus Nichtverbrennungsprozessen stammten, wie Zement- und Ziegelfertigung, sodass die fossilen, anthropogenen CO₂-Emissionen 38,0±1,9 Gigatonnen betragen. Hinzukommen, zusätzlich andere Treibhausgase (THG), wie Methan (CH₄), Stickstoffoxid (N₂O), Schwefelhexafluorid (SF₆), teilfluorierte Kohlenwasserstoffe, fluorierte Ether und perfluorierte Verbindungen, in Höhe von 14,4 Gigatonnen CO_{2eq.} sowie für Landnutzungsänderungen (LUC). Die globalen CO_{2eq.}-Emissionen summieren sich für 2019 auf 59,1 ± 5,9 Gigatonnen CO_{2eq.}. Siehe United Nation's Emission Gap Report 2020.

Verbindungen, sowie Landnutzungsänderungen (LUC), werden als CO₂-Äquivalente umgerechnet und oben draufgeschlagen, so dass die gesamten Treibhausgasemissionen 2019 sich auf 59,1 ± 5,9 Gigatonnen CO_{2eq.} erhöhen [9].

Auch in einer digitalisierten Welt wird in beweglichen Teilen und Maschinenelementen die Reibung weiterhin irreversibel Antriebsenergie in Wärme umwandeln. Die Reduzierung der Reibung ist nicht nur – wie oft aus Laiensicht – ein generelles Thema oder ein Thema für Fahrzeugantriebe mit Verbrennungsmotor, sondern auch für batterieelektrische (BEV) und brennstoffzellenelektrische Fahrzeuge (FCEV) von Bedeutung, denn die Reduzierung der Reibung in Elektroantrieben erhöht die Reichweite von Elektrofahrzeugen.

Insgesamt ist die Reibungsreduzierung eine dominierende Teilmenge der Energieeffizienz und

als solche gut eingebettet in die Nachhaltigkeitsziele (Sustainable Development Goals (SDG)) der Vereinten Nationen [10].

Die Energieeffizienz findet sich im SDG #7.3: „Bis 2030 die weltweite Steigerungsrate der Energieeffizienz verdoppeln“, und im SDG #13: „Umgehend Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und seiner Auswirkungen ergreifen“.

Explizit hebt Artikel 2(17) in der EU-Taxonomie-Verordnung EU/2020/852 die Energieeffizienz hervor, welche über die Reibungsminderung einen Bezug zu den CO₂-Emissionen hat:

„Energieeffizienz“, eine effizientere Energienutzung entlang der gesamten Energieversorgungskette von der Erzeugung bis zum Endverbrauch.

2. VERSCHLEISSSCHUTZ & NACHHALTIGKEIT

Langlebigkeit hat keine Verbindung zur Technosphäre der Kreislaufwirtschaft, aber die Verlängerung des Produktlebenszyklus entkoppelt den Materialverbrauch vom Wirtschaftswachstum, reduziert Abfallströme und mindert den Ressourcenverbrauch und deren CO₂-Rucksack.

Die inhaltlichen Vorstellungen zum Begriff der Nachhaltigkeit unterliegen einer breiten Auffassung und sind oft diffus. Alle Aspekte der Nachhaltigkeit werden durch die siebzehn Ziele und 169 Zielvorgaben für nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals, SDG) beschrieben, die von der Generalversammlung der Vereinten Nationen [10] im Oktober 2015 verabschiedet wurden. CO₂ oder CO₂-Äquivalente (CO_{2eq.}) werden in Zukunft die Währung für Nachhaltigkeit bzw. der „Goldstandard“ sein, um menschliche Aktivitäten zu vergleichen und deren Folgen zu bewerten.

Der Verschleißschutz ist im SDG #12 „Nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster“ verankert und die Materialeffizienz und Ressourcenschonung im SDG #8.4 als „Ressourceneffizienz in Konsum und Produktion“ und im SDG #9.4 als „effizienterem Ressourceneinsatz“.

2.1. CO₂-RUCKSACK IN MATERIELLEN RESSOURCEN

Der Verbrauch von Ressourcen jeglicher Art führt unweigerlich zu CO₂-Emissionen aus den Prozessschritten „Bergbau, Extraktion, Verhüttung und Verarbeitung“. Die Ressourcenfrage war bisher der CO₂-Frage untergeordnet. Die globalen Stoffströme stellen den Ausgangspunkt für Bewertungen der Auswirkungen des Ressourcenverbrauchs auf die damit verbundenen eingebetteten CO₂-Emissionen (CO₂-Rucksack) von Primärressourcen dar. Der weltweite Materialverbrauch oder Gesamt(erst)extraktion von 92,1 Gigatonnen (= Milliarden Tonnen) im Jahr 2017 (zzgl. + 8,6 Gigatonnen Kreislaufprodukte) wird prognostiziert auf 167-190 Gigatonnen [11, 12] im Jahr 2060, wovon im Jahr 2017 die fossilen Brennstoffe nur einen Anteil von 15% an den globalen Materialströmen bzw. einen Betrag von 15 Gigatonnen hatten. Diese Prognosen implizieren unweigerlich einen erhöhten Verbrauch von Metallen und Mineralien, die im Maschinenbau, der Mobilität oder Haushaltsgeräten verwendet werden, sofern ausreichend vorhanden, sowie die darin eingebetteten CO_{2eq.}-Emissionen.

In Tabelle 2 sind die Verbräuche und die direkten CO₂-Äquivalente für ausgewählte Metalle und Materialien aufgeführt. Tabelle 2 basiert auf Zahlen von internationalen Industrieverbänden, die ihre Statistiken auf Angaben von Mitgliedsunterneh-

men stützen und als qualifiziert anzusehen sind. Die Natur der Erze und eingesetzten Verarbeitungsverfahren erklären die Bandbreiten der äquivalenten CO₂-Emissionen (CO_{2eq}) in Tabelle 2.

Tabelle 2: Mittlere CO_{2eq}-Emissionen bei der Gewinnung von einer Tonne Primärmetall/-material³ [13,14]

Primärmetall oder Material	CO ₂ -Äquivalente in Tonnen pro Tonne Metall oder Material	Globale Produktion 2018/2019 [10 ³ Tonnen]	Errechnete CO _{2eq} -Emissionen der Primärmetalle oder Materialien [10 ³ Tonnen]
Sondermetalle			
Neodym	12-60	35	420-2.100
Lithium	5-16	80	400-1.280
Niob	7,6	100	760
Wolfram	33,6	146	4.905
Molybdän	3,4-14,8	259	881-3.788
Magnesium	20-26	1.100	>22.000
Nickel	13-42	2.330	30.290-97.860
Titan	45	7.200	324.000
Silizium	10	8.400	81.000
Blei	3,2	11.640	37.248
Chrom	25	12.300	307.500
Zink	9,8	13.400	131.320
Mangan [#]	1,9-6,2	16.630	31.597-103.106
Zwischensumme	–	73.620	972.321-1.116.867
Bedeutende Ingenieurwerkstoffe			
Kupfer*	5,5-9,5	23.600	129.800-224.200
Aluminium	16,6	64.800	1.075.680
Stahl (Eisen)	>1,8	1.808.000	>3.254.400
Zwischensumme	–	1.896.400	>4.459.880
Nicht-metallische Ingenieurwerkstoffe			
Bitumen	0,30-0,75	90.000	27.000-67.500
Kunststoffe ⁺	~3,4	368.000	~1.251.000
Zement	0,6-1,3	4.200.000	2.520.000-5.460.000
Gesamtsumme	–	6.620.020	9.228.401-12.422.711
Zum Vergleich			
Deutschland 2019 ⁴	–	–	805.000
Globale, energiebedingte CO ₂ -Emissionen 2019 ⁵	–	–	37.900.000

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

³ Weitere CO_{2eq}-Emissionen durch die nachfolgenden Prozessschritte der Affination und Weiterverarbeitung (Walzen, Umformen, Wärmebehandlung, etc.) sind nicht enthalten.

⁴ Die Treibhausgasemissionen in Deutschland betragen 2018 858,3 Megatonnen CO₂-Äquivalenten oder 755,3 Megatonnen CO₂ (ca. 88%) und mit Berücksichtigung des Luftverkehrs 888,3 Megatonnen CO₂-Äquivalente. Die Treibhausgasemissionen gingen 2019 auf 805 Megatonnen CO₂-Äquivalente (ohne Luftfahrt) bzw. 683,8 Megatonnen CO₂ zurück. Ein weiterer Rückgang auf 739 Megatonnen CO_{2eq} (bzw. 644,5 Megatonnen CO₂) ergab sich 2020. Die Treibhausgasemissionen in Deutschland betragen 2022 746 Megatonnen CO₂-Äquivalenten. Insgesamt gingen in Deutschland die Treibhausgasemissionen seit 1990 um -40,4% zurück.

⁵ Es gibt unterschiedlich zusammengesetzte Treibhausgas-Emissionen (Siehe Fußnote 2).

Das durchschnittliche Brutto-Verhältnis zwischen Abbau, Gewinnung und Verarbeitung einer Tonne Primärmetall oder -material zu den entsprechenden CO_{2eq.}-Emissionen in den Jahren 2018 & 2019 liegt zwischen 1,36 und 1,82 Tonnen CO_{2eq.} pro Tonne Material. Das Gesamtverhältnis zwischen CO_{2eq.} und extrahierten Tonnagen an Metallen/Materialien berechnet sich für 2015 auf 1,38:1, wenn man 11,5 Gigatonnen CO_{2eq.} Treibhausgas-Emissionen⁶, wie der U.N. Emissions Gap Report 2019 [15, S. XXV & S. 57, ebenda] berichtet, durch den materiellen Fußabdruck von 8,3 Gigatonnen Metallerzen teilt, wie ihn der United Nation Environment Report [16] bekannt gibt.

Unabhängig von den Bestrebungen der Stahl- und Aluminiumindustrien, die spezifischen CO₂-Emissionen langfristig zu reduzieren, werden Maßnahmen zur Verbesserung von Lebenszyklen und Langlebigkeit den Rohstoffverbrauch und die Abfallströme reduzieren und zur Senkung der CO₂-Emissionen beitragen.

In einer sozio-ökologischen Betrachtung kann der Verschleißschutz dazu beitragen, bei gleichem Ressourcenverbrauch bzw. Stagnation der eingebetteten CO_{2eq.}-Emissionen eine Verdoppelung im Nutzwert zu erlauben; mit anderen Worten, es können doppelt so viele Erdenbürger am Nutzen der Ressourcen teilhaben bei heutigem globalen „Materialhunger“.

2.2. ZUORDNUNG DER STOFFSTRÖME ZUR TRIBOLOGIE

Die aus der Natur extrahierten Ressourcen fließen in verschiedene Anwendungen, wobei sich die Frage nach deren individuellen Bezug zur Tribologie stellt. Es stellt sich für die in Tabelle 2 wiedergegebenen Stoffströme die Frage nach dem potenziellen Ressourcenpool, dessen Nutzungsdauer durch Verschleißschutz verlängerbar ist bzw. welche Stoffströme in Endverwendungen mit Tribosystemen oder in Anwendungen fließen, deren „funktionales Profil“ von Tribosystemen bestimmt werden. Hierüber liegen keine allgemeinen Erkenntnisse bzw. Datengerüste vor.

Die Materialflussanalyse veranschaulicht, in welche Anwendungen oder Warengruppen die Stoffströme des einfließenden Frischmaterials verwendet werden. Für die verschiedenen Werkstoffgruppen fehlen heute überhaupt detaillierte oder aktuelle Sankey⁷-Diagramme der Stoffströme.

Die extrahierten Ressourcen zielen auf verschiedene Anwendungen. Jede Materialkategorie fließt in individuellen Anteilen in Mobilität, Maschinen, Anlagen, Installationen, Haushaltsgeräte, usw., welche Tribosysteme enthalten. Stoffströme in Katalysatoren, Verpackungen und statische Konstruktionen haben keinen Bezug zur Tribologie, außer der Möglichkeit, durch reibungsarme Tribosysteme deren Energieverbrauch bei ihrer Herstellung zu reduzieren. Verpackungen sind der Hauptverwendungszweck für Kunststoffe und Aluminium mit einer kurzen Lebensdauer von weniger als 2 Jahren. Auch Smartphones haben heute eine durchschnittliche Lebensdauer von weniger als 2 Jahren. Gebäude haben eine lange Lebensdauer, enthalten aber auch Komponenten mit Tribosystemen, wie Pumpen und Ventilatoren der Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik (HLK). Straßenoberflächen und Schienen der Verkehrsinfrastruktur verschleifen im Laufe der Jahre. Entgegen der Erwartung strömen vom gesamten Zementverbrauch in den USA 33 % (2015) [17] und in China 22,4 % (2019) [18] in Straßen und Autobahnen.

Asphaltbeläge bestehen zu ~5% aus Bitumen und zu ~95% aus mineralischen Zuschlagstoffen und sind die am häufigsten recycelten Materialien. Etwa 85 % der weltweit 90 Millionen Tonnen Bitumen werden als Bindemittel für verschiedene Arten von Asphaltbelägen für Straßen, Flughäfen und Parkplätze verwendet [19].

Stahl, Aluminium, Kupfer oder Kunststoffe werden hauptsächlich in Beständen gespeichert, wie Fahrzeuge und Konsumgüter oder Maschinen, welche Tribosysteme enthalten. Der globale Verkehrssektor, bestehend aus Kraftfahrzeugen, Zügen, Flugzeugen und Schiffen, die alle mit Tribosystemen ausgestattet sind und deren Funktion

⁶ Die 11,5 Gigatonnen an CO_{2eq.}-Emissionen in 2015 bedeuten auch, dass der Materialfußabdruck der Metalle/Materialien für 23,2% der Treibhausgasemissionen (CO_{2eq.}) der 49,85 Gigatonnen an CO₂-Emissionen (2015) verantwortlich ist).

⁷ Ein Sankey-Diagramm ist eine Visualisierung, die zur Darstellung von Strömen jeglicher Art von einem Satz von Ausgangswerten zu einem Satz von Endwerte entlang einer betrachteten Wertschöpfungskette verwendet wird, wobei die Breite jedes dargestellten Teilstromes einem quantitativen Wert entspricht.

von diesen abhängen, emittierte 2018 8,2 Gigatonnen CO₂ aus Energieträgern [20], wobei die Zahl nicht den materiellen Ressourcen-Fußabdruck für den Bau von Verkehrstechnologien, Fahrzeugen und Verkehrsinfrastrukturen (Straßen, Schienen, Flughäfen, Häfen) berücksichtigt.

Der Stahlbau in der EU27 hatte 2012 einen Anteil von 64,7 % an den in Gebrauch befindlichen Beständen von 4,21 Gigatonnen Eisen und Stahl [21], während die Studie des Joint Research Centers (EU-JRC) 49 % der in der EU für das Bauwesen verwendeten Stahlfertigprodukte für das Bauwesen ausweist [22]. Von den 1,87 Gigatonnen Stahl, die jährlich produziert werden, entfallen nur 15 % auf Autos, Lastwagen und Schiffe sowie 20 % auf Maschinen und 15 % auf Konsumgüter [23]. Bei den übrigen ~50 %, vor allem bei Gebäuden und Infrastrukturen, besteht nur ein mittelbarer Zusammenhang zur Tribologie bei Gebäuden und Infrastrukturen, wobei bei Verpackungen an sich kein erkennbarer Zusammenhang mit der Tribologie besteht.

Der weltweite Verbrauch von Kunststoffen lag 2019 bei 368 Megatonnen. In der EU28 (plus Schweiz und Norwegen) wurden 61,7 Megatonnen Kunststoffe eingesetzt, von denen 43 Mega-

tonnen (69,7%) für Verpackungen und Gebäude verwendet wurden [24]. 30,3 % verblieben für Transport, Maschinen und Konsumgüter. Von den 61,7 Megatonnen wurden 29,1 Megatonnen (47,2 %) gesammelt und nur 9,32 Megatonnen (15,1 %) physikalisch recycelt.

45 % des weltweit verbrauchten Aluminiums gelangen in Transportmittel, Maschinen und langlebige Konsumgüter [25]. Die Endverwendung von Kupfer entfiel 2019 zu 48 % auf Motorantriebe und Ausrüstungen in Industrie und Transport sowie auf Haushaltsgeräte [26].

Alle Sondermetalle sind in einem breiten Spektrum moderner Technologien von entscheidender Bedeutung und decken ein breites technologisches Anwendungsspektrum ab. Sie haben keine praktischen Anwendungen in Verpackungen und Konstruktionen gefunden. Einige von ihnen werden als Katalysatoren verwendet. Nickel, Chrom, Molybdän oder Mangan sind wichtige Legierungselemente in der Metallurgie und den Materialwissenschaften sowie bei Beschichtungen für den Verschleiß- und Korrosionsschutz.

Hartmetalle aus Wolframkarbid verbrauchen 64% sowie Superlegierungen und Stähle 16% des

Tabelle 3: Abschätzungen der CO_{2eq.}-Emissionen von Materialströmen⁸, die in Produkte eingehen, welche Tribosysteme enthalten

Primärmetall oder Material	Mittlere, globale Verweildauer [Jahre]	Rechnerische CO _{2eq.} -Emissionen von Primärmetallen [10 ³ Tonnen]	Anteil an Tribosystemen oder von diesen abhängig	Rechnerische CO _{2eq.} -Emissionen der Stoffströme mit einem Bezug zur Tribologie [10 ³ Tonnen]
Sondermetalle				
Nd, Li, W, Mn, Si, Ti, Ni, Mg, Zn, Pb, Mo	–	>1.039.131	<70	727.307
Bedeutende Ingenieurwerkstoffe				
Kupfer	41	129.800-224.200	48	61.020-107.520
Aluminium	21,1	1.075.680	45	484.056
Stahl (Eisen)		>3.254.400	35-50	1.138.900-1.627.000
Zwischensumme	–	4.459.880	–	1.688.976-2.218.576
Nicht-metallische Ingenieurwerkstoffe				
Bitumen	~20	27.000-67.500	95	25.650-64.125
Kunststoffe		~1.251.000	30	375.300
Zement	>30	2.520.000- 5.460.000	22-33*	554.400-1.801.800
Total	–	9.297.011-12.371.911		3.371.633-5.187.108

⁸ Anmerkung: Die Minderungen der Material-/Stoffströme durch lebensdauer verlängernden Verschleißschutz und Zustandsüberwachung ist derzeit schwer abzuschätzen, da die eingesparten Tonnagen bisher nicht quantifiziert und direkt den Anwendungen und Endanwendungen zugeordnet werden können, die Tribosysteme haben oder von Tribosystemen abhängen (Siehe Kapitel 2.1).

Primärwolframs [27]. Ungefähr die Hälfte der Tonnage der Seltenen Erden wird als Katalysator, in Gläsern und Leuchtmitteln verwendet. Permanentmagnete und Ingenieurkeramiken verbrauchen das verbleibende Volumen an Seltenen Erden [28]. Vor allem Windkraft- und Elektromotoren sind auf Neodym angewiesen [29], aber auch auf Dysprosium und Praseodym. Der weltweite Verbrauch von Seltenerdoxid erreichte 2019 158.500 Tonnen [29].

In Tabelle 3 werden die anteiligen CO_{2eq.}-Emissionen von Materialströmen abgeschätzt, die in mit tribosystemen-behafteten Produkte einfließen oder von Tribosysteme jeglicher Art abhängen. Für diese Tabelle wurden die berechneten Emissionen von Metallen/Materialien aus Tabelle 2 mit einem angemessenen Anteil der Metalle/Materialien multipliziert, die in Mobilität, Ma-

schinen, Anlagen, Installationen, Haushaltsgeräten usw. verwendet werden, und Tribosysteme enthalten oder von deren Funktionsfähigkeit abhängen. 32% bis 42% der berechneten CO_{2eq.}-Emissionen von Primärmetallen oder -materialien können Materialströmen zugeordnet werden, die in Anwendungen und Endverwendungen mit Tribosystemen eingehen oder von Tribosystemen abhängen. Mit diesem Ansatz können die THG-Emissionen der potenziellen Materialströme aus Tabelle 2 von 9,2-12,4 Gigatonnen eingebettetem CO_{2eq.} auf 3,4-5,2 Gigatonnen in Tabelle 3 für diejenigen mit einem Bezug zur Tribologie, insbesondere mit einem Potential zur Lebensdauer-Verlängerung. Unter der Annahme einer mittel-/langfristigen Verdoppelung der Lebensdauer durch tribologische Maßnahmen sinken die CO_{2eq.}-THG-Emissionen jährlich um 1,8-2,6 Gigatonnen CO_{2eq.}.

2.3. RELEVANTE, MATERIELLE STOFFSTRÖME ZU DEN CO_{2EQ.}-MINDERUNGEN DURCH VERSCHLEISSCHUTZ

Bei den verschiedenen Volumina an materiellen Stoffströmen gibt es Diskrepanzen zwischen den Quellen internationaler Organisationen. Für 2017 berichtet der UN Resources Outlook 2019 [12, p. 49] von einer Extraktion von 9,1 Gigatonnen an „Metallerzen“, während der Circularity Report 2020 [30, S. 18, ebenda] 10,1 Gigatonnen angibt. Aus den verfügbaren Daten ergeben sich verschiedene materielle Ressourcenpools:

- a. > 6,620 Gigatonnen “Ingenieurwerkstoffen” (Siehe Tabelle 2),
- b. 9,120 Gigatonnen an “metal ores” (für 2017, U.N. Resources Outlook 2019) [12],
- c. 10,100 Gigatonnen an “metal ores” (für 2017, Circularity Report 2020) [30] and
- d. 17,720 Gigatonnen (Siehe die Zahlen für 2015 in Tabelle 4 abgeleitet aus dem U.N. Resources Outlook 2019).

Tabelle 4: Globale Rohstoffentnahme 2017

Extraktion nach Materialgruppe	Gigatonnen	Bezug zur Tribologie
Globale Rohstoffentnahme	92,063	Bergbau ist verschleißbehaftet, wie auch seine Maschinen
Rezyklate	8,600	Re-Raffination von Gebrauchttölen
Gesamter Stoffstrom	100,663	–
Mineralische Rohstoffe (nicht-metallisch)	-43,834	Lebensdauererlängerungen von Fahrbelägen
Biomassen jeglicher Art	-24,062	Schmierstoffe und Additive auf Basis nachwachsender Rohstoffe
Fossile Energieträger	-15,047	Reibungsminderung senkt den allgemeinen Primärenergieverbrauch
Potentieller Ressourcenpool für Maßnahmen über Verschleißschutz	17,720	Eine angenommene Verdoppelung der Nutzungsdauer von Maschinen, Anlagen und Konsumgütern halbiert den Ressourcenverbrauch

Tabelle 4 subsummiert aus dem Circularity Gap Report 2020 den gesamten Ressourcenverbrauch von 100,6 Gigatonnen für 2017 mit dem potenziellen bzw. möglichen Ressourcenpool, bei welchem tribologische Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer zur Anwendung kommen können. Vom weltweiten Materialverbrauch oder Stoffstrom im Jahr 2017 von 100,663 Gigatonnen inkl. Recycling sind nicht kreislaufwirtschaftsfähige und nicht regenerierbare Materialien, wie 15,047 Gigatonnen fossile Energieträger und 24,062 Gigatonnen an Biomassen abgezogen worden. Von den verbleibenden 61,554 Gigatonnen müssen weitere Stoffströme subtrahiert werden, welche keinen Bezug zur Tribologie haben, wie 43,834 Gigatonnen nichtmetallische Mineralien (Baustoffe, Sand, Kies und Kalkstein, etc.), wobei bei dieser Materialgruppe deren Verwendung in Fahrbahnbelägen zu berücksichtigen ist. Die resultierenden 17,720 Gigatonnen⁹ repräsentieren den potenziellen Ressourcenpool, bei welchem tribologische Maßnahmen zur Verlängerung der Lebensdauer zur Anwendung kommen können.

Ungeachtet des betrachteten Ressourcenpools bleiben die Einsparungspotentiale durch Verschleißschutz in Bezug auf die globalen THG-Gesamtemissionen von 51,8 Gigatonnen CO_{2eq} bzw. den 37,9 Gigatonnen an direkten CO₂-Emissionen für 2017 signifikant.

2.4. HIERARCHISCHE ZUORDNUNG DER MATERIALSTRÖME ZUR TRIBOLOGIE

Für alle Materialstrom stellt sich die Frage, auf welcher hierarchischen Ebene dieser der Tribologie zugeordnet werden kann. Folgende Methodologien sind erkennbar:

A. Fokus nur auf die Triboelemente

Dabei wird nur die Masse des verschlissenen oder ausgefallenen Triboelementes, wie die der Gleitlagerschale oder des Kolbenrings oder des Wälzlagers, unabhängig von seiner Auswirkung auf das Teilsystem oder Gesamtprodukt, berücksichtigt.

B. Fokus auf Subsysteme oder Komponenten

Selbst wenn Verschleiß oder Ausfälle nur durch ein bestimmtes Triboelement verursacht wurden, wird die Masse des Teilsystems/der Komponente, wie Getriebe oder Motor, berücksichtigt, da es ohne Überholung unbrauchbar geworden ist und sein vollständiger Austausch einen neuen Materialverbrauch verursacht. Dieser Ansatz schließt die Masse anderer Triboelemente, vom Gehäuse und der Peripherie mit ein, obwohl die noch funktionsfähig sind, da das gesamte Subsystem bzw. die gesamte Komponente ausgetauscht und/oder verschrottet oder demontiert wurde, im besten Fall demontiert und das Material stofflich recycelt wurde.

C. Fokus auf Produkte oder gesamte Produktmasse

Die gesamte Maschine oder das Produkt wird verschrottet, wie z.B. ein Fahrzeug, obwohl viele Teilsysteme, Innenausstattung, Antriebsstränge und Gehäuse noch funktionsfähig sind, so dass dessen gesamte Massen dem tribologierelevanten Stoffstrom zugerechnet werden, weil

- eine technische Obsoleszenz¹⁰ eingetreten ist (sog. „gestrandete Vermögenswerte¹¹“) und/oder

⁹ Die Diskrepanz zwischen den 9,120 Gigatonnen an „Metallen“ aus dem U.N. Resources Outlook 2019 und den 17,657 Gigatonnen begründet sich mit den 8,6 Gigatonnen an Rezyklaten aus dem Circularity Report 2020. Die Zuordnung der zugeführten 8,6 Gigatonnen (cycled sources) zu Materialgruppen oder Anwendungen erfolgt im Circularity Gap Report 2020 nicht. Rezyklate müssen in die Betrachtungen zum potentiellen Ressourcenpool mit einfließen, da diese Materialien überwiegend aus technischen Werkstoffen bestehen und wieder dem Verarbeitungsprozess zugeführt werden sowie einen zusätzlichen Stoffstrom an Ingenieurwerkstoffen darstellen mit darin enthaltenen CO₂-Äquivalenten.

¹⁰ Begriffe der Obsoleszenz:

- a. 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.
- b. 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.

¹¹ Verlorene Vermögenswerte („stranded assets“) sind Vermögenswerte, die vorzeitig veraltet sind oder keine Erträge mehr erbringen und daher abgeschrieben werden müssen.

- ein Subsystem oder eine Hauptkomponente ausgefallen ist und eine Reparatur oder ein Austausch wirtschaftlich nicht durchführbar ist, insbesondere zu einem späten Nutzungszeitpunkt.

Die gesamte Produktmasse mit allen unterschiedlichen Materialien wird berücksichtigt, wenn sie verschrottet oder demontiert und recycelt wird. Dieser Ansatz berücksichtigt die Gesamtfolgen eines ausgefallenen oder verschlissenen Tribosystems.

Weiterhin bleibt zu berücksichtigen, dass durch schnelle technologische und gesetzliche Entwicklungen Produkte in die technische Veralterung (funktionale Obsoleszenz) geraten, so dass die Sinnhaftigkeit von Langlebigkeit und der Wiederverwendung von durch Wiederaufarbeitung vollständig wiederhergestellte Produkte nicht mehr gegeben ist.

2.5. AUFARBEITUNG VON VERSCHLISSENEN BAUTEILEN

Ein offensichtlicher Vorteil der längeren Lebensdauer von Gütern ist die Verringerung der Abfallströme, aber ein weiterer ist die Minderung der Treibhausgasemissionen (THG), weil eine Nutzungsverlängerung den im Ressourcenverbrauch beinhalteten Rucksack an THG länger valorisiert. Es scheint, dass ökologische Nachhaltigkeit eine längere Produktlebensdauer erfordert. Eine Strategie zur Verlängerung der Produktlebensdauer besteht darin, den Begriff der Qualität in Form von intrinsischer Haltbarkeit, Zustandsüberwachung, Reparaturfähigkeit und Wiederverwendung an den Kunden vor dem Kauf zu adressieren, damit ein Ersatz nur in letzter Konsequenz in Betracht kommt.

In Zeiten einer Rezession fördern die Wirtschaftsförderprogramme von Regierungen den Austausch von Produkten, was unmittelbar die Lebensdauer von funktionierenden oder reparaturfähigen Produkten verkürzt. Viele Geschäftsmodelle in einer Wohlstandsgesellschaft basieren auf einem frühzeitigen Austausch von Gütern, wofür

es verschiedene Motivationen gibt. Unternehmen müssen Gewinne machen, um zu überleben, und eine Verlagerung von Quantität zur Qualität bedroht eindeutig ein rein auf Volumen gerichtetes Geschäftsmodell. Alternativ sind komplexere Geschäftsmodelle vorstellbar, indem das Produkt nicht nur für ein Produktleben verkauft wird, sondern nach Aufarbeitung, Leistungssteigerungen oder „Restaurierung“ für weitere Lebenszyklen konzipiert wird.

Die Richtlinie 2009/125/EC „Ecodesign“ [31], zuletzt geändert durch 2021/341/EC, verweist auf die Möglichkeit einer „Verlängerung der Lebensdauer, die sich durch: garantierte Mindestlebensdauer, Mindestzeitraum der Lieferbarkeit von Ersatzteilen, Modularität, Nachrüstbarkeit, Reparierbarkeit“ ergibt. Die Ökodesign-Richtlinie zielt auf die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte, also Produkte, welche Energie zu ihrer bestimmungsgemäßen Funktion benötigen. Die EU-Rechtsvorschriften zum Ökodesign umfassen 31 Produktgruppen zu meist des täglichen Gebrauchs (business-to-consumer (B2C)), darunter Kühlschränke, Klimaanlage, Staubsauger, Pumpen, Fernseher, Waschmaschinen, Straßenbeleuchtungen oder PCs, etc.. Eine Ausweitung auf Business-to-Business-Produkte (B2B) wird angestrebt.

Darüber hinaus thematisiert die Rahmenrichtlinie 2008/98/EG „Abfallrahmenrichtlinie“ [32] die Verlängerung der Produktlebensdauer als eine Maßnahme zur Abfallreduzierung, welche durch die Änderungen in der EU-Richtlinie 2018/851/EG [33] nur bestärkt wurden.

Die Verlängerung der Lebensdauer ist eine Teilstrategie innerhalb der Ressourceneffizienz. Die Ressourceneffizienz ist ein Schwerpunkt im Toyama-Rahmenwerk [34] von 2016 der G7-Industriationen zu den Materialkreisläufen zur Umsetzung der Ressourceneffizienz (RE), Kreislaufwirtschaft (CE= circular economy), Vermeiden, Verringern, Verbessern (3R¹²) und nachhaltigem Materialmanagement (SNM¹³). Die Produktpolitik zur Verlängerung der Lebensdauer¹⁴ umfasst Maßnahmen wie Wiederaufarbeitung, Aufarbei-

¹² 3R= Replace, Reduce, Refine

¹³ SNM= Sustainable Materials Management

¹⁴ Die R-Strategien zur Lebensverlängerung sind: R3= Weiterverwendung, R4=Reparatur, R5= Instandsetzung/Aufarbeitung, R6= Wiederaufbereitung, R7= Umnutzung.

tung, Reparatur und direkte Wiederverwendung (RRRDR¹⁵). Der Rahmen der Toyama-Vereinbarung zielt darauf ab, eine nachhaltige, emissionsarme globale Wirtschaft zu fördern, die natürliche Ressourcen schont, wiederherstellt sowie nachhaltig nutzt und gleichzeitig wirtschaftliche Chancen, wie Wettbewerbsfähigkeit, Versorgungssicherheit, Innovation, Wirtschaftswachstum und die Schaffung von Arbeitsplätzen bietet.

Durch die Aufarbeitung verschlissener Bauteile können CO₂-Emissionen reduziert werden. Erfolgreich umgesetzt wird das zum Beispiel bei der Aufarbeitung von Wälzlagern in der Bahnindustrie, Bergbau- und Zementindustrie sowie bei Flugzeugturbinen.

Im Vergleich zur Herstellung neuer Lager werden dabei Ressourcen eingespart: Konkret lassen sich bei der Aufbereitung von Radsatzlagern die CO₂-Emissionen um über 95 Prozent, der Energieverbrauch um 94 Prozent und der Wasserverbrauch um 96 Prozent senken. So können bei einem Güterzug mit 80 Waggons, zwei Lokomotiven und damit insgesamt 1.296 Radsatzlagern allein 133 Tonnen CO₂, 481 MWh Energie und 1.767 m³ Wasser eingespart werden [35].

Die Überwachung der funktionalen Wirksamkeit von Schmierstoffen ist ein weiterer Bestandteil, um einen idealen Betrieb der Maschinen zu gewährleisten. Besonderes Augenmerk wird auf die korrekte Schmierung von Lagerungen gelegt, durch die viele Anwendungsprobleme und Maschinenausfälle vermieden werden können. Ungewissheit und fehlende Transparenz über die tatsächliche Schmiermenge und den Zustand üb-

licher automatischer Schmiersysteme sind für Instandhalter oft ein Grund, weiterhin manuell zu schmieren und sich nicht auf automatische Schmiersysteme zu verlassen. Dadurch wird bis zu 60 % mehr Schmierstoff als erforderlich verwendet. Ein smartes und vernetztes Schmieresystem, wie z.B. OPTIME C1 von Schaeffler, erlaubt nicht nur die Zustandsüberwachung hunderter Schmierstellen, sondern unterstützt bei der optimalen Einstellung der Schmiermenge und der Fernüberwachung der Schmierstoffversorger. Dieser digitale Service reduziert den Fettverbrauch sowie den Aufwand für die Schmierung und erhöht die Maschinenverfügbarkeit, was insgesamt die Ressourcenschonung positiv beeinflusst.

Data Matrix Code als Grundlage der digitalisierten und zustandsabhängigen Instandhaltung

Ein wichtiges Element des 100 Prozent Return-Services von Schaeffler ist ein im Herstellungsprozess auf jedes Radsatzlager aufgebracht, individueller Data Matrix Code (DMC). Hiermit können Herstellungs- und Betriebsdaten sowie Wartungsinformationen für das individuelle Produkt fortlaufend erfasst werden. Es entsteht ein digitaler Zwilling des Produktes mit einer umfassenden Lebensdauerakte. Aufgrund ihrer Auslegung haben die Radsatzlager ein hohes Potenzial für die Verlängerung von Wartungsfristen, welches mit der Auswertung der Lebensdauerakte genutzt werden kann. Diese zustandsabhängige Instandhaltung verbessert zusätzlich zum reduzierten CO₂-Fußabdruck die Zuverlässigkeit und Sicherheit im Betrieb bei reduzierten Kosten.

3. EINBEZIEHUNG DER TRIBOLOGIE IN DIE KLIMABERICHTERSTATTUNG

3.1. TRIBOLOGIE ALS NACHHALTIGE WIRTSCHAFTSTÄTIGKEIT INNERHALB DER TAXONOMIE

Die „EU-Taxonomie¹⁶-Verordnung“ ist eine Art Regelwerk mit einem einheitlichen Klassifizierungsrahmen für die Einstufung der Nachhaltigkeit von wirtschaftlichen Tätigkeiten, das festlegt,

welche Projekte und Unternehmungen in der EU als „grüne“ bzw. „ökologisch nachhaltige“ Wirtschaftstätigkeiten gelten und gefördert werden. Sie ist eine Art von Gütesiegel für klimafreundliche Kapitalanlagen. Sie betrifft als Regelwerk vor allem die Finanzwirtschaft und energieintensive Wirtschaftsbereiche wie Verkehr, Wohnen, Energie sowie Chemie und Stahl.

¹⁵ RRRDR= Remanufacture, Refurbishment, Repair and Direct Reuse (RRRDR)

¹⁶ Die Taxonomie unterscheidet zwischen Aktivitäten und Technologien, die für das Klima positiv sind („grün“) und klimaproblematisch („braun“) sind.

Es stellt sich die Frage nach der Reichweite der Verordnung EU/2020/852, da in Ziffer (24) eine Wirtschaftstätigkeit, mit der das Umweltziel des Klimaschutzes verfolgt wird, wesentlich dazu beitragen sollte, die Treibhausgasemissionen zu stabilisieren, indem sie vermieden oder verringert werden oder die Speicherung von Treibhausgasen verstärkt wird.

Explizit hebt Artikel 2(17) die Energieeffizienz hervor, welche über die Reibungsminderung¹⁷ einen Bezug zu den CO₂-Emissionen hat: „Energieeffizienz“, eine effizientere Energienutzung entlang der gesamten Energieversorgungskette von der Erzeugung bis zum Endverbrauch“.

Nach Artikel 10(1b) leistet eine Wirtschaftstätigkeit einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz, wenn sie die Energieeffizienz steigert. Die Tabelle 5 verbindet die Zielvorgaben der Taxonomie mit Attributen und den Beiträgen der Tribologie.

In Artikel 17 (1d(i)) wird „**Ineffizienz bei der Materialnutzung**“ als eine erhebliche Beeinträchtigung der Umweltziele eingestuft wird, was bedeutet, dass *mangelnder Verschleißschutz und schlechte Reparaturfähigkeit* keine nachhaltige Wirtschaftstätigkeit mehr sind. Verschleißschutz bzw. gesteigerte Langlebigkeit stellen die Kernstrategien zur Abfallvermeidung über reduzierte Materialströme und zur Minderung des CO₂-Rucksacks dar.

3.2. BEPREISUNG VON CO₂-EMISSIONEN

Es lässt sich heute nicht vorhersagen, welche konkreten technologischen Innovationen durch einen höheren CO₂-Preis ausgelöst werden. Es ist aber davon auszugehen, dass ein höherer CO₂-Preis einen energiesparenden technologischen Fortschritt forciert (Siehe Kapitel 4) [36]. Die Kundenpreise für emissionshaltige Produkte steigen durch den höheren CO₂-Preis. Die Folge ist eine

Tabelle 5: Auszüge aus dem Artikel 13 in EU/2020/852 „Wesentlicher Beitrag zum Übergang zur Kreislaufwirtschaft“

Zielvorgaben	Attribute und Beiträge der Tribologie
<p>(1) Eine Wirtschaftstätigkeit leistet einen wesentlichen Beitrag zum Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft einschließlich Abfallvermeidung, Wiederverwendung und Recycling, wenn sie:</p> <p>a) die natürlichen Ressourcen, einschließlich beschaffter biobasierter und anderer Rohstoffe nachhaltiger Herkunft, in der Produktion, effizienter nutzt, unter anderem durch</p> <p>i) einen reduzierten Einsatz von Primärrohstoffen oder eine Steigerung der Verwendung von Nebenprodukten und Sekundärrohstoffen; oder</p> <p>ii) Ressourcen- und Energieeffizienzmaßnahmen;</p> <p>b) die Haltbarkeit, Reparaturfähigkeit, Nachrüstbarkeit oder Wiederverwendbarkeit von Produkten, insbesondere bei den Entwicklungs- und Fertigungstätigkeiten, verbessert;</p> <p>e) die Nutzung von Produkten, unter anderem durch Wiederverwendung, Design für Langlebigkeit, Umfunktionierung, Demontage, Wiederaufarbeitung, Modernisierung und Reparatur sowie gemeinsame Nutzung von Produkten, verlängert;</p> <p>k) Abfall vermeidet oder verringert, oder</p>	<p>Verschleißschutz = technische Langlebigkeit und Lebensdauererweiterungen mindern das Abfallaufkommen.</p> <p>Bioschmierstoffe und Schmierstoffe aus biogenen Ressourcen.</p> <p>Verschleißschutz = Materialeffizienz und Ressourcenschonung.</p> <p>Energieeffizienz durch Reibungsminderung bedeutet z.B. eine direkte CO₂-Reduktion. Ressourceneffizienz durch Verschleißschutz kann z.B. als Lebensdauererweiterung von Windenergieanlagen realisiert werden.</p> <p>Langlebigkeit durch Verschleißschutz mindert die Abfallmengen und den Ressourcenverbrauch.</p> <p>Verschleißarme Tribosysteme und deren Wiederaufarbeitung schonen Ressourcen mit dem darin eingebetteten CO₂-Rucksack</p> <p>Langlebigkeit, Reparaturfähigkeit und Aufarbeitung mindern Abfallmengen. Re-Raffinate können neue Rohstoffe ersetzen.</p>

¹⁷ Reibung ist der größte Feind der Effizienz.

geringere Nachfrage nach diesen Produkten. Diese Mehrkosten können durch die emissionsreduzierenden Offerten der Tribologie gemindert werden und fördern so den Produktabsatz.

Die CO₂-Bepreisung ist eine Orientierung in Bezug auf geeignete Negative-Emissions-Technologien (NET) und kann an der Emissionsquelle vor- oder nachgelagert reguliert werden. Die CO₂-Bepreisung bietet allgemeine Anreize zur Reduzierung des Energieverbrauchs bzw. zur Reibungsminde- rung. Langfristig stellt das EU Carbon Pricing (EU-ETS) die wirtschaftliche Basis dar, um tribologische „CO₂-Reduktionspfad-Lösungen“ entweder öko- nomisch oder durch vermiedene CO₂-Strafzahlun- gen bzw. eingesparte Zertifikate zu bewerten.

Der CO₂-Preiskorridor im Europäischen Emis- sionshandel (EU-ETS) für die Kompensation von CO_{2eq}-Emissionen lag im Jahr 2020 zwischen 40- 80 US-\$/tCO₂ [37]. 2022 lag der Preiskorridor im EU-ETS-Emissionshandel zwischen 75 €/tCO_{2eq} und 90 €/tCO_{2eq} mit einem Spitzenwert von 105,30 €/tCO_{2eq} am 27.02.2023.

Prognosen zum ökonomischen Wert der Kosten von THG-Vermeidungen erwarten in Europa bis 2032 ein Preiskorridor von 175-300 €/tCO_{2eq}. [38]. Die ressortübergreifende Arbeitsgruppe [39] über volkswirtschaftliche Kosten¹⁸ von Treib- hausgasemissionen¹⁹ der Regierung der Vereinig- ten Staaten hat im Februar 2021 [40] den Wert der sozialen bzw. volkswirtschaftlichen Kosten von Kohlendioxidemissionen (SCC= social costs of carbon dioxide) für 2020 mit 51 \$/tCO₂ bewer- tet gefolgt von einer Projektion auf 56 \$/tCO₂ für 2025 und auf 63 \$ für 2030. In einer späteren Studie schätzten Rennert et al. [41] unter Ver- wendung des von ihm bevorzugten Diskontie- rungsschemas²⁰ einen mittleren SCC-Wert von 185 \$/tCO₂ (bzw. 44-413 \$/tCO₂: Spanne von 5-95 %, in US-Dollar für 2020). Dieser Wert ist 3,6-mal höher als der derzeitige, am häufigsten zitierte Mittelwert der US-Regierung von 51 \$ pro tCO₂ bei einem konstanten Diskontsatz von 3 %.

Das Umweltbundesamt schätzt die Umweltscha- denskosten (ein Indikator für die Nutzenverluste der Natur) für Strom-, Wärmeerzeugung und Straßenverkehr im Jahr 2019 auf 202,7 Milliar- den €. Unter Berücksichtigung der Treibhausgas- emissionen dieser Sektoren ergäbe sich rechne- risch 372 €/tCO_{2eq}. Das Umweltbundesamt [42] empfiehlt die Verwendung eines Kostensatzes von 195 €/tCO_{2eq} für das Jahr 2020 bei einer Hö- hergewichtung der Wohlfahrt heutiger gegen- über zukünftigen Generationen und eines Kos- tensatzes von 680 €2020/tCO_{2eq} bei einer Gleich- gewichtung der Wohlfahrt heutiger und zukünf- tiger Generationen.

Die SCC-Kosten können stark variieren, da es un- ter Experten keinen Konsens darüber gibt, wie die durch CO₂ verursachten, potentiellen Klima- schäden zu bewerten sind.

3.3. VOLKSWIRTSCHAFTLICHES PREIS- SCHILD FÜR DIE DEFOSSILISIERUNG

Im 14. Fünfjahresplan [43] von 2021-2025 erwar- tet China den Höhepunkt der CO_{2eq}-Emissionen um das Jahr 2030 und strebt die Kohlenstoffneu- tralität im Jahr 2060 an. Bezogen auf das BIP sol- len die CO₂-Emissionen um -18% gesenkt wer- den. Da jedoch im Zeitraum von 2021-2025 das BIP um 6% jährlich ansteigen soll, ergäbe sich ef- fektiv dennoch eine Ausweitung der CO₂-Emis- sionen um +12%, auch wenn damit der Anstieg ge- genüber der Vergangenheit geringer ausfiele. Der Anteil nicht-fossiler Energieträger am Ener- giemix soll auf „rund 25 %“ bis 2030 erhöht wer- den.

Der Internationale Währungsfond (IMF) [44] er- mittelte für China bis 2030 einen jährlichen In- vestitionsbedarf von 1,5 bis 2,0 % des Bruttoin- landsprodukts bzw. 2.200 Milliarden ¥ bzw. >265 Milliarden US-\$) und einen höheren Finanzbe- darf für den Zeitraum von 2030 bis 2050 von mehr als 3.900 Mrd. ¥ pro Jahr zur Erreichung der Klimaneutralität.

¹⁸ Diese Schätzungen der sozialen bzw. volkswirtschaftlichen Schäden sollten nicht mit Schätzungen der Kosten für die Errei- chung eines bestimmten Emissions- oder Erwärmungsgrenzwertes verwechselt werden.

¹⁹ SCC ist ein geschätztes Maß, in Geld, für die wirtschaftlichen Kosten (d. h. die Klimaschäden), die sich aus der Emission einer zusätzlichen Tonne Kohlendioxid (CO₂) in die Atmosphäre ergeben. Umgekehrt stellt er den Nutzen dar, den die Gesellschaft aus der Reduzierung der CO₂-Emissionen um eine Tonne zieht – eine Zahl, die dann mit den Kosten der Emis- sionsminderung verglichen werden kann..

²⁰ Der Diskontsatz übersetzt die Kosten zukünftiger Klimaschäden in gegenwärtiges Geld (Gegenwartswert). Somit wird der Wert zukünftiger Klimaschäden mit heutigen Geldwerten verglichen

Die Chinese Tribology Institution (CTI) kam 2006 zu dem Schluss [45], dass durch tribologische Maßnahmen in acht ausgewählten Branchen (Metallurgie, Energie, Eisenbahn, Automobil, Petrochemie, Landwirtschaft und Schifffahrt) mindestens 1,55 % des chinesischen BIP eingespart werden können.

Beides zusammen genommen führt zur Schlussfolgerung, dass allein aus den Ersparnissen durch tribologische Maßnahmen China's Anstrengungen zur Dekarbonisierung volkswirtschaftlich gegenfinanziert werden könnten.

3.4. SCOPE 4 „AVOIDED EMISSIONS“ – TRIBOLOGIE ALS CO₂-VERMEIDUNGSTECHNOLOGIE

Das Erreichen des Klimaschutzabkommens von Paris bedeutet drastische Emissionsreduktionen bis spätestens 2050, wobei China die Klimaneutralität bis 2060 und Indien bis 2070 auslobten. Die damit verbundene Treibhausgasneutralität erfordert im Idealfall, dass nicht mehr Treibhausgase in die Atmosphäre abgegeben werden, als auf anderen Wegen aus der Atmosphäre entfernt werden können. Eine wesentliche Voraussetzung für die Erreichung dieses Zieles wäre die weitgehende Defossilisierung heutiger Stoffströme. Dies wird für viele Bereiche nicht möglich sein. Folglich müssen die unvermeidbaren Restemissionen vollständig kompensiert werden, damit insgesamt gerechnet ein Konzentrationsanstieg von Treibhausgasen vermieden und eine sogenannte „Netto-Null-Emission“ erreicht werden kann. Technologien und Methoden für Ökosysteme zu finden, welche der Atmosphäre CO₂ entziehen, werden als „Negative-Emissionen-Technologien“ bezeichnet, die bislang im Verständnis auf natürliche, biologische oder geochemische Senken (Abscheidungen) begrenzt sind. Bekannte Schlagwörter für die Abscheidung von CO₂ sind CCS (Carbon Capture and Storage) und CCU (Carbon Capture and Utilization).

3.4.1. CO₂-REDUKTIONSPFADE

Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [46] hat für das 21. Jahrhundert einen Kohlendioxidabbau (carbon dioxide removal²¹ = CDR) in der Größenordnung von 100 bis 1000 Gigatonnen Kohlendioxid vorgeschrieben, und die U.S. National Academies of Science [47] und The Royal Society [48] haben vorgeschlagen, dass bis 2050 8-10 Gigatonnen Kohlendioxid pro Jahr und bis 2100 20 Gigatonnen Kohlendioxid pro Jahr entfernt werden müssen, aber die Welt kann sich nicht nur auf einen Ansatz oder einen Weg verlassen, um diese Größenordnung zu erreichen.

Natürliche Ansätze, wie die Wiederherstellung von Landschaften, könnten 5-6 Gigatonnen CO₂ entfernen, wenn diese Anstrengungen deutlich verstärkt werden. Aber auch technische Ansätze, wie die direkte Abscheidung und Speicherung von Kohlenstoff in der Luft, werden notwendig sein, wenn wir so viel Kohlenstoff entfernen und speichern wollen, wie es nach den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen notwendig ist [49].

Hier kommen die Angebote der Tribologie (Siehe Kapitel 1 und 2 sowie 4) mit Einsparungen von 3,9-11,3 Gigatonnen CO_{2eq.} ins Spiel (Siehe Tabelle 6); in Konsequenz sollten tribologische Ansätze zur Energie- und Rohstoffreduktion in das Portfolio der CO₂-Reduktionspfade aufgenommen werden. Reibungsreduzierung und Langlebigkeit stellen „industrielle Kohlenstoffentfernungen“ oder „gesellschaftliche Kohlenstoffentfernungen“ dar, denn CO_{2eq.}-Einsparungen durch Tribologie finden überall und jederzeit statt. Reibungsreduzierung und Langlebigkeit sind insofern als „CO₂-Reduktionspfade“) zu betrachten, als dadurch für den Betrieb tribologischer Systeme weniger CO₂ freigesetzt wird, und zumal sie oft in Form von Drop-in-Lösungen relativ leicht realisierbar sind. In anderen Worten: CO₂-relevante Aufwendungen, welche downstream nicht benötigt werden, müssen *upstream* nicht generiert werden.

¹⁸ Synonyme Begriffe: „carbon dioxide removal“ oder „anthropogenic activities removing CO₂ from the atmosphere“, IPCC's 1.5°C report (2018). „Greenhouse Gas Removal (GGR)“, The Royal Society report (2018). „negative emissions technologies“, The National Academies report (2019).

Die anthropogenen Kohlendioxid (CO₂)-Emissionen werden zwischen der Atmosphäre, den Ozeanen und der terrestrischen Biosphäre umverteilt. Die Entfernung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre erfolgt natürlicherweise über biologische und geochemische Senken, wie Wald- und Bodenökosysteme, geologische Mineralisierung und Ozeane. Von den globalen anthropogenen CO₂-Emissionen im Jahr 2019 wurden 9,5 ± 2,2 Gigatonnen CO₂ in ozeanischen Senken, 11,4 ± 4,4 Gigatonnen CO₂ in terrestrischen Senken und 19,8 ± 0,7 Gigatonnen CO₂ in der Atmosphäre als Senke gebunden [50, p. 3292].

- a. Etwa 23-30 Prozent des Kohlendioxids oder 9-12 Gigatonnen CO₂/Jahr, das die Menschheit in die Atmosphäre emittiert, absorbieren die Ozeane durch direkten chemischen Austausch. Der Ozean enthält etwa 38.000 Gigatonnen gelösten Kohlenstoff, hauptsächlich in Form von Bicarbonat-Ionen (HCO₃⁻) und in geringeren Mengen von Carbonationen (CO₃²⁻). Die Ozeane dienen als wichtige Senke für anthropogenes CO₂, das in die Atmosphäre gelangt [51, 52, 53, 54].
- b. Pflanzen an Land haben etwa 25-30 % des vom Menschen in die Atmosphäre eingebrachten Kohlendioxids aufgenommen [55]. Weltweit umfassen die terrestrischen biotischen Kohlenstoffvorräte etwa 600 Gigatonnen Kohlenstoff in pflanzlicher Biomasse (hauptsächlich in Wäldern) und ca. 1.500 Gigatonnen Kohlenstoff als organische Subs-

tanz im Boden bis zu einer Gesamttiefe von etwa 1 Meter (oder ca. 2.600 Gigatonnen Kohlenstoff für bis zu 2 Meter) [56].

- c. Die weltweite geologische Speicherkapazität bzw. gebundene Menge von salinen Aquiferen und Kohlenwasserstoffreservoirien beläuft sich auf 5.000 bis 25.000 Gigatonnen CO₂ [57, p. 252]. Die derzeitigen Speicherraten liegen jedoch nur in der Größenordnung von einigen zehn Megatonnen CO₂/Jahr. Natürliche Quellen von Alkalinität (z. B. Mineralien der Serpentinegruppe, Basalt oder Peridotit) sind in der Erdkruste reichlich vorhanden und könnten etwa 10 Gigatonnen CO₂ pro Jahr speichern.

Der IPCC hat im August 2019 mehrere Maßnahmen zur Schaffung neuer CO₂-Senken bekannt gegeben, die zusätzlich Kohlendioxid binden sollen (Siehe Tabelle 5). Die vom IPCC bis 2050 geschätzten Minderungspotenziale waren [58, Kapitel 2.6 ebenda]:

1. Verbesserte Verwitterung zwischen 0,5-4,0 Gigatonnen CO₂/Jahr,
2. Aufforstung/Wiederaufforstung: 0,5-10,1 Gigatonnen CO₂/Jahr und
3. Bindung von Kohlenstoff im Boden auf Acker- und Grünlandflächen: 0,4-9,3 Gigatonnen CO₂/Jahr.

Die gesamte Literatur zum Kohlendioxidabbau durch Pflanzen ergibt für das Jahr 2050 ein Po-

Tabelle 6: Geschätztes Minderungspotenziale verschiedener Handlungsoptionen zur Minderung von Kohlendioxid in der Atmosphäre [58]

CO ₂ -Reduktionspfade	Vermeidungspotential bis 2050 [Gigatonnen CO ₂ /yr.]	
	Min.	Max.
Kohlendioxid-Abbausenken		
Beschleunigte Gesteinsverwitterung	0,5	4,0
Aufforstung/Wiederaufforstung	0,5	10,1
CO ₂ -Sequestrierung in geologischen Formationen		10,0
Kohlenstoffabsorption durch Äcker und Grünland	0,4	9,3
CO₂-Vermeidungspotenziale durch tribologische Maßnahmen		
Reibungsminderung*	2,3	4,5
Langlebigkeit*	1,7	6,8

*CO_{2eq.}

tenzial von 1-7 Gigatonnen CO₂/Jahr [59, 60]. Die Deutsche Gesellschaft für Tribologie (GfT e.V.) schätzte die langfristigen CO_{2eq.}-Minderungspotenziale wie folgt ab:

- a. Reibungsminderung (= Energieeffizienz) zwischen 2,3-4,5 Gigatonnen CO_{2eq.}/Jahr und
- b. Langlebigkeit (= Ressourceneffizienz und Ressourcenschonung) zwischen 1,7-6,8 Gigatonnen CO_{2eq.}/Jahr,

basierend auf den fossilen (anthropogenen) CO_{2eq.}-Gesamtemissionen im Jahr 2019. Die Tribologie bietet ein bislang nicht hinreichend wahrgenommenes und diskutiertes Kohlendioxid-Abbaupotential im Gigatonnen-Maßstab in denselben Größenordnungen, wie die oben genannten und vom IPCC ermittelten Minderungsmaßnahmen.

Reibung und Verschleiß treten überall entlang der Wertschöpfungskette auf. Tribologie ist deshalb eine technische Handlungsoption zur Vermeidung von CO₂ aus der Atmosphäre mit hohen Umsetzungschancen, da sie insbesondere in der Nutzungsphase wirkt.

Viele sind der Ansicht, dass technologische Ansätze zur Kohlenstoffentfernung noch in den „Kinderschuhen“ stecken und erst durch signifikante Skaleneffekte marktfähig werden. Andererseits sind genügend tribologische Angebote mit einem technologischen Reifegrad von TRL >6 (Technology Readiness Level, TRL) vorhanden und müssen nur noch in die Praxis Eingang finden. Die resultierenden Mehrkosten, welche vordergründig nicht-funktionaler Art sind, müssen allerdings über monetäre CO₂-Ersparnisse valorisiert werden

Langlebigkeit wirkt sich auf die bestehenden Geschäftsmodelle des Wachstums aus, da sie bisher auf dem regelmäßigen Austausch von Gütern und einem häufigen Wechsel von Ersatzteilen aufbauen. Die Angebote aus der Tribologie können namhafte CO₂-Einsparungen liefern, ohne dabei besonders disruptiv auf darauf angepasste Geschäftsmodelle zu wirken!

3.4.2. ZUTEILUNG DER CO₂-GUTSCHRIFTEN

Die technische Leitlinie für Scope 3, Kategorie 11, (Siehe Kapitel 4) verlangt nur die Berichterstat-

tung über die Nutzungsphase verkaufter (vollständiger) Produkte, wie bei Fahrzeugen. Das THG-Protokoll befasst sich nicht mit konkreten Einsparungen, sondern nur mit der Berichterstattung. Die Menge der vermiedenen THG-Emissionen durch Reibungsreduzierung und Ressourceneinsparung durch Langlebigkeit wird nicht vom gesamten Kohlenstoffinventar einer Organisation abgezogen. In Anbetracht der Auswirkungen der Tribologie auf die Treibhausgasemissionen sollten Reduzierungen Teil des Kohlenstoffhandelsystems sein. Das Treibhausgas-Protokoll befasst sich allerdings noch nicht mit vermiedenen Emissionen. Erste Vorschläge für „vermiedene Emissionen“ (Scope 4) wurden vom World Resources Institute bereits im November 2013 [61] in einem Kommentar zum fünften Bericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) gemacht. Die vorgeschlagene Definition lautete:

“Emissionsminderungen, die außerhalb des Lebenszyklus oder der Wertschöpfungskette eines Produkts, aber als Ergebnis der Nutzung dieses Produkts auftreten. Beispiele für Produkte (Waren und Dienstleistungen), die Emissionen vermeiden, sind kraftstoffsparende Reifen, energieeffiziente Kugellager usw.”.

Die Substitution von Produkten und Materialien durch solche mit geringeren eingebetteten CO_{2eq.}-Emissionen ist ein anspruchsvolles Ziel, da sie funktionale Anforderungen an Langlebigkeit, Belastbarkeit und geringe Reibung sowie einen sicheren Betrieb erfüllen müssen. Auch hier stellt sich die Frage: *Wer wird für diese Anstrengungen mit CO₂-Zertifikaten oder Gutschriften belohnt? Wem gehört monetär die CO₂-Einsparung?*

Eine dynamische Dichtung oder ein dynamisches Lager erzeugt über die Nutzungsdauer unvermeidliche Reibungsverluste. Wer kann die Emissionsgutschriften erhalten oder wird von der Verringerung der Reibung profitieren, die sich aus CO_{2eq.}-Einsparungen ableiten?:

- a. Der Dichtungs- oder Lagerhersteller oder
- b. Der OEM, weil er diese Lösung erwarb oder
- c. Der Endverbraucher bzw. Betreiber, der ebenfalls Mehrkosten trug oder
- d. alle Akteure entlang der Wertschöpfungskette, die sich die CO_{2eq.}-Ersparnisse aus der Nutzungsphase angemessen aufteilen?

Die etablierten Energieeffizienzmaßnahmen erfordern häufig erhebliche Investitionsaufwendungen. Die Reibungsminderung, verstanden als eine Technologie zur Verbesserung der Energieeffizienz und Nachhaltigkeit in der Nutzungsphase, erspart Umbauten und Investitionen. Der Umstieg auf reibungsarme Schmierstoffe ist oft retroaktiv und zumeist während der Produktlebensdauer möglich sowie auf reibungsarme Werkstoffe oder Beschichtungen in Rahmen der Neukonzeption. Energieeinsparungen bzw. Reibungsminderungen können sich doppelt auszahlen (Siehe Tabelle 9):

- direkt bei den Kosten für Elektrizität oder Primärenergie, aber auch
- indirekt im Klimareporting (Scopes, GRI) durch geminderten CO₂-Fußabdruck und durch verbesserte Nachhaltigkeit.

3.4.3. ABSCHÄTZUNG VON EMISSIONSMINDERUNGEN

Als nachhaltige Produkte sollte man solche Produkte verstehen, deren Produktion, Transport, Verwendung oder Entsorgung im Vergleich zu vergleichbaren Produkten weniger CO₂-Emissionen freisetzen (Siehe Bild 1). Die Reduzierung des CO₂-Fußabdruckes beginnt integriert im Produktentwicklungsprozess, also bspw. im Produktdesign und bei der Materialauswahl. Entscheidend aber ist der gesamte Lebenszyklus von der Rohstoffgewinnung und Produktion über die Produktnutzung bis hin zu möglichen Kreislaufwirtschaftskonzepten am Lebensende. Die vermiedenen Emissionen können als die Differenz zwischen den aufakkumulierten THG-Emissionen aus einem Business-As-Usual²² (BAU)-Basisszenario und den THG-Emissionen aus einem Szenario mit THG-mindernden Maßnahmen²³ berechnet werden:

**Vermiedene Netto-Emissionen =
BAU-Basislinien Emissionen –
Emissionen der Technologie mit
verminderten Emissionen.**

Die Lebenszyklus-Analysen LCAs nach ISO 14040 und ISO 14044 dienen als zentrale Instrumente zur Erfassung der Nachhaltigkeitsperformance von Produkten und Prozessen und berücksichtigen dabei mittels des Product Carbon Footprint (PCF) insb. die CO₂-Bilanz aus der Bereitstellung der Produkte. Die Verbesserungswirkung kann in verschiedenen Phasen des Lebenszyklus, der Lieferkette und Verarbeitung auftreten, und die vermiedenen Emissionen sind als Summe der Veränderungen entlang der Wertschöpfungskette zu betrachten. Die vergleichenden Auswirkungen werden als Differenz zwischen den gesamten, zurechenbaren Lebenszyklus-THG-Inventaren des Produkts eines Unternehmens (des „bewerteten“ Produkts) und eines alternativen Produkts (oder „Referenzprodukts“) geschätzt, das eine gleichwertige Funktion (Bild 1) über den gesamten Lebenszyklus erfüllt. Dieser Ansatz beschränkt sich nicht nur auf die Verringerung der Reibung während der Nutzungsphase, sondern bezieht auch die Einsparungen bei den Materialströmen aus den Maßnahmen der Langlebigkeit und aus der effizienteren Werkstoffherstellung im Hinblick auf ihre eingebetteten CO_{2eq}-Emissionen mit ein. Die Methodologie zur Ermittlung der vermiedenen THG-Emissionen entspricht dem „cradle-to-grave“-Ansatz in Lebensdauerzyklusanalysen.

In der Gesamtschau der Produktentwicklung muss der Product Carbon Footprint (PCF) schon frühzeitig bei der Auslegung frühzeitig berücksichtigt werden. Zur Ermittlung des PCF stehen

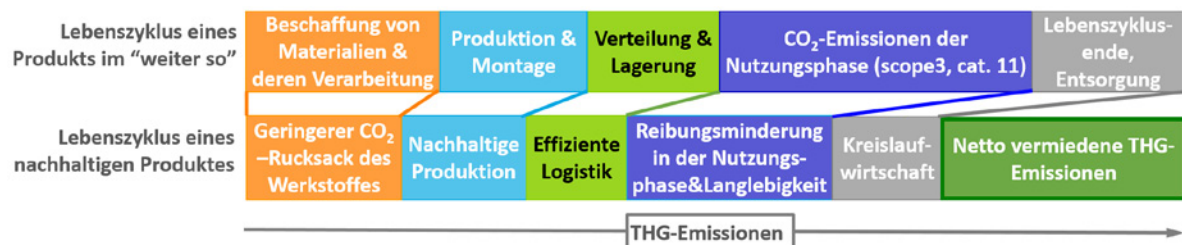


Bild 1: Methodologie zur Berechnung Auswirkungen auf THG-Emissionen unter Verwendung der Technologie mit verminderten Emissionen [angepasst aus 62]

²² Die BAU-Basisemissionen sind THG-Emissionen, welche ohne die entsprechenden Verbesserungen aufgetreten wären.

²³ Der positive Nutzeffekt sind die vermiedenen Emissionen durch den Ersatz der BAU durch die emissionsärmere Lösung.

erste Softwarelösungen zur Verfügung, wie z.B. eine automatisierte Berechnungsmöglichkeit im Produktkonfigurator für Wälzlager (Medias® von Schaeffler).

Bei tribologischen Produkten, wie z.B. Schmierstoffen, sind die THG-Emissionsvorteile in der Nutzungsphase erheblich größer, als der CO₂-Rucksack oder die Kohlenstoffintensität des Rohmaterials oder Grundstoffs. Die Effizienzsteigerung²⁴ bzw. Reibungsminderung muss nachweisbar sein, insbesondere im Idealfall über die gesamte Lebensdauer. Hierzu liefern übliche

„Analytical Sciences“ an Ölproben keine Informationen, sondern nur tribologische Prüfungen an Gebrauchttölen, da tribologische Kenngrößen funktionale Systemeigenschaften darstellen. Folglich kann im Rahmen der Zustandsüberwachung (Condition Monitoring) die Beibehaltung des niedrigen Reibungszahlniveaus periodisch nur durch anwendungsorientierte Tribometrie nachgewiesen werden – es sei denn, die Anwendung liefert implizit Angaben zur fortlaufenden Energieeffizienz (z.B. durch Aufzeichnung des Stromverbrauchs von Pumpen oder Stellantrieben).

4. SCOPE 3, CATEGORY 11, DOWNSTREAM EMISSIONEN

Scope-3-Emissionen²⁵ oder Emissionen aus der Wertschöpfungskette sind definiert als alle anderen indirekten Emissionen, die entlang der Wertschöpfungskette einer Organisation durch nachgelagerte Aktivitäten entstehen. Die Scope-3-Emissionen werden in 15 spezielle Kategorien [63] unterteilt, von denen Scope 3 der Kategorie 11 (Scope 3.11) für die Tribologie am relevantesten ist. Die Methodik des GHG-Protokolls bezieht die Kategorien 1-8 auf vorgelagerte und die Kategorien 9-15 auf nachgelagerte Bereiche.

Scope-3-Emissionen sind das Ergebnis von Aktivitäten aus Anlagen, die sich nicht im Besitz oder unter der Kontrolle der berichtenden Organisation befinden. Zugleich hat die Organisation weniger Einfluss auf die Reduzierung dieser Emissionen. Genau hier offeriert die Tribologie Einsparungen auf nachgelagerter Ebene, die zusätzlich nicht auf vorgelagerter Ebene erzeugt werden müssen. Die Bedeutung von Scope-3-THG-Emissionen für bestimmte Produkte, Services und Industriebereiche ist in [64] zusammengefasst.

Es liegt auf der Hand, dass „genutzte Produkte während ihrer Nutzung direkt Energie (Brennstoffe, Strom, Ressourcen) verbrauchen“, um sie am Laufen zu halten. Schmierstoffe sind chemi-

sche Produkte, welche das funktionale Profil anderer Technologien so beeinflussen, dass die CO_{2eq}-Emissionen reduziert werden. Solange sie nicht verbrannt werden, haben sie einen erheblichen Einfluss auf die über die gesamte Lebensdauer zu erwartenden CO_{2eq}-Emissionen aus irreversiblen Reibungsverlusten und auf die Langlebigkeit von Maschinen, da sie hoffentlich einen vorzeitigen Ausfall der Maschinen und damit den Verbrauch zusätzlicher Metall-/Mineralressourcen mit eingebetteten CO_{2eq} vermeiden. Dies gilt auch für Gleit- und Wälzlager sowie Dichtungen, die jeweils wichtige Maschinenelemente für den Betrieb von Anlagen und Maschinen darstellen (Siehe auch Kapitel 5).

Tabelle 7: Scope 3, Kategorie 11, Emissionen durch die Nutzung verkaufter Produkte [63]

Art der Emission	Typus	Beispiele
Aus der Nutzung verkaufter Produkte	Umfasst Emissionen aus der Nutzung von verkauften Waren und Dienstleistungen, durch Endkunden, also aus der Nutzungsphase.	Automobile, Flugzeuge, Motoren, Kraftwerke, Gebäude, Geräte, Elektronik, Beleuchtung, Datenzentren, webbasierte Software
	Brennstoffe und Rohstoffe	Erdölprodukte, Erdgas, Kohle, Biokraftstoffe und Rohöl

²⁴ Nach dem Verständnis der U.S. Federal Trade Commission (FTC) sind nur „auf freiwilliger Basis und konsensbasierte Standardisierungsorganisationen“ befugt, Standards für grüne Umweltaussagen zu entwickeln und aufrechtzuerhalten [Abschnitt III im FTC Green Guide, 2012]. Dabei handelt es sich um „Organisationen, die freiwillige, konsensbasierte Normen unter Verwendung vereinbarter Verfahren planen, entwickeln, festlegen oder koordinieren“. ASTM D7721-22 „Practice for determining the effect of fluid selection on hydraulic system or component efficiency“ ist ein solches neues Beispiel, wie Einsparungen an Energie quantifiziert werden können. Ähnliche Anforderungen entstehen in der EU (COM(2022)143) Green Guide Directive.

²⁵ Scope-3-Emissionen der Kategorie 11 sind Teil der GRI-Standards für die Nachhaltigkeitsberichterstattung (GRI= Global Reporting Initiative) und werden unter dem Themengebiet 305-3 „Andere indirekte (Scope 3) THG-Emissionen“ offengelegt.

4.1. SCOPE 3 EMISSIONEN VON FAHRZEUGEN

Toyota hatte die Lebenszyklusanalyse (LCA) angewandt, um die CO₂-Gesamtemissionen seiner Fahrzeuge bewertet und hat festgestellt, dass die Nutzungsphase seiner Fahrzeuge 81,8 % (Geschäftsjahr 2019) [65, S. 23, ebenda] und 80,5 % (Geschäftsjahr 2020) [66, S. 37, ebenda] aller indirekten Emissionen (Scope 3, Kategorie 11) ausmacht. Der Kraftstoffverbrauch von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren verantwortet während der Nutzungsphase den größten Teil der

Treibhausgasemissionen. Daher haben optimierte tribologische Systeme mit reibungsarmen Oberflächen und Beschichtungen [67] sowie Motoren- und Getriebeöle, die den Kraftstoffverbrauch senken, einen direkten Einfluss auf diese CO₂-Emissionen.

Wie aus Tabelle 2 hervorgeht, wurden rund 80±5 % der Cradle-to-Grave-Emissionen von Straßenfahrzeugen während der Nutzungsphase durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe oder ersatzweise im Falle von Elektro-/Hybridantrieben durch die Stromerzeugung emittiert.

Tabelle 8: Verhältnis der Scope-3-THG-Emissionen der Kategorie 11 zu allen anderen 15 Kategorien in Scope 3

Jahr	BMW [68]	RENAULT* [69]	GM [70]	NISSAN [71]	Mercedes* [72]	TOYOTA	Volkswagen# [73]
2020		83,2			79,6	80,5	76,2
2019	71,2	84,2	75,7	88,6	80,5	81,8	77,0

*Nutzungsphase (200.000 km); # Well-to-wheel; +Tank-to-wheel

Das branchenübergreifende Forschungskonsortium „Low Friction Powertrain“, der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) und der Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen (FVV) ermittelte eine maximal mögliche Reduzierung [74] des Kraftstoffverbrauchs von 12,1 % (bzw. 0,945 l/100km) durch mehrere Maßnahmen zur Reibungsreduzierung bei Fahrzeugen (M271 KE, Benziner, 1,8L).

Die prognostizierten Einsparungen von 0,945 Litern Benzin/100 km entsprechen 2,249 kg O₂/100 km. Der monetäre CO₂-Wert der tribologischen Maßnahmen zur Verringerung der Reibung über 200.000 km beläuft sich in diesem Fall auf 449,80 €, wenn man einen Mindestpreis von 100 €/tCO₂ zugrunde legt. Hinsichtlich anderer Preisannahmen, siehe Kapitel 3.2. Die Messungen und Berechnungen des Forschungsclusters „Low Friction Powertrain“ ließen einige Optionen außer Betracht: Beispielsweise wurden die Auswirkungen von Schmierstoffen mit niedriger Viskosität und/oder hohem Viskositätsindex nicht berücksichtigt.

Kombiniert man beide Aspekte, kommt man zu dem Schluss, dass durchschnittlich 9,6±0,6 % der Scope3-CO₂-Lebenszyklusemissionen der Kategorie 11 von Straßenfahrzeugen durch Reibungsreduzierung eingespart werden könnten. Die Spanne der Lebenszyklus-THG-Emissionen von Straßenfahrzeugen liegt zwischen 30-65 Tonnen

CO_{2eq} während 200.000 km [75,76]. Der monetäre Wert der durch tribologische Maßnahmen zur Reibungsreduzierung eingesparten 2,88-6,24 tCO₂ beläuft sich auf 288-625 €, wenn man einen Mindestpreis von 100 €/tCO₂ zugrunde legt.

Gemäß EU/2019/631 erhebt die Kommission vom PKW-Hersteller pro Fahrzeug eine Abgabe in Höhe von 95 € für jedes Gramm CO₂/km, das die Effektiv-Emissionen – gemessen gemäß NEFZ – über dem EU-Zielwert von 95 gCO₂/km liegen. Die maximal mögliche Einsparung aus dem FVA/FVV-Projekt von ca. 12,1% in Verbindung mit den durchschnittlichen CO₂-Emissionen der in Europa zugelassenen neuen Personenkraftwagen von 122,3 gr.CO₂/km in 2019 ergäbe mit der rechnerischen Ersparnis durch Reibungsminderungen von 14,8 gr.CO₂/km einen viel höheren monetären Vorteil in Höhe von 1.406 €.

4.2. EIN HOLISTISCHER BEITRAG MODERNER DICHTUNGSTECHNIK ZUR NACHHALTIGKEIT

Überall auf der Welt sind Maschinen und Fahrzeuge aller Art in Betrieb und überall, wo sich Maschinenelemente relativ zueinander bewegen, entsteht Reibung, und zwar in Wälzlagern, Gleitlagern und dynamischen Dichtungen. Überall, wo es gelingt, die Reibung zu reduzieren, wird Energie und somit auch CO₂ eingespart. Vor al-

lem bei dynamischen Dichtungen geht die Reibungsreduktion mit verringertem Verschleiß einher, was in längere Lebensdauer und somit geringeren Ressourcenverbrauch resultiert [77]. Deshalb können dynamische Dichtungen, wie Simmerringe® und Gleitringdichtungen, einen erheblichen Beitrag zur Einsparung von Energie leisten. Auch statische Dichtungen können einen Beitrag leisten, indem sie so ausgelegt werden, dass sie mit möglichst geringer Dichtkraft ihre Dichtwirkung erzielen und dadurch weniger steife und damit gewichtsparende Konstruktionen erlauben.

Nachhaltigkeitsaspekte müssen bereits in der Produktentwicklung [78] berücksichtigt werden. Am Ende sollen dem Kunden die bestmögliche Funktionalität bei gleichzeitig minimalem Ressourcenverbrauch und CO_{2eq}-Emissionen angeboten werden. Dabei werden neben den Materialien und Produktionstechnologien auch das Produktdesign und die zur Produktherstellung benötigte Infrastruktur berücksichtigt.

4.2.1. KLIMANEUTRALE PRODUKTENTWICKLUNG ALS ZIEL

Am Beispiel des von FREUDENBERG Sealing Technologies (FST) entwickelten „Green Index“ wird im Folgenden die Methodologie einer klimafreundlichen Entwicklung von Dichtungen dargestellt. Dabei werden die klimarelevanten Emissionen und auch das Gefährdungspotenzial aus den Rohstoffen heraus berücksichtigt, um in-

tern alternative Materialien und Prozesse vergleichen und bewerten zu können. Da moderne Dichtungen oft aus Materialmischungen bestehen, werden alle Einzelkomponenten berücksichtigt, um keine Fehlanreize für die Auswahl bestimmter Materialien zu setzen.

Der „Green Index“ stellt letztendlich eine Kennzahl dar, mit der Dichtungswerkstoffe einer bestimmten internen Nachhaltigkeitsklasse zugeordnet werden können. Wie und in welchem Umfang über das Global Warming Potential (GWP) hinaus Nachhaltigkeitsfaktoren zukünftig berücksichtigt werden sollen, ist bei FST nicht endgültig entschieden; wichtig ist, dass nicht eindimensional optimiert wird.

FST hatte sich überlegt, wie die Energie, die für die Herstellung von Dichtungen benötigt wird, korrekt auf einzelne Materialchargen oder Produkte umgelegt werden kann. Eine Voraussetzung dafür ist die Kenntnis darüber, wieviel Energie in einzelnen Prozessschritten spezifisch, also auf das Gewicht, das Volumen oder die Oberfläche bezogen, tatsächlich verbraucht wird. Dafür werden bereits in der Produktentstehungsphase unterschiedliche Herstellungsprozesse und -möglichkeiten eingehend untersucht, um frühzeitig die Gestaltungsspielräume im Hinblick auf den CO₂-Footprint umfänglich auszuschöpfen. Bild 2 zeigt die Kernprozesse, die prozesseitig maßgeblich den CO₂-Footprint bestimmen.

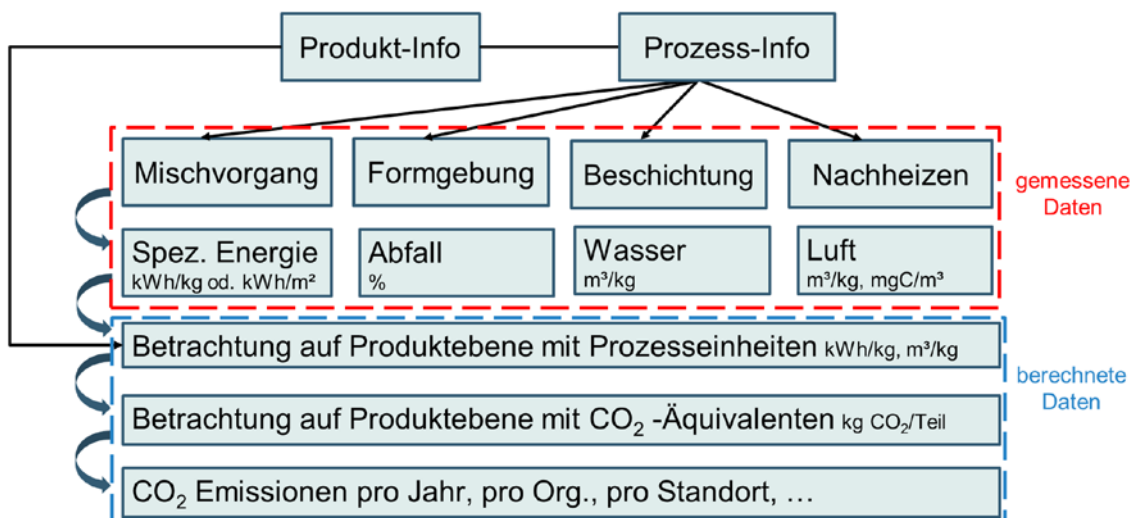


Bild 2: System der Key Performance Indicators (KPI) bei der Produktentstehung

Ein großer Hebel, um Bauteile klimafreundlicher herzustellen bzw. um den Ressourcenverbrauch zu mindern, liegt außerdem in der Abfallvermeidung, weshalb FST konsequent auf abfallvermeidende Produktionstechnik setzt. Neben der Minimierung organisationsbedingter Materialverluste, beispielsweise durch Lagerung über die Mindesthaltbarkeit der Vorprodukte hinaus sowie des qualitätsbedingten Ausschusses, werden vor allem die verfahrensbedingten Materialverluste seit Jahren erfasst und systematisch reduziert. Neben der Minimierung von Materialverlusten beim Materialwechsel (Anfahr Ausschuss, Reinigungszyklen) liegt das Augenmerk insbesondere auf der Reduzierung des sogenannten „engineered waste“, also von prozessimmanenten Abfällen wie Angusschirmen, Verteilerspinnen und Graten. Hierzu werden vor allem innovative Werkzeugkonzepte, angussfreie Kaltkanalverfahren sowie weitere Konzepte zum net shape molding umgesetzt.

4.2.2. DYNAMIC „PREMIUM PRESSURE SEAL – PPS“

Nach dieser Betrachtung, die sich mit den Nachhaltigkeitsaspekten von „Cradle-to-Gate“ (Scope 1-3) beschäftigt, also mit all den Aspekten, auf die der Dichtungshersteller Einfluss hat, soll auch die Einsparung von Energie in der Nutzungsphase betrachtet werden. Der Beitrag zur Nachhaltigkeit, der den Kunden aus Einsparungen an monetären CO₂-Krediten infolge der Reibungsminierungen zugutekommt, wird als „Handprint“ bezeichnet.

Bild 3 zeigt Ergebnisse eines Versuchs, in dem bei konstanter Drehzahl der abzudichtende Druck erhöht und die durch die Dichtung verursachte Reibung gemessen wird: Der PPS mit etwas kürzerer und damit weniger auf Druck reagierenden Dichtlippe und inversem Dichtkantenprofil zeigt eine

wesentlich geringere Reibung als die anderen Dichtringe.

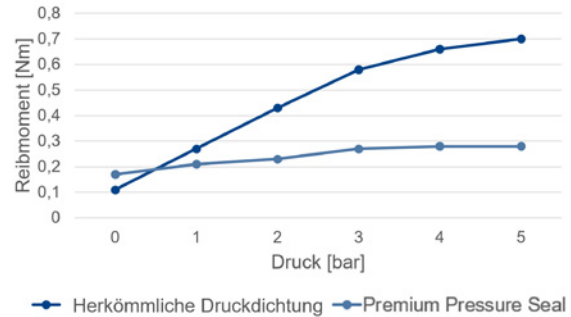


Bild 3: Reibung der unterschiedlichen Lösungen im Vergleich

In einer direkten Gegenüberstellung zum Standard-Radialwellendichtring zeigt sich, dass ein PPS-Simmerring® für eine 25mm-Welle in einer hydrostatischen Antriebseinheit bei 3 bar und 4.000 min⁻¹ bei 2.000 Betriebsstunden pro Jahr 160 kWh einspart, was 64,2 kg CO₂ im deutschen Energiemix von 2019 entspricht. Im Dauerbetrieb (8.760 Stunden) PPS-Simmerring® entspräche das 700,8 kWh/Jahr oder ca. 281 kg CO₂ pro Jahr für den deutschen Strommix 2019. Jährlich werden ca. 1,3 Millionen PPS verbaut. Bei 2.000 Betriebsstunden werden mehr als 200 GWh Energie oder 55.000 tCO₂ bzw. 80.200 tCO₂ eingespart unter Verwendung einer Treibhausgasintensität der gesamten Stromerzeugung in der EU27 in 2019 von 275 grCO_{2eq}/kWh und in Deutschland von 401 grCO_{2eq}/kWh.

4.2.3. REIBUNGSOPTIMIERTE, GASGESCHMIERTE GLEITRINGDICHTUNG

Die gasgeschmierte Gleitringdichtung Levitex® reduziert die Dichtungsreibung am hinteren Kurbelwellenende des Verbrennungsmotors um ca. 90%, was zu einer CO₂-Einsparung von 0,5-1,0 Gramm pro gefahrenem Kilometer führt [79].

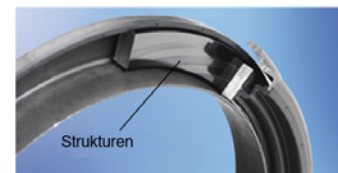
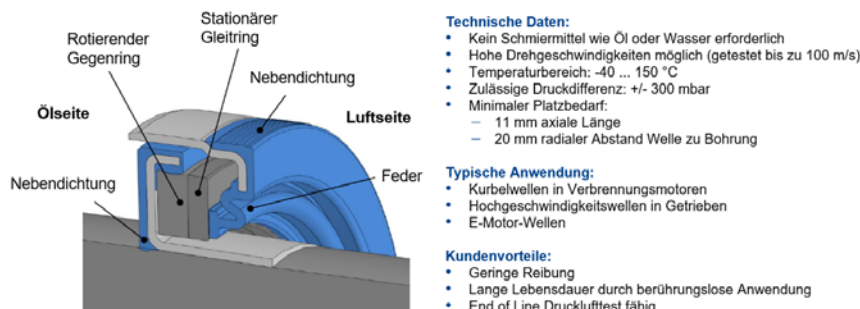


Bild 4: Gasgeschmierte Gleitringdichtung Levitex® in einer Schnittdarstellung

Im Betrieb erfolgt die Trennung der aufeinander gleitenden Gleit- und Gegenringe mit Hilfe aerodynamisch wirksamer Strukturen – sogenannter Gasnuten – auf der Dichtfläche des Gegenrings (Siehe Bild 4). Die Gasnut ist in Strömungsrichtung im Querschnitt abnehmend ausgebildet, ist nur wenige Mikrometer tief und ist nur zur Luftseite hin geöffnet. Bei Rotation wird Luft in der Gasnut gegen einen Dichtdamm geschleppt. Der dadurch entstehende Schleppdruck trennt die Dichtflächen und die Dichtung läuft weitestgehend reibungsfrei. Lediglich die Scherspannung im Luftfilm verursacht Reibungsverluste [80, 81]. Diese reibungsoptimierte Gleitringdichtung reduziert die Reibung um 0,5 bis 1,0 grCO₂/km in einem 1,6-Liter-Pkw mit Doppelkupplung gegenüber einer Standard-PTFE-Kurbelwellendichtung [82]. Für die nachfolgenden Beispiele wird eine konservative Ersparnis von 0,5 grCO₂/km angenommen:

- a. Bei einer mittleren, jährlichen Fahrstrecke von 15.000 km pro Jahr und Fahrzeug mit einer Million verbauter Dichtungen werden so ca. 7.500 t CO₂ pro Jahr eingespart.
- b. Nimmt man die mittlere Lebensdauer eines Fahrzeugs in der EU von 160.109 km für Benzin- und 208.476 km für Dieselfahrzeuge an [83], so errechnen sich über die Fahrzeuglebensdauer kumulierte Ersparnisse pro Dichtung von ca. 80 kg CO₂ bzw. 104 kg CO₂.

4.2.4. MONETÄRER CO₂-WERT

Die Mehrkosten für tribologische Innovationen zur Minderung von CO₂-Emissionen müssen als eine Investition in klimaneutrale Produkte betrachtet werden, welche einem monetären CO₂-Nutzen gegenübergestellt werden müssen. Es ist

bislang unklar, wie der “CO₂-Preis“ zwischen Komponentenhersteller, OEM und/oder Endkunde aufgeteilt wird. Im Folgenden werden die CO₂-Einsparungen der Beispiele aus der Dichtungstechnik in CO₂-Preise unter der Annahme von 50 €/tCO_{2eq} umgerechnet (Siehe auch Kapitel 3.2).

Der rechnerische, monetäre CO₂-Wert gibt einen Anhaltspunkt dafür, ob eine tribologische Lösung, welche mit dem Ziel der Verbesserung des CO₂-Fussabdruckes entwickelt wurde, eine zukünftige Marktdurchdringung erlangen kann, weil ein verbesserter CO₂-Fussabdruck an sich keine technische Anforderung zur Funktionsfähigkeit darstellt, sondern einen Zusatznutzen offeriert, dessen Mehrkosten sich über die CO₂-Bepreisung valorisieren. Vor einer Bewertung monetärer CO₂-Werte muss konkret geklärt werden, wo diese verbucht werden:

- » beim Produkthersteller
- » beim Endverbraucher über effektiv geringere Energie- oder Kraftstoffkosten.

Alternativ ist der Erwerb eines CO₂-Emissionsrechtes günstiger.

Der Vergleich des monetären CO₂-Werts in Tabelle 9 mit den tatsächlich eingesparten Energiekosten zeigt eindrucksvoll, dass der heutige, monetäre CO₂-Wert viel zu niedrig angesetzt wird.

Wird die in Kapitel 4.1 genannte Steuerabgabe in Höhe von 95 € pro Gramm CO₂ und Kilometer zugrunde gelegt, dann beläuft sich die zusätzliche Ersparnis auf 47,50 € bis 95,- € je Fahrzeug, sofern die Fahrzeugflotte im Durchschnitt den derzeitigen Grenzwert von 95 gr. CO₂/km überschreitet.

Tabelle 9: Der monetäre Wert der CO₂-Reduktion durch tribologische Maßnahmen (für 50 €/tCO_{2eq}) bzw. tatsächlich eingesparte Energiekosten

Dichtungstyp	Randbedingungen	CO ₂ -Ersparnis [kg CO ₂]	Monetärer CO ₂ -Wert	Energiekosten (0,3 €/kWh bzw. 2,- €/l Treibstoff)
PPS-Simmerring	Hydrostatische Antriebseinheit, Energiemix DE	64,2 (2.000 h/p.a.)	3,21 €/p.a.	48,- €/p.a.
		281 (7.860 h/p.a.)	14,05 €/p.a.	210,24 €/p.a.
Reibungsoptimierte, gasgeschmierte Gleitringdichtung	Mittlere Lebensdauer 160.109 km für Benzin- und 208.476 km für Dieselfahrzeuge	80 kg (Benzin)/ 104 kg (Diesel) pro Dichtung	4 € bzw. 5,20 €	69,0 €/76,4 €

4.3. ABSCHÄTZUNG DES GLOBALEN ENERGIEVERBRAUCHS VON WÄLZLAGERN

Wälzlager übertragen Kräfte zwischen sich zueinander bewegendem Oberflächen und gehören mit zu den wichtigsten Maschinenelementen. Sie erweisen sich als zuverlässig und sind für eine lange Nutzungsdauer ausgelegt. In der EU sind etwa 8 Milliarden Elektromotoren im Einsatz, die fast 50 % des in der EU produzierten Stroms verbrauchen [84]. IEA schätzte, dass 43-46 % der gesamten globalen elektrischen Energie von Elektromotoren verbraucht wird [85, 86] und von diesem Anteil 20-30% eingespart werden können [87]. Elektrifizierte Antriebskonzepte verbauen vermehrt Wälzlagerungen. Dort bedeutet die Senkung der Lagerreibung eine Reichweitenverlängerung. Hohe Motordrehzahlen und die Minimierung der Lagerreibung sind Bestandteile zur Effizienzsteigerung von Elektromotoren, wobei der Anteil der Lagerreibung mit ansteigender Drehzahl weiter an Bedeutung gewinnt.

Nichtsdestotrotz ist der Vorteil von energieeffizienten Bauteilen über deren kompletten Lebenszyklus nicht auf breiter Ebene untersucht worden. Zwar gibt es generelle Richtlinien, die deren Produktion und Transport abdecken [88, 89, 90], es gibt aber wenig Untersuchungen, die den CO₂-Fußabdruck während der verbleibenden Gebrauchsdauer – das ist der Zeitbereich deren Nutzung – oder des möglichen Material- und Energieverbrauchs während der Entsorgung oder des Recyclings beleuchten.

Verschiedene Studien zur Berechnung des globalen Energieverbrauchs [5] oder des Verbrauchs einzelner Industriesektoren wie des Bergbaus [91], der Papierindustrie [92] oder der globalen CO₂-Emissionen von Fahrzeugen [6, 93] sind veröffentlicht worden. Die Autoren dieser Studien definierten einen durchschnittlichen Vertreter des jeweiligen Industriezweigs – beispielsweise ein durchschnittliches Auto – und haben daraus die Emissionen des Sektors berechnet. Des Weiteren konnten sie den potenziellen Effekt der CO₂-Einsparung neuer Technologien ermitteln, indem sie die Energieverluste der jeweiligen Anwendung berechnet haben.

Der Beitrag von spezifischen, aber breit eingesetzten Komponenten auf die globale Energie-

emissionen ist bisher nicht sorgfältig untersucht worden. Wälzlager befinden sich in fast allen Maschinentypen. Allerdings ist deren Energieverbrauch aufgrund ihrer hohen Effizienz meist nicht im Fokus der Optimierung (Wälzlager werden im Englischen auch „antifricition bearings“ genannt). Aufgrund der riesigen Anzahl an verwendeten Lagern kann deren Gesamtverbrauch allerdings nicht vernachlässigt werden. In den letzten Jahren sind viele energieeffiziente(re) Lager entwickelt worden, die ein spezifisches Design oder neue Materialien verwenden, um die Verluste zu verringern, ohne an Lasttragfähigkeit einzubüßen. Der Effekt, den diese Änderungen auf den globalen Energieverbrauch haben, ist bisher nicht quantifiziert worden.

Um den gesamten Energieverlust von Wälzlagern während ihres Betriebs zu berechnen, gibt es zwei mögliche Ansätze, die ähnliche Ergebnisse liefern sollten (Bild 5). Im produktbasierten Ansatz wird ein Ensemble von repräsentativen Betriebsbedingungen für einen bestimmten Lagertyp definiert und der Energieverlust jedes Lagers dieses Typs mit aktuellen Berechnungsmethoden ermittelt. Anschließend können die Berechnungsergebnisse mit den globalen Verkaufszahlen gewichtet werden, um die globalen Emissionen eines Typs abzuschätzen.

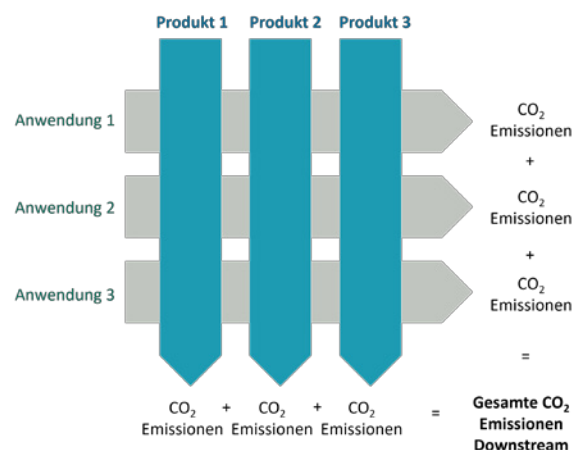


Bild 5: Gegenüberstellung des Produkt- und Anwendungs-basierten Ansatzes.

Die andere Möglichkeit folgt dem Ansatz von Holmberg et al. [5, 6, 93], indem in einem anwendungsbasierten Ansatz der Energieverlust einer Stellvertreteranwendung eines bestimmten Anwendungsgebiets komponentenweise untersucht wird, bis der Energieverbrauch der Wälzla-

ger abgeschätzt werden kann. Die Breite und Vielzahl industrieller Anwendungen und Designs macht diesen Ansatz allerdings mühsam. Zwar kann er leicht in großen Sektoren wie Automobilindustrie, Luftfahrt, Windenergie, Bergbau oder der Papierindustrie angewendet werden. Es gibt allerdings viele andere Sektoren, die für eine gute Genauigkeit der Abschätzung mit einbezogen werden sollten. Dieser Ansatz ist sehr zeit- aufwändig und daher nicht Teil dieses Beitrags.

Eine Methode zur Abschätzung der Energieverluste von Wälzlagern mit Hilfe des produktbasierten Ansatzes wurde erst kürzlich vorgeschlagen [94]. In dieser Studie zeigten die Autoren u.a. welchen Einfluss Reibungsberechnungsmethoden auf die Ergebnisse haben und unter welchen Bedingungen die Wirkung von reibungsoptimierten Konstruktionen quantifiziert werden könnte. Basierend auf den Ergebnissen von Bakolas et al. [94] haben die Autoren den globalen Energieverbrauch aller Kataloglager anhand von zwei verschiedenen Parametern berechnet.

In den letzten Jahren haben etliche Lagerhersteller Wälzlager mit unterschiedlichen Innenkonstruktionen vorgestellt, die die Reibung reduzieren sollen. Gleichzeitig haben sie ebenfalls verbesserte Berechnungsmethoden zur Ermittlung der Reibenergie von Lagern sowohl in Form von Katalogmethoden (SKF) [95] als auch spezialisierten Computerprogrammen (SCHAEFFLER) [96], die auf theoretischen Modellen basieren, vorgestellt. Diese neuen Berechnungsmethoden berücksichtigen wesentlich mehr Faktoren, die die Reibung beeinflussen. Sie beinhalten das interne Design entweder implizit, wie beispielsweise in Katalogmethoden, oder explizit, zum Beispiel im Rahmen von Computerprogrammen. In dieser Studie und aus den in [94] dargelegten Gründen wurde nur die Analyse- methode von Schaeffler verwendet.

Schaeffler stellt sein Reibmodell in Form des Computerprogramms Bearinx Easy Friction zur Verfügung. Das Model basiert auf physikalischen Algorithmen, die Last, Verkippung der Lagerringe, Viskosität des Schmierstoffs, Temperatur, die genaue interne Lagergeometrie und das Lager- spiel berücksichtigen. Dieses Model ist ebenfalls mit einer Serie von Experimenten validiert worden. Die Basis dieses Modells ist die Reibkraft jedes Kontaktpunkts innerhalb des Lagers, die

durch die Scherung des Schmierstoffs und der Reibung zwischen Rauheitsspitzen entsteht [96].

$$F_{sl} = \lambda \cdot F_{sl,asp} + (1 - \lambda) \cdot F_{sl,fl} \quad (1)$$

mit der Gleitreibungskraft F_{sl} der Gleitreibungskraft der Rauheitsspitzenkontakte $F_{sl,asp}$ der Gleitreibungskraft der Scherung des Schmierstoffs $F_{sl,fl}$ und dem Lasttraganteil λ der Rauheitsspitzen.

Die spezifische Reibkraft eines Flächenelements ΔA und der lokalen Gleitgeschwindigkeit u_{sl} ergibt sich somit zu:

$$q = \frac{|F_{sl} \cdot u_{sl}|}{\Delta A} \quad (2)$$

Die Summe aller spezifischen Reibverluste aller Kontakte im Lager ergibt dessen Reibverlust.

Die Hauptaufgabe im produktbasierten Ansatz besteht darin, ein Ensemble von Betriebsbedingungen zu definieren, das auf alle Lagertypen angewendet werden kann. Der Standard ISO281 [97] bezieht sich hauptsächlich auf die Lebensdauer von Wälzlagern und stellt daher keine Orientierungshilfe dar. Der Standard ISO/TS 16281 [98] stellt einen Satz von Referenz-Geometrien zur Verfügung, der zur Erstellung von Referenztypen für die Berechnung verwendet werden kann.

Die einzige Quelle zu bestimmten Betriebsbedingungen findet sich im Standard ISO15312 [99], der sich mit der thermischen Bezugsdrehzahl befasst. Demnach basieren die Referenzbedingungen in diesem Standard hauptsächlich auf den Betriebsbedingungen der am häufigsten verwendeten Lagertypen und -größen. Des Weiteren ist dieser Standard für die vorliegende Studie geeignet, da er eine Methode zur Berechnung der Reibungsverluste in Lagern beinhaltet. Die Betriebsbedingungen sind hier so gewählt, dass ein Lager einen Temperaturanstieg um 50°C (von 20°C auf 70°C) in einer Ölbad- schmierung erfährt, wenn ein Öl mit einer Betriebsviskosität von 12mm²/s bei 70°C verwendet wird. Die Betriebsbedingungen dieses Lagers sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: Betriebsbedingungen

	ISO 15312 Ansatz	Lh10 Ansatz
Lagerreferenztemperatur	70°C	70°C
Radiale Referenzlast	5% C _{0r}	Berechnet von nomineller Lebensdauer
Drehzahl	Thermische Bezugsdrehzahl nach ISO 15312	50% von thermischen Bezugsdrehzahl nach ISO 15312
Viskosität des Schmierstoffs bei 70°C	12 mm ² /s	12 mm ² /s
Art der Schmierung	Ölbad	Ölbad
Bohrungsdurchmesser	< 1000mm	< 1000mm
Lagerspiel	N (ISO 5753-1)	N (ISO 5753-1)
Lagerachse	horizontal	horizontal
Stehender Ring	Outer ring	Outer ring

In einem Kugellager, wie in Bild 6, sind als Tribosysteme (Reibkontakte) die Kontakte zwischen Kugeln und Laufbahnen bzw. Käfig sowie zusätzlich der Dichtungskontakt zu betrachten. Da der Standard eine Ölbad Schmierung voraussetzt, was einen dichtungsfreien Betrieb vorgibt, wird der Dichtungseinfluss vernachlässigt. Gleichzeitig scheint der Standard durch seine Wahl der Schmierung alle Wälzlager zu vernachlässigen die typischerweise mit Fett geschmiert werden. Das Ziel dieses Artikels ist es, eine generell anwendbare und auf bestehenden Standards basierende Methode zur Berechnung der Energieverluste vorzuschlagen. Daher geben diese Standards auch die Annahmen vor, die getroffen werden müssen. Andererseits wird darin auch eine wesentlich geringere Reibung für Fett- als für Ölgeschmierte Lager vorhergesagt. Diese geringere Reibung wird durch die Dichtungen wieder aufgehoben, so dass die beiden gegenläufigen Effekte die Reibung von Fett- und Ölgeschmierten Lagern in dieselbe Größenordnung bringen. Daher sind die Annahmen in Tabelle 10 akzeptabel.

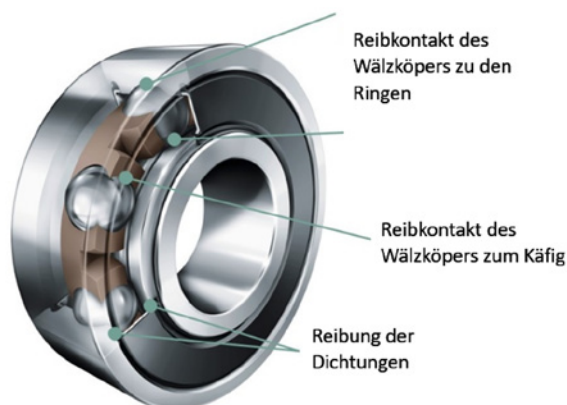


Bild 6: Die Reibkontakte in einem typischen Radialrillenkugellager.

Die einzige fehlende Betriebsbedingung ist die Drehzahl. Eine Untersuchung der Lagerkataloge verschiedener Hersteller zeigt, dass die thermischen Bezugsdrehzahlen stark unterschiedlich sein können. Dies hängt a.) mit der individuellen Innenkonstruktion des Lagers und b.) mit der Methode zur Berechnung der Reibungsverluste zusammen. Daher muss zur Bewertung der Energieverluste aller Lager ein Satz an Drehzahlen gewählt werden. In dieser Studie sind die Bezugsdrehzahlen nach der Berechnungsmethode der ISO15312 als Drehzahlen verwendet worden.

Eine weitere wichtige Variable, die bestimmt werden muss, um die Energieverluste zu berechnen, ist die Zeit, in der diese Verluste entstehen. Für diese Studie wurde eine Lebensdauer von 5.500 Stunden für alle Lager unabhängig von ihrer Art und Dimension angenommen. Diese Lebensdauer scheint ein guter Kompromiss zwischen der geringen Lebensdauer kleiner Lager, die typischerweise 1.000-2.000 Stunden laufen, und den größeren Lagern, die typischerweise eine Lebensdauer von 40.000-50.000 Stunden erreichen oder sogar überschreiten können, zu sein.

Die in ISO 15312 definierten Betriebsbedingungen entsprechen Wälzlagern, die leicht belastet sind und mit sehr hohen Drehzahlen arbeiten. Dies führt zu einem erhöhten Einfluss der Fliehkräfte, die mit hohen Geschwindigkeiten verbunden sind. Der Effekt mag bei Kugellagern geringer sein, wird aber vor allem bei Rollenlagern zum treibenden Faktor. Darüber hinaus sind auch die Planschverluste proportional zur Betriebsgeschwindigkeit, was bedeutet, dass sie durch die Verwendung dieser Bedingungen überschätzt würden. Daher wurde auch ein alternativer Satz

von Betriebsbedingungen in Betracht gezogen. Da die Lebensdauer der Lager bereits vorgegeben war, wurde die Betriebslast so gewählt, dass die nominelle Lebensdauer jedes Wälzlagers 5.500 Stunden entsprach. Darüber hinaus wurde die Betriebsdrehzahl auf 50% der thermischen Bezugsdrehzahl eingestellt, um der Drehzahl im normalen Lagerbetrieb besser zu entsprechen. Dieser Satz von Bedingungen wurde Lh10 – Ansatz genannt.

Die Reibenergie der meisten Kataloglagertypen wurde für beide Betriebszustände bestimmt. In Tabelle 2 sind die Lagertypen, die in dieser Studie betrachtet wurden, zusammen mit ihren repräsentativen Serien dargestellt.

Tabelle 11: In der Studie betrachtete Lager

Typ	Serie	Typ	Serie
Rillenkugellager	62	Zylinderrollenlager	NU3
Schräggugellager	72	Kegelrollenlager	303
Vierpunktlager	QJ3	Pendelrollenlager	222
Pendelkugellager	22	Nadellager	NA49
Axial-Zylinderrollenlager	812	Axial-Pendelrollenlager	294

Um die Energieverluste von Lagern während der angesetzten Gebrauchsdauer abschätzen zu können, muss eine Annahme über die Anzahl der weltweit verkauften Lager und deren Verteilung auf die verschiedenen Größen vorgenommen werden. Basierend auf den verfügbaren Daten des Jahres 2019 zur Größe des Lagermarktes und den Preisangaben mehrerer Hersteller wurde in einem iterativen Verfahren die Verteilung der verkauften Lager ermittelt. Zunächst wurde eine statistische Verteilung für die Zuordnung des Umsatzes pro Lagergröße gewählt. Anhand der Preisinformationen wurde die statistische Verteilung der verkauften Lager ermittelt. Basierend auf der Art der Lagerung wurde eine Annahme hinsichtlich der endgültigen Verteilung der verkauften Einheiten getroffen. Das Verfahren wurde so lange wiederholt, bis die statistische Verteilung der verkauften Lager für jeden Lagertyp den Erwartungen entsprach. Die statistische Verteilung der verkauften Rillenkugellager stellt Bild 7 dar.

Die Ergebnisse der Reibungsberechnungen vergleicht Bild 8. Die durch den ISO15312-Ansatz vorhergesagte Reibungskraft ist höher als die des

Lh10-Ansatzes, wie erwartet. Die Gründe für diesen Unterschied werden auf die höheren Geschwindigkeiten des ISO-Ansatzes zurückgeführt, die wiederum zu höheren Energieverlusten führen.

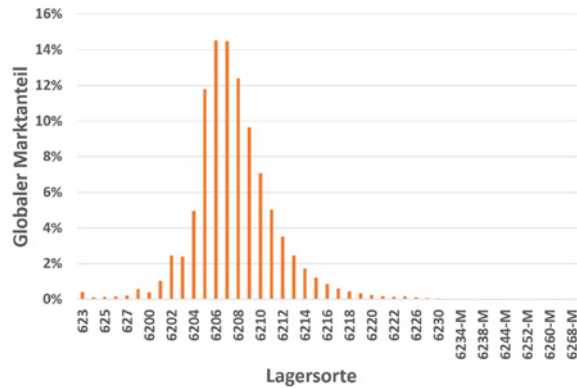


Bild 7: Prozentuale Lagerverkaufszahlen pro Lagergröße

Die hohen Drehzahlen des ISO-Ansatzes wirken sich negativ auf die Energieverluste von Lagern aus. Planschverluste tragen ebenfalls zu den Reibungsverlusten bei und ISO 15312 schreibt eine Ölbadschmierung vor, bei der der untere Walzkörper zur Hälfte mit Öl bedeckt ist, was wiederum bedeutet, dass Planschverluste nicht vernachlässigt werden dürfen. Bild 9 zeigt den Unterschied in den Ergebnissen, wenn die Planschverluste vernachlässigt werden. Wie man sieht, können diese Verluste 25%-30% der gesamten Reibverluste betragen, obwohl dieser Prozentsatz je nach Lagertyp erheblich variiert. Die erste Schlussfolgerung, die aus den Ergebnissen gezogen werden kann, ist, dass Kugellager die meisten Energieverluste verursachen und 50% der Gesamtverluste erreichen, was andererseits angesichts der Größe des Kugellagermarktes zu erwarten ist. Nadellager tragen je nach Ansatz auch mit etwa 20% bis 30% zu den Verlusten bei.

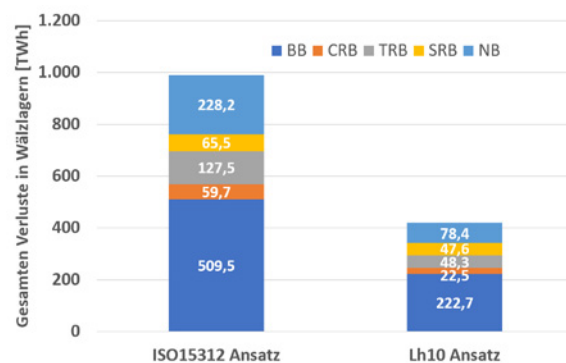


Bild 8: Reibungsverluste von Wälzlagern

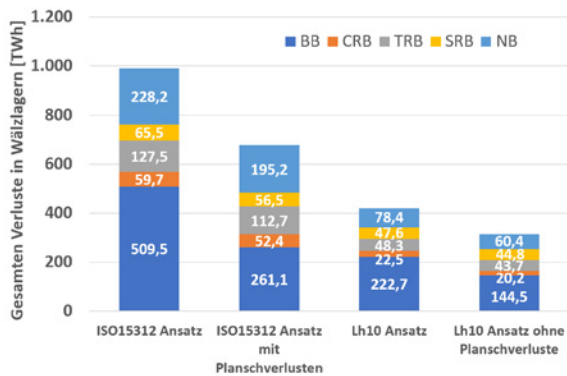


Bild 9: Einfluss des „Planschens“ auf die Reibungsverluste von Lagern

Kugellager scheinen auch stärker von den Planschverlusten betroffen²⁶ zu sein als jede andere Art von Wälzlagern. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die thermische Bezugsdrehzahl von Kugellagern typischerweise höher ist als die von Rollenlagern. Da die Planschverluste proportional zur Drehzahl sind, werden Kugellager aufgrund der Wahl der Betriebsbedingungen stärker vom Planschen beeinflusst.

Hauptnutzen dieser Art von Ergebnissen kann es sein, dass Hersteller und Anwender von Wälzlagern den Einfluss neuer reibungsoptimierter Designs auf den Energieverbrauch bewerten können. Solche Designs haben hauptsächlich die Kontakte zwischen Wälzkörpern und Laufbahnen oder Käfigen im Fokus. Die Reduzierung der Rauheiten ist eine offensichtliche Maßnahme, um Reibung zu reduzieren. Des Weiteren beeinflusst die Schmiegun g des Innen- und Außenrings signifikant die Reibung, da die Kontaktfläche und damit der Mikroschlupf im Kontakt verringert wird. Bestimmte Käfigdesigns und -materialien können ebenfalls einen großen Einfluss auf die Lagerreibung haben. Die Anzahl der Wälzkörper beeinflusst ebenfalls die Reibung aus dem offensichtlichen Grund, dass sie die Anzahl der Reibkontakte festlegt. Die Verwendung von Lagern mit Keramikwälzkörper hat auch den positiven Effekt gezeigt, den verschiedene Materialpaarungen auf die Reibung haben. Zuletzt haben Oberflächenbeschichtungen einen signifikanten Effekt auf die Reibungsreduzierung, die zusätzlich zur Anwendung in Lagern eine entsprechende Überrollbeständigkeit und Verschleißbeständigkeit aufweisen müssen [100].

4.3.1. MÖGLICHE, VOLKSWIRTSCHAFTLICHE CO₂-EINSPARUNGEN DURCH WÄLZLAGER

Bakolas et al. [94] errechneten, dass die jährlichen Energieeinsparungen, die sich durch den Einsatz von reibungsoptimierten Standard-Kugellagern ergeben würden, bis zu 90 TWh pro Jahr [94] betragen könnten. Unter der Annahme, dass der Marktanteil Deutschlands im weltweiten Kugellagergeschäft bei rund 7% liegt [101] errechnet sich entsprechende Energieeinsparungen von 6,2 TWh pro Jahr.

Bei einem durchschnittlichen Emissionsfaktor in Deutschland für die Energieerzeugung von 0,401 kgCO_{2eq}/kWh in 2019 läge die Emissionseinsparung für Deutschland bei 2,486 Megatonnen CO_{2eq} pro Jahr. Bei einem Preis von 100 €/tCO_{2eq} belaufen sich die monetären Einsparungen an CO₂-Zertifikaten für Deutschland dann auf 248 Mio.€ pro Jahr.

Die durchschnittliche, globale Kohlenstoffintensität der erzeugten Elektrizität beträgt 0,475 kgCO₂/kWh [102] in 2019, wobei reibungsoptimierte Wälzlager aus den eingesparten 90 TWh eine globale Minderung von 42,750 Megatonnen CO_{2eq} pro Jahr ermöglichen.

Unter Verwendung der zuvor genannten Energieeinsparung für Deutschland von 6,2 TWh in Verbindung mit einem durchschnittlichen Strompreis für Industriekunden von 0,330 €/kWh und 0,371 €/kWh für Gewerbekunden im ersten Halbjahr 2022 errechnet sich eine volkswirtschaftliche Einsparung von 2,04 bzw. 2,30 Milliarden € pro Jahr, welche viel bedeutender ist, als die derzeitige monetäre Ersparnis an CO₂-Zertifikaten. Ungeachtet dessen setzt sich die Gesamtersparnis reibungsarmer Standardwälzlager aus dem monetären Werten des verminderten Energieverbrauchs und der gesparten CO₂-Zertifikate zusammen.

4.3.2 Reibungsminderungen in Wälzlagern der Mobilität

Wälzlager spielen eine wesentliche Rolle für die Sicherheit und die Effizienz in zukünftigen Fahrzeugen (Siehe Kapitel 4.1). Sie bieten u. a. bei Nutzfahrzeugen großes Einsparpotenzial – so

²⁶ Zur Abschätzung der Planschverluste gibt es ein System CoDaC von den Professoren Sauer und Schwarze.

wohl bei konventionellen als auch elektrifizierten Antrieben. Neben der Reibungsminderung steht bei der Neuentwicklung spezieller Lagerlösungen für einen effizienten Antriebsstrang auch die Verschleißminderung nebst Gewichtsreduzierung bei leichten und insbesondere schweren Nutzfahrzeugen im Vordergrund, um den CO₂-Rucksack aus dem Ressourcenverbrauch zu senken. Speziell für Nutzfahrzeuge hat die Schaeffler Gruppe eine Radlagereinheit entwickelt, welche die Reibleistung weiter verringert. Am Beispiel einer 13-Tonnen-Hinterachse ergibt sich daraus eine um 56 % niedrigere Reibung und eine Leistungseinsparung in der Reibungsverlustleistung von bis zu 600 W. Bei einem Nutzfahrzeug mit einer elektrischen Reichweite von 500 km bedeutet das eine Energieeinsparung von bis zu 11 kWh bei jedem Ladevorgang. Somit ermöglicht eine Batterie gleicher Größe eine höhere Reichweite. Alternativ kann die gleiche Reichweite mit weniger Ressourcen und zu geringeren Kosten erreicht werden [103].

Die in einem Hochleistungskugellager integrierte Schleuderscheibe stellt ein weitere, nachhaltigkeitswirksame Lager-Innovation dar. Die Besonderheit des weltweit einzigartigen Lagers der Schaeffler Gruppe ist, dass die sonst an den Außenseiten von abgedichteten Lagern fest fixierten Gummidichtungen durch eine speziell entwickelte Schleuderscheibe im Innenring ersetzt werden. Sie hält – ähnlich wie bei einem abgedichteten Lager – Verschmutzungen ab. Da sie

sich jedoch frei dreht, erzeugt das Lager rd. 80 % weniger Reibung als mit herkömmlichen Dichtungen. Das Ergebnis ist eine CO₂-Reduzierung um bis zu 0,3 g pro Kilometer und Fahrzeug. Die Verringerung der Verluste um bis zu 30 W pro Lager kann zudem die Reichweite von Elektrofahrzeugen um bis zu 1 % erhöhen. Zudem hält das Schleuderscheibenlager deutlich länger: Verglichen mit einem offenen Lager kann sich die Lebensdauer bis um den Faktor zehn erhöhen, was eine nachhaltige Ressourcenschonung bedeutet. Im Vergleich zu herkömmlichen abgedichteten Kugellagern kann sie sich verdoppeln. Das bedeutet, dass sowohl Lager als auch Getriebe künftig kleiner dimensioniert werden können, was wiederum Material und Gewicht einspart [103].

4.4. EINSPARUNGEN AN ENERGIE IN HYDRAULIKSYSTEMEN

9-12% der Schmierstoffmenge entfallen auf Hydraulikflüssigkeiten. Gegenüber elektrischen Antrieben stellen Hydrauliksysteme eine leistungsstarke mechanische Lösung zum Bewegen von Bauteilen und Maschinen dar. Hochscherstabile Mehrbereichshydraulikfluide mit einem hohen Viskositätsindex²⁷ (VI) haben sich in der Praxis bewährt als eine der wirkungsvollsten Maßnahmen, die Produktivität zu steigern und den Energiebedarf zu senken. Insbesondere für Bagger konnte diese Verbesserung gegenüber Einbereichsölen in zahlreichen Feldversuchen gezeigt



Bild 10: Die Bewertung des gesamten Lebenszyklus bietet eine ganzheitliche Sicht auf die Emissionen [104]

²⁷ Der Viskositätsindex (VI) ist ein Maß zur Stabilität der Viskosität mit ansteigender Öltemperatur. Bei jedem Schmierstoff nimmt mit ansteigender Öltemperatur die Viskosität (Zähigkeit) um Zehnerpotenzen ab. Ein hoher VI bedeutet, dass die Abnahme der Viskosität mit zunehmender Öltemperatur geringer ist.

werden. Bedeutende globale Hersteller von Baumaschinen verwenden deshalb solche Hydraulikfluide zur Erstbefüllung und schreiben deren Verwendung für den Service (aftermarket) vor. 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.

Die nachfolgende Lebensdaueranalyse (Ökobilanz) nach ISO 14040/14044 beschreibt zwei Anwendungsfälle von energieeffizienten Hydraulikfluiden am Beispiel einer mobilen Arbeitsmaschine und einer stationären Produktionsmaschine. Im Bild 10 ist der gesamte Lebenszyklus des Öles dargestellt, dessen CO₂-Emissionen in verschiedenen Bereichen betrachtet werden.

4.4.1. ANWENDUNGSFALL BAGGER

Ein herkömmliches Einbereichshydraulikfluid HLP 46 dient als Vergleich, um die eingesparten CO₂-Emissionen bei Verwendung eines hochscherstabilen Mehrbereichshydraulikfluids mit hohem Viskositätsindex (> 180) in einer Lebenszyklusanalyse zu ermitteln. Der hohe Viskositätsindex ermöglicht eine Absenkung der Viskositätsklasse unter Beibehaltung der Viskosität bei 100 °C im Vergleich zum Einbereichsöl HLP 4, sodass neben dem HVLP 46 auch niedrigviskoses HVLP 32 betrachtet wurde.

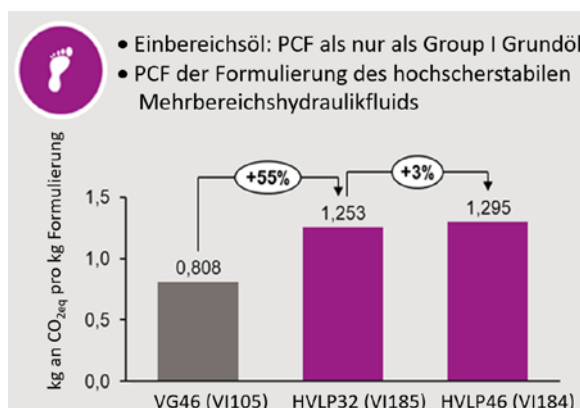


Bild 11: CO₂-Fußabdruck von Hydraulikfluiden (cradle-to-gate²⁸; Herstellungsphase) [104]

²⁸ Cradle-to-gate („Wiege bis Werkstor“) bewertet ein Produkt nur, bis es die Werkstore verlässt, bevor es zum Verbraucher/ Nutzer transportiert wird.

Der CO₂-Fußabdruck des Einbereichsöles HLP 46 ist in der Herstellung deutlich niedriger als bei beiden HVLP-Formulierungen, weil u.a. der verwendete VI-Verbesserer einen höheren CO₂-Fußabdruck als das Grundöl des Einbereichsöles HLP 46 hat (siehe Bild 11). Durch einen höheren Gehalt an VI-Verbesserern erhöht sich der CO₂-Fußabdruck vom HVLP ISO 46 etwas gegenüber dem des HVLP 32.

Für die Anwendungsphase wurde auf Basis statistisch ausgewerteter Feldversuche die verrichtete Arbeit als Maßstab herangezogen: Der Transport von einer Million Tonnen Masse durch den Bagger des Typs ZX 290 vom Hersteller Hitachi. Die dazu nötige Menge an Kraftstoff und Hydraulikfluid incl. dessen Entsorgung wurde für jedes Fluid ermittelt.

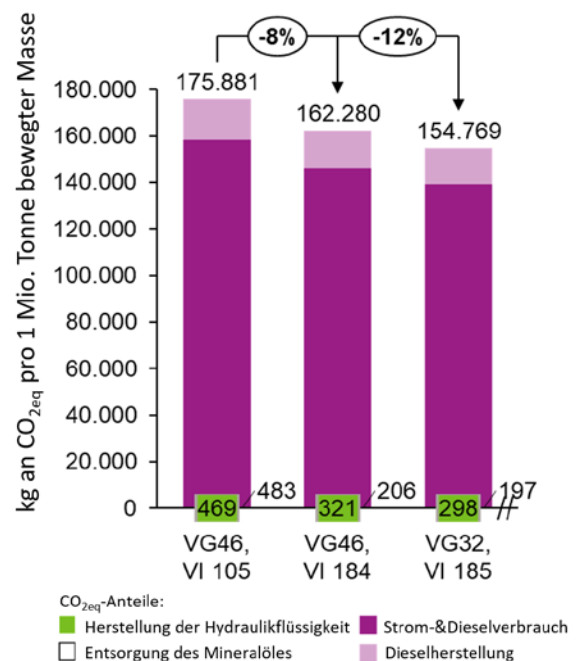


Bild 12: Lebensdaueranalyse für den Anwendungsfall Bagger für das Referenzöl HLP 46 und die beiden hochscherstabilen HVLP 32 und HVLP 46 [104]

Die Öllebensdauer für das Einbereichsfluid HLP 46 wurde mit den von Baggerherstellern üblicherweise festgelegten 2.000 Stunden angesetzt, für die Mehrbereichsöle HVLP 32 und HVLP 46 mit je 4.500 Stunden, was den Abfallstrom und

den Ressourcenbedarf mindert. Durch die für Energieeffizienz optimierten Hydraulikfluide lassen sich 8% bzw. 13,6 tCO_{2eq} mit einem HVLP 46 bzw. 12 % oder 21,1 t an CO_{2eq} durch ein HVLP 32 mit weiter abgesenkter Viskosität einsparen (Siehe Bild 12). Die große Wirkung viskosimetrischer Maßnahmen erklärt sich aus dem hohen Anteil der Nutzungsphase von 99,5-99,7% an den gesamten CO_{2eq}-Emissionen.

In einem weiteren, großangelegten Feldversuch mit einem Bagger wurde eine Umweltbilanz zu den eingesetzten Hydraulikfluiden erstellt [105]. Im Einzelnen wurden die Umwelteigenschaften und Kosten von drei mineralölbasierten Hydraulikschmierstoffen über den gesamten Lebenszyklus für eine Baggeranwendung analysiert. Es kamen drei unterschiedliche Hydraulikfluide zum Einsatz (Siehe Bild 13): Einbereichsöl HLP 46, Mehrbereichsöl HVLP 46 und Premium Mehrbereichsöl HVLP 46. Damit sollte ein Verständnis dafür geschaffen werden, welche Faktoren Einfluss auf die Umweltbilanz nehmen: von den Rohstoffen über die Produktion und Nutzung bis zur Entsorgung. Der Praxistests lief über eine Laufzeit von 8.000 Stunden. Bild 13 fasst die Einsparpotentiale durch das Premium Mehrbereichs-Hydrauliköl zusammen. Die CO₂-Emissionen vom Diesel-Kraftstoffverbrauch dominieren in der Nutzungsphase; für eine bessere Übersichtlichkeit enthält das Einbereichsöl HLP46 nur

die zusätzlichen Diesel-Mehrverbräuche gegenüber dem effizientesten Öl „Premium HVLP 46“ (Mehrbereichsöl). Folglich entfaltet das „Premium Mehrbereichsöl HVLP 46“ in nur einem Bagger in 8.000 Betriebsstunden eine Ersparnis von 31,1 Tonnen CO_{2eq}. In anderen Worten: Der monetäre Wert des eingesparten Diesels übersteigt um Zehnerpotenzen die Befüllungsmehrkosten mit dem „Premium Mehrbereichsöl HVLP 46“. Die Ersparnis von 31,1 Tonnen CO_{2eq} entsprechen z.Z. ca. 3.100 € an CO₂-Zertifikaten. Der Hauptunterschied dieses Öls gegenüber dem „Standard HVLP 46“ besteht wiederum in seiner deutlich längeren Lebensdauer, wodurch der Ressourcenverbrauch und die Abfallströme abnehmen.

Einprägsamstes Ergebnis dieser Untersuchungen in Bild 13 ist, dass die Nutzungsphase den product carbon footprint²⁹ (PCF) eindeutig dominiert – eine Reibungsminderung in der Nutzungsphase überkompensiert in vielen Fällen die monetären Investitionen in reibungsärmere Konstruktionen und Hochleistungsschmierstoffe.

4.4.2. ANWENDUNGSFALL SPRITZGIESSMASCHINE

Auf Basis eines Langzeitversuches mit einer Spritzgießmaschine vom Typ KraussMaffei GX 550-4300 wurde eine Lebenszyklusanalyse für eine Arbeitsdauer von 8.100 Stunden durchge-

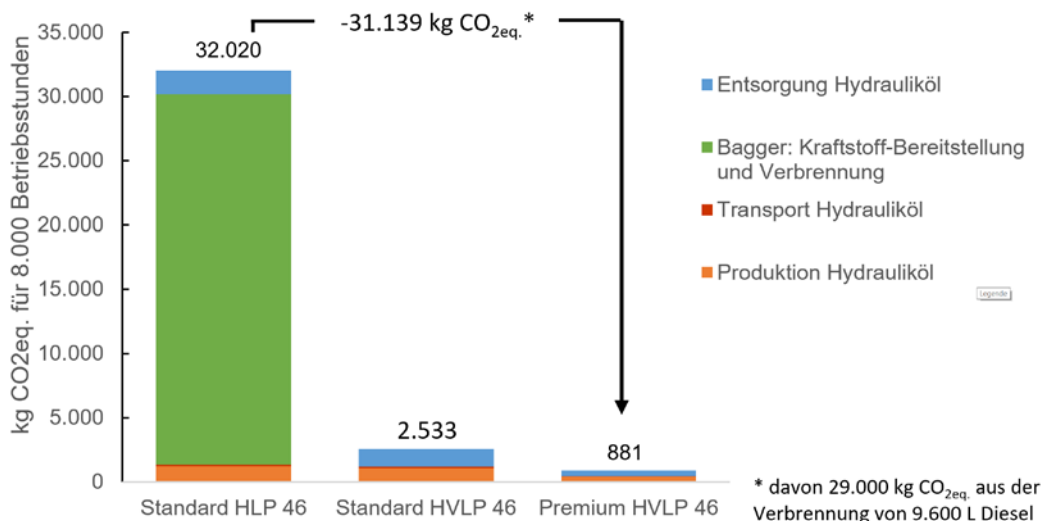


Bild 13: Lebenszyklusanalyse „Hydraulikfluide“ – Öko-Effizienz-Analyse von FUCHS und BASF. Differentielle Darstellung: Kraftstoff dominiert mit >99% die CO₂-Emissionen [105]

²⁹ Der PCF erfasst die CO₂- und Treibhausgas-Emissionen eines Produkts oder einer Dienstleistung in den einzelnen Phasen des Produkt-Lebenszyklus, wie Rohstoffe, Herstellung, Transport, Nutzung und Entsorgung, also über den gesamten Lebenszyklus (Cradle-to-Grave)..

führt [106]. Verglichen wurde das Einbereichsfluid HLP 46 mit dem zuvor beschriebenen HVLP 32. Für die Nutzungsphase relevant waren der Stromverbrauch sowie die Entsorgung des Öles. Die Lebensdauer wurde für beide mit 8.100 Stunden angenommen, obwohl das HVLP eine deutlich längere Nutzungsdauer ermöglicht. Im Endergebnis verdeutlicht Bild 14 Effizienzsteigerungen von ca. 3%, wobei je nach Betriebszyklus die Spannweite 2,4% bis 4,4% beträgt. In der Lebensdaueranalyse ergaben sich, je nach Betriebszyklus, daraus 1 bis 5 % an CO_{2eq}-Einsparungen ergeben.

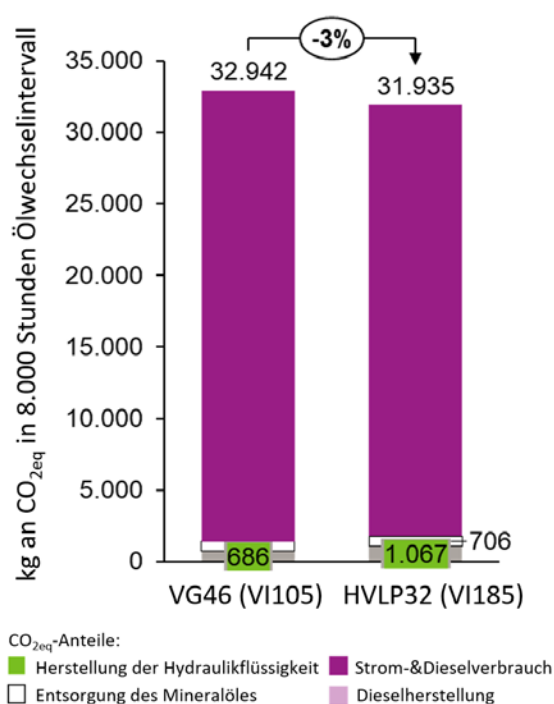


Bild 14: Lebensdaueranalyse für ein HLP 46 Einbereichsöl und ein hochscherstabiles HVLP 32 mit sehr hohem Viskositätsindex in Anwendungsfall Spritzgießmaschine über 8.100 Stunden [104,106]

Die CO_{2eq}-Ersparnis nach 8.100 Stunden durch das HVLP32 gegenüber dem HPL46 beträgt 1,007 Tonnen CO_{2eq}. (Siehe Bild 14) mit einem monetären Wert auf Basis der EU-ETS von ca. 90 €. Andererseits sparte das HVLP32 ca. 1.600 kWh, deren monetärer Wert ein Vielfaches vom Wert aktueller CO₂-Zertifikate beträgt.

4.4.3. MÖGLICHE, VOLKSWIRTSCHAFTLICHE CO₂- UND ENERGIE-EINSPARUNGEN IN HYDRAULIKSYSTEMEN

Bislang zählt oft nur der Einkaufspreis des Hydraulikfluides. Die Ergebnisse der aufgeführten Beispiele zeigen, dass die CO_{2eq}-Emissionen klar von den Energieverlusten aus der Nutzungsphase bestimmt sind, so dass der produktbezogene CO_{2eq}-Fußabdruck (PCF) der hochscherstabilen Mehrbereichshydraulikfluide mit einem hohen Viskositätsindex und deren Entsorgung dahinter zurücktreten. Die deutlichen Minderungen an CO_{2eq} durch die Energieeffizienz der hochscherstabilen Mehrbereichshydraulikfluide mit einem hohen Viskositätsindex valorisieren die höheren Beschaffungskosten im Betrieb mit erheblichen monetären Ersparnissen an Energiekosten und an eingesparten CO₂-Zertifikaten. Die Rückwärtskompatibilität dieser effizienten Hydraulikfluide ist für ältere, ineffizientere Maschinen gegeben, wo diese Hydraulikfluide eine noch größere Energieverbrauchs- bzw. CO₂-Minderung entfalten.

Ein effizienteres Hydrauliksystem hat per se geringere Energieverluste bzw. einen deutlich abgesenkten Stromverbrauch und dadurch eine geringere Wärmeentwicklung, wodurch eine geringere Betriebstemperatur entsteht und stationäre Produktionsanlagen deutlich weniger Wasser zur Kühlung benötigen. Die geringere Wärmeabstrahlung sorgt für angenehmere Arbeitsbedingungen in warmer Umgebung. Dadurch wird nicht nur die Gefahr reduziert, das System in einem Zustand unzureichender Schmierfilmdicke zu betreiben, wodurch Verschleiß und der Ressourcenverbrauch forciert würden, sondern auch die Alterung des Öles und der polymeren Dichtungen reduziert. In einer weiteren Folge steigt die Lebensdauer des Öles und der Maschine, dagegen sinkt die Gefahr von Leckagen. Aufwendige Reparaturen, die z.B. durch oxidative und polymere Ablagerungen an Stellventilen – mit den potentiellen Folgen eines Komplettausfalls der Maschine – erforderlich sein können, werden dadurch signifikant seltener erforderlich.

Untersuchungen von Spritzgießmaschinen unterschiedlicher Hersteller sowie weiterer Maschinen- und Anlagentypen wie Pressen, Knetern und Werkzeugmaschinen ergeben eine durchschnittliche Einsparung von 3-10 % [106,107] durch hochscherstabilen Mehrbereichshydrau-

Energiebedarf Deutschland 2017

Anteile von Druckluft, Stationär- und Mobilhydraulik (in TWh)

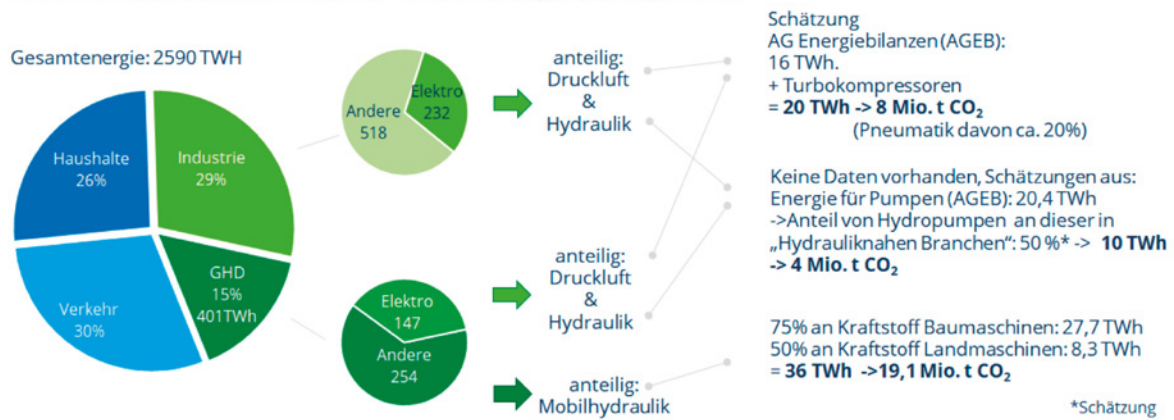


Bild 15: Anteiliger Energiebedarf in Hydrauliksystemen getrennt nach Fluidtechnik und Pneumatik in Deutschland und dessen CO₂-Emissionen [108]

likfluids. In stationären Anwendungen wird bislang so gut wie kein effizientes Hydraulikfluid verwendet. Daraus lässt sich ein Einsparpotential durch fluidtechnische Maßnahmen allein für stationäre Hydraulik von 1,3 TWh ableiten.

Aus dem Betrieb fluidtechnischer Systeme wurden 2017 ca. 29,5 Megatonnen CO₂ freigesetzt (Siehe Bild 15) [108]. Mobile Maschinen, in denen große Energiemengen für Fahr- und Arbeitsantriebe hydraulisch umgesetzt werden, verbrauchen in Deutschland 2017 ca. 62 TWh Kraftstoff [108]. Die Größenordnung des Energiebedarfs von Maschinen und Anlagen, die mit fluidtechnischen Systemen betrieben werden liegt im Jahr im höheren zweistelligen TWh-Bereich, was in etwa 10% der deutschen Bruttostromverbraucher von 600 TWh (2017) entspricht. Der Effizienzgewinn durch den Wechsel zu einem energieeffizienten Hydraulikfluid, wie oben beschrieben, wurde in einer Vielzahl von Feldtesten mit mobilen Baumaschinen unterschiedlicher Größe und Hersteller mit durchschnittlich 10 % ermittelt [106,109]. Allerdings wird bereits ein Teil der mobilen Arbeitsmaschinen mit effizienten Fluiden betrieben, weshalb hier nur 80 % des Kraftstoffverbrauches als Basis herangezogen werden. Da die beschriebenen Einsparpotentiale zwar auch für Erntemaschinen gelten, nicht jedoch für Traktoren, die den größten Teil der Landmaschinen ausmachen, wird der Verbrauch der Landmaschi-

nen nicht berücksichtigt. So ergibt sich ein Einsparpotential durch fluidtechnische Maßnahmen von 2,2 TWh für mobile Arbeitsmaschinen.

Die Studie des Oak Ridge National Laboratory (ORNL) [110] ergab, dass 2008 fluidtechnische Systeme in den USA zwischen 1,52 und 2,42 Quads³⁰ (1,60 bis 2,55 Exajoules) an Energie verbrauchten und zwischen 259 und 317 Megatonnen CO₂ emittierten, von denen

- Mobilhydraulik zwischen 0,4 und 1,3 Quads/Jahr verbrauchte und zwischen 26 und 92 Megatonnen CO₂ erzeugte,
- Industriehydraulik etwa 1,1 Quads/Jahr verbrauchte und 196 Megatonnen CO₂ pro Jahr erzeugte und
- die Hydrauliksysteme in der Luft- und Raumfahrt etwa 0,02 Quads/Jahr verbrauchte und 1,7 Megatonnen CO₂ erzeugte.

Der Anteil der fluidtechnischen Systeme in den USA betrug 2008 1,5-2,6 % des Primärenergieverbrauchs von 98,7 Quads und 4,5-5,5 % der energiebezogenen CO₂ Emissionen von 5,745 Gigatonnen CO_{2eq}. Somit offenbaren die Studien des ORNL und des Umweltbundesamtes [108] einen vergleichbaren Anteil von fluidtechnischen Systemen zwischen 4,4% bis 5,4% an den CO₂-Gesamtemissionen.

³⁰ Quad= Quadrillion (10¹⁵) BTU. BTU ist die Abkürzung für British Thermal Unit(s). 1 Quad = 1,0550559 Exajoule.

4.5. OPTIMIERTE MOTORENÖLE ZUR REIBUNGSMINDERUNG

Mit einer Absatzmenge von 225.000 Tonnen stellen Motorenöle in Deutschland immer noch mit Abstand die größte Absatzmenge in Inland aller Schmierstoffarten von etwa 930.000 Tonnen in 2022 dar.

Wesentliche Triebfeder für die Weiterentwicklung von Motorenölen war in den letzten Jahren die Reibungsminderung bzw. Effizienzerhöhung. Ein Blick auf Reibungsverluste bei Ottomotoren kann exemplarisch Hinweise auf Optimierungspotenziale geben, wobei die Zahlen je nach Motorkonstruktion auch stärker abweichen können:

Kolbengruppe	25-30 %
Pleuellager	15-20 %
Kurbelwellenlager	12-18 %
Zylinderkopf (Ventile + Nockenwelle)	5-10 %
Pumpverluste	5-10 %
Hilfsaggregate	15-35 %

Insgesamt betragen die mechanischen Reibungsverluste etwa 15-20% der Motorleistung. Diese Daten wurden mit Hilfe elektrisch geschleppter Motoren(-komponenten) ermittelt. Die Summe der Verluste an jedem einzelnen Reibkontakt ergibt – stark abhängig von den Betriebsbedingungen – den Gesamtverlust.

Hinter den genannten Tribokontakten stehen unterschiedliche Materialpaarungen, Flächenpresungen und Kontaktgeometrien. Bei der Optimierung eines Schmierstoffs in Richtung gesteigerter Energieeffizienz wird man sich also auf die großen Verluststellen konzentrieren.

Für Verbrennungsmotoren gilt die grobe Aufteilung: 1/6 bis 1/3 der Reibungsverluste liegen im Bereich der Mischreibung und 2/3 im Bereich der Flüssigkeitsreibung – auch dies zeigt die Wichtigkeit der Stellschraube „Viskosität“ für weitere Verbrauchminderung.

4.5.1. RHEOLOGISCHE ANSÄTZE ZUR REIBUNGSMINDERUNG

Der Klassiker unter den effizienzsteigernden Maßnahmen für Schmierstoffe ist daher die Viskositätsabsenkung. Viskosität als „innere Reibung“ interpretiert macht anschaulich, warum hier ein wichtiges Potenzial zu vermuten ist. Eine Viskositätsabsenkung führt in hydrodynamischer Schmierung direkt zu geringerer Verlustleistung, kann aber bei höheren Lasten oder geringeren Geschwindigkeiten zu vermehrter Mischreibung, ggf. zu verstärktem Verschleiß führen. Als rheologische Einflussparameter auf elasto-hydrodynamische (EHD) und hydrodynamische Reibung lassen sich nennen:

- » geringe Viskosität (z.B. Motorenöl-Klassen³¹ SAE 0W-20, 0W-16, 0W-12)
- » hoher Viskositätsindex (160 bis >200)
- » geringe Scherviskosität HTHSV (z.B. < 2 mPa·s bei PKW-Motorenölen).

Die letztgenannte, die High-Temperature-High-Shear Viskosität (HTHSV) stellt die wesentliche viskosimetrische Größe zur Verbesserung des Kraftstoffverbrauches dar. In den ASTM-Normen D4683 und D4741 wird die dynamische Viskosität bei 150°C und einem hohen Schergefälle von 10⁶ s⁻¹ gemessen. Dem Trend vorausgehend sind viskositäts-abgesenkte SAE-Klassen bereits seit längerem in der SAE J300 festgelegt:

SAE Klasse	Kin. Viskosität @ 100°C [mm ² /s]		HTHS Viskosität @ 150°C [mPa·s]
SAE 20	≥ 6,9	< 9,3	≥ 2,6
SAE 16	≥ 6,1	< 8,2	≥ 2,3
SAE 12	≥ 5,0	< 7,1	≥ 2,0
SAE 8	≥ 4,0	< 6,1	≥ 1,7

Eine Absenkung der Viskosität verringert, insbesondere unter Schergefälle bei strukturviskosen, nicht-Newton'schen Fluiden, die minimale Schmierfilmdicke. Dadurch ergeben sich zwei Zusammenhänge: Eine direkte Beeinflussung der Reibungsverluste und eine Erhöhung der Verschleißbeträge in den Tribosystemen. Aber die Schmierfilmdicke hängt nicht nur von der Scherviskosität ab, sondern auch von anderen Fluid-Kenngrößen, z.B. dem Druck-Viskositätskoeffizienten.

³⁰ Wo wird die untere Grenze für die Viskositätsabsenkung liegen? Das SAE 8 hat eine HTHS-Viskosität (HTHS150°C) von >1,7 mPa·s, was nahe an der dynamischen Viskosität von Wasser mit 1 mPa·s bei 20°C liegt. Zweitens, je kleiner die Viskosität, desto kleiner wird die Molmasse des Grundölmoleküls und im Gegenzug steigt die physikalische NOACK-Verdampfung an. Kürzlich wurde eine neue Viskositätsklasse SAE 4 mit einer HTHS-Viskosität von > 1,4 mPa·s vorgeschlagen.

Neben der Viskosität bei einer gegebenen Temperatur beschreibt vor allem der Viskositäts-Druck-Koeffizient α als Parameter die Dicke eines hydrodynamischen Schmierfilmes [h_{\min}] unter hohen, statischen Drücken, die im Schmier-spalt auftreten. Flüssigkeiten weisen eine teilweise starke Abhängigkeit der Viskosität vom Druck auf.

Für die Beurteilung der hydrodynamischen Tragfähigkeit reicht allein die HTHS also nicht aus, sondern $\alpha(T)$ muss als zusätzliche Größe mit herangezogen werden [111]. Der Druck-Viskositätskoeffizient a nimmt mit ansteigender Temperatur ab, wobei dieser Abfall bei Syntheseestern gegenüber Kohlenwasserstoffen geringer ausfällt. Flüssigkeiten mit identischer kinematischer Viskosität (ν) können demgemäß sehr unterschiedliche Schmierfilmdicken ergeben, die abhängen von

- » Druck-Viskositäts-Koeffizient (→ $V(p)$ -Verhalten)
- » Schergefälle (HTHSV)
- » Viskositätsindex (→ $V(T)$ -Verhalten).

Bei Anwendung von Syntheseestern oder von Polyglykolen können deren tendenziell geringere α -Werte (im Vergleich mit Kohlenwasserstoffen) zu einer Verringerung der Schmierfilmdicke führen, die wiederum bei hohen Öltemperaturen durch ihre hohen Viskositätsindizes bei hohen Öltemperaturen kompensiert wird.

Nun hat die Viskositätsabsenkung in einem gegebenen Triboregime ihre Grenze in ansteigenden Anteilen an der Mischreibung und am Verschleiß. Bei einer Absenkung des a -Wertes muss eine werkstoffbasierte Strategie zur Kompensation des durch die Verringerung der Schmier-spalthöhe ansteigenden Verschleißbeträge infolge größerer Mischreibungsanteile bereitgestellt werden. Durch Einsatz bestimmter Additive lässt sich aber (in gewissen Grenzen) der Übergang zur Mischreibung verschieben und damit der Zielkonflikt entschärfen, wodurch geringere Verlustleistung bei geringem Verschleiß möglich wird.

An dieser Stelle muss die Perspektive auf das Gesamtsystem wechseln, verstanden als Zusammenspiel der Konstruktionselemente Körper – Schmierstoff – Gegenkörper, um die Viskositätsgrenzen noch weiter hinausschieben zu können.

In Bild 16 ist der Einfluss einer Viskositätsabsenkung auf den Kraftstoffverbrauch gut zu erkennen. Es wurden verschiedene Grundöleinstellungen bei weitgehend gleicher Additivierung in einem Vollfahrzeug (BMW 320d, Motor: N47) nach dem Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) geprüft. Ausgehend von einem typischen SAE 10W-40 bedarf eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs um ca. 4% eine Absenkung der Scherviskosität (HTHSV) um 1 mPa·s (oder etwa um drei SAE-Viskositätsklassen). Eine Absenkung der HTHSV um 1 mPa·s über das „5W-30“ low hin zu einem „0W-12“ reduziert den Kraftstoffverbrauch nochmals um 2%. Man erkennt, dass eine reine Viskositätsabsenkung hier an eine konstruktive Grenze stößt – eine weitere Verbrauchsminderung ist nur durch innermotorische Maßnahmen in Verbindung mit einer angepassten Additivierung des Motorenöls möglich.

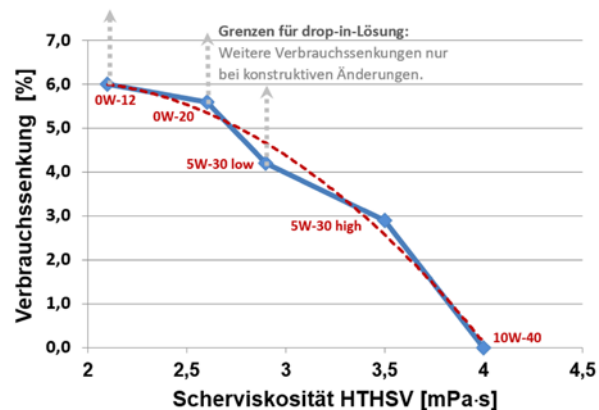


Bild 16: Kraftstoffeinsparung in Abhängigkeit der Viskosität (HTHSV) bei identischer Additivierung – Messungen nach NEFZ mit Vollfahrzeug BMW 320d auf dem Rollenprüfstand; Motor: N47 [112]

Im Ergebnis lassen sich trotz des bereits erreichten, niedrigen Reibungsniveaus moderner Leichtlauf-Motorenöle weitere Kraftstoffeinsparungen erreichen: Zwischen 2% und 4% im WLTP (Worldwide harmonized Light Vehicles Test Procedure) im Vergleich mit einem SAE 0W-20-Öl werden durch Schmierungstechnologien für realistisch gehalten [113], wobei allerdings weiter verbrauchsoptimierte Motorenöle zumeist sehr motoren-spezifisch sind.

4.5.2. BEITRAG VON MOTORÖLEN ZUR CO₂-BILANZ

Die durchschnittlichen CO₂-Emissionen aller Neufahrzeuge in der EU28 ab 2019 lag bei 122,3 g CO₂/km. Bei einer Fahrleistung von 30.000 km ist ein Ölwechsel erforderlich, wobei 3.669 kg CO₂ ausgestoßen und etwa 10 Liter Motoröl verbraucht werden. Mit höherwertigem Motoröl wäre ein Ölwechsel in einem Intervall von 30.000 km machbar. Motoröle mit besonders niedriger Viskosität und hohem Viskositätsindex sparen über ein 0W-30-Motorenöl >1% Kraftstoff und mehr bei besonders niedrigviskosen Motorölen mit hohem Viskositätsindex. Bei einer Fahrleistung von 30.000 km können die CO₂-Emissionen um 36,69 kg CO₂ gesenkt werden, wenn man von einer Kraftstoffeinsparung von 1 % ausgeht und der Ölwechselintervall der 5 L Motorenöl (~4 kg) sich verdoppelt.

Nach einer von NESTE Oyj [114] durchgeführten Studie beträgt der CO₂-Fußabdruck der Motorölproduktion aus fossilen Ressourcen (Gruppe I-III, PAO, GTL) 1,63 kgCO_{2eq}/kg plus 3,2 kgCO_{2eq}/kg, wenn es thermisch verwertet wird. Diese Werte sind als grobe Anhaltspunkte anzusehen; im Einzelfall können konkrete Motorenöle nicht unerheblich davon abweichen.

Auf Basis der aufgeführten Zahlen ergeben sich bei einem verdoppelten Wechselintervall für die 5 l Motorenöl (~4 kg) auf 30.000 km Einsparungen von etwa 6,52 kgCO_{2eq} (ohne thermische Verwertung). Durch ein Motorenöl mit 2% Kraftstoffeinsparung und Verdoppelung des Ölwechselintervalls können demnach im Durchschnitt mindestens 79,9 kg CO₂ über 30.000 km eingespart werden.

Die hier angenommenen 2% Kraftstoffeinsparung entsprechen 73,4 kg CO₂ und damit – unter Verwendung der Emissionsfaktoren für Kraftstoffe 31,6 L Benzin bzw. 27,0 L Diesel. Dies muss mit den lokalen Kraftstoffpreisen multipliziert werden. Dazu kommt noch der monetäre CO₂-Wert reibungsarmer Motorenöle mit verlängertem Ölwechselintervall (5 Liter (~4 kg) und 2% FE), der sich auf >7,34 € (ohne thermische Verwertung) berechnet, wenn man einen CO₂-Preis im EU-ETS von 100 €/tCO₂ annimmt. Löhne und sekundäre Einsparungen sind hier nicht berücksichtigt. Die Attraktivität und damit die Marktdurchdringung

von Leichtlaufmotorenölen mit verlängerter Betriebszeit hängen ganz wesentlich vom monetären Wert der eingesparten Kraftstoffmenge und der CO₂-Bepreisung ab. Aktuell dominieren die direkten Kraftstoffkosten und der monetäre Wert der damit verbundenen CO₂-Emissionen fallen derzeit weniger ins Gewicht.

Auf gesellschaftlicher Ebene würde die Gesamt-reduzierung der CO₂-Emissionen von 342 Millionen Personenkraftwagen (EU, EFTA, GB) im Jahr 2019, die ca. 15.000 km p.a. fahren, eine Einsparung von mindestens 12,5 Megatonnen CO₂ bedeuten, wenn man von einer Kraftstoffeinsparung von 2 % nur durch viskosimetrische Maßnahmen ausgeht.

Da das Forschungscluster „Low Friction Power Train“ [74] der FVA/FVV die Auswirkungen von viskosimetrischen Maßnahmen bzw. von Schmierstoffen mit niedriger Viskosität und/oder hohem Viskositätsindex nicht berücksichtigt hatte, kämen die von diesem Forschungscluster ermittelte, maximal mögliche Reduzierung [74] des Kraftstoffverbrauchs von 12,1 % (bzw. 0,945 l/100km) durch mehrere Maßnahmen zur Reibungsreduzierung bei Fahrzeugen hinzu (Siehe Kapitel 4.1).

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Reibungsreduzierung und Langlebigkeit sind „industrielle Strategien zur Defossilisierung“ oder „gesellschaftlichen CO₂-Sequestrierung“, weil CO_{2eq}-Einsparungen durch Tribologie überall und zu jeder Zeit stattfinden sowie die nötige Energie zur Bewegung von Maschinenelementen upstream nicht erzeugt werden müssen. Tribologie ermöglicht eine globale, mittel- bis langfristige Kohlendioxid-Minderungen in der Nutzungsphase (downstream) von jährlich 3,9-11,3 Gigatonnen CO_{2eq}. und sollte deshalb als „negative Emissionstechnologien“ (NET) eingestuft werden, weil sie im Betrieb weniger CO₂ entstehen lässt und als leicht implementierbare „Drop-in-Lösungen“ vermeidbare Emissionen generiert. Reibung, betrachtet als praktisch irreversibler Verlust höherwertiger Energieformen, ist proportional zu den Kohlendioxidemissionen. Die Technologien zur Reibungsminderung sind vorhanden und deren Implementierung zur Minderung von CO₂ stellt ein einfach erreichbares Ziel dar

(low hanging fruits). Ebenso verfügbar sind Technologien zur Lebensdauerverlängerung bzw. zum Verschleißschutz, wodurch der Materialhunger stark sinken und der damit verbundene CO₂-Rucksack ebenfalls signifikant abnehmen könnte.

Tribologie ist deshalb eine technische und politische Handlungsoption zur Entfernung von CO₂ in der Atmosphäre mit hohen Umsetzungschancen, da sie insbesondere in der Nutzungsphase wirkt, weil in der Nutzungsphase (downstream) eingespartes CO₂ nicht in der Erzeugungsphase (upstream) erzeugt werden muss. Deshalb sollten Politik und Gesellschaft einen klaren Fokus auf die Angebote der Tribologie haben und deren Implementierung einfordern.

Wohlstand und Bevölkerungswachstum heizen den Energie- und Materialhunger an. Folglich gibt es keine Alternative zur Annahme der Angebote der Tribologie zur Minderung des Energiebedarfs und zur Steigerung der Langlebigkeit, da nur so aus den vorhandenen und von der Natur kostenlos abgegebenen Ressourcen mehr Nutzwerte für alle generiert werden können.

DANKSAGUNGEN

Frau Dr. Ruth Bieringer und Herrn Hans Kloos von Freudenberg FST GmbH gilt besonderer Dank für die Überarbeitung des Kapitels „4.2“.

BIBLIOGRAPHISCHE REFERENZEN ZUM NACHLESEN

- [1] Statistical Review on World Energy, 69th edition, 2020, BP p.l.c.
- [2] T. Kober, H.-W. Schiffer, M. Densing and E. Panos, Global energy perspectives to 2060 – WEC’s World Energy Scenarios 2019, Energy Strategy Reviews 31 (2020) 100523
- [3] “EIA Projects Nearly 50% Increase in World Energy Usage by 2050, Led by Growth in Asia - Today in Energy - U.S. Energy Information Administration (EIA).” Independent Statistics and Analysis, 24 Sept. 2019, www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=41433 .
- [4] United States Congress, Resolutions #916 of September 28, 2016, <https://www.govtrack.us/congress/bills/114/hres916> and #306 of May 2nd, 2017 by the “House of Representatives“, <https://www.govtrack.us/congress/bills/115/hres306>
- [5] K. Holmberg and A. Erdemir, Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions, *FRICITION* 5(3): 263–284 (2017)
- [6] K. Holmberg and Erdemir, A., The impact of tribology on energy use and CO₂ emission globally and in combustion engine and electric cars, *Tribology International*, 2019, Vol. 135, p. 389-396
- [7] M. Woydt, T. Gradt, T. Hosenfeldt, R. Luther, A. Rienäcker, F. Wetzels and C. Wincierz, Tribologie in Deutschland - Querschnittstechnologie zur Minderung von CO₂-Emissionen und zur Ressourcenschonung, pHerausgeberr: Gesellschaft für Tribologie, www.gft-ev.de, Adolf-Fischer-Str. 34, D-52428 Jülich, September 2019, <https://www.gft-ev.de/wp-content/uploads/GfT-Study-Tribology-in-Germany.pdf>
- [8] M. Woydt, The importance of tribology for reducing CO₂ emissions and for sustainability, *WEAR*, Vol. 474–475, 15 June 2021, 203768, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.203768>
- [9] Emissions Gap Report 2019, November 2019, United Nations Environment Program, United Nations Avenue, Gigiri, PO Box 30552, 00100 Nairobi, Kenya, ISBN: 978-92-807-3812-4, <https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020>
- [10] United Nation, 70. General Assembly, Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, resolution adopted on 25. September 2015
- [11] O.E.C.D., Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences, OECD Publishing, 2019, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en> .
- [12] United Nations Environment, Global Resource outlook 2019, A Report of the International Resource Panel, ISBN: 978-92-807-3741-7, <https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/Overview/>
- [13] M. Woydt, M. Bäse, T. Hosenfeldt, R. Luther, Chr. Scholz, J. Schulz, Chr. Wincierz, Verschleißschutz und Nachhaltigkeit als Querschnittsherausforderungen, Januar 2021, <https://www.gft-ev.de/en/tribology-in-germany-wear-protection-and-sustainability-as-cross-sectional-challenges/>
- [14] M. Woydt, Material efficiency through wear protection – The contribution of tribology for reducing CO₂ emissions, *WEAR*, *WEAR* 488–489 (2022) 204134, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2021.204134>
- [15] Emissions Gap Report 2019, November 2019, United Nations Environment Program, ISBN: 978-92-807-3766-0
- [16] United Nations Environment, 12.2 Material footprint (MF) and MF per capita, and material footprint per GDP; Excel data file: https://environmentlive.unep.org/indicator/index/12_2_1

- [17] S. A. Miller, The role of cement service-life on the efficient use of resources, *Environ. Res. Lett.* 15 (2020) 024004, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab639d>
- [18] US Cement industry annual yearbook 2019, Portland Cement Association, 5420 Old Orchard Road, Skokie, Illinois 60077-1083, USA
- [19] The bitumen industry – a global perspective, production, chemistry, use, specification and occupational exposure, third edition, information series no. 230, ISBN 978-1-934154-73-1, Asphalt Institute, 2696 Research Park Drive, Lexington, KY 40511-8480, USA, https://www.eurobitume.eu/public_downloads/General/The%20Bitumen%20Industry%203rd%20edition.pdf, 2015
- [20] J. Teter et al., *Tracking Transport 2020*, International Energy Agency, 9 rue de la Fédération F-75739 Paris Cedex 15, France, <https://www.iea.org/reports/tracking-transport-2020>, May 2020
- [21] D. Panasiyk, B. Laratte, S. Remy, Steel stock analysis in Europe from 1945 to 2013, *Procedia CIRP* 48 (2016) 348 – 351
- [22] F. Passarini, L. Ciacci, P. Nuss and S. Manfredi, Material Flow Analysis of Aluminium, Copper, and Iron in the EU-28, EUR 29220 EN, Publications Office of the European Union, Rue Mercier, 2985 Luxembourg, Luxembourg, 2018, ISBN 978-92-79-85744-7, <https://doi:10.2760/1079>, JRC111643
- [23] Iron and Steel Technology Roadmap - Towards more sustainable steelmaking, International Energy Agency, 9 rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15, France, October 2020, <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>
- [24] Plastics – The Facts 2019, An analysis of European plastics production, demand and waste data, PlasticsEurope Deutschland e. V., Mainzer Landstraße 55, 60329 Frankfurt am Main, Germany, <https://www.plasticseurope.org/de/resources/publications/1804-plastics-facts-2019>
- [25] D. Turtell et al., *Resources and Energy Quarterly*, - Aluminium, Alumina and Bauxite-, March 2019, Vol. 9, no. 1, p. 93-99, Department of Industry, Science, Energy and Resources, GPO Box 2013, Canberra, ACT, 2601, Australia, ISSN 1839-5007, www.industry.gov.au/req
- [26] Global 2020 End Use Data Set, International Copper Association Ltd., 799 9th St NW, Suite 1000, Washington, DC 20001, USA, <https://copperalliance.org/trends-and-innovations/data-set/>, 2020
- [27] Primary Uses of Tungsten, ITIA, 1st Floor, 454-458 Chiswick High Road, London W4 5TT, UK, <https://www.itia.info/tungsten-primary-uses.html>, 2011
- [28] G. Charalampides, K. I. Vatalis, B. Apostolopoulos and B. Ploutarch-Nikolas, Rare Earth Elements: Industrial Applications and Economic Dependency of Europe, *Procedia Economics and Finance* 24 (2015) 126 – 135
- [29] Y. Yang, A. Walton, R. Sheridan, K. Güth, R. Gauß, O. Gutfleisch, M. Buchert, B.-M. Steenari, T. Van Gerven, P. T. Jones and K. Binnemans, REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review, *J. Sustain. Metall.* (2017) 3:122–149
- [30] C. Schmidt et al., *The Circularity Gap Report 2020*, January 2020, Circular Economy, Mauritskade 63, NL-1092 AD Amsterdam, Netherlands, <https://www.circularity-gap.world/2020>
- [31] Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council, 21 October 2009, framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=celex%3A32009L0125>
- [32] Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex%3A32008L0098>

- [33] Richtlinie (EU) 2018/851 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Mai 2018 zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32018L0851>
- [34] C. Aoki-Suzuki, I. Miyazawa, M. Kato and E. Fushimi (eds.), *Following up G7 Progress on Toyama Framework on Material Cycles and 5-year Bologna Roadmap, A synthesis report as a follow-up activity of the G7 Alliance on Resource Efficiency*, Ministry of the Environment, Japan, June 2019, <https://www.iges.or.jp/en/pub/our-actions-resource-efficient-future-0/en>
- [35] Railway Forum 2021, Schaeffler gewinnt Railsponsible Supplier Award 2021, Pressemitteilung vom 09.09.2021, <https://www.schaeffler.com/de/medien/pressemitteilungen/pressemitteilung-details.jsp?id=87724745>
- [36] H. Mahlkow, T. Petersen und J. Wanner, Folgen eines höheren CO₂-Preises in der EU – wer gewinnt, wer verliert?, *Wirtschaftsdienst* 101, 870–877 (2021). <https://doi.org/10.1007/s10273-021-3048-5>
- [37] World Bank. *State and Trends of Carbon Pricing 2021*. Washington, DC: World Bank, May 2021. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35620>
- [38] A. Quinet, *The Value for Climate Action - A shadow price of carbon for evaluation of investments and public policies*, France Stratégie, February 2019, <https://www.strategie.gouv.fr/english-articles/value-climate-action>
- [39] Technical Support Document: Social Cost of Carbon, Methane, and Nitrous Oxide Interim Estimates under Executive Order 13990; Interagency Working Group on Social Cost of Greenhouse Gases, United States Government, February 2021
- [40] K. Rennert et al., *The Social Cost of Carbon: Advances in Long-Term Probabilistic Projections of Population, GDP, Emissions, and Discount Rates*, *Brookings Papers on Economic Activity*, Fall 2021, p. 223-275. <https://www.rff.org/publications/working-papers/the-social-cost-of-carbon-advances-in-long-term-probabilistic-projections-of-population-gdp-emissions-and-discount-rates/>
- [41] K. Rennert et al., *Comprehensive evidence implies a higher social cost of CO₂*, *NATURE* 610, 687–692 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41586-022-05224-9>
- [42] A. Matthey und B. Bünger, *Methodenkonvention 3.1 zur Ermittlung von Umweltkosten – Kostensätze, Stand 12/2020*, Umweltbundesamt, DE-06844 Dessau-Roßlau, ISSN 1862-4804, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/methodenkonvention-umweltkosten>
- [43] C. Hepburn, Y. Qi, N. Stern, B. Ward, C. Xie and D. Zenghelis – *Towards carbon neutrality and China’s 14th Five-Year Plan: Clean energy transition, sustainable urban development, and investment priorities*, *Environmental Science and Ecotechnology* 8 (2021) 100130, <https://doi.org/10.1016/j.ese.2021.100130>
- [44] International Monetary Fund; *People’s Republic of China - 2021 Article IV Consultation*, Press Release, staff report and statement by the executive director for the people’s republic of China, , Country Report No. 22/21, 28.01.2022,
- [45] 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
- [46] IPCC, *Global Warming of 1.5°C*. Working Group I Technical Support Unit, [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tig-

- nor, and T. Waterfield (eds.)) , October 2018, Chapter 2, <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- [47] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration: A Research Agenda, 2019. Washington, DC: The National Academies Press. ISBN: 978-0-309-48452-7. <https://doi.org/10.17226/25259> .
- [48] G. Henderson et al., Greenhouse gas removal, September 2018, The Royal Society, DES5563_1, ISBN: 978-1-78252-349-9, <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/greenhouse-gas-removal/>
- [49] K. Levin and A. Steer, Fighting Climate Change with innovation, FINANCE & DEVELOPMENT, 09-2021, p. 23-25
- [50] P. Friedlingstein, Global Carbon Budget 2020, Earth Syst. Sci. Data, 12, 3269–3340, 2020, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>
- [51] Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.), IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Chapter 6, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2005, ISBN 978-0-521-86643-9, <https://www.ipcc.ch/report/carbon-dioxide-capture-and-storage/ocean-storage/>
- [52] Blunden, J. and T. Boyer, Eds., State of the climate 2020, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 102, No. 8, August 2020 Si–S475, <https://doi.org/10.1175/2021BAMSStateoftheClimate.1>
- [53] Watson, A.J., Schuster, U., Shutler, J.D. et al. Revised estimates of ocean-atmosphere CO₂ flux are consistent with ocean carbon inventory. Nature Communication 11, 4422 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18203-3>
- [54] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, A Research Strategy for Ocean-based Carbon Dioxide Removal and Sequestration (2021), Washington, DC. The National Academies Press. ISBN 978-0-309-08761-2, <https://doi.org/10.17226/26278>
- [55] Cook-Patton, S.C., Leavitt, S.M., Gibbs, D. et al., Mapping carbon accumulation potential from global natural forest regrowth. NATURE 585, 545–550 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2686-x>
- [56] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine; Negative Emissions Technologies and Reliable Sequestration - A Research Agenda, National Academies Press, Washington D.C., USA, 2019, 978-0-309-48452-7, <https://doi.org/10.17226/25259>
- [57] H. de Coninck and Sally M. Benson, Carbon Dioxide Capture and Storage: Issues and Prospects, Annual Review of Environment and Resources, 2014, 39:243–270, <https://www.annualreviews.org/doi/abs/10.1146/annurev-environ-032112-095222>
- [58] P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.), Climate Change and Land. An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial eco-systems, August 2019, <https://www.ipcc.ch/srccl>
- [59] Strengthening and implementing the global response, Chapter 4, section 4.3.7. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report, 2018, <https://www.ipcc.ch/sr15/chapter/chapter-4/>
- [60] T. M. Lenton, The Global Potential for Carbon Dioxide Removal, Environmental Science and Technology, 2014, 38, p. 52-79

- [61] L. Draucker, Do We Need a Standard to Calculate “Avoided Emissions”? , 05.11.2013, <https://www.wri.org/insights/do-we-need-standard-calculate-avoided-emissions>
- [62] S. Russell, Estimating and reporting the comparative emission impacts of products, World Resources Institute, working paper, January 2019, <https://ghgprotocol.org/estimating-and-reporting-avoided-emissions>
- [63] Technical guidance for calculating scope 3 emissions (version 1.0); World Resources Institute, 2013, <https://ghgprotocol.org/scope-3-technical-calculation-guidance>
- [64] J. Raynaud et al., Carbon Compass, 23.11.2015, Kepler-Cheuvreux Financial Services, <https://www.iigcc.org/resource/carbon-compass-investor-guide-to-carbon-footprinting/>
- [65] Environmental Report 2019 – Toward the Toyota environmental challenge 2050, https://global.toyota/pages/global_toyota/sustainability/report/er/er19_en.pdf
- [66] Environmental Report 2020, TOYOTA Motor Corporation, October 2020, p. 38, https://global.toyota/pages/global_toyota/sustainability/report/er/er20_en.pdf
- [67] T. Hosenfeldt: It’s What’s on Top that Counts - Innovative Coating Technology for Customized Automotive and Aerospace Products, Keynote in: Advanced Coatings for Transportation. 57th Annual SVC Technical Conference, 2014, Chicago, USA.
- [68] Der BMW Group Bericht 2020, p. 344, https://www.bmwgroup.com/content/dam/grpw/websites/bmwgroup_com/ir/downloads/de/2021/bericht/BMW-Group-Bericht-2020-DE.pdf
- [69] On the road to carbon neutrality- Climate Report, RENAULT Group., April 2021, p. 52-53, <https://cdn.group.renault.com/.../climate-report-renault-group.pdf>
- [70] 2020 Sustainability Report, General Motors, p. 228, <https://www.gmsustainability.com>
- [71] Sustainability Report 2020, NISSAN Motor Corp., p. 222, <https://www.nissan-global.com/EN/SUSTAINABILITY/LIBRARY/SR/2020/>
- [72] Scope 3-Emissionen Mercedes-Benz Cars, <https://nachhaltigkeitsbericht.daimler.com/2020/anhang/gri-index.html>
- [73] Sustainability report 2020, Volkswagen AG, March 2021, p. 89, <https://annualreport2020.volkswagenag.com/group-management-report/sustainable-value-enhancement/sustainability.html>
- [74] K. Michaelis, J. Geiger, K. Moser, Stahl. K., J. Beulshausen, S. Pischinger, Low Friction Powertrain, General report of the research cluster Low Friction Powertrain, final report, FVV Heft 1000, 2013, Frankfurt am Main, Germany
- [75] Life-cycle analysis – a look into the key parameters affecting life-cycle CO₂ emissions of passenger cars, Concawe Review, Volume 27, Number 1, July 2018, <https://www.concawe.eu/publication/life-cycle-analysis-a-look-into-the-key-parameters-affecting-life-cycle-co2-emissions-of-passengers-cars/>
- [76] Carbon footprint report Battery electric XC40 Recharge and the XC40 ICEs, April 2020 – https://group.volvocars.com/news/sustainability/2020/~/_media/ccs/Volvo_carbonfootprintreport.pdf
- [77] A. Heislitz und E. Bock, Nachhaltigkeit von der Materialentwicklung bis zum Produkt, im Rahmen des Neuland Innovationstag am Karlsruhe Institute of Technology, www.kit-neuland.de, 06. Juli 2022, <https://www.youtube.com/watch?v=K5-fHDnz5KI>
- [78] <https://www.freudenberg.com/de/unternehmen/nachhaltigkeit-bei-freudenberg>
- [79] Neuberger, S., Bock, E., Haas, W., Lang, K.: CO₂-Einsparpotenziale durch Einsatz von gasgeschmierten Gleitringdichtungen, Fortschrittberichte VDI Nr. 777 „35. Internationales Wiener Motorensymposium, 8.-9.Mai 2014, Band 1, S. 248 – 272, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf, 2014

- [80] Müller, H. K., „Abdichtung bewegter Maschinenteile“, Waiblingen, Medienverlag Ursula Müller, 1990
- [81] Lebeck, A. O. “Principle and Design of Mechanical Face Seals”, New York/Chichester/Brisbane/Toronto/Singapore, John Wiley & Sons Inc., 1991
- [82] N.N., Gas-lubricated mechanical face seals reduce CO₂ emissions, White paper, Freudenberg Sealing Technologies GmbH & Co. KG, D-69465 Weinheim, Germany – <https://www.fst.com> › fst_whitepaper_levitex_en
- [83] Improvements to the definition of lifetime mileage of light duty vehicles, report ED 59296, RICARDO-AEA Ltd, 12.03.2015
- [84] Electric motors and variable speed drives, https://ec.europa.eu/info/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/energy-label-and-ecodesign/energy-efficient-products/electric-motors_en
- [85] P. Waide and C.U. Brunner, Energy efficiency policy opportunities for electric motor-driven systems, IEA, Paris, May 2011, <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-policy-opportunities-for-electric-motor-driven-systems>
- [86] Accelerating the Global Adoption of Energy-Efficient Electric Motors and Motor Systems, United Nations Environment Programme, September 2017, <https://united4efficiency.org/resources/accelerating-global-adoption-energy-efficient-electric-motors-motor-systems/>
- [87] H. Falkner and S. Holt, Walking the Torque, IEA, Paris, May 2011, <https://www.iea.org/reports/walking-the-torque>
- [88] ISO 14044, (2006), “Environmental Management – Life cycle assessment”
- [89] ISO 14067, (2018), “Greenhouse gases – Carbon footprint of products – Requirements and guidelines for quantification”
- [90] DIN EN 16258, (2013), “Methodology for calculation and declaration of energy consumption and GHG emissions of transport services (freight and passengers)”
- [91] 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)
- [92] Holmberg, K., Siilasto, R., Laitinen, T., Andersson, P., Jasberg, A., (2013), “Global energy consumption due to friction in paper machines”, Tribology International, 62, 58-77
- [93] K. Holmberg, P. Andersson and A. Erdemir, Global Energy Consumption due to Friction in Passenger Cars, Tribology International 47 (2012) 221-234,
- [94] Bakolas, V., Roedel, P, Koch, O., Pausch, M, “A first approximation of the global energy consumption of ball bearings”, Tribology Transactions, 2021, 64, 883-890.
- [95] SKF, “The SKF model for calculating the frictional moment”, <https://skf.com/go/17000-B5>
- [96] Koch, O., Plank, R., Weber, J., (2009), “Analytisches Modell zur Berechnung und Minimierung der Wälzlagerreibung”, VDI-Fachtagung „Gleit- und Wälzlagerungen 2009“, VDI Berichte 2069, ISBN 978-3-18-092069-6, S. 67–78, Wiesloch, June 2009 (in German)
- [97] ISO 281, (2007), “Rolling Bearings – Dynamic load ratings and rating life”
- [98] ISO 16281, (2008), “Rolling bearings – Methods for calculating the modified reference rating life for universally loaded bearings”
- [99] ISO 15312, (2018), Rolling bearings – Thermal speed rating – Calculation”
- [100] H. Schillinger und T. Hosenfeldt: Maßgeschneiderte Beschichtungssysteme zur Reduzierung von Reibung und Verschleiß an Lagern und Präzisionsbauteilen, Galvanotechnik 9/2007, S. 2256-2258.

- [101] K. Peters and J. Iorillo, Global Bearings, Industry Study #3684, November 2018, Cleveland, USA, The Freedonia Group.
- [102] International Energy Agency (IEA), Global Energy & CO₂ Status Report, March 2019, <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019>
- [103] Nachhaltigkeitsbericht 2022, Schaeffler Gruppe, 07.03.2023, <https://www.schaeffler-nachhaltigkeitsbericht.de/2022/>
- [104] F.-O. Mähling, Impact of Lubricants on GHG emissions of construction and manufacturing equipment, 12. Kolloquium Mobilhydraulik, 18./19.10.2022, Technische Universität Braunschweig, <https://www.tu-braunschweig.de/mhk/programm>
- [105] Pressemitteilung, FUCHS und BASF kooperieren im Bereich ganzheitlicher Nachhaltigkeitsbewertung und nachhaltigerer Schmierstoffprodukte – Lebenszyklusanalyse von Hydraulikflüssigkeiten, 27.04.2020, <https://www.basf.com/at/de/who-we-are/sustainability/whats-new/sustainability-news/2020/fuchs-basf-collaboration-lca.html>
- [106] G. Huster, A. Smirnov, F.-O. Mähling, L. Voigt, C. Wincierz und T. Schimmel, Effizienzsteigerung einer Kunststoffspritzgießmaschine durch scherstabile HVLP-Fluide – Eine Langzeitstudie, O+P Fluidtechnik, 2022-03, p. 30-33
- [107] F. Makansi, J. Sossenheimer, L. Petruschke, C. Wincierz, M. Alibert, E. Abele, Influence Analysis of the Viscosity of Hydraulic Fluids on the Energy Consumption of Machine Tools, Proceedings 22nd International Colloquium Tribology, 28.-30.01.2020, pp. 166–167, ISBN: 978-3-943563-11-5
- [108] T. Radermacher, M. Merx, A. Sitte, V. Boyko und M. Unger: Potenzialstudie Energie-/Kosteneinsparung in der Fluidtechnik, Umweltbundesamt, April 2021, ISSN 1862-4359, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/potenzialstudie-energie-kosteneinsparung-in-der>
- [109] M. Alibert, T. Schimmel, The contribution of hydraulic fluid properties to hydraulic system efficiency, 20th International Colloquium Tribology, Esslingen, 12-14 January 2016, ISBN 978-3-943563-23-8
- [110] L.J. Love, E. Lanke and P. Alles, Estimating the impact (energy, emission and economics) of the U.S. fluid power industry, December 2012, ORNL/TM-2011/14, <https://www.osti.gov/biblio/1061537/>
- [111] R. Schmidt, G. Klingenberg and M. Woydt, Thermophysical and viscosimetric properties of environmentally acceptable lubricants, Industrial Lubrication and Tribology, 2006, Vol. 58, issue 4, p. 210-224
- [112] R. Luther und M. Harperscheid, Multifunktionstalent Motorenöl - Zielkonflikte bei der Reibungsminderung, Motortechnische Zeitschrift, 2016, Heft 12, 77. Jahrgang, p. 10-14
- [113] N. Hill, M. Parrett, R. Neiva, G. Hilton and S. Yucel, Lubricants' contribution to fuel economy, Ricardo Energy & Environment reference: ED12057, issue number 3, 20.06.2019
- [114] Neste prioritises sustainability, INFINEUM Insight, 13.08.2019, [https://www.infineuminsight.com/en-gb/\[/\]articles/base-stocks/neste-prioritises-sustainability/](https://www.infineuminsight.com/en-gb/[/]articles/base-stocks/neste-prioritises-sustainability/)

