

WiGeP-Positionspapier zum Thema

„Maschinenelemente – Zukunft gestalten durch Evolution“

Brunnen und Rad als älteste Erfindungen der Menschheit waren bereits vom Maschinenelement abhängig. Im Laufe der Jahre ermöglichten Seile als ältestes Maschinenelement zahlreiche Innovationen wie Ziehbrunnen, die Segelschiffahrt und später den Flugzeugbau. Maschinenelemente standen schon immer im Zentrum zahlreicher Innovationen. Mehr denn je ermöglicht die Weiterentwicklung von klassischen Maschinenelementen wie beispielsweise Zahnrädern und Lagern innovative Lösungen für Problemstellungen von morgen: eine Standortbestimmung.

1 MASCHINENELEMENTE SIND ÜBERALL

Im täglichen Sprachgebrauch nutzen selbst technophobe Personen an vielen Stellen Maschinenelemente, um ihre Meinung bildlich darzustellen. Redewendungen wie „Das Rad nicht neu erfinden“ oder „Sand im Getriebe“ sind allgegenwärtig, allgemein verständlich und akzeptiert. Auch die Symbolik der Maschinenelemente ist aus dem Alltagsleben nicht wegzudenken. Man stelle sich nur die Suche nach den Einstellungen am Smartphone ohne das stilisierte Zahnrad, das Mainzer Wappen ohne das Rad oder den Rotary-Club ohne die Maschinenelemente im Markenzeichen vor, Abbildung 1. Dass hinter vielen Maschinenelementen eine Jahrtausende überdauernde Entwicklung liegt und diese heute aus modernen Produkten des Maschinen- und Anlagenbaus nicht mehr wegzudenken sind, ist vielen nicht bewusst.

Dieser Beitrag der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung WiGeP analysiert die Evolution zweier ausgewählter Klassen von Maschinenelementen, formuliert eine Gesetzmäßigkeit zur Beschreibung deren Entwicklung im Sinne des Moore'schen Gesetzes und extrapoliert in die Zukunft. Während die Transistoren, für deren Architektur das Moore'sche Gesetz ursprünglich formuliert wurde [1],

inzwischen physikalisch die höchste räumliche Dichte erreicht haben, ist bei den Maschinenelementen durch die Möglichkeiten zur Synthese neuer Systemlösungen aus Sicht der Autoren noch vieles erreichbar. Trotz der sehr langen Historie einzelner Maschinenelemente werden diese stetig weiterentwickelt und die Digitalisierung bietet den Maschinenelementen hohes Potential für Innovationen.

2 KONTINUIERLICHE LEISTUNGSSTEIGERUNG

Die Evolution der Maschinenelemente und ihre Zukunft als Element der Gestaltung werden hier am Beispiel von Wälzlager und Verzahnungen analysiert. Durch die Lagerung als funktionale Einheit wurde vor ca. 6600 Jahren die Erfindung des Rades zu einer nachhaltigen Innovation, das Rad wurde durch die Lagerung zentriert und geführt, die wirkenden Kräfte wurden abgestützt, vgl. Abbildung 2 links. Ein modernes Radlager weist die gleichen Grundfunktionen auf, kann darüber hinaus die Antriebsleistung praktisch verlustfrei übertragen und liefert in vielen Fällen über spezifische Sensoren zudem hochaufgelöste Drehgeschwindigkeitsinformationen für das ABS-System.

Eine ähnliche Entwicklung ist am Beispiel der Linearführungen zu beobachten, Abbildung 3. Während vor ca.



Abbildung 1: Maschinenelemente im Alltag als Symbol für die Einstellungen am Smartphone, in der Heraldik am Beispiel des Mainzer Rades und als Symbol wohlthätiger Organisationen

4600 Jahren Holzrollen als Wälzkörper den Bau der Pyramiden erleichterten, sind mit modernen Führungen durch die Fortschritte in der Fertigungstechnologie für die gehärteten und präzisionsgeschliffenen Wälzkörper sowie die Vorspannung der Wälzkontakte Führungsgenauigkeiten im Bereich von Mikrometern möglich. Eine integrierte Positionsmessung kann die gleiche Genauigkeit sensorisch auflösen. Durch reibungsarme Dichtungen und optimierte Wälzkontakte konnten die Reibungsverluste in den letzten Dekaden kontinuierlich reduziert werden.

3 MOORE'SCHES GESETZ

Im Jahr 1965 traf Gordon Moore eine Vorhersage zur Entwicklung der Halbleitertechnik [1]. Seine Vorhersage wird als Moore'sches Gesetz bezeichnet und besagt, dass sich die Anzahl der Transistoren pro Flächeneinheit jedes Jahr verdoppeln wird, was einem

exponentiellen Anstieg entspricht. Das Moore'sche Gesetz hat sich bisher weitestgehend als korrekt erwiesen. Die weitere Verkleinerung von Transistoren dürfte in den kommenden Jahren jedoch an Grenzen stoßen. Für die Zukunft sind Alternativen zum herkömmlichen Transistor-Design oder neue Ansätze bei der Chip-Architektur notwendig [3].

Ob sich das Moore'sche Gesetz auch auf Maschinenelemente anwenden lässt, soll in diesem Kapitel betrachtet werden. Um die Weiterentwicklung von Maschinenelementen und die daraus zusammengesetzten technischen Systeme beurteilen zu können, ist eine geeignete Quantifizierung anhand technischer Merkmale notwendig.



Abbildung 2: Leistungssteigerung beim Radlager. Vom ungeschmierten Gleitlager zum lebensdauer-geschmierten zweireihigen Schrägkugellager in O-Anordnung mit formschlüssiger Anbindung an die Gelenkwelle. (Copyright links: public domain, rechts: [2])

3.1 DREHMOMENTDICHTE VON GETRIEBEN FÜR WINDENERGIEANLAGEN

Bei Windenergieanlagen führen die größer werdenden Rotordurchmesser zu einer Erhöhung der Nennleistung. Gleichzeitig ist eine Absenkung der Rotordrehzahl zur Einhaltung der zulässigen Blattspitzengeschwindigkeit notwendig [4]. Damit kommt es zu einem starken Anstieg des Eingangsdrehmoments. Zur Beurteilung der Entwicklung von Getrieben für Windenergieanlagen eignet sich die Drehmomentdichte als Quotient aus dem Nenn-drehmoment des Getriebes und dem Gewicht des Getriebes [5, 6].

Abbildung 4 lässt einen jährlichen Anstieg der Drehmomentdichte um etwa fünf Prozent erkennen. Das entspricht einem exponentiellen Anstieg wie beim Moore'schen Gesetz, wenn auch bei geringerer Wachstumsrate.

Die Entwicklung der Drehmomentdichte ist unter anderem auf Leichtbau, neue Materialien und Beschichtungen sowie optimierte Makro- und Mikro-Geometrien zurückzuführen [6]. Kleinbauende Gleitlager erlauben höhere Leistungsdichten durch Lastaufteilung auf mehr Planeten und ermöglichen neue Getriebekonzepte [7].

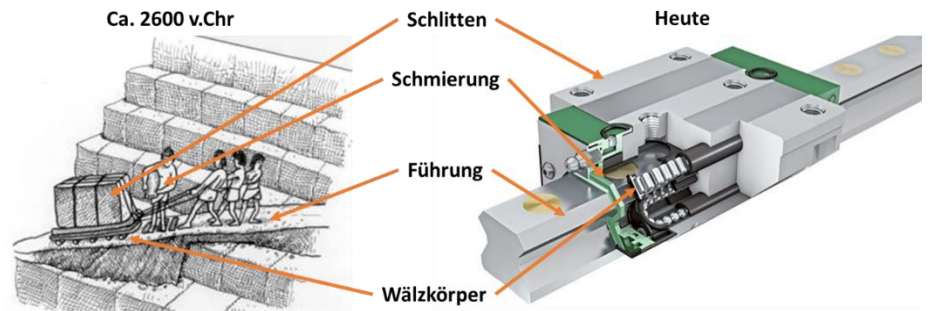


Abbildung 3: Leistungssteigerung am Beispiel der Linearführung. Links mit hölzernen Wälzkörpern und Sand als Haftmittel im offenen System, rechts mit fettgeschmierten Präzisions-Rollen als geschlossenes System. (Copyright links: Vladimir Filipovic, ZUNS, Belgrad / La main à la pâte, rechts: Schaeffler)

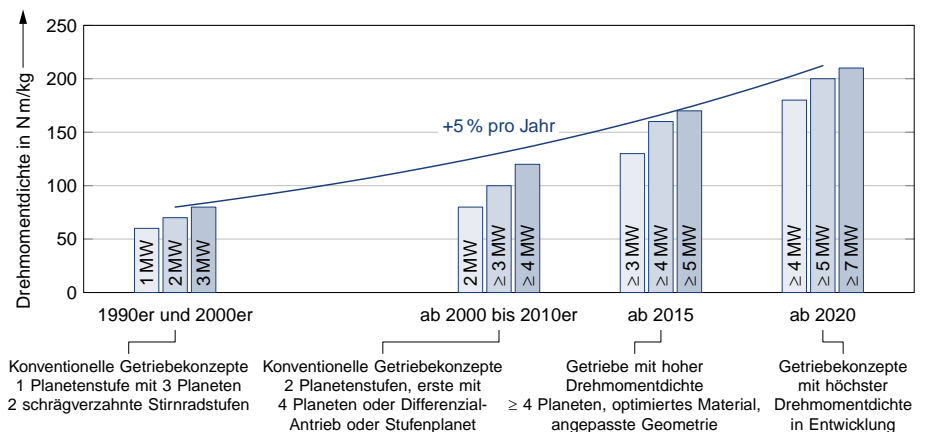


Abbildung 4: Entwicklung der Drehmomentdichte von Getrieben für Windenergieanlagen (basierend auf [6])

3.2 REIBUNGSVERLUSTE VON KEGELROLLENLAGERN

Zusätzlich zur Erhöhung der Tragfähigkeit werden heute immer größere Anforderungen an die Energieeffizienz

von Maschinenelementen formuliert. In Abbildung 5 ist die zeitliche Entwicklung der Reibungsverluste von Kegelrollenlagern dargestellt. Die Reibung nimmt exponentiell ab und folgt etwa der eingezeichneten Kurve einer jähr-

lichen Abnahme von vier Prozent.

Verbesserungen konnten unter anderem durch eine verbesserte Oberflächenqualität von Lagerringen und Wälzkörpern, Anpassung der Bord- und Käfiggeometrie sowie der Schmierstoffe erreicht werden. Zur Reduktion der Reibung unter Einhaltung der notwendigen Tragfähigkeit werden anwendungsbezogene, rechnerunterstützte Designoptimierungen durchgeführt [8].

3.3 BEDEUTUNG DER GÜLTIGKEIT DES MOORE'SCHEN GESETZES FÜR MASCHINENELEMENTE

Für die beiden vorgestellten Beispiele zeigt sich eine ähnliche, wenn auch eine sich über einen längeren Zeitraum erstreckende, exponentielle Entwicklung wie beim Moore'schen Gesetz. Auch bei anderen Industriegetrieben konnte über die Jahre die Berechnungsgenauigkeit deutlich gesteigert und Applikationswissen sowie Erkenntnisse aus verschiedensten Anwendungsgebieten in die Entwicklung eingebracht werden, was zu einer Steigerung der Drehmomentdichte, Erhöhung der Lagerlebensdauer und des Wirkungsgrads führte [9, 10]. Die ständige Weiterentwicklung beruht zusammenfassend einerseits auf einer Verbesserung einzelner Maschinenelemente, andererseits auf der Entwicklung von neuen Konzepten für technische Systeme.

4 MASCHINENELEMENTE ERÖFFNEN NEUE MÖGLICHKEITEN

Die Weiterentwicklung von Maschinenelementen geht über die Steigerung der Leistungsdichte oder die Reduktion von Reibverlusten deutlich hinaus. Innovationen im Bereich der Maschinenelemente eröffnen auch gänzlich neue Möglichkeiten, um die Funktionalität und Nachhaltigkeit von Maschinen und Anlagen zu steigern.

4.1 GEARED TURBOFAN

In Flugtriebwerken der neuesten Generation wird zwischen dem Kerntriebwerk und dem sogenannten Fan (Mantelbläser) eine Planetengetriebebestufe gemäß Abbildung 6 eingesetzt,

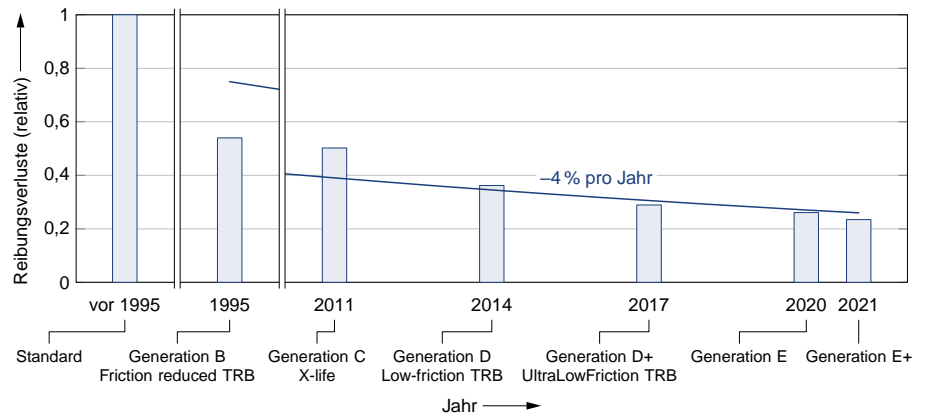


Abbildung 5: Entwicklung der Reibungsverluste von Kegelrollenlagern (TRB) (basierend auf [8])



Abbildung 6: Geared Turbofan – Planetengetriebebestufe (links) und Vergleich von Airbus A320-200 und Airbus A320 neo (rechts). (Copyright links: Pratt & Whitney, rechts: public domain (A320-200), Airbus (A320 neo))

um die Drehzahl des Fans auf ca. 1/3 zu reduzieren. Aufgrund der geringeren Umfangsgeschwindigkeiten der Bläseschaufeln kann der Fan größer ausgeführt und damit das Nebenstromverhältnis erheblich gesteigert werden, was den Treibstoffverbrauch um bis zu 20 % reduziert. Zudem bewirkt das größere Nebenstromverhältnis eine um ebenfalls bis zu 20 % geringere Geräuschemission. Die erste Generation dieser Triebwerke ist bereits am Markt; die zweite – in Entwicklung befindliche – Generation dieser Triebwerke wird noch einmal die gleichen Reduktionen erreichen können und soll mit bis zu 100 % synthetischen Kraftstoffen betrieben werden. Durch die große Zahl derart ausgerüsteter Flugzeuge wird schon heute ein nennenswerter Umweltbeitrag erreicht. Da gleichzeitig auch die Wirtschaftlichkeit steigt, setzt sich diese Technologie sehr schnell in der breiten Anwendung durch.

Abbildung 6 rechts zeigt den mit Geared Turbofans ausgerüsteten Airbus A320 neo (neo = new engine option)

im Vergleich zum A320-200. Die deutlich größeren Durchmesser der neuen Triebwerksgeneration im Vergleich zur älteren Generation sind eindeutig zu erkennen.

Das Maschinenelement Zahnrad bzw. das Planetengetriebe trägt damit wesentlich zum Erreichen heute wichtiger Ziele im Umwelt- und Klimaschutz bei.

4.2 DAS WÄLZLAGER ALS SENSOR

Die Integration von Sensorik gewinnt in Zeiten der Industrie 4.0 zunehmend an Bedeutung und stellt Konstrukteuren insbesondere bei beschränkten Bauräumen vor Herausforderungen. Daher werden verschiedene Ansätze erforscht, um Sensorfunktionen in Maschinenelemente zu integrieren.

Das Wälzlager hat sich als bevorzugte Quelle von Prozessdaten für die Parametrierung digitaler Zwillinge herausgestellt, um mit vergleichsweise geringem Aufwand qualitativ hochwertige Daten zu gewinnen. Es lassen sich beispielsweise durch die Messung der elektrischen Eigenschaften Rückschlüsse auf den Betriebszustand des

Lagers ziehen, Abbildung 7. Da die Schmierfilmdicke und die Verformung im Kontakt von der Belastung abhängen, ändern sich die elektrischen Eigenschaften des Wälzkörper-Laufbahnkontakts in Abhängigkeit von der Belastung messbar. Die ermittelten Belastungsdaten können beispielsweise zur Prozessüberwachung eingesetzt werden oder in ein echtzeitfähiges Lebensdauermodell einfließen, das eine verbesserte Schätzung der Restlebensdauer ermöglicht. Zudem kann eine Aussage über den Schmierstoffzustand getroffen werden, welcher mit fortschreitender Alterung veränderte elektrische Eigenschaften aufweist.

Die weitere Erforschung und anschließende Markteinführung dieser Ansätze haben das Potential, die Vorteile der Industrie 4.0 einfacher und kostengünstiger nutzbar zu machen. KonstrukteurInnen greifen auf einen vertrauten Katalog von Maschinenelementen zurück und können gleichzeitig zusätzliche Sensorfunktionen in das Produkt integrieren.

4.3 ADDITIVE FERTIGUNG VON WÄZLAGERRINGEN

An anderer Stelle begünstigen neue Fertigungsverfahren potentielle Innovationen im Bereich der Maschinenelemente. So auch die additive Fertigung: Es wurde ein Prozess zum selektiven Laserschmelzen von M50NiL-Stahl entwickelt, der beispielsweise in den hochtemperaturbelasteten Lagerungen der Hauptwelle von Flugtriebwerken zum Einsatz kommt. Eine additive Fertigung des Außenrings erlaubt dabei eine zielgerichtete und effiziente Kühlung des Lagers, Abbildung 8. Durch die Trennung von Kühlung und Schmierung lassen sich Gewicht, Kühlmittelfluss und Betriebstemperatur des Lagers reduzieren und die Effizienz des Triebwerks erheblich steigern [11].

5 ZUKÜNFTIGE ANWENDUNGEN

Basierend auf der Analyse der bisherigen Leistungssteigerung der Maschinenelemente in Kapitel 2, der Bestätigung einer Moore'schen Gesetzmäßigkeit und der Diskussion von Beispielen,



Abbildung 7: Sensorlager zur Messung von Kraft, Schmierstoffzustand und Drehzahl. (Copyright: HCP Sense)

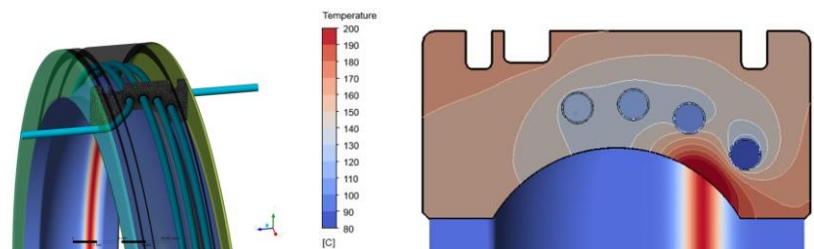


Abbildung 8: Additiv gefertigter Außenring mit integrierten Kühlkanälen [11].

len, welche durch kontinuierliche Weiterentwicklungen im Bereich der Maschinenelemente stetige Leistungs- oder Funktionalitätssteigerungen ermöglichen haben, soll nun anhand eines elektrischen Fahrzeugantriebs der Blick auf die mittelfristige Zukunft geworfen werden, denn elektrische Fahrzeuge werden immer Maschinenelemente und in den allermeisten Fällen auch Getriebe benötigen. Legt man das Moore'sche Gesetz für den kontinuierlichen Anstieg der maximalen Drehzahl der Elektromotoren zugrunde, welcher aus dem Bedarf nach leistungsstarken und kostenoptimierten Antrieben bei gleichzeitiger Reduktion des Magnetmaterials aus ökonomischen wie ökologischen Gründen angetrieben wird, so erkennt man schnell die wachsenden Herausforderungen an Wälzlager, Dichtungen, Verzahnungen sowie nicht zuletzt an den Schmierstoff. Wälzlager, Dichtungen und Verzahnungen müssen für die steigenden Drehzahlen im Bereich von $30\,000\text{ min}^{-1}$ ertüchtigt werden. Die schnelleren Schaltzeiten der Umrichter

als stufenlose Kennungswandler dürfen infolge deutlich größerer Spannungsgradienten in den Funktionsflächen von Verzahnungen oder Wälzlagern nicht zu spontanen Entladungen führen. Der Schmierstoff darf bei der beabsichtigten gemeinsamen Kühlung und Schmierung von elektrischer Maschine und Reduktionsgetriebe durch die kurzfristigeren thermischen Lastwechsel bei Durchlauf durch Antriebssystem und Ölkühler nicht deutlich stärker altern, ferner muss die zuverlässige Funktion des Schmierstoffs auch bei Spannungen im kV-Bereich sichergestellt werden. Nicht zuletzt sollte, um der Forderung nach Energieeffizienz zu entsprechen, weiter an der Reibungsreduktion gearbeitet werden, denn der ökologische Hebel ist riesig [122].

6 FAZIT

Viele Entwicklungen, die in der Öffentlichkeit als *disruptiv* bezeichnet werden, basieren auf dem stetigen Fortschritt in den Maschinenelementen. Der nächste Innovationsschub durch

die Digitalisierung der Maschinenelemente wird derzeit in der Grundlagenforschung vorbereitet [13]. Die Messung bisher kaum zugänglicher Größen in direkter Prozessnähe wird zu einem stetigen Anstieg neuer Funktionen auf Systemebene führen. Die Fähigkeit zur Synthese von Architekturen und Topologien, welche wie in den vo-

rausgegangenen Kapiteln gezeigt, aufbauend auf der Verbesserung der Maschinenelemente einen erheblichen funktionalen Fortschritt auf Systemebene erschließen, muss in der Ausbildung der Studierenden die neuen Möglichkeiten der Maschinenelemente einschließen. Die künftige Gültigkeit des Moore'schen Gesetzes für die Maschinenelemente setzt voraus,

dass die Grundlagen erhalten bleiben oder besser werden, nur so ist der technische Fortschritt als notwendiges Mittel zur Lösung der aktuellen ökologischen Herausforderungen erreichbar.

LITERATUR

- [1] Moore, G. E. 1965. Cracking more components onto integrated circuits. In: Electronics. Band 38, Nr. 8, S. 114-117.
- [2] Köllner, Ch. 2017. SKF entwickelt reibungsarme Radlager. URL: <https://www.springerprofessional.de/tribologie/fahrzeugtechnik/skf-entwickelt-reibungsarme-radlager/13334862>. Abrufdatum: 23.07.2021
- [3] Porsche Engineering. 2021. Automobilentwicklung auf dem Sprung. Porsche Engineering Magazin Ausgabe 1/2021.
- [4] Schelenz, R. 2013. Schwachwindanlagen. ETN Innovation & Forschung Windenergie NRW, Düsseldorf.
- [5] Winergy. 2014. 1981 – 2014 | 100 Gigawatt weltweit ausgelieferte Leistung an Windenergie-Getrieben. Das 100-Gigawatt-Magazin.
- [6] Lubenow, K., Schuhmann, F. und Schemmert, S. 2019. Requirements for wind turbine gearboxes with increased torque density with special attention to a low-noise turbine operation. Conference for Wind Power Drives 2019, Aachen.
- [7] ZF Wind Power. 2019. Plain bearings as a viable alternative to roller bearings. PES Wind Talking Point. URL: <https://cdn.pes.eu.com/v/20180916/wp-content/uploads/2019/11/PES-W-4-19-ZF-Talking-point-1.pdf>. Abrufdatum 07.06.2021.
- [8] Stahl, T., Rumpel, R. und Wirth, P. 2021. Neue Lösungen für noch weniger Reibung – Die neue Generation reibungsoptimierter Schaeffler-Kegelrollenlager. In: VDI (Hrsg.): Tagung Gleit- und Wälzlagerungen. Online-Tagung, 03.-04.05.2021.
- [9] SEW-EURODRIVE und ANSYS. SEW-EURODRIVE: Stop. And Go!. URL: <https://www.cad-fem.net/de/de/cad-fem-informiert/cad-fem-newsroom/cad-fem-journal/sew-eurodrive.html>. Abrufdatum: 16.07.2021.
- [10] Getriebekonstruktion NORD. Produktkataloge G2000 und G1000. URL: <https://www.nord.com/de/dokumentation/kataloge/kataloge.jsp>. Abrufdatum: 16.07.2021.
- [11] Mirring, P., Rottmann, A. und Merklein, C. 2020. Selective Laser Melting (SLM) of M50NiL - Enabling Increased Degrees of Freedom in New Design Concepts. In: Bearing Steel Technologies. 12th Volume, Progress in Bearing Steel Metallurgical Testing and Quality Assurance, S. 261-276. DOI: <http://doi.org/10.1520/STP162320190071>.
- [12] Gesellschaft für Tribologie e.V. 2019. Tribologie in Deutschland - Querschnittstechnologie zur Minderung von CO2-Emissionen und zur Ressourcenschonung. Eine Expertenstudie der Gesellschaft für Tribologie e.V. URL: <https://www.gft-ev.de/de/tribologie-studie-co2-minderung/>. Abrufdatum: 12.07.2021.
- [13] DFG-Schwerpunktprogramm 2305. Sensorintegrierende Maschinenelemente. Wegbereiter der flächen-deckenden Digitalisierung. URL: www.spp2305.de. Abrufdatum: 15.07.2021.

IMPRESSUM

Autoren/innen Prof. Dr.-Ing. Alexander Hasse (TU Chemnitz), Michael Hofer (TU München), Prof. Dr.-Ing. Georg Jacobs (RWTH Aachen), Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner (TU Darmstadt), Steffen Puchtler (TU Darmstadt), Prof. Dr.-Ing. Berthold Schlecht (TU Dresden), Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl (TU München), Prof. Dr.-Ing. Michael Weigand (TU Wien)

Herausgeber Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung WiGeP e.V.
c/o Institut für Produktentwicklung und Gerätebau
An der Universität 1, 30823 Garbsen
www.wigep.de

Vorstand: Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl, Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer, Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause, Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen, Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Dieses Positionspapier entstand im Rahmen der Arbeit der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktentwicklung WiGeP e.V (WiGeP). Es handelt sich hierbei um eine abgestimmte und von der Mitgliederversammlung freigegebene Meinung, Stellungnahme oder Position der WiGeP zu der dargestellten Thematik.