



WiGeP

Wissenschaftliche Gesellschaft
für Produktentwicklung

NEWS

Mitteilungen der WiGeP
Ausgabe 2/2025

Liebe Freunde und Förderer der Produktentwicklung,
liebe WiGeP-Mitglieder

zum Jahresende erreicht euch die zweite Ausgabe unserer WiGeP-News 2025 erneut im Rahmen der Weihnachtspost.

Mit der Frühjahrstagung in Darmstadt und der Herbsttagung in Chemnitz blicken wir auf zwei sehr gelungene Veranstaltungen zurück. Dort haben wir, neben der Arbeit in unseren laufenden SPPs und vielen weiteren Aktivitäten, zahlreiche aktuelle Fragestellungen der Produktentwicklung, wie Selbstadaptive Maschinenelemente, Super-Lubricity sowie Modularität & Nachhaltigkeit intensiv diskutiert. Euer Engagement für die Produktentwicklung und eure lebendige Mitwirkung in unserer Vereinsgemeinschaft sind das Fundament dessen, wofür die WiGeP steht. Eure Bereitschaft, euch einzubringen und den Verein aktiv mitzugestalten, war auch in diesem Jahr deutlich wahrnehmbar. Darauf aufbauend möchten wir gemeinsam mit euch im kommenden Jahr die wissenschaftliche Arbeit in der Produktentwicklung weiter voranbringen.

Wir wünschen euch, dass diese Weihnachtszeit Raum für Ruhe, Zuversicht und gute Momente im Kreise eurer Liebsten bietet. Ein besinnliches Weihnachtsfest und einen erfolgreichen Start in das neue Jahr 2026!

Für die Geschäftsstelle,
Roland Lachmayer, Kevin Herrmann

WiGeP Herbsttagung 2025 in Chemnitz

#frischerWind

Vom 24. bis 26. September 2025 fand die jährliche Herbsttagung der WiGeP in Chemnitz statt. Chemnitz als Europäische Kulturhauptstadt 2025 bot mit zahlreichen Kunstinstallationen und Veranstaltungen einen inspirierenden kulturellen Rahmen für die Tagung. Neben einem abwechslungsreichen Programm und fachlichen Impulsen stand insbesondere der persönliche Austausch im Mittelpunkt – ein Kernelement, das die WiGeP als Verein auszeichnet. Ein herzlicher Dank gilt Prof. Alexander Hasse, der die Teilnehmenden als Gastgeber willkommen hieß und maßgeblich zu einer rundum gelungenen Veranstaltung beigetragen hat.



Bild 1: Arbeitsphase im SPP-Workshop

Bereits im Vorfeld des offiziellen Tagungsprogramms fand ab Mittag des 24. September ein SPP-Workshop statt. Ziel war es, neue gemeinsame Forschungsthemen zu identifizieren und bestehende Kooperationen weiter auszuarbeiten. Im Fokus standen die Themen Selbstadaptive Maschinenelemente, Super-Lubricity sowie Modularität & Nachhaltigkeit. Der offizielle Auftakt der Herbsttagung erfolgte am Abend mit einem „Get-together“ im Restaurant Jannsens. Die gemütliche Atmosphäre bot den idealen Rahmen für informelle Gespräche und einen entspannten Ausklang des ersten Tages. Die Mitgliederversammlung am folgenden Tag fand im „Alten Heizhaus“ statt, das eine eindrucksvolle Kulisse für die Versammlung bot. Eröffnet wurde die Sitzung von der Prorektorin für Forschung und Universitätsentwicklung der Technischen Universität Chemnitz, Frau Prof. Strobel, die alle Mitglieder begrüßte und die Universität vorstellte. Neben den üblichen Agendapunkten stand die Aufnahme

von fünf neuen WiGeP-Mitgliedern auf dem Programm. Mit Freude dürfen wir verkünden, dass die Mitgliederversammlung allen fünf Kandidat*innen zugestimmt hat. An dieser Stelle heißen wir

- Frau Prof. Iryna Mozgova,
 - Herrn Prof. Tobias Düser,
 - Herrn Prof. Benjamin Schleich,
 - Herrn Prof. Nikola Bursac und
 - Herrn Balázs Magyar
- herzlich in der WiGeP willkommen.

Im Anschluss an die Mitgliederversammlung fand die Preisverleihung des Pahl-Beitz-Preises an

- Dr. -Ing. Benedict Julian Alois Rothammer und an
- Dr. -Ing. Peter Welzbacher

sowie die Verleihung der WiGeP Innovation Awards an

- Dr. -Ing. Jörg Miehling,
- David Scherb,
- Patrick Steck,
- Maximilian Pohling und
- Dr. -Ing. Markus Döllken statt.

Alle Preisträger haben durch herausragende wissenschaftliche Leistungen überzeugt und wurden hierfür von der WiGeP geehrt. Den feierlichen Abschluss des Tages bildete ein Gala-Dinner mit Sektempfang im „max-louis“, bei dem der persönliche Austausch in angenehmer Atmosphäre fortgeführt wurde.

Der letzte Tag der Herbsttagung fand auf dem Maschinenbau-Campus statt und wurde durch eine Begrüßung des Dekans, Herrn Prof. Jonas Hensel, eröffnet. Im Anschluss wurden die drei Fachgruppensitzungen

parallel durchgeführt. Nach dem erneuten Zusammentreffen im Hörsaal stellte Prof. Hasse sein Institut und seine Forschungsfelder mit spürbarer Begeisterung vor. Die Tagung schloss mit einem „Test and Rest“-Mittagessen mit anschließender Versuchsfeldbesichtigung, bei der spannende Einblicke in die umfangreiche Versuchstechnik gegeben wurden.

Wir danken nochmals herzlich Prof. Hasse sowie allen weiteren Mitwirkenden, die zur Organisation und Durchführung der Tagung beigetragen haben, und freuen uns bereits auf die kommende Frühjahrstagung in Paris!

Für die WiGeP

Dr.-Ing. Kevin Herrmann

Assistent der Geschäftsführung

Institut für Produktentwicklung und Gerätebau

Leibniz Universität Hannover



Bild 2: Willkommen an unsere neuen Mitglieder

Entwicklung von nachhaltigen Bremssystemen für Mikromobilitätsanwendungen

Validierung von Bremssystemen für E-Lastenräder und E-Scooter

Das IPEK forscht an Lösungen zur Mikromobilität auf Ebene der Systeme, Methoden und Prozesse u.a. durch Transfer von Wissen, Methoden und Prozessen aus dem Bereich der Antriebs- und Prüfstandsentwicklung unter Berücksichtigung realer Lastkollektive. Mikromobilitätsfahrzeuge wie E-Lastenräder, E-Bikes oder E-Scooter wachsen rasant in Verbreitung und Leistungsfähigkeit, stellen aber eigene Anforderungen an die Bremse. Kleine Räder, variable Fahrzeugmassen, unterschiedliche Fahrdynamiken sowie höhere Geschwindigkeiten und ein insgesamt instabileres Fahrverhalten, im Vergleich zu leichten Transportmitteln ohne elektrische Unterstützung, prägen hier die Bremsdynamik. Die Herausforderung besteht darin, unter diesen

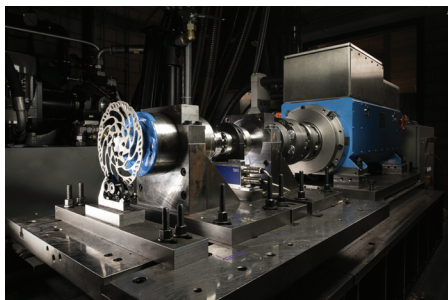


Bild 1: Validierungsumgebung für Bremssysteme von E-Lastenrädern [1]

Rahmenbedingungen, den tatsächlichen Erwartungen und Einsatzbedingungen gerecht zu werden.

VALIDIERUNGSUMGEBUNG UND ZIELSETZUNG

Hohe Systemvarianz sowie uneinheitliche Testmethoden und schwer reproduzierbare reale Belastungen, bedingt durch die Verfügbarkeit von Realdaten, erschweren eine belastbare Validierung der Bremssysteme der Mikromobilitätsfahrzeuge. Aus diesem Grund wurde eine Validierungsumgebung für E-Lastenräder (Abbildung 1) am IPEK entwickelt. Die derzeitige Validierungskonfiguration dient dazu, unterschiedliche Fahrrad-Bremssysteme zu untersuchen und weiterzuentwickeln [1].

Sie unterstützt die Validierung von System- und Investigation (Sul) verschiedener Ebenen. In der aktuellen Konfiguration können zunächst einzelne Scheibenbremsen untersucht werden. Die Validierungsumgebung wird jedoch fortlaufend erweitert, sodass in zukünftigen Konfigurationen auch die Kombination von Vorder- und Hinterradbremmen gesamtsystemisch validiert werden kann.

GESAMTSYSTEMISCHE BETRACHTUNG: FAHRER – FAHRZEUG – UMWELT

Die Validierungsumgebung folgt einer gesamtsystematischen Betrachtungsweise, die Fahrzeug, Fahrer und Umwelt gemeinsam berücksichtigt. Auf Fahrerseite werden verschiedene Fahrerprofile modelliert, um unterschiedliche Risikoneigungen, Reaktionszeiten, Erfahrungsgrade sowie körperliche Eigenschaften einzubeziehen. Dadurch können typische Bedienmuster ebenso abgebildet werden wie sicherheitskritische Situationen, die stark vom Verhalten des Nutzers abhängen.

Die Restsystemmodellierung des Fahrzeugs besteht sowohl aus einem simulativ, als auch physischen Teil. Physisch erlaubt der modulare Aufbau der Validierungsumgebung das schnelle Austauschen und Vergleichen unterschiedlicher Bremskonstruktionen, Bremscheiben oder Reibbeläge. Der modulare Aufbau ermöglicht die Verwendung aller gewünschten Aktuationsprinzipien für das Bremssystem. Bei der Validierungskonfiguration in Abbildung 1, sieht man eine hydraulische Betätigung der Bremse. Die Aktuierung erfolgt automatisiert über ein Hydraulikaggregat und gewährleistet damit hochpräzise und reproduzierbare Versuche. Gleichzeitig ist die Architektur so ausgelegt, dass sie zukünftige Anforderungen wie dynamische, regelbare hydraulische Aktuierungen, beispielsweise für ABS- und weitere Sicherheits- sowie Komfortfunktionen, unterstützen kann. Auf der virtuellen Ebene können verschiedene Restfahrzeugmodelle

eingebunden werden. Etwa unterschiedliche Topologien, Fahrzeugmassen, Steifigkeiten und Dämpfungen des Aufbaus sowie Lastverteilungen. Dadurch lassen sich systemische Wechselwirkungen flexibel abbilden und variieren. Es findet eine Einbindung von Lastfällen statt, die aus der Umgebung kommend, und in primäre Lastgrößen umgerechnet, energetisch berücksichtigt werden. Dazu zählen Steigungen und Gefälle, unterschiedliche Verkehrsflüsse, variable Verkehrsdichten, die Häufigkeit von Ampelstopps oder allgemeine Geschwindigkeitsprofile.

Dies ermöglicht eine Vielzahl von relevanten Lastfällen unter kontrollierten und dennoch praxisnahen Bedingungen reproduzierbar nachzustellen. Damit entsteht eine modulare und zukunftsorientierte Validierungsumgebung, die eine belastbare Validierung von Bremsen mit unterschiedlichen Funktions- und Wirkprinzipien erlaubt.

ZUKÜNFTIGE UNTERSUCHUNGSPOTENTIALE

Ausblickend sind verschiedene Tests zur Umgebungstemperatur und -feuchtigkeit, Salzwasser- und Staubtests oder Emissionsanalysen, durch den modularen Aufbau möglich. Somit können Umweltbedingungen umfassend berücksichtigt werden.

MIKROMOBILITÄTSSYSTEME ALS LEHR- UND LERNPLATTFORM

Darüber hinaus stellen Mikromobilitätsanwendungen ein aktuelles Systembeispiel in der Ausbildung des Ingenieur Nachwuchses dar. So ist sowohl das System E-Bike, als auch die angesprochene Validierungsumgebung, in aktuellen Lehrveranstaltungen des IPEK am KIT als Leitbeispiel integriert und schafft dadurch unter Einbezug des Erfahrungshorizontes der Studierenden ein systemnahes Verständnis für die Anwendung der Theorie in der Praxis. Durch die Erkenntnisse, der im eigenen Alltag erlebbaren relevanten Ingenieursprinzipien, zeigt sich bei den Studierenden deutliche Begeisterung



Bild 2: Leitbeispiel Fahrrad in der Maschinenkonstruktionslehre Vorlesung des IPEK am KIT

AUTOREN

Timo Hacker, M.Sc.1
Arne Bischofberger, M.Sc.1
Dipl.-Ing. Sascha Ott 1
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Tobias Düser 1
1IPEK – Institut für Produktentwicklung,
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

LITERATUR

[1] Hacker, Timo; Bause, Katharina; Lampert, Michael; Gohlke, Tobias; Ott, Sascha (2025): Entwicklung einer Validierungsumgebung für anwendungsspezifische Lastkollektive - Untersuchung innovativer Bremssysteme für elektrisch unterstützte Schwerlastenräder. VDI-Fachtagung Kupplungs-Bremssysteme für mobile und stationäre Anwendungen, Karlsruhe.
[2] Albers, A., Düser, T. & Ott, S. (2008). X-in-the-Loop als integrierte Entwicklungsumgebung von komplexen Antriebssystemen. 8. Tagung Hardware-in-the-loop-Simulation, 16./17. September 2008, Kassel.

Nachhaltigkeit in der Produktentwicklung

NEUE RINGVORLESUNG BRINGT STUDIERENDE AUS 11 UNIVERSITÄTEN MIT 13 PROFESSOREN ERFOLGREICH ZUSAMMEN

Wie gelingt nachhaltige Produktentwicklung im Maschinenbau?

Diese Frage stand im Zentrum der neuen Ringvorlesung „Nachhaltigkeit in der Produktentwicklung“ (NaPe), die im Sommersemester 2025 zum ersten Mal stattfand. Masterstudierende aus 11 (technischen) Universitäten aus Bochum, Chemnitz, Clausthal-Zellerfeld, Darmstadt, Erlangen, Hamburg, Hannover, Kaiserslautern, Karlsruhe, Paderborn nahmen am digitalen Format teil.

Organisiert wurde die Veranstaltung aus der Querschnittsgruppe Lehre und Weiterbildung (QLW) der WiGeP, federführend durch die Professoren Bursac, Koch, Schleich und Wartzack. Zusammen mit neun weiteren renommierten Universitätsprofessor:innen entstand eine hochschulübergreifende Vorlesungsreihe zur nachhaltigen Produktentwicklung. Sie bereitet zentrale Themen fundiert und praxisnah anhand aktueller Forschungsergebnisse der beteiligten Institute auf. Das Bild 1 zeigt die Themen und Vortragenden.

Joana Stein, Studentin der TUHH, zieht ein klares Fazit: „Mich hat vor allem das breite Themenspektrum überzeugt. Die

Vorlesungsreihe hat eindrucksvoll gezeigt, wie unterschiedlich nachhaltige Produktentwicklung gedacht und erforscht wird.“ Auch andere Teilnehmende betonten den Gewinn der Vielfalt: „Die unterschiedlichen Perspektiven der Dozierenden waren sehr bereichernd. Ich habe viele neue Denkanstöße mitgenommen.“ Die Bandbreite der Themen – von zirkulären Fabriken über datenbasierte Lebenszyklusanalyse bis hin zur sozialen Verantwortung technischer Produkte – wurde vielfach als Stärke genannt. Ein Studierender schrieb: „Die Themen waren spannend, die Vorlesungen gut aufgebaut und die Folien klar. Für mich

war das eine durchweg gelungene Veranstaltung.“

Aufgrund der positiven Resonanz soll die Vorlesung künftig jedes Sommersemester stattfinden. Wer im nächsten Jahr teilnehmen möchte, kann sich per E-Mail an felix.foerster@isem-tuhh.de wenden. Der Zugang wird dann unkompliziert bereitgestellt, alle Interessierten sind herzlich eingeladen.



Bild 1: Team der WiGeP-Ringvorlesung „Nachhaltigkeit in der Produktentwicklung“

AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Nikola Bursac

Felix Förster, M. Sc.

ISEM – Institut für Smarte Entwicklung und Maschinenelement, TU Hamburg

Prof. Dr.-Ing. Oliver Koch

Lehrstuhl für Maschinenelemente, Getriebe und Tribologie, RPTU Kaiserslautern-Landau

Prof. Dr.-Ing. habil. Benjamin Schleich

Fachgebiet Product Life Cycle Management, TU Darmstadt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartack

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik KTmfk, FAU Erlangen – Nürnberg

Testen automatisierter Fahrfunktionen am IPEK

ERMÖGLICHUNG DES LENKENS AUF DEM ROLLENPRÜFSTAND ZUR ERTÜCHTIGUNG ALS VEHICLE-IN-THE-LOOP TESTUMGEBUNG FÜR FUNKTIONALE TESTS AUTOMATISierter FAHRFUNKTIONEN

Automatisiertes Fahren ist seit Jahren eines der meistdiskutierten Themen der Automobilindustrie – und zugleich eines, das bislang hinter den Erwartungen zurückbleibt. Die Frage, warum automatisierte Fahrfunktionen noch nicht flächendeckend auf der Straße angekommen sind, führt unweigerlich zu eines der Kernprobleme: der anspruchsvollen Validierung und Freigabe dieser Systeme. Reale Fahrversuche auf dem Proving Ground oder im realen Straßenverkehr sind aufwendig, kostenintensiv und oft nur eingeschränkt reproduzierbar. Reine Simulationen dagegen bieten zwar Skalierbarkeit, doch ihr Vertrauensniveau ist kritisch zu betrachten. Aufgrund dessen sind Ansätze, die Vorteile der virtuellen und realen Welt kombinieren nötig. Vehicle-in-the-Loop (ViL) ist eine gemischt physisch-virtuelle Testumgebung, die das real vorliegende Gesamtfahrzeug mit einer meist virtuellen Fahrumgebung verbindet. Dadurch werden Vorteile der Reproduzierbarkeit und des hohen Integrationslevels kombiniert.

VIL IM KONTEXT AUTOMATISIERTEN FAHRENS

Eine mögliche Verwendung von ViL-Testumgebungen wird derzeit im Rahmen der jährlichen Hauptuntersuchung (engl.: Periodical Technical Inspection, PTI) für automatisierte Fahrzeuge diskutiert [1]. Dabei soll zunächst die Funktionalität von Fahrerassistenzsystemen wie Automated Emergency Braking (AEB) oder Lane Keep Assist (LKA) überprüft werden. Die gesamte Funktionskette – von der Perzeption über die Trajektorienplanung bis zur Aktorik – wird dabei als Blackbox betrachtet und im Gesamtfahrzeug getestet. Für die PTI sind

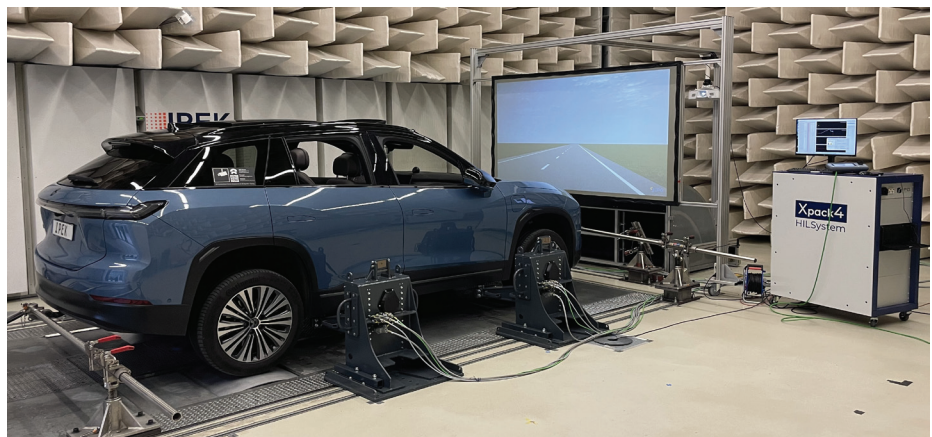


Bild 1: Vehicle-in-the-Loop Testumgebung mit neuartigem Hebekonzept am IPEK

kurze Testzeiten, der Verzicht auf Eingriffe ins Fahrzeug (z. B. Entfernen von Abdeckungen) sowie geringe Kosten entscheidend, da langfristig viele Prüfstellen mit entsprechenden Testumgebungen ausgestattet werden müssen. Daher wird eine schlanke, kostengünstige Lösung gefordert, die sich idealerweise in bestehende Infrastruktur integrieren lässt.

Für die Bremsprüfung existieren bereits Prüfstands Lösungen auf Basis eines Doppelrollensystems. Da hierbei jedoch kein Lenken möglich ist, sind Erweiterungen für das Testen automatisierter Fahrfunktionen notwendig. In der Forschung finden sich Ansätze, die entweder das Lenken durch bewegliche Rollensätze ermöglichen [2] oder Lenkkräfte über ein am Fahrzeugboden montiertes Modul auf die Lenkstange einleiten [3]. Ersteres erfordert einen komplexen mechanischen Aufbau, letzteres einen Eingriff ins Fahrzeug. Beide Ansätze sind grundsätzlich zur Untersuchung einer LKA-Funktion geeignet, erfüllen jedoch die Anforderungen der PTI nur bedingt. Am IPEK wurde daher ein Konzept entwickelt,

einen 4x2-Scheitelrollenprüfstand so zu erweitern, dass das Lenken mit einer schlanken und kostengünstigen Lösung möglich wird. Der Grundgedanke besteht darin, das Fahrzeug über vier Anhebemechanismen leicht anzuheben und die maximal übertragbare Reifen-Rollen-Kraft zu minimieren.

EXEMPLARISCHER ANWENDUNGSFALL DES KONZEPTS

Das Wirkprinzip wird anhand eines möglichen funktionalen Tests einer LKA-Funktion erläutert: Das Fahrzeug wird wie in Bild 1 auf dem Rollenprüfstand positioniert, und die Anhebemechanismen werden auf die entsprechenden Punkte ausgerichtet. Zu Testbeginn wird das Fahrzeug im nicht angehobenen Zustand auf z. B. 120 km/h beschleunigt, um beide Achsen adäquat zu beschleunigen. Nach Erreichen der Zielgeschwindigkeit wird es so weit angehoben, dass nur noch minimaler Reifen-Kontakt besteht. Erkennt das Fahrzeug über eine vorn platzierte Leinwand im simulierten Szenario eine kritische Annäherung an die Fahrbahnmarkierung, greift das LKA ein

und lenkt zurück in die Mitte. Aufgrund des reduzierten Kontakts kann das Manöver problemlos am Prüfstand durchgeführt werden. Der Lenkeingriff dient dabei als Nachweis der LKA-Funktionalität.

NUTZEN UND AUSBLICK

Mit der Weiterentwicklung des Rollenprüfstands am IPEK steht eine ViL Testumgebung zur Verfügung, die sich für funktionale Tests automatisierter Fahrfunktionen eignet, wie am Beispiel der PIT des LKA gezeigt. Insbesondere die Untersuchung der Funktionalität automatisierter Fahrfunktionen über Überprüfung von Aktorikeingriffen eignet sich auf dieser einfach nachrüstbaren und schlanken Prüfstandslösung. Der Mehrwert soll hierbei mit einer Reihe an weiteren Tests eines automatisierten Fahrzeugs zukünftig gezeigt werden.

LITERATUR

- [1] CITA, September 2025, Periodical Technical Inspections 40th session
 - [2] KÜS, 2024, ADAS Wirkprüfungen zugelassener Kraftfahrzeuge in einer Prüflinie basierend auf dem ViL-Testkonzept
 - [3] Schyr, Düser, Weck, Schick, 2016, Modularer Prüfstand für fahrbereite Gesamtfahrzeuge
- Univ.-Prof. Dr.-Ing. Tobias Düser
 akad. Dir. DI Sascha Ott
 Dipl.-Ing. Katharina Bause
 David Fischer, M. Sc.
 IPEK – Institut für Produktentwicklung
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Werkzeugmaschinen-spindeln mit CFK-Schnittstellen

UNTERSUCHUNGEN ZUM EINSpanNVORGANG VON CFK-WERKZEUGSCHNITTSTELLEN IN KONVENTIONELLE WERKZEUGHALTER

MOTIVATION

Bei Motorspindeln von Werkzeugmaschinen führt die Substitution von Werkzeugstahl durch Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) zu einer erhöhten Leistungsfähigkeit und einer verbesserten Energieeffizienz. Die hochpräzisen Schnittstellen der Motorspindel zu Anbaukomponenten, wie Lagern oder der Werkzeughalterschnittstelle, bestehen jedoch weiterhin aus Stahl. Eine solche Schnittstelle ist zwischen der Werkzeugaufnahme der Motorspindel und dem Werkzeughalter die Hohlchaftkegel-Schnittstelle (HSK). Der Konus der HSK-Schnittstelle wird während des Einspannvorgangs tribologisch beansprucht. Verschleiß am Konus verringert die Präzision der Einspannung des Werkzeughalters [1]. Der Einsatz von CFK auf einer Seite der Schnittstelle erhöht zusätzlich auch die Anzahl der tribologischen Einflussfaktoren, insbesondere der Faser- und Matrixmaterialien sowie der Faserorientierung.

VORGEHEN

Im Rahmen des Projekts SPOTLIGHT werden die Herstellung von hochpräzisen

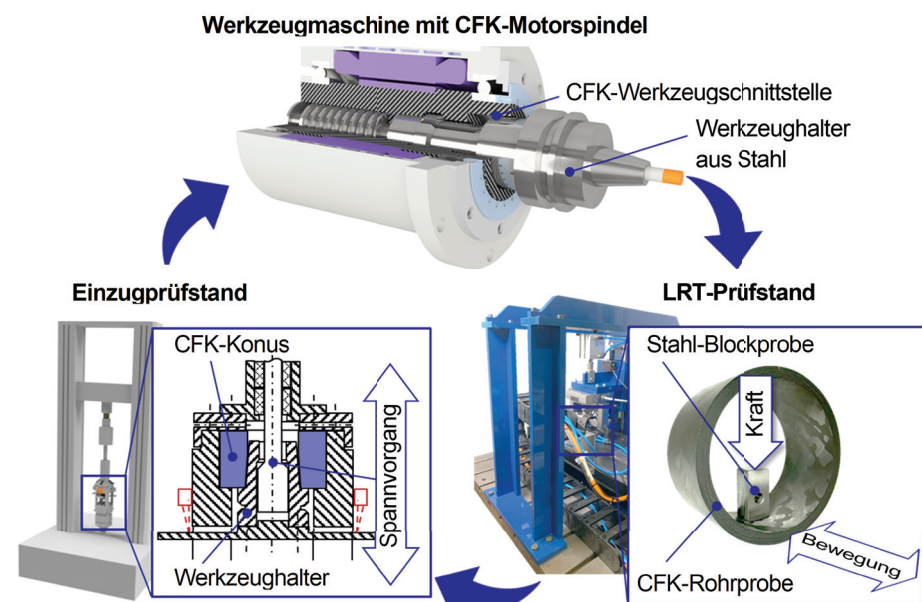


Bild 1: Untersuchung von CFK-Werkzeugschnittstellen anhand von neuen Prüfständen

Funktionsflächen an CFK-Bauteilen betrachtet und am Anwendungsfall einer CFK-Motorspindel mit CFK-Werkzeugschnittstelle demonstriert [2]. Das Vorgehen zu Entwicklung einer CFK-Werkzeugschnittstelle ist in Bild 1 dargestellt. Eine Werkzeugmaschine mit CFK-Motorspindel ist

im Dreiviertelschnitt mit dem Werkzeughalter visualisiert. Der Werkzeughalter wird beim Werkzeugwechsel über einen Spannsatz mit Zugstange in die CFK-Werkzeugschnittstelle eingezogen. Um ein vertieftes Verständnis des Reib- und Verschleißverhaltens von hochbelas-

teten CFK-Schnittstellen zu erlangen, wird der Spannvorgang beim Werkzeugwechsel mithilfe von zwei eigen entwickelten Tribologieprüfständen untersucht. Um die Vielzahl materialabhängiger tribologischer Einflussfaktoren bei CFK wirtschaftlich untersuchen zu können, kommt eine vom Anwendungsfall abstrahierte Block-Rohr-Versuchsanordnung zum Einsatz. Der linear reversierende Tribologieprüfstand (LRT-Prüfstand) setzt eine innen- und außerungeschliffene CFK-Rohrprobe in eine linear reversierende Bewegung. Ein Pneumatikzylinder drückt eine abgerundete Blockprobe gegen die Innenseite der CFK-Rohrprobe. Die Versuchsanordnung ermöglicht die Herstellung der CFK-Rohrproben im identischen Fertigungsverfahren wie im Anwendungsfall und erlaubt eine kostengünstige Analyse zentraler Einflussfaktoren wie der Faserorientierung und der verwendeten Schmierstoffe.

Aufbauend auf den Ergebnissen der Grundlagenuntersuchungen werden am Einzugsprüfstand Dauerversuche zum Spannvorgang von HSK-Werkzeughaltern in konische CFK-Proben durchgeführt, die die CFK-Schnittstelle des Motorspindelendes repräsentieren. Der Werkzeughalter wird ohne mechanische Übersetzung der Spannkraft über eine Zugstange mit einer Einzugskraft von 18 kN in die CFK-Schnittstelle eingezogen. Laserwegsensoren erfassen den Einzugsweg des Werkzeughalters. Dehnmessstreifen werden eingesetzt, um die Spannkraftverteilung zwischen Plananlage und Konus zu bestimmen. Die Schnittstelle wird durch Kühlschmierstoff gereinigt und gleichzeitig gekühlt.

AUSBLICK

Die bisherigen Erkenntnisse bestätigen das Potenzial geschliffener CFK-Funktionsflächen für hochpräzise Werkzeugschnittstellen und fließen in die Entwicklung der Demonstratorspindel ein. Anhand des Demonstrators erfolgt die Validierung der Erkenntnisse der beiden Prüfstände.

LITERATUR

- [1] Brecher et al.: Verschleiß an Werkzeughaltern mit Plananlage beim Spannen, Werkstatt und Betrieb 149, S. 30–33, 2016.
- [2] L. Kilian et al.: Hochpräzise Funktionsflächen an CFK-Bauteilen, Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 119, S. 553–557, 2024, DOI:10.1515/zwf-2024-1094.

AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause
Floyd D. Bischof, M.Sc.
Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT)
Technische Universität Hamburg (TUHH)

Gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWE) im Projekt SPOTLIGHT, Förderkennzeichen 03LB2061.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

PBMon – Zustandsüberwachungssystem für Gleitlager in Windenergieanlagen

ENTWICKLUNG EINES CMS BASIEREND AUF TEMPERATURMESSUNG UND ULTRASCHALL

Gleitlager als Planetenradlager in Getrieben von Windenergieanlagen (WEA) sind eine etablierte Technologie. Aufgrund ihrer kompakten Bauweise benötigen sie im Vergleich zu Wälzlager weniger Bauraum (Steigerung der Drehmomentdichte) und besitzen eine höhere Zuverlässigkeit als Wälzlager. Sonderereignisse im Anlagenbetrieb (z.B. Überlast, Verschmutzung, unzureichende Schmierstoff-versorgung) können sich jedoch schädigend auf ein Gleitlager auswirken.

Damit ein Ausfall der Gleitlager einer WEA vermieden werden kann, müssen bei Betriebszuständen mit hohem Schadensrisiko in kurzer Zeit Gegenmaßnahmen durch die Anlagensteuerung eingeleitet werden (z.B. schnelle Lastreduktion). Für die Detektion kritischen Betriebszustands in Echtzeit werden Condition-Monitoring-Systeme (CMS) benötigt. Speziell für den Einsatz in Gleitlagern von WEA entwickelte CMS sind derzeit nicht für Feldanwendungen verfügbar. Die bestehenden Ansätze aus der Forschung weisen einen geringen technischen Reifegrad auf.

Das System lässt sich in mehrere Einheiten unterteilen: Eine stationäre Empfangseinheit auf dem Getriebegehäuse und rotierende CMS Einheiten in den Planetenachsen. Die rotierenden Einheiten kommunizieren mittels Telemetrie mit der stationären Empfangs-einheit am Getriebegehäuse. In den rotierenden CMS-Einheiten werden sowohl Ultraschallwellen auf der Gleitfläche eingeleitet von Schallwandlern (engl. Surface acoustic waves, SAW) als auch eine Temperaturfeldmessung (TFM) eingesetzt. Die Sensoren sind jeweils unmittelbar unter der Gleitfläche positioniert (vgl. Bild 1). Auf diese Weise sollen kritische Betriebszustände, die auf einen sich anbahnender Lagerausfall infolge von starkem adhäsivem Verschleiß hindeuten, frühzeitig erkannt werden können. Zur Versorgung der rotierenden CMS-Einheiten mit Energie wird eine kabellose Stromübertragung über mitrotierende Induktionsspulen eingesetzt. Über die stationäre Einheit des CMS können zusätzlich weitere Sensoren – beispielsweise Beschleunigungs- oder Temperatursensoren – in das System integriert werden, um

TEMPERATURFELDMESSUNG

Die lokale Temperaturverteilung auf der Gleitfläche hat maßgeblichen Einfluss auf das Betriebsverhalten eines hydrodynamischen Gleitlagers und umgekehrt. Der Übergang vom hydrodynamischen Betrieb zu Mischreibung führt zur Wärmeentwicklung und bewirkt an den Kontaktstellen eine lokale Erhöhung der Lagertemperatur. Mittels Verwendung mehrerer über den Lagerumfang verteilter Temperatursensoren können lokale Temperaturveränderungen in der Lastzone des Gleitlagers erfasst werden. [2] Durch eine Anomalie Detektion werden Temperaturgradienten identifiziert und auf diese Weise kritische Betriebspunkte erkannt. Die Temperaturgradienten über den Lagerumfang können hierbei als Alarmgrenzen für instabiles thermisches Verhalten genutzt werden. Der TFM-Ansatz hat somit großes Potenzial für die frühzeitige Erkennung von schadenskritischen Betriebszuständen in Planetengleitlagern und ermöglicht eine kostengünstige, leicht zu integrierende Zustandsüberwachung.

AKUSTISCHE OBERFLÄCHENWELLEN

Ultraschallmessverfahren bieten ein hohes Potenzial für die Zustandsüberwachung von WEA-Planetengleitlagern. Grundlage ist ein piezoelektrischer Wandler, der eine hochfrequente akustische Welle in das umgebende Material einbringt. Die ausgesendete Schallwelle breitet sich auf der Gleitfläche des Lagers aus und tritt dort in Wechselwirkung mit dem Schmierspalt. Die Höhe des Schmierspalts, Mischreibungsereignisse sowie der Schmierzustand beeinflussen die Ausbreitung der akustischen Wellen maßgeblich.

Die Analyse der Signalamplitude, -modulation und Phasenverschiebung ermöglicht es, Rückschlüsse auf den aktuellen Betriebszustand des Gleitlagers zu ziehen [3]. Insbesondere können Veränderungen im Schmierfilm oder abrasiver und adhäsiver Verschleiß detektiert werden. Damit stellt das Verfahren einen vielversprechenden Ansatz für die Überwachung sicherheitskritischer Antriebssysteme dar.

ALGORITHMUSENTWICKLUNG

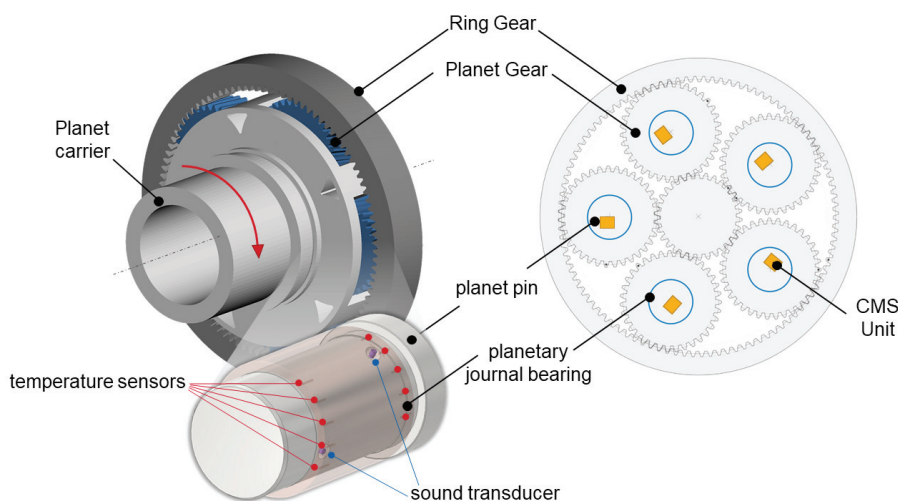


Bild 1: Schematische Darstellung des Condition-Monitoring-Systems

INNOVATIVES CMS KONZEPT FÜR WEA-GLEITLAGER

Ziel des Forschungsprojekts PBMon [1] ist ein experimentell validierter CMS-Multi-sensor-Prototyp für Planetengleitlager in WEA-Getrieben. Im Projekt wird ein CMS entwickelt, das energetisch autark, und modular aufgebaut ist.

eine Überwachung des gesamten Getriebes zu ermöglichen. Die Systemarchitektur des CMS zeichnet sich durch eine modulare Bauweise aus, die sich an die schnelle Weiterentwicklung von WEA-Getrieben anpassen lässt (variable Anzahl an Planetenrädern, als auch zusätzliche Planetenstufen).

Um aus den Messdaten des CMS einen sich anbahnenden Lagerschaden zu können, wird im Projekt PBMon ein Überwachungsalgorithmus entwickelt, der auf Statistik und maschinellem Lernen basiert. Die Messdaten aus der entwickelten Temperaturfeldmessung sowie der beschriebenen SAW-Technologie werden zunächst vorverarbeitet und anschließend dem Überwachungsalgorithmus übergeben. Aus den SAW-Signalen und der TFM werden dabei mehrere Kenngrößen abgeleitet. In vorangegangenen Untersuchungen konnte bereits eine Korrelation zwischen diesen Kenngrößen und der Schmierstalthöhe oder Mischreibungseignissen nachgewiesen werden. Aussagen über das Ausfallrisiko der Gleitlager lassen sich nach aktuellem Stand der Forschung jedoch noch nicht treffen. Der im Projekt PBMon entwickelte Algorithmus soll anhand der multisensorischen Messdaten den sich anbahnenden Schaden erkennen. Das abschließende Ziel des Projekts PBMon ist es, so den Ausfall von Gleitlagern zu verhindern, bevor ein Schaden auftritt.

LITERATUR

- [1] www.enargus.de, PBMon – Zustandsüberwachung von Triebsträngen in Windenergieanlagen mit Fokus auf Getriebebegleitleger (03EE3125A)
- [2] Thao Baszenski, Georg Jacobs, et. al., Sensor integrating plain bearings: design of an energy-autonomous, temperature-based condition monitoring system, Forschung im Ingenieurwesen (2023)
- [3] Thomas Decker, Georg Jacobs, et. al., Experimental study on the condition monitoring of planetary journal bearings in wind turbine gearboxes using the surface acoustic wave method, Forschung im Ingenieurwesen (2025)

AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Georg Jacobs
M.Sc. Thomas Decker
M.Sc. Tim Scholz
M.Eng. Patrick Haas
M.Eng. Anuj Khare

Chair for Wind Power Drives
RWTH Aachen University

Kontextsensitive Entscheidungsunterstützung für die Gestaltung gebrauchstauglicher und emotional ansprechender Produkte

ENTWICKLUNG EINER MODULAREN METHODE ZUR KONTEXTANALYSE, EMPIRISCHEN GEWICHTUNG UND KONTEXTADAPTIVEN EMPFEHLUNGSGENERIERUNG FÜR DIE PRODUKTENTWICKLUNG

Die Entwicklung gleichermaßen gebrauchstauglicher wie emotional ansprechender Produkte erfordert eine präzise Kenntnis derjenigen Nutzer-, Produkt- und Umgebungsmerkmale, die das Nutzungserleben wesentlich beeinflussen. Obwohl die Relevanz solcher Einflussfaktoren in der Literatur umfassend beschrieben ist [1], fehlt bislang eine systematische Vorgehensweise, um diese Faktoren kontextspezifisch zu identifizieren, zu bewerten und für frühe Gestaltungsentscheidungen nutzbar zu machen.

In der Praxis müssen Produktentwickler häufig auf heuristische Annahmen zurückgreifen. Aufgrund der hohen Varianz der Nutzungskontexte ist jedoch eine strukturierte, datenbasierte Entscheidungsunterstützung notwendig, um relevante Einflussfaktoren frühzeitig zu erkennen und zu priorisieren.

ZIELSETZUNG

Zur Bewältigung dieser Herausforderung untersucht das DFG-Projekt „NEPTUN GeP“ systematisch, wie Nutzer-, Produkt- und Umgebungsmerkmale das Verhältnis von Gebrauchstauglichkeit und emotionaler Produktgestaltung beeinflussen.

Ziel ist es, die Vielzahl potenziell relevanter Einflussfaktoren empirisch zu strukturieren, kontextspezifisch zu bewerten und diese Bewertung für die Priorisierung gebrauchstauglicher und emotionaler Gestaltungsaspekte nutzbar zu machen. Dadurch sollen Produktentwickler bereits in frühen Phasen Entscheidungen über die Gewichtung der Gestaltungszielgrößen treffen können.

ERGEBNIS

Im Rahmen von NEPTUN GeP wurde eine modular aufgebaute Methode entwickelt (siehe Bild 1), die die Erfassung, Bewertung und Gewichtung kontextrelevanter Merkmale systematisiert und für die Entscheidungsfindung operationalisiert. Grundlage hierfür bilden die im Projekt durchgeführten Nutzerstudien, aus denen datenbasierte Gewichtungsfaktoren für die relevanten Einflussmerkmale abgeleitet wurden. Diese Gewichtungsfaktoren fließen in eine AHP-basierte Entscheidungslogik [2] ein, welche es ermöglicht, die Bedeutung einzelner Faktoren bezogen Gebrauchstauglichkeit und emotionale Produktgestaltung separat sowie gemeinsam zu bewerten und deren relative Relevanz kontextsensitiv zu bestimmen. In Kombination entsteht eine nachvollziehbare Priorisierung der Faktoren, die eine differenzierte Abbildung der Wirkzu-

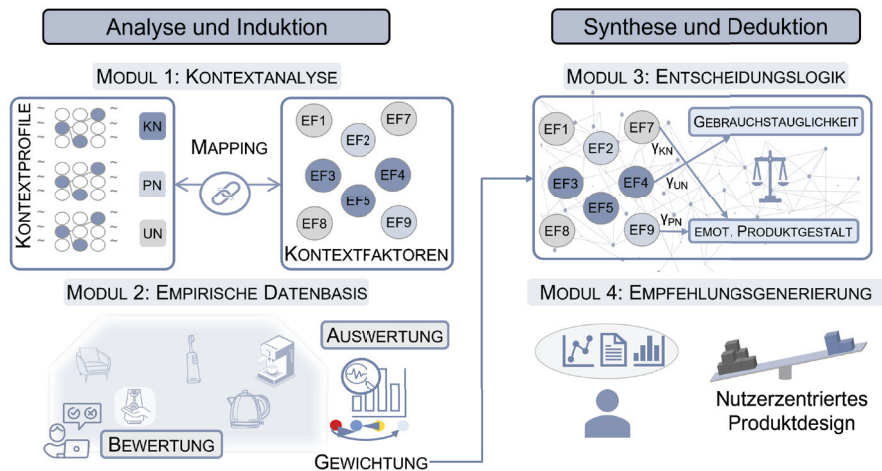


Bild 1: Ansatz für die kontextabhängige Priorisierung von Gebrauchstauglichkeit und emotionaler Produktgestaltung mittels empirisch fundierter Gewichtung

malen und Nutzungserleben erlaubt Insgesamt wird durch die entwickelte Methode eine präzisere und kontextspezifische Priorisierung nutzerrelevanter Gestaltungsanforderungen ermöglicht. Produktentwickelnde können dadurch fundiert entscheiden, wann gebrauchstaugliche Anforderungen dominieren, wann emotionale Gestaltung im Vordergrund steht und wie beide Zielgrößen im jeweiligen Nutzungskontext auszubalancieren und in die Produktgestalt zu überführen sind.

DANKSAGUNG

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Forschungsprojekts 398054801.

LITERATUR

- [1] J. van Remmen, S. Wartack und J. Miehling, „A systematic literature analysis of influencing factors affecting the balance between usability and emotional product design,” *Journal of Engineering Design*, S. 1–41, 2025, doi: 10.1080/09544828.2025.2455365.
- [2] J. van Remmen, D. Horber, J. Händel, J. Miehling und S. Wartack, „The balance between a usable and emotional product design – a comparison of different methods for prioritising relevant influencing factors,” *Proc. Des. Soc.*, Jg. 4, S. 2463–2472, 2024, doi: 10.1017/pds.2024.249.

AUTOREN

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartack
 PD Dr.-Ing. Jörg Miehling
 Judith van Remmen, M. Sc.
 Lehrstuhl für Konstruktionstechnik (KTmfk)
 Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Grundlage der modernen Produktplanung

FACHAUSSCHUSS VERBINDET ETABLIERTE MODELLE MIT DIGITALEN, NACHHALTIGEN UND DATENGETRIEBENEN ANFORDERUNGEN PRODUKTENTWICKLUNG

Wie können innovative Produkte, digitale Services und nachhaltige Geschäftsmodelle künftig agil, fundiert und marktorientiert entwickelt werden? Antworten liefert nun der Fachausschuss „Entwicklung und Planung hybrider Leistungsbündel“ des VDI/VDE-GMA Fachbeirats Digitalisierung und Virtualisierung. Im Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn legten Expert*innen aus Forschung und Industrie die Grundzüge des neuen Modells der Strategischen Produktplanung (SPP) fest (siehe Bild 1).

AKTUALISIERUNGSBEDARF

Bestehende Richtlinien und standardisierte Werke repräsentieren etablierte Ansätze zur SPP, doch die zunehmende Bedeutung digitaler Services macht eine systematische Analyse und Zusammenführung dieser Modelle notwendig. Die Integration mechanischer und cyber-physischer Systeme

gilt zwar als Standard, wird jedoch durch die wachsende Relevanz digitaler Services, datenbasierter Geschäftsmodelle und der hierfür erforderlichen Datenräume stetig anspruchsvoller. Die konsequente Nutzung digitaler Werkzeuge in frühen Phasen der Produktentstehung ist heute keine Option mehr, sondern Voraussetzung für effiziente Entscheidungsfindung und erfolgreiche Produktideen. Neu entwickelte Lösungen müssen sich auf inzwischen etablierte Methoden und Konzepte wie Requirements



Bild 1: Workshop zum SPP Modell

Engineering, kundenindividuelle Massenproduktion und die enge Verzahnung mit dem Innovationsmanagement stützen. Wer künftig marktfähige Lösungen entwickeln will, muss Produkt, Dienstleistung, Datenflüsse und digitale Wertschöpfung von Beginn an zusammendenken.

ANFORDERUNGEN MODERNER PRODUKTPLANUNG

Eine zukunftsgerichtete strategische Produktplanung muss flexibel und agil die heutige Markt- und Technologiedynamik einbeziehen. Gleichzeitig rückt das Erfordernis von Informationszirkularität in den Mittelpunkt: Daten müssen nicht nur erhoben, sondern über den gesamten Planungsprozess hinweg rückgeführt, aktualisiert, verknüpft und interpretiert werden. Der Einsatz künstlicher Intelligenz eröffnet dabei neue Möglichkeiten für fundierte und automatisierte Entscheidungen. Parallel eröffnen

sich große Geschäftschancen, wenn Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft nicht erst am Ende, sondern bereits zu Beginn der Produktentstehung berücksichtigt werden. Diese drei Anforderungen – Agilität, datengetriebene Entscheidungsfähigkeit und konsequente Nachhaltigkeitsorientierung – müssen in einem zentralen SPP-Modell systematisch zusammengeführt werden.

MODELL DER STRATEGISCHEN PRODUKTPLANUNG

Prof. Dr. Iris Gräßler präsentierte als Vorsitzende des Fachausschusses ein neues Modell der SPP (siehe DOI: 10.30844/I4SD.25.3.24). Die etablierte Form eines zulaufenden Trichters wird genutzt, um den Weg vom offenen Problemraum bis hin zu einer klar definierten Produktidee zu beschreiben (siehe Bild 2). Die Darstellung verdeutlicht die kontinuierliche Verdichtung vielfältiger Optionen zu einem tragfähigen Konzept. Entlang des Trichters liegen fünf Kontrollpunkte, die jeweils durch zentrale Artefakte beschrieben werden – vom strategischen Ziel- und Zukunftsbild über die konsolidierte Ideenauswahl bis hin zur ausgereiften Produktidee, welche schließlich in einem Entwicklungsauftrag endet.

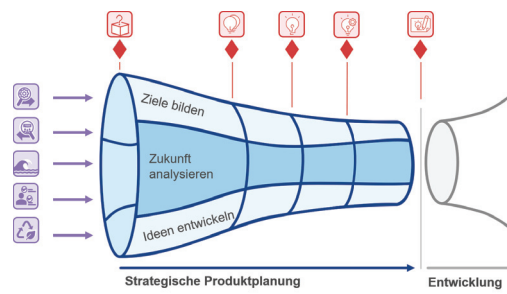


Bild 2: Schematische Darstellung des Modells der Strategischen Produktplanung

Entlang der zugehörigen Abschnitte werden zyklisch angelegte Kernaktivitäten durchlaufen. Diese ermöglichen Agilität, da sie iterativ durchlaufen und flexibel an neue Erkenntnisse sowie veränderte Rahmenbedingungen angepasst werden. Während zu Beginn insbesondere die Zukunftsanalyse dominiert, verschiebt sich der Schwerpunkt im weiteren Verlauf zunehmend zur gezielten Konzeptentwicklung. Ergänzt wird dieser Aufbau durch eine integrierte Produktüberwachung, die fortlaufend Daten aus dem gesamten Lebenszyklus aktueller und zukünftiger Produktgenerationen erfasst und in die SPP zurückführt. Lösungen wie digitale Zwillinge oder moderne PLM-Systeme gewährleisten, dass reale Nutzungsinformationen unmittelbar in die Weiterentwicklung von Zielen, Konzepten und Entscheidungen einfließen und die Planung kontinuierlich verbessern. Die einheitliche Struktur, zyklisches Vorgehen und datenbasierte Rückführung ermöglichen fundierte strategische Entscheidungen, bei gleichzeitiger Flexibilität für dynamische Markt- und Technologietrends.

AUSBLICK AUF DIE RICHTLINIE

Die Fachausschusssitzung am 20./21.10.25 in Paderborn markiert einen wichtigen Schritt auf dem Weg zum Gründruck der Richtlinie für die Strategische Produktplanung. Ergebnis des Treffens sind die gemeinsame Festlegung des Modells und die Richtlinienstruktur. Struktur, Kernelemente und methodische Logik des Modells sind damit fest verankert. Die kommenden Monate dienen der fachlichen Konsolidierung und inhaltlichen Schärfung, sodass im Verlauf des nächsten Jahres der Gründruck entsteht.

AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler
Dr.-Ing. Jens Pottebaum
M.Sc. Sven Rarbach
M.Sc. Benedikt Grewe
Heinz Nixdorf Institut
Lehrstuhl für Produktentstehung
Universität Paderborn

Autarke Sensorschraube

IN-SITU MESSUNG VON VORSPANNKRÄFTEN UND BIEGEMOMENTEN IM PRAKTISCHEN EINSATZ

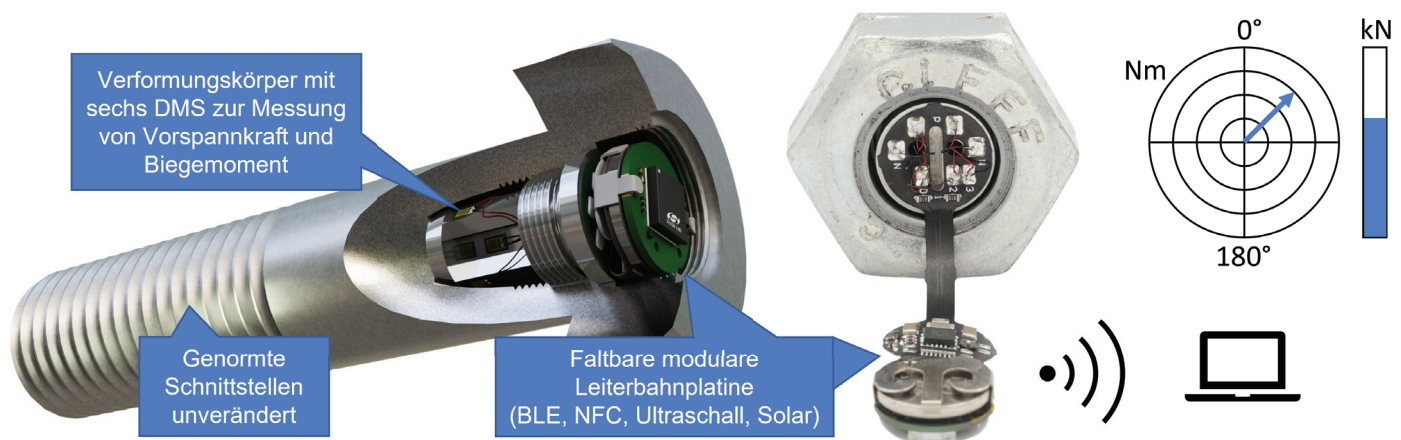


Bild 1: Sensorschraube zur Messung mehraxialer Kräfte und Biegemomenten mit Hilfe eines Verformungskörpers. Integration der Elektronik, Datenkommunikation und Energieversorgung ermöglicht den autarken Betrieb [2].

MOTIVATION

Die fortschreitende Digitalisierung im Maschinenbau erhöht den Bedarf an verlässlichen In-situ-Messdaten, die direkt im Kraftfluss von Maschinen und Anlagen entstehen. Nur solche prozessnahen Daten ermöglichen Big-Data Ansätze wie Condition Monitoring, Structural-Health Monitoring oder digitale Zwillinge. [1].

Maschinenelemente wie Schrauben bieten hierfür großes Potenzial, da weit verbreitet sind und ihre Belastung unmittelbar den Systemzustand widerspiegelt. Dafür müssen jedoch Sensoren in die Schraube integriert werden, ohne die mechanischen Schnittstellen und Normgeometrien zu verändern. Bestehende Lösungen beschränken sich meist auf die axiale Vorspannkraft und erfordern oft zusätzliche Komponenten, Kabel oder erhöhten Bauraum, was besonders Retrofit-Anwendungen einschränkt. Gleichzeitig fehlt die Erfassung von Biegemomenten, obwohl sie die Dauerfestigkeit und Sicherheit wesentlich beeinflussen. Eine umfassende Zustandsüberwachung erfordert daher eine mehraxiale Kraftmessung, die zuverlässig im Bauteil erfasst und energieautark übertragen werden kann. Genau hier setzt die im SPP 2305 entwickelte Sensorschraube an, die mechanische und sensorische Funktion vereint.

VORGEHEN

Gefördert von der DFG (Projektnummer: 466650813) wird das Projekt am IPEK – Institut für Produktentwicklung zusammen

mit den Forschungsgruppen MUST (Prof. Kupnik) und IES (Prof. Hofmann, beide TU-Darmstadt) im vierten Jahr erfolgreich beforscht. Das Vorgehen zur Entwicklung der Sensorschraube folgt einem methodischen Rahmen, der auf dem V-Modell der VDI 2206 und der Methode des Testings basiert [2].

ERGEBNISSE

Es wurde eine Sensorschraube erforscht und entwickelt, die sowohl axiale Vorspannkraft als auch Biegemomente erfassen kann, ohne die normierten äußeren Schnittstellen wie Gewinde oder Kopfform zu verändern (siehe Bild 1) [2]. Ein im Schraubenschaft integrierter Verformungskörper mit mehreren Dehnungsmessstreifen (DMS) ermöglicht eine Trennung der Lastkomponenten und eine hohe Messsensitivität. Die Messwerte werden temperaturkompensiert verarbeitet und zeigen geringe Linearitäts- und Hysteresefehler von weniger als 2 %. In einem Hohlraum im Schraubenkopf ist die komplette Elektronik zur Signalerfassung, Datenverarbeitung und Energieversorgung auf einer gefalteten Leiterplatte integriert. Diese ist modular aufgebaut und ermöglicht die drahtlose Übertragung der Messwerte bspw. mittels Bluetooth Low Energy (BLE), Near-Field-Communication (NFC) oder Ultraschall (in Erprobung) und arbeitet energieeffizient, sodass auch batteriebasierte sowie energieautarke Betriebskonzepte realisierbar sind. Die Hohlräume für Sensoren und Elektronik reduzieren die

Beanspruchbarkeit der Schraube um ca. 20 %, was durch die Erhöhung der Festigkeitsklasse kompensiert werden kann.

MEHRWERT

Damit steht eine vollintegrierte laborerprobte Sensorschraube zur Verfügung, die multiaxiale Belastungen im praktischen Einsatz erfassen und gleichzeitig in bestehende Schraubverbindungen eingesetzt werden kann. Auf diese Weise lassen sich beginnende Versagenszustände wie Vorspannkraftverlust oder Klaffen frühzeitig identifizieren. In der industriellen Anwendung können dadurch Unsicherheiten in den Lastannahmen reduziert werden, da die tatsächlich wirkenden Belastungen gemessen werden können, wodurch die Auslegung optimiert werden kann. Gleichzeitig können beim Anziehen streuende Reibwerte besser beurteilt und Montageprozesse präziser bewertet werden. Wir freuen uns darauf, die Schraube in der industriellen Anwendung zu erproben.

LITERATUR

[1] Kirchner et al. (2024) A Review on Sensor-integrating Machine Elements.

[2] Riehl, Peters, et al. (2025) Design of a sensor integrating bolt for multiaxial force measurement and development of a design methodology.

Julian Peters, M. Sc.

Johannes Säger, M. Sc.

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen

IPEK – Institut für Produktentwicklung

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Präsenzkolloquium des SPP 2305 in Darmstadt

ERSTE BILANZ EINES WEGWEISENDEN AUSTAUSCHS

Am 18. und 19. September 2025 traf sich auf dem Campus Lichtwiese der TU Darmstadt das Netzwerk der beteiligten Forschungspartner zum ersten Jahrestreffen des DFG-Schwerpunktprogramms 2305 – Sensorintegrierende Maschinenelemente in der zweiten Förderperiode. Organisiert wurde die Veranstaltung vom Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente (pmd).

Im Zentrum der zweitägigen Zusammenkunft standen Zukunftsperspektiven für sensorintegrierende Maschinenelemente (SiME), die nicht nur mechanische, sondern auch sensorische und informationsverarbeitende Funktionen vereinen. Nachdem in der ersten Förderperiode der Funktionsnachweis des sensorischen Konzepts und die Abschätzung der Schwächung der Maschinenelemente mit Blick auf deren Primärfunktion im Vordergrund stand, sind in der aktuellen Förderperiode die Themen Energieautarkie und Drahtloskommunikation Fokusthemen des Schwerpunktprogramms (SPP) 2305.

Für die Teilnehmenden bot das Treffen eine wichtige Plattform zur Abstimmung der angelaufenen Förderphase: Neben dem Austausch über gemeinsame Herausforderungen wie die effiziente Gestaltung von Energie- und Datenhaushalt in Impulsvorträgen und Diskussionen, wurden auch Gespräche über eine verstärkte Internationalisierung der Forschung und die Erprobung der Prototypen in gemeinsamen Prüfständen geführt.

Ein Kernthema der Diskussionen war die Ertüchtigung zur Energieautarkie. Aufgrund der Anforderung auf eine Lebenszeit begrenzenden Hauptenergiespeicher zu verzichten, sollen die Prototypen zukünftig mit Hilfe von Energy Harvesting Technologien betrieben werden. Bedingt durch die unterschiedlichen Einsatzbedingungen der im SPP 2305 vertretenen Maschinenelemente kristallisierten sich diesbezüglich multiple Lösungskonzepte heraus. Hierzu zählen beispielhaft Vibrations-, Thermische und Fliehkraftharvester. Die Versorgung des Systems mithilfe eines Harvesters stellt

jedoch einige Projekte vor größere Herausforderungen als andere, da die harvestbare Energie stark durch Einsatz und Bauraum limitiert werden kann. Um dieser Herausforderung zu begegnen war auch die optimierte Auslegung des Energieverbrauchs und der Betriebsstrategie ein viel diskutiertes Thema.

Das zweite Kernthema der aktuellen Förderperiode, Drahtloskommunikation und Updatefähigkeit over-the-air (OTA), sorgte ebenfalls für einen regen Austausch. Verschiedene Projekte diskutierten über die angedachten Kommunikationsstandards wie Bluetooth Low Energy, LoRaWAN, oder IEE 802.15.4. Aufgrund der unterschiedlichen gewählten Standards wurde der Beschluss gefasst in einem Verbundvorhaben eine gemeinsame Hardwareplattform für einen Kommunikationsknotenpunkt zu entwickeln, welcher alle verwendeten Kommunikationsprotokolle verarbeiten kann. Eine solche Gateway-Hardware soll ebenfalls dazu dienen, gemeinsame Prüfstände mit multiplen SiME zu ermöglichen. Die intendierte Updatefähigkeit wiederum, so waren sich die Projektmitarbeitenden einig, stellt eine interessante Herausforderung dar. Die Themen Datensicherheit und stark erhöhter Energieverbrauch sind von besonderem Interesse und unterschiedliche Ansätze zur Lösung wurden eingebracht.

Der Diskurs und die Vernetzung mit den anderen Projekten des SPP 2305 war für alle beteiligten gewinnbringend und gemeinsame Forschungsarbeiten sowie Veröffentlichungen werden folgen.

Bei der abendlichen Vernetzungsveranstaltung unterstrich der Dinnerspeech haltende Prof. Klaus-Michael Ahrend, Vorstand der Heag Holding AG, die strategische

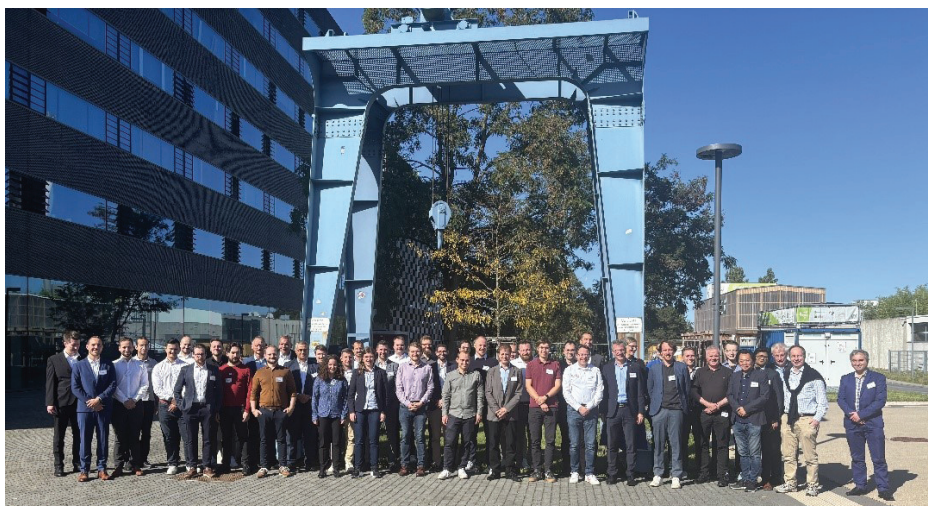


Bild 1: Die Teilnehmer des SPP 2305 Präsenzworkshops.

Bedeutung von SiME als Schlüsseltechnologie für die Industrie 4.0. Für das Ziel eine flächendeckende digitale Transformation zu ermöglichen, eröffnet sich hier ein maßgeblicher Innovationspfad.

Zukünftig soll der Fokus mehr auf die Vorbereitung einer möglichen Transferphase gelegt werden, beginnend mit dem kommenden SiME-Kongress 2026.

AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner

M. Sc. Luca Häfner

Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente

Technische Universität Darmstadt

PAD Summer School geht in die nächste Runde!

IM JUNI 2026 FINDET IN KOPENHAGEN DIE 7. INTERNATIONAL SUMMER SCHOOL ON PRODUCT ARCHITECTURE DESIGN (PAD) STATT

Wir freuen uns, dass die PAD 2026 vom 22. bis 26. Juni 2026 an der Technischen Universität Dänemark (DTU) in Kopenhagen stattfinden wird.

ÜBER DIE PAD

Ziel der Summer School ist es, das Wissen junger Forscher auf dem Gebiet des Produktarchitekturdesigns und der Modularität zu erweitern und eine Plattform für den Austausch und die gemeinsame Diskussion zu schaffen. Neben der Vermittlung von umfangreichem Fachwissen auf dem neuesten Stand der Technik sowie der praktischen Anwendung des Wissens in verschiedenen Workshops steht die Diskussion der eigenen Forschungsthemen im Fokus, was hoffentlich zu langfristigen Forschungskooperationen zwischen den Teilnehmenden führen wird.

ORGANISATION

Die aus einer Forschungsk Kooperation entstandene PAD findet alle zwei Jahre an wechselnden Austragungsorten statt (siehe Bild 1). Sie wird gemeinsam von Prof. Mortensen (DTU), Prof. Isaksson (Chalmers University of Technology), Prof. Krause (Technische Universität Hamburg), Prof. Moon (Nanyang Technological University) und Prof. Otto (University of Melbourne) organisiert.

Über Ihre Bewerbungen freuen wir uns. Die Teilnahme an der Veranstaltung ist kostenlos.

KONTAKT

Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause

Katharina Zumach, M.Sc.

katharina.zumach@tuhh.de

Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT)

Technische Universität Hamburg (TUHH)

VERANSTALTUNGSDATEN

International Summer School on Product Architecture Design an der Technischen Universität Dänemark in Kopenhagen

22. bis 26. Juni 2026

Anmeldung bis 30. Mai 2026

Informationen unter www.tuhh.de/pkt/pad



Bild 1: Teilnehmende der PAD 2024 in Hamburg

Human-Machine-Symbiose-Labor: Eine neue Testingumgebung für die Entwicklung symbiotischer Mensch-Maschine-Systeme

EIN EINBLICK IN DIE ABBILDUNG TECHNISCHER SYSTEMEIGENSCHAFTEN MITHILFE EINES 6-ACHS-VOICE-COIL-HEXAPODS

Die Weltwirtschaft steht vor einer wachsenden Herausforderung: Der Fachkräftemangel in handwerklichen und industriellen Bereichen nimmt in Europa und Nordamerika zu [1]. Demografische Veränderungen und ein rückläufiger Zustrom junger Arbeitskräfte verschärfen diesen Trend [2]. Als Antwort auf diese Entwicklung hat die Europäische Union mit Industrie 5.0 einen Paradigmenwechsel hin zu einer menschenzentrierten Industrie eingeleitet [3]. Ziel ist es, die Interaktion von Mensch und Maschine auf eine höhere Stufe zu heben, hin zur Mensch-Maschine-Symbiose. In dieser Interaktionsform reagieren Mensch und Maschine aufeinander, um gemeinsam eine höhere Leistungsfähigkeit zu erreichen [4]. Die Entwicklung solcher Systeme erfordert, den Menschen mit seiner Wahrnehmung und seinem Interaktionsverhalten aktiv in den Produktentwicklungsprozess einzubeziehen und ihm eine direkte physische Interaktion mit dem technischen System zu ermöglichen. Das Problem ist, dass diese in der frühen Phase der Produktentwicklung oft nicht vorhanden sind. Dafür ist eine Testingumgebung notwendig, in der die Eigenschaften des technischen Systems schnell und gezielt angepasst werden können und der Mensch während der Interaktion mit einem technischen System präzise vermessen werden kann.

Vor diesem Hintergrund wurde das Human-Machine-Symbiose-Labor am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) aufgebaut [5].

ABBILDUNG DES TECHNISCHEN SYSTEMS
Das Human-Machine-Symbiose (HMS)-Labor besteht aus in den Abbildungen 1 und 2 abgebildeten Teilsystemen. Die Vermessung des Menschen während der Anwendungen erfolgt über drei Teilsysteme. Die Bewegungen und Körperhaltungen werden mithilfe des markerbasierten Motion-Capture-Systems Vicon (Vicon Motion Systems Ltd., Vereinigtes Königreich) erfasst. Die subjektive Wahrnehmung des Menschen wird mithilfe auditiver oder visueller Fragebögen dokumentiert. Die

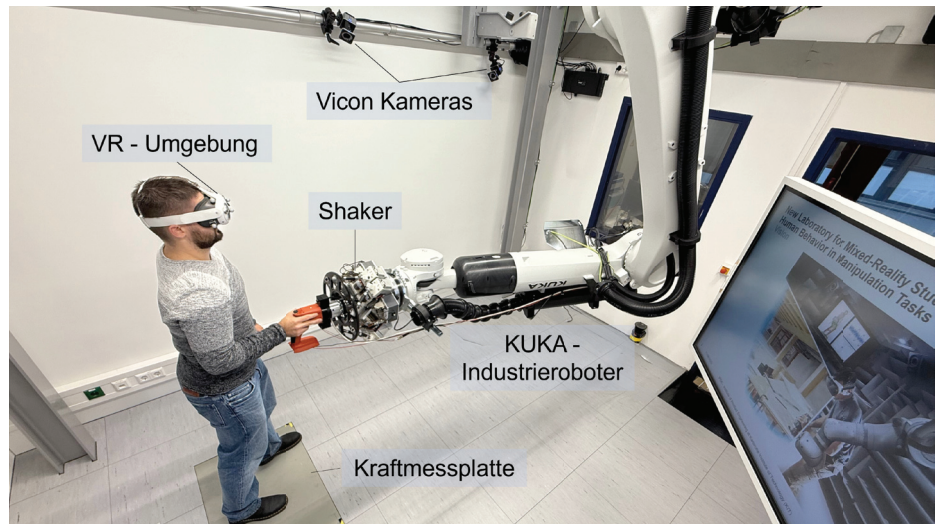


Bild 1: Technische Ausstattung des Human-Machine-Symbiose-Labors am KIT – Karlsruher Institut für Technologie

Bodenreaktionskräfte misst eine Kraftmessplatte, während die Kräfte am Tool-Griff über einen am Endeffektor angebrachten Kraft-Momenten-Sensor (Schunk SE &

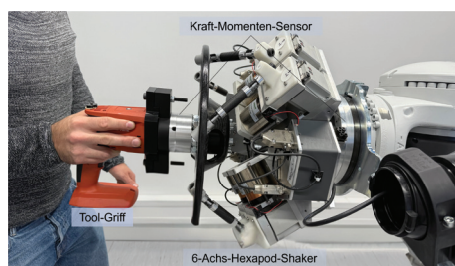


Bild 2: Interaktion zwischen Mensch und technischem System

Co.KG, Lauffen, Deutschland) aufgenommen werden. Die in Unity entwickelte VR-Umgebung dient als flexibel anpassbare visuelle Versuchsumgebung und versetzt die Probanden in ein realitätsnahes Anwendungsszenario. Die Immersion wird durch einen wechselbaren Endeffektor verstärkt. Eine universelle Schnittstelle ermöglicht die Montage unterschiedlicher Griffe technischer Systeme. Die Lastprofile aus realen Anwendungen können mit dem 6-Achs-Kuka-Industrieroboter reproduzierbar eingestellt werden.

6-ACHS-VOICE-COIL-HEXAPOD ZUR

ABBILDUNG VON TECHNISCHEN SYSTEMEIGENSCHAFTEN

Bei der Nutzung technischer Systeme treten unter anderem Vibrationsbelastungen auf, die für die Wahrnehmung des Menschen und seine Gesundheit von großer Bedeutung sind. Solche Belastungen können zu Erkrankungen wie der Weiß-Finger-Krankheit führen. Um diese Art der Belastung im HMS-Lab untersuchen zu können, ist zwischen Endeffektor des KUKA-Roboters und der Interaktionsschnittstelle zum Menschen ein 6-Achs-Voice-Coil-Shaker verbaut. Dieses Shaker-System, eine Sonderanfertigung der Firma DT-Square (DTSquare GmbH, Stuttgart, Germany), ermöglicht Andruckkräfte des Menschen bis 200 N sowie das Erzeugen von Vibrationen in Frequenzbereichen bis zu 500 Hz. Wie in Abbildung 2 zu sehen, werden die Vibrationen durch regelbare Voice-Coils erzeugt.

AUSBLICK

Mithilfe der Ausstattung des HMS-Labs können in Zukunft reale Belastungen in Form von Kräften und Drehmomenten durch die gekoppelte Echtzeitsteuerung von Industrieroboter und Shaker auf den Menschen aufgebracht und gleichzeitig dessen Reaktionen vermessen werden.

Die flexible Einstellbarkeit des Roboters und des Shakers ermöglicht die Untersuchung zentraler Belastungsgrößen wie Vibrationen, Werkzeugmasse und Anwendungskräfte sowie die Erfassung der damit verbundenen menschlichen Wahrnehmung. So können aufwendige Iterationen von physischen Prototypen reduziert werden. Ergänzend erlaubt die programmierbare VR-Umgebung den Einsatz des HMS-Labs in unterschiedlichsten Anwendungsfällen. So können wichtige Erkenntnisse für die Entwicklung symbiotischer Mensch-Maschine-Systeme gewonnen werden.

LITERATUR

- [1] Brucker Juricic, et al. (2021). Review of the Construction Labour Demand and Shortages in the EU. Buildings, 11(1), 17. <https://doi.org/10.3390/buildings11010017>
- [2] Hardege, Stefan (2023). Fachkräfteengpässe gefährden Transformation und Innovation. DIHK-Report Fachkräfte 2023/2024.
- [3] (2021) Industry 5.0 : towards a sustainable, human-centric and resilient European industry. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/308407>

- [4] Inga, Jairo, et al. (2023): Human-machine symbiosis: A multivariate perspective for physically coupled human-machine systems. International Journal of Human-Computer Studies 170, 102926. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2022.102926>.
- [5] Saurbier, Simon, et al. (2025). The Human-Machine Symbiosis Laboratory: A New Testing Environment for Developing Symbiotic Human-Machine Systems. AHFE (2025) International Conference. AHFE Open Access, vol 199. AHFE International, USA. <http://doi.org/10.54941/ahfe1006890>

AUTOREN

Simon Saurbier, M.Sc.
Susanne Sutschet, M.Sc.
Johannes Sängler, M.Sc.
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen
IPEK – Institut für Produktentwicklung
Karlsruher Institut für Technologie

Entwicklung smarter Produkt-Service-Systeme im industriellen Mittelstand

METHODISCHE UND ORGANISATORISCHE ERKENNTNISSE FÜR DIE DATENGETRIEBENE WERTSCHÖPFUNG

Die Entwicklung smarter Produkt-Service-Systeme (PSS) vollzieht sich vor dem Hintergrund tiefgreifender technologischer Umbrüche, die durch Fortschritte in der Informations- und Kommunikationstechnik ausgelöst werden. Damit verschieben sich Wertschöpfungslogiken weg von rein produktorientierten Modellen hin zu Nutzungs- und Lösungsorientierung, in denen Wert primär im Gebrauch entsteht [1]. Smart PSS bezeichnen integrierte Systeme, die vernetzte, sensorisch ausgestattete Produkte mit datenbasierten Diensten koppeln und Analyse-, Optimierungs- und Automatisierungsfunktionen bereitstellen. Die zugrunde liegenden technischen Strukturen entsprechen einem cyber-physischen System. Digitale Infrastrukturen verbinden die Elemente zu datenfähigen Netzwerken, die die kontinuierliche Nutzung, Auswertung und Weiterverarbeitung produktgenerierter Informationen ermöglichen [2].

MOTIVATION

Die damit verbundene Transformation erzeugt diverse

Entwicklungsherausforderungen. Die integrierte Gestaltung heterogener Domänen wie Mechanik, Elektronik, Software, Datenanalyse, Service-Design und Geschäftsmodellarchitektur führt zu einer starken Erhöhung der Systemkomplexität [3]. Methodische Engpässe entstehen durch fehlende Standardisierung, unzureichende Modellierung datenintensiver Dienstleistungen und begrenzte Eignung etablierter PSS-Vorgehensmodelle für digitale und datenorientierte Wertschöpfung [3]. Dies erzeugt ein Spannungsfeld aus technischen, organisationalen und geschäftsstrategischen Anforderungen, das bislang nur punktuell adressiert wird.

Gleichzeitig eröffnen produktgenerierte Daten substantielle Wertschöpfungspotenziale. Echtzeitdiagnosen, prädiktive Wartung, adaptive Betriebsoptimierung oder nutzungsabhängige Abrechnungsmodelle basieren direkt auf der Analyse kontinuierlicher Datenströme. Diese datenorientierten Mechanismen steigern Verfügbarkeit, Effizienz und Individualisierung und ermöglichen Unternehmen eine differenzierte Positionie-

rung im Wettbewerb.

ENTWICKLUNG SMARTER PSS PRAXISNAHE FORSCHUNG

Die industrielle Umsetzung dieser Potenziale erfordert belastbare und praxisvalidierte Entwicklungsunterstützung. Das BMBF-Konsortialprojekt bi.smart adressierte diese Lücke, indem es ein systematisches,



Bild 1: bi.smart Projekttreffen bei Trumpf

industriell orientiertes Verständnis smarter PSS-Entwicklung erarbeitete. Neun Partner, darunter fünf produzierende KMU, bildeten hierfür ein interdisziplinäres Konsortium (Bild 1). Die Ausgangslage reflektierte typische Problemlagen der Industrie,

welche als Grundlage für eine kritische Analyse etablierter Entwicklungsmodelle dienen, bspw. aus Produktentwicklung, mechatronischen Systemansätzen, serviceorientierten Entwicklungsframeworks und agilen Software-Entwicklungsprozessen. Die praxisnahe Forschung ermöglichte einen iterativen Abgleich wissenschaftlicher Konzepte mit realen Entwicklungsverläufen. Die Pilotprojekte der KMU boten empirische Evidenz für typische Herausforderungen wie Datenqualitätsprobleme, Integrationshürden, organisatorische Reibungen und fehlende Lebenszyklustransparenz. Durch diese Rückkopplung konnten neue Rollenmodelle, methodische Bausteine und ein modularisiertes Vorgehensmodell verifiziert und industrienah ausgestaltet werden.

BI.SMART LAUNCHPAD

Die wesentlichen Erkenntnisse des Projekts wurden in der frei zugänglichen Web-Plattform bi.smart Launchpad konsolidiert (www.bismart.info). Diese Plattform aggregiert die zentralen Forschungsergebnisse und bereitet diese in einer strukturierten, anwenderorientierten Form auf. Ihr Fundament bildet die Synthese zweier Wissensstränge: empirische Lerneffekte der KMU-Entwicklungsprojekte sowie methodische und konzeptionelle Erkenntnisse. Daraus resultiert ein praxisvalidiertes Wissensökosystem, das sowohl konzeptionelle Orientierung als auch konkrete operative Unterstützung ermöglicht.

Das Launchpad strukturiert die Ergebnisse entlang eines phasenbasierten Vorgehensmodells, das Analyse-, Gestaltungs- und Realisierungsaktivitäten systematisch verbindet (Bild 2). Es integriert darüber hinaus zentrale Kompetenzfelder der Smart-PSS-Entwicklung, darunter Sensorik- und Datenintegration, Service-Design, datenbasierte Geschäftsmodellinnovation, Plattform- und Ökosystemgestaltung sowie Rollen- und Domänenarchitektur. Ausgehend von einem Self-Assessment, welches Unternehmen hilft Entwicklungspotenziale offenzulegen, werden die Ergebnisse in Form methodischer Bausteine, Rollenprofile, Entscheidungslogiken, Templates und anwendungsnahe Fallbeispiele bereitgestellt.

Die Plattform fungiert gleichzeitig als Koordinationsinstrument, da sie Transparenz über notwendige Kompetenzen, Domäneninteraktionen und Datenflüsse schafft. Die Einbettung realer KMU-Projektverläufe ermöglicht ein realistisches Verständnis operativer Herausforderungen und reduziert Entwicklungsrisiken. Durch diese industrienah und zugleich wissenschaftlich fundierte Ausgestaltung bildet das Launchpad ein belastbares Bindeglied zwischen Forschung und Praxis und unterstützt die systematische, datenorientierte Entwicklung smarter Produkt-Service-Systeme.

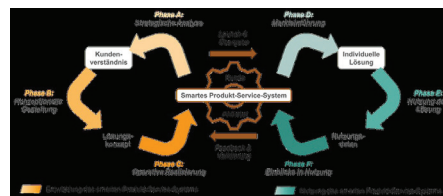


Bild 2: Referenzvorgehensmodell zur smart PSS Entwicklung

Diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung durch das Forschungsprojekt „bi.smart“ gefördert (Förderkennzeichen 02J19B043).

LITERATUR

- [1] Valencia, A.; Mugge, R.; Schoormans, J. P. L.; Schifferstein, H.: Challenges in the design of smart product-service systems (PSSs): Experiences from practitioners. In: 19th DMI: Academic Design Management Conference, 2014.
- Zheng, P., Chen, C.H., Wang, Z., 2021. Smart Product-Service Systems. Elsevier, Nanyang, Singapore.
- [2] Paliyenko, Y.; Tüzün, G.-J.; Roth, D.; Kreimeyer, M.: Inquiry and Analysis of Challenges in the Development of Smart Product-Service Systems. In: Proceedings of the Design Society 2 (2022).

AUTOREN

Yevgeni Paliyenko, M.Sc.
 Dr.-Ing. Daniel Roth
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Kreimeyer
 Institut für Konstruktionstechnik und Technisches Design (IKTD)
 Universität Stuttgart

Innovation für New Space: Wärmemanagement von Cube-Sats mittels eines Digitalen Zwillings

MOTIVATION

Laserbasierte Satellitenkommunikation gilt als Schlüsseltechnologie für die nächste Generation hochperformanter Datenverbindungen im All. Doch je präziser die Optik, desto dramatischer wirken sich thermische Ungleichgewichte aus: Schon kleine Temperaturgradienten führen zu minimalen, aber kritischen Verformungen und damit zu optischen Aberrationen, die Reichweite, Datenrate und Signalqualität schmälern. Klassische Gegenmaßnahmen – etwa Radiatoren, Multilayer-Isolation oder selektive Oberflächenbeschichtungen – sind in CubeSats durch begrenzte Masse-, Volumen- und Leistungsbudgets sowie wechselnde Umgebungsbedingungen nur eingeschränkt einsetzbar.

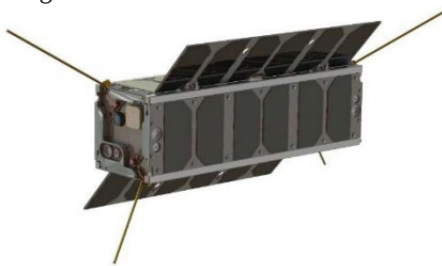


Bild 1: 3U CubeSat

Vor diesem Hintergrund hat das Projekt PLUTO (Processor Localization and Utilization for Thermal Optimization) folgendes Ziel formuliert: vorhandene Redundanzen der Elektronik nicht nur als Ausfallsicherung zu betrachten, sondern sie gezielt als thermische Stellglieder zu nutzen, um Wärmeflüsse aktiv zu steuern und Temperaturverteilungen zu homogenisieren. Das Konzept adressiert unmittelbar jene Engstelle, die neuartige Laserterminals, präzise Nutzlastsensoren und eng tolerierte Strukturverbunde in Kleinsatelliten bislang limitiert hat. Damit rückt ein operativ taugliches, ressourceneffizientes System in Griffweite, das auch bei dynamischen Missionsprofilen, wechselnden Orbitalbedingungen und Lastwechseln eine stabile optische Abbildung gewährleistet.

DIGITALER ZWILLING

Der Kern der PLUTO-Architektur ist ein Digitaler Zwilling, der den thermischen Zustand des CubeSats als hochaufgelöstes,

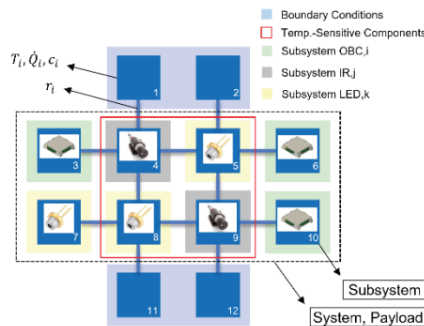


Bild 2: PLUTO Satelliten-Payload Konzept

fortlaufend aktualisiertes Abbild erfasst. Anders als statische Simulationsmodelle ist dieser Zwilling eng an Telemetriedaten gekoppelt und führt kontinuierlich Systemidentifikation durch: Materialparameter, Koppelmatrizen, Leitfähigkeiten und Wärmekapazitäten werden datengetrieben korrigiert, sodass Vorhersagen auch unter sich ändernden Betriebs- und Umweltbedingungen belastbar bleiben (Parameter Update).

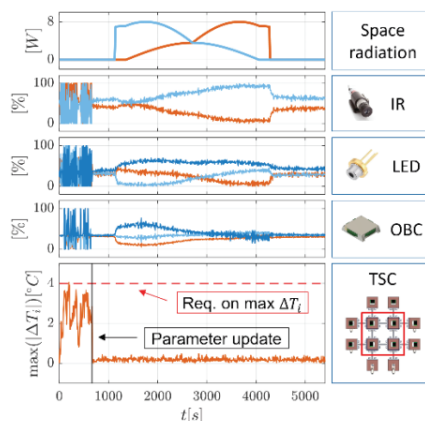


Bild 3: Temperaturregelung bei Low-Earth-Orbit-Simulation

Auf dieser adaptiven Grundlage arbeitet eine modellprädiktive Regelung (Model Predictive Control, MPC), die die Zukunft der Temperaturverteilung über einen Vorhersagehorizont abschätzt und anschließend jene Kombination redundanter Elektronikpfade auswählt, deren Aktivierung in Summe die Temperaturgradienten minimiert. Dabei berücksichtigt der MPC physikalische Nebenbedingungen – etwa maximale Leiterplattentemperaturen, ssige Anstiegsraten, verfügbare Leistungsbudgets und zeitkritische Betriebsmodi der Nutzlast

– und löst ein Optimierungsproblem, das zwischen Regelgüte, Energieeinsatz und Lebensdauernanforderungen balanciert.

Der entscheidende Hebel liegt im Paradigmenwechsel: Redundante Elektronik, die herkömmlich inaktiv bleibt, wird kontextsensitiv als thermischer Akteur eingesetzt. Verlustleistungen, die ohnehin anfallen, werden zeitlich und räumlich so verteilt, dass Wärme gezielt in die Struktur eingekoppelt oder von Hotspots weggeleitet wird. Der Digitale Zwilling dient dabei als konsistentes Rückgrat, in das physikbasierte Wärmemodelle – Leitungs-, Konvektions- und Strahlungsanteile in der Raumumgebung – mit datengetriebener Kalibrierung verschmelzen. Das Parameter-Update arbeitet in einem geschlossenen Regelkreis: Telemetrie und Randbedingungsschätzer (z. B. solare Einstrahlung, Erd-IR, Albedo, interne Leistungsprofile) speisen die Systemidentifikation, die wiederum den MPC mit aktuellen Modellen versorgt. So bleibt die Steuerung robust gegenüber Drift, Alterung, Fertigungstoleranzen und nicht modellierten Kopplungen. Das Ergebnis ist eine prädiktive, selbstanpassende Thermikregelung, die nicht nur auf Störungen reagiert, sondern ihnen vorausgreift, Temperaturspitzen abflacht und den optischen Pfad stabil hält.

THERMALE TESTS

Um den Ansatz jenseits der Simulation zu validieren, wurde ein CubeSat-Prototyp mit repräsentativer Nutzlast, thermisch relevanten Strukturpfaden und gezielt platzierter Redundanzhardware aufgebaut. Befestigungskonzepte und Wärmeleitpfade wurden so gestaltet, dass sie sowohl realistische Einsatzbedingungen abbilden als auch dem Regler genügend Stellmöglichkeiten eröffnen.

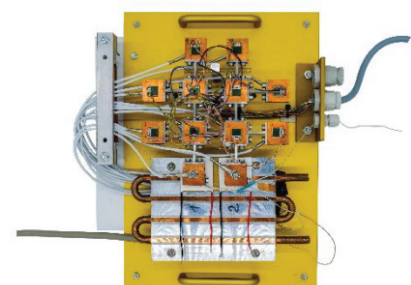


Bild 4: Satelliten-Testprototyp

Der Digitale Zwilling lief in einer Hardware-in-the-Loop-Umgebung, in der echte Telemetrie – unter anderem von Temperatursensoren, von Strom- und Spannungsmessungen sowie von simulierten Orbit-Randbedingungen – in Echtzeit in das Modell zurückgeführt wurde. Die Testkampagne kombinierte mehrere Profile: zum einen thermische Zyklen, die aus Orbitberechnungen abgeleitet wurden und typische Sonneneinstrahlungsverläufe, Eclipsephasen und Albedo-Ereignisse nachbildeten; zum anderen provozierte Lastwechsel, etwa durch wechselnde Nutzlast-Duty-Cycles, angedeutete Leistungsspitzen in der Energieversorgung und transiente Störfälle. In jeder Phase arbeitete der MPC mit dem jeweils aktualisierten Modell aus der Systemidentifikation, schätzte die Temperaturentwicklung voraus und wählte die Aktivierungsmuster der redundanten Elektronik so, dass Gradienten minimiert und Grenzwerte eingehalten wurden. Zusätzlich wurden Robustheitstests durchgeführt, bei denen Sensorfehler, kalibrierte Messrauschen und partielle Modellabweichungen eingespielt wurden, um die Fehlertoleranz und Konvergenz des Parameterupdates zu prüfen. Die Versuche zeigten, dass der Digitale Zwilling in der Lage ist, Diskrepanzen zwischen Vorhersage und Messung rasch zu identifizieren und mit moderaten Parameteranpassungen zu schließen, ohne die physikalische Plausibilität des Modells zu verlieren. Damit blieb der Regelkreis stabil, selbst wenn Randbedingungen sprunghaft wechselten oder Lastprofile stark moduliert wurden.



Bild 6: Thermisches Testaufbau und Messelektronik

ERGEBNIS

Die Messergebnisse aus Labor und Hardware-in-the-Loop belegen die Wirksamkeit des Konzepts: Temperaturdifferenzen zwischen kritischen Subsystemen konnten zuverlässig unter 5 Grad Kelvin gehalten werden – exakt dem im Anforderungskata-

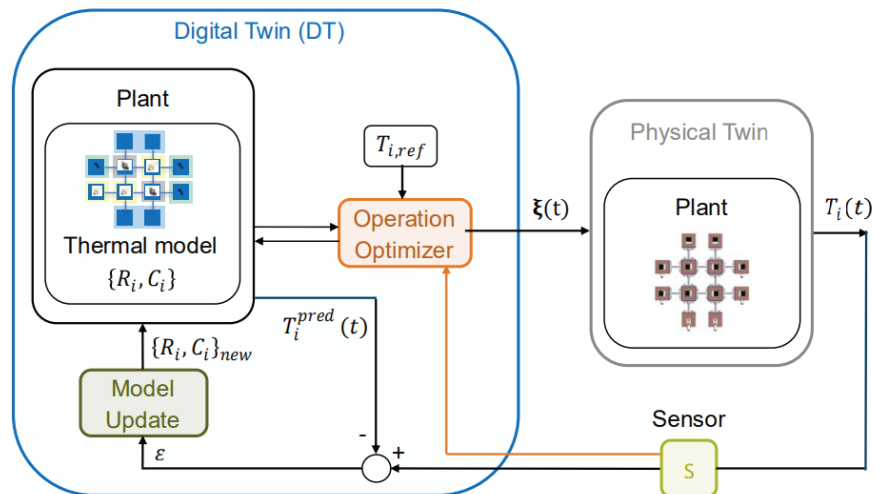


Bild 5: Digitaler Zwilling für Thermalmanagement

log definierten Zielwert entsprechend. Das Besondere ist, dass diese Regelgüte ohne zusätzliche, dedizierte Thermik-Aktoren erreicht wurde. Stattdessen nutzt PLUTO vorhandene Redundanzkanäle, die im nominellen Betrieb ohnehin mitgeführt werden, und erschließt sie als fein dosierbare Wärmequellen. Darüber hinaus zeigte sich der Ansatz robust gegenüber Störungen: Auch bei künstlich induzierten Leistungsspitzen, abrupten Duty-Cycle-Wechseln und variierenden Einstrahlbedingungen blieb die Temperaturverteilung innerhalb zuvor definierter Toleranzen. Die stetig Kopplung von Systemidentifikation und MPC verhinderte Modellalterung, sodass der Regler weder in konservative Übervorsicht noch in riskante Überschinger verfiel. In Summe liefert PLUTO eine belastbare Antwort auf eines der drängendsten Probleme moderner Kleinsatellitenmissionen: ein integriertes, selbstadaptives Thermikmanagement, das physikbasierte Modellierung mit datengetriebener Kalibrierung und prädiktiver Optimierung verbindet. Über den konkreten Anwendungsfall hinaus eröffnet die Methodik einen generischen Pfad für komplexere Missionen, bei denen die Thermik in enger Wechselwirkung mit Optik, Struktur und Energiehaushalt steht. Der Digitale Zwilling als Rückgrat, das sich mit realer Telemetrie fortschreibt, schafft dabei die Voraussetzung für eine Klasse intelligenter, selbstregulierender Satellitenplattformen, die nicht nur auf Abweichungen reagieren, sondern Betriebszustände vorausschauend in den zulässigen Fenstern halten. Damit legt das

PLUTO-Projekt den Grundstein für zuverlässigere laserbasierte Kommunikation, höhere optische Präzision und effizientere Nutzung knapper Ressourcen – in CubeSats und darüber hinaus.

PARTNER



GEFÖRDERT DURCH

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie



LEHRSTUHLINHABER

Prof. Markus Zimmermann

AUTOREN

Sergi Pagés, M.Sc.

Lehrstuhl für Produktentwicklung und Leichtbau Technische Universität München



WiGeP

Wissenschaftliche Gesellschaft
für Produktentwicklung

Mehr Innovationskraft durch Zusammenarbeit von Wissenschaft und Wirtschaft

Besuchen Sie die Website der WiGeP: www.wigep.de

Vorstand/Anschriften:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer
(Geschäftsführer)

Institut für Produktentwicklung und
Gerätebau
Leibniz Universität Hannover

An der Universität 1
30823 Garbsen
Tel.: +49 (0) 511 | 762 3471

E-Mail: lachmayer@ipeg.uni-hannover.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold-
Byhain (Sprecherin für Methoden & Pro-
zesse in der Produktentwicklung)

Institut für Maschinenelemente
und Maschinenkonstruktion
Technische Universität Dresden

George-Bähr-Straße 3c
01069 Dresden
Tel.: +49 (0) 351 | 463-33775

E-Mail: kristin.paetzold@tu-dresden.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulf Kletzin
(Sprecher für Lehre & Weiterbildung)

Fachgebiet Maschinenelemente
Technische Universität Ilmenau
Max-Planck-Ring 12
98693 Ilmenau

Tel.: +49 (0) 3677 | 69-2471

E-Mail: ulf.kletzin@tu-ilmenau.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner
(Sprecher für Maschinenelemente und
-systeme)

Fachgebiet Produktentwick-
lung und Maschinenelemente
Technische Universität Darmstadt

Otto-Berndt-Straße 2
64287 Darmstadt

Tel.: +49 (0) 6151 | 1621171

E-Mail: kirchner@pmd.tu-darmstadt.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Gerhard
(Sprecher des Vorstands und für Virtuelle
Produktentwicklung)

Lehrstuhl für Digital Engineering
Ruhr Universität Bochum
Universitätsstraße 150
44801 Bochum

Tel.: +49 (0) 234 | 32-27009

E-Mail: detlef.gerhard@rub.de

Ordentliche Mitglieder:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Abramwici (Ruhr-Universität Bochum), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers (Karlsruher Institut für Technologie (KIT)), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Beate Bender (Ruhr-Universität Bochum), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Nikola Bursac (Technische Universität Hamburg), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Tobias Düser (Karlsruher Institut für Technologie), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detlef Gerhard (Ruhr-Universität Bochum), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kilian Gericke (Universität Rostock), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler (Universität Paderborn), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jens Göbel (Technische Universität Kaiserslautern), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dietmar Göhlich (Technische Universität Berlin), Univ.-Prof. Dr. sc. ETH Alexander Hasse (Technische Universität Chemnitz), Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hannes Hick (Technische Universität Graz), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Husung (Technische Universität Ilmenau), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Jacobs (RWTH Aachen University), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner (Technische Universität Darmstadt), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulf Kletzin (Technische Universität Ilmenau), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Koch (Technische Universität Kaiserslautern), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause (Technische Universität Hamburg), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Matthias Kreimayer (Universität Stuttgart), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer (Leibniz Universität Hannover), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Liebig (Technische Universität Berlin), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel (Technische Universität Clausthal), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Balazs Magyar (Universität Paderborn), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Mantwill (Helmut-Schmidt-Universität), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen (Karlsruher Institut für Technologie (KIT)), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Mirk Meboldt (Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich), Univ.-Prof. Dr. Iryna Mozgova (Universität Paderborn), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold-Byhain (Technische Universität Dresden), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel (Universität Stuttgart), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Schindler (RWTH Aachen University), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Berthold Schlecht (Technische Universität Dresden), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Benjamin Schleich (Technische Universität Darmstadt), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hubert Schwarze (Technische Universität Clausthal), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl (Technische Universität München), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark (Technische Universität Berlin), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Roman Teutsch (Technische Universität Kaiserslautern), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stephan Tremmel (Universität Bayreuth), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor (Technische Universität Braunschweig), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek (Leibniz Universität Hannover), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sandr Wartzack (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen), Univ.-Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Michael Weigand (Technische Universität Wien), Univ.-Prof. Dr. Markus Zimmermann (Technische Universität München)

Mitglieder im Ruhestand:

Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl (Technische Universität Darmstadt), Prof. Dr.-Ing. Fatih Babalik (Uludag Üniversitesi), Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche (Universität Stuttgart), Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz (Universität Stuttgart), Prof. Dr. h. c. Dr. h. c. Dr.-Ing. Herbert Birkhofer (Technische Universität Darmstadt), Prof. Dr.-Ing. Lucienne Blessing, Prof. em. Dr. rer. nat. C. Werner Dankwort, Prof. Dr.-Ing. Ludger Deters (Universität Magdeburg), Prof. em. Dr.-Ing. Klaus Ehrlenspiel, Prof. Dr.-Ing. Martin Eigner, Univ.-Prof. Dr. sc. techn. Paolo Ermanni (Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) Zürich), Prof. Dr.-Ing. Jörg Feldhusen (RWTH Aachen), Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier (Universität Paderborn), em. Prof. Dr.-Ing. Peter Gold, Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg), Prof. Dr.-Ing. Bernd-Robert Höhn (Technische Universität München), Prof. Dr.-Ing. habil. Günter Höhne (Technische Universität Ilmenau), Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Franz Gustav Kollmann, Prof. Dr.-Ing. Frank-Lothar Krause, em. Prof. Dr.-Ing. Konrad Langenbeck, Prof. Dr.-Ing. Erhard Leidich (Technische Universität Chemnitz), Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann (Technische Universität München), Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Linke, Prof. Dr.-Ing. Harald Meerkamm (Universität Erlangen-Nürnberg), Prof. Dr.-Ing. Heinz Mertens (Technische Universität Berlin), Prof. Dr. Athanassis Mihalidis (Aristotle University of Thessaloniki), Univ.-Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h. c. Jivka Ovtcharova (Karlsruher Institut für Technologie (KIT)), Prof. em. Dr.-Ing. Heing Peeken, Prof. Dr.-Ing. Gerhard

Poll (Leibniz Universität Hannover), Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart (Technische Universität München), Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg (Universität Bayreuth), Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Laurenz Rinder, Prof. Dr.-Ing. Bernd Sauer (Technische Universität Kaiserslautern), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dieter Spath (Universität Stuttgart), Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph Stelzer (Technische Universität Dresden), Prof. Dr.-Ing. Peter Tenberge (Ruhr-Universität Bochum), Prof. Dr.-Ing. Klaus-Dieter Thoben (Universität Bremen), Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Sándor Vajna (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg), Prof. Dr.-Ing. Gerhard Wagner (Ruhr-Universität Bochum), Prof. Dr.-Ing. Christian Weber (Technische Universität Ilmenau), Prof. Dr.-Ing. Dieter Wüstenberg (Technische Universität Kaiserslautern), o. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Klaus Zeman (Johannes Kepler Universität), Prof. Dr.-Ing. Detmar Zimmer (Universität Paderborn)

Industriekreis:

Alfred Katzenbach (Katzenbach Executive Consulting), Alfred Schreiber (C. & E. Fein GmbH), Alois Starlinger (Stadler Rheintal AG), Andreas Weber (Vestas Nacelles Deutschland GmbH), Bernd Pätzold (ProSTEP AG), Burkhard Pinnekamp (RENK AG), Carsten Burchardt (Siemens Digital Industries Software GmbH), Christoph Lutz (Julius Blum GmbH), Daniel Kähny (LS Telcom AG), Detlef Gierling (ZF Sachs AG), Dirk Adamczyk (ZF Friedrichshafen AG), Eberhard Bock (Freudenberg FST GmbH), Emil Heyden (Vibracoustic SE), Frank Koch (Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI), Frank Thielemann (UNITY AG), Franz Völkel (Schaeffler), Gerd Fricke (PEKU Folien GmbH), Gunnar Ebner (Capgemini Deutschland GmbH), Gunnar Gödecke (VULKAN Kupplungs- und Getriebekonstruktion Berhard Hackforth GmbH & Co. KG), Günter Hähn (Wirtgen GmbH), Hans Huber (Mayr GmbH & Co. KG), Hansjörg Maier (Dr.-Ing. h.c. F. Porsche AG), Hartmut Rauen (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA)), Herbert Bickelmann (Autodesk GmbH), Johannes Schulz (Brose), Johann Paul Stemplinger (Audi AG), Jörg Böcking (Vibracoustic GmbH), Jörg Hartmann (Meyer Werft GmbH), Jörg Hermes (SEW-EURODRIVE GmbH & Co. KG), Jörg Schiebel (Tyco Integrated Fire & Security), Jörg Stahlmann (ConSenses GmbH), Jörn Reinecke (Faurecia Autositze GmbH), Jürgen Vogt (CADFEM GmbH), Karl Heinz Zachries (CONTACT Software GmbH), Karl Ludwig Kimmig (LuK GmbH & Co. KG), Karsten Anger (Hadi-Plast GmbH), Karsten Stoll (WAGO GmbH & Co. KG), Katharina Helten, Knut Tracht (Körber Technologies GmbH), Kristin Sittig (Volkswagen AG), Kurt Bengel (Cenit AG), Marc Kessler (Körber Technologies GmbH), Marcus Krastel (em engineering methods AG), Markus Kläiber (Schunk GmbH & Co. KG), Martin Husemann (Phi GmbH), Martin Kratzer (Mercedes-Benz AG), Martin Stark (invcn Beteiligungsgesellschaft mbH), Matthias Gatzert (Baker Hughes, a GE Company), Michael Engelbreit (Wittenstein Alpha), Michael Grethler (EES GmbH), Michael Ketting (IBAF GmbH), Michael Kleinkes (Hella KGaA Hueck & Co.), Nicolas Gebhardt (thyssenkrupp Marine Systems GmbH), Niklas Halfmann (Diehl Aviation), Olaf Schadowfsky (HILTI Entwicklungsgesellschaft mbH), Ottmar Müller (VAT Vakuumventile AG), Peter Fietkau (Porsche AG), Peter Gutzmer (SCHAEFFLER Gruppe), Peter Post (Festo AG & Co. KG), Peter Robl (Siemens AG), Ralf Hambrecht (Flender GmbH), Razvan Olosu (b1 Engineering Solutions GmbH & Co. KG), Reinhold Achatz (Thyssen Krupp AG), Richard Einmann (Bechtle GmbH), Robert Fischer (AVL), Robert Plank (Horiba Europe GmbH), Roland Gerhards (ZAL - Zentrum für angewandte Luftfahrtforschung GmbH), Rolf Döbereiner (AVL List GmbH), Rudolf Schubert (Continental AG), Sabine Muschik (Trumpf Werkzeugmaschinen), Stefan Heilmann (Paul Wurth S.A.), Stefan Möhringer (Simon Möhringer Anlagenbau GmbH), Stefan Schnackertz (Dassault Systemes Deutschland GmbH), Stefan Wallmeier (KAMAX Holding GmbH & Co. KG), Thomas Bertolini (Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG Antriebssysteme), Thomas Schneider (TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH & Co. KG), Urban August (Siemens PLM Software),

Stand: August 2025
Internet: www.wigep.de
Auflage: 800 Exemplare
ISSN 1613-5504
Redaktion: Kevin Herrmann

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

