



NEWS

Mitteilungen der WiGeP

WiGeP Herbsttagung 2022

Zur diesjährige Herbsttagung lud Professor Rieg die Mitglieder der WiGeP an die Universität in Bayreuth. Der Start dieser dreitägigen Tagung erfolgte im Hotel-Restaurant Goldener Anker mit einem Sektempfang und einem gemeinsamen Abendessen direkt in der schönen Altstadt von Bayreuth. Die Auftaktveranstaltung genossen die Mitglieder mit regionalen Spezialitäten zum Essen und Trinken und nutzten die Zeit für einen regen fachlichen und privaten Austausch.

Der zweite Tag begann mit der Mitgliederversammlung in den Räumlichkeiten der Universität Bayreuth. In dieser wurden neben den offiziellen Vereinspunkten auch Berichte aus Fach- und Arbeitsgruppen und anderen WiGeP-nahen Gesellschaften vorgetragen. Ein wichtiger Programmpunkt war zudem die Wahl drei neuer WiGeP-Kandidaten, sodass im Rahmen der

Versammlung Professor Teutsch, Professor Riedel und Professor Gericke als neue Mitglieder in die WiGeP aufgenommen wurden. Außerdem berichteten in zwei interessanten Vorträgen die Gastredner Dr.-Ing. Stephan Neugebauer über die EU-Forschungslandschaft und Norbert Haefke über die Aktivitäten der Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA).

Im Anschluss an die Mitgliederversammlung folgte der kulturelle Teil des Tages. Zuerst besichtigten die Mitglieder das Markgräfliche Opernhaus Bayreuth. Am Abend folgte eine Fahrt zur Orangerie der Eremitage, wo die Wasserspiele in der eindrucksvollen Parkanlage bestaunt werden konnten. Das anschließende Gala-Dinner in der Eremitage führte durch ein hervorragendes Essen und einer schönen Atmosphäre zu einem rundum gelungenen Abend.

Am letzten Tag versammelten sich die Mitglieder zu den Fachgruppensitzungen an der Universität. Anschließend lud Professor Tremmel zu einer interessanten Lehrstuhlführung, in welcher er mit seinen Mitarbeitern die Forschungsschwerpunkte, Lehrtätigkeiten und Prüfstände seiner Einrichtung vorstellten. Die Herbsttagung endete dann mit einem gemeinsamen Mittagessen im Botanischen Garten der Universität Bayreuth.

Der Vorstand bedankt sich bei allen Teilnehmenden und den Veranstaltern für eine interessante und gelungene Herbsttagung und freut sich auf die Frühjahrstagung 2023 in Linz.

Für die WiGeP

Kevin Herrmann, M. Eng.

Lukas Hoppe, M. Sc.



Schüler:innen zu Gast am IPeG Nachhaltige Produkte?!

Im Wintersemester 2021/2022 ist zum einen der neue Studiengang „Nachhaltige Ingenieurwissenschaft“ an der Fakultät für Maschinenbau der Leibniz Universität Hannover gestartet. Zum anderen hat sich das Institut für Produktentwicklung und Gerätebau (IPeG) mit einer neuen Lehrveranstaltung und Projektarbeit zum Thema „Entwicklung nachhaltiger Produkte – Nachhaltiges Produktdesign“ an diesem Bachelorstudiengang beteiligt, um gemeinsam mit den Studierenden das Spannungsfeld der mehrdimensionalen Nachhaltigkeit zu untersuchen. Vor diesem Hintergrund setzen sich die Studierenden mit der Entwicklung von Produkten sowohl theoretisch als auch praktisch in semesterbegleitenden Projekten auseinander. Über diese Lehrveranstaltungen hinausgehend hat das IPeG in den diesjährigen Sommerferien eingeladen und die Türen für interessierte Schüler:innen der Region Hannover geöffnet. Im Rahmen der neu entwickelten „Summer School: Nachhaltige Produkte?“ haben sich Schüler:innen im Alter von 11 bis 15 Jahren mit den Aspekten der Nachhaltigkeit bei der Entwicklung von Produkten beschäftigt.

WARUM IST DAS WICHTIG?

Mit Blick auf die aktuellen Zahlen der weiblichen Studienanfänger:innen im Fachbereich Maschinenbau zeigt sich, dass noch immer nur wenige Schülerinnen nach der Schule einen klassischen Ingenieurstudiengang beginnen. Mit lediglich 22,2% weiblicher Maschinenbaustudierenden im WiSe 2021/2022 bilden junge Ingenieurinnen deutschlandweit einen kleinen Teil der Studienbeginnenden.



Bild 1: Die Kleingruppen konnten die unterschiedlichen Fachbereiche der Institute am CMG kennenlernen

Somit muss sich heute und auch perspektivisch die Frage gestellt werden, wie mit diesem Gefälle umgegangen werden kann. Eine Möglichkeit bereits frühzeitig das Interesse für technische Zusammenhänge spielerisch zu wecken und zugleich ein Bewusstsein für die Einflüsse von Produkten auf alle Dimensionen der Nachhaltigkeit zu schaffen, gilt neben der Vernetzung in der Region als ein Ziel des IPeGs.

SCHÜLER:INNEN UND STUDIERENDE IM AUSTAUSCH

Gemeinsam mit Studierenden der Fakultät Maschinenbau haben sich die Schüler:innen nicht nur mit Fragen rund um das Thema „Entwicklung nachhaltiger Produkte“ beschäftigt, sondern auch die Studierenden selbst und das Leben an der Universität spielerisch kennengelernt. Beispielsweise konnten die Kleingruppen bei einer Rallye über den neuen Campus Maschinenbau Garbsen (CMG) die Vielseitigkeit der verschiedenen Institute kennenlernen und alle aufkommenden Fragen direkt beantwortet wissen.

THEORIE UND PRAXIS

An den folgenden Tagen haben die hybriden Kleingruppen bestehend aus Studierenden und Schüler:innen in verschiedenen Arbeitsphasen sich der Herausforderung der „Entwicklung nachhaltiger Produkte“ angenähert. Insgesamt sieben thematische Stationen haben die Teilnehmenden durchlaufen und am Beispiel unterschiedlicher Akkuschauber unter anderem mit den Phasen des Produktlebenszyklus (PLC), den Produktfunktionen oder der ökologischen Bewertbarkeit von diesen Produkten auseinandergesetzt.

Als Ergebnisse dieser Stationen konnten die Kleingruppen unter anderem die identifizierten Phasen des PLC als Kreislauf anordnen oder sich die Produktarchitekturen der jeweiligen Akkuschauber gegenseitig vorstellen und Unterschiede bzw. Gemeinsamkeiten zwischen diesen identifizieren.

Darauf aufbauend haben die Teilnehmenden die grundlegenden Phasen eines Life Cycle Assessments (LCA) kennengelernt und ein erstes Modell für die ökologische Bewertung der Akkuschauber aufgebaut.

Somit konnten die Schüler:innen mit Hilfe der Studierenden aus den ermittelten LCA-Daten konkrete Überlegungen vornehmen, wie die Entwicklung der Akkuschauber auf die Phasen des PLC Einfluss haben kann und beispielsweise Ressourcen eingespart oder mit Blick auf die Produktstruktur eine verlängerte Lebensdauer realisiert werden kann. Mit dieser Kombination aus Lehrinhalten, einem den Teilnehmenden bekannten Produktbeispiel und spielerischen ingenieursnahen Tätigkeiten hat das IPeG nicht nur ein Betreuungsangebot in den Sommerferien geschaffen, sondern vielmehr den Ingenieur:innen von morgen erste Einblicke in den universitären Alltag ermöglicht.

WEITERE PROJEKTE

Neben diesen Projektbeispielen erhofft sich das IPeG mit der Umsetzung eines konstruktiven Vorkurses im Bereich der Entwicklung nachhaltiger Produkte einen weiteren dem Studium vorgelagerten Impuls, um junge Menschen theoretisch sowie auch praktisch mit den Ingenieurwissenschaften vertraut zu machen.

LITERATUR

[1] Statistisches Bundesamt: Studierende in Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik-Fächern. Online im Internet unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bildung-Forschung-Kultur/Hochschulen/Tabellen/studierende-mint-faechern.html> (01.10.2022).

AUTOREN

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer
Johanna Wurst, M.Sc.

IPeG – Institut für Produktentwicklung und Gerätebau; Leibniz Universität Hannover

Entwicklung eines Inline Qualitätssicherungskonzepts der Batteriezellproduktion

Prozessübergreifende Analyse von Wechselwirkungen zwischen Produkten und Prozessen zur Identifizierung qualitätsrelevanter Parameter mittels Model-Based Systems Engineering (MBSE)

Energiespeichersysteme wie Lithium-Ionen-Batterien stellen einen wichtigen Wegbereiter im Zuge des fortschreitenden Trends zur Elektrifizierung der Mobilität dar. Die Batterieproduktion ist allerdings ein hochkomplexer Prozess, der aus mehreren Teilprozessschritten (TPS) besteht und eine Vielzahl von Zwischenprodukten (ZP) einschließt. Für jedes einzelne ZP existieren Produktparameter, die als qualitätsrelevant betrachtet werden können. Auch zwischen den Prozessparametern der einzelnen TPS und den Parametern des zugehörigen ZP gibt es Wechselwirkungen, die die Qualität der endgültigen Batteriezellen und beeinflussen. Um qualitätskritische Parameterabweichungen frühzeitig zu erfassen und somit Ausschuss während der Produktion zu reduzieren, ist ein gutes Verständnis des kompletten Produktionsprozesses und der Wechselwirkungen zwischen den Einflussparametern über TPS hinweg erforderlich.

NEUER ANSATZ MIT POTENZIAL
Ziel der Autoren ist die Entwicklung eines Konzepts zur Inline-Qualitätssicherung in der Batteriezellproduktion unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Produkt- und Prozessparametern sowie deren Auswirkungen auf die qualitätsrelevanten Parameter. Es gibt bereits Ansätze und Modelle, die den Einfluss von Abweichungen der Produktparameter verfolgen und die Auswirkungen einzelner Prozessabweichungen auf Folgeprozesse beschreiben. Die Autoren stellen einen MBSE-gestützten Ansatz vor, um die TPS-übergreifenden Wechselwirkungen zwischen Produkt- und Prozessparametern zu analysieren und so qualitätsrelevante Parameter im Kontext der Batteriezellenproduktion zu identifizieren (siehe Bild 1). Im ersten Schritt wird das Systemmodell des zu berücksichtigenden Gesamtsystems aufgestellt, in dem die Elemente wie Produkte und Prozesse, deren

Beziehungen sowie die jeweiligen Ein- und Ausgänge umfasst sind. Wechselwirkungen zwischen den Produkt- und Prozessparametern werden anschließend mittels Abhängigkeitsmatrix identifiziert und anhand definierter Abhängigkeitskriterien bewertet. Zur besseren Verfolgbarkeit der Abhängigkeiten werden diese in einem Baumdiagramm visualisiert. Dem Ziel folgend werden die Qualitätsparameter so eingeteilt, wie sie in verschiedenen Anwendungsfällen zu überwachen sind, darunter z. B. Vorbeugung von Qualitätsabweichung bzw. Unterstützung der Fehleranalyse [1]. Schließlich wird basierend auf den verketteten Abhängigkeiten sowie der Klassifizierung der Qualitätsparameter eine Auswertungsmethode entwickelt, um die anwendungsfallorientierten Qualitätsparameter der ZP in den einzelnen TPS zu ermitteln.

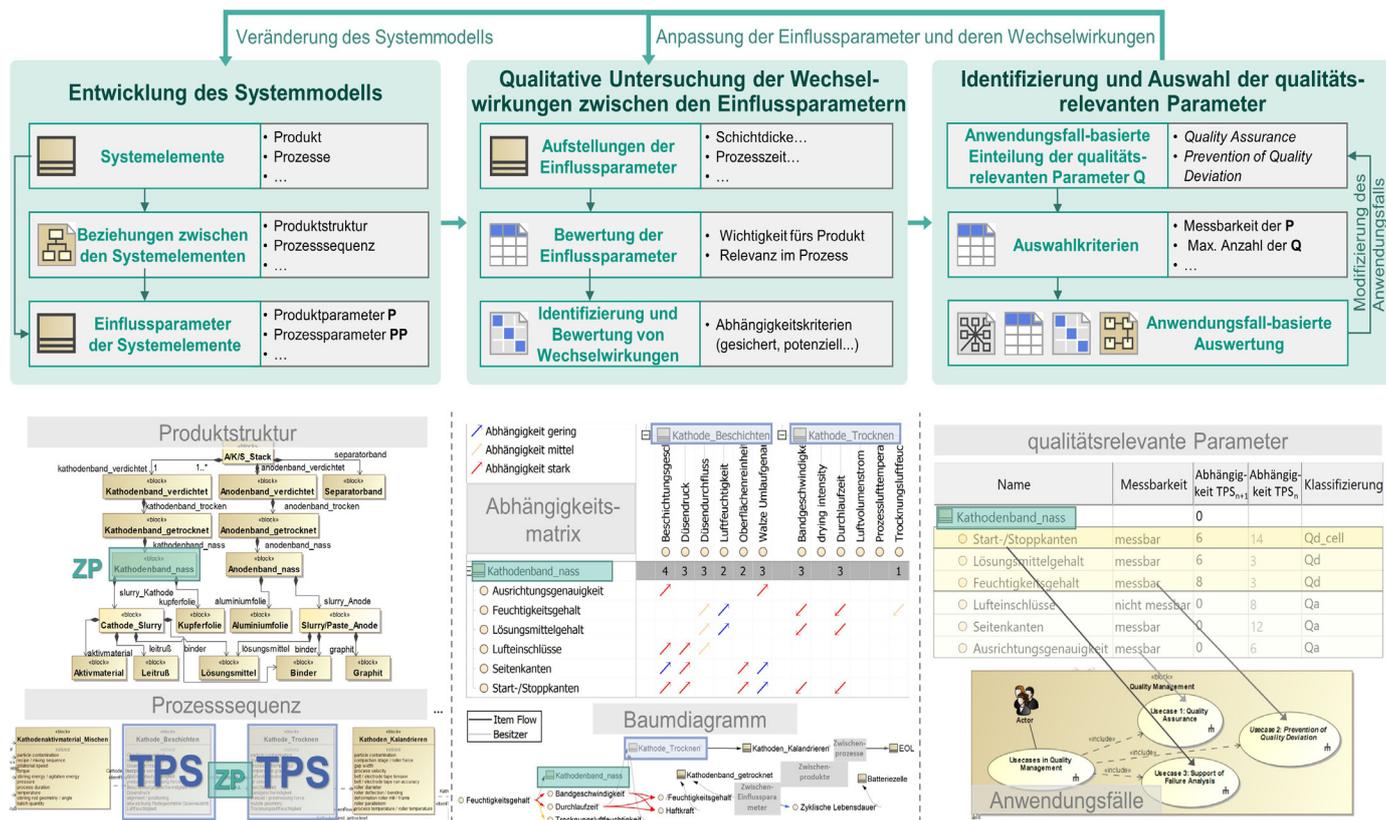


Bild 1: Arbeitsablauf des entwickelten Ansatzes und ein Anwendungsbeispiel

NUTZEN FÜR DIE ZUKUNFT

Anhand des Anwendungsbeispiels im Bild 1 wird gezeigt, dass der entwickelte MBSE-gestützte Ansatz beim Umgang mit der Komplexität der Batteriezellproduktion wesentlich unterstützt. Der Ansatz stellt auch einen Beitrag zum Produkt-Produktions-CoDesign (PPCD) dar, das die hoch vernetzte und parallelisierte Entstehung von Produkten und deren Produktionssystem(en) hinsichtlich eines effizienten und effektiven Betriebs beschreibt.

In der nächsten Phase sollten die Aktivitäten in der Qualitätssicherung abgebildet werden, was mit Hilfe von MBSE möglich ist. So können anhand der ermittelten, anwendungsorientierten Qualitätsparameter konkrete Handlungsempfehlungen für die frühzeitige Qualitätssicherung in der Produktion abgeleitet werden.

für die frühzeitige Qualitätssicherung in der Produktion abgeleitet werden. Beispielsweise sollen frühzeitig Parameterabweichungen, die am wahrscheinlichsten zu Ausschuss führen oder weitere Prozessschritte am stärksten beeinflussen können, vorrangig erfasst werden um eine bessere, prädiktive Regelung zu ermöglichen.

Mit dem entwickelten Ansatz wird somit eine Grundlage geschaffen, die die Auslegung der Inline-Messtechnik, die Aufklärung der Anforderungen an die Datenerfassung und -auswertung sowie die Optimierung der Aktivitätsabläufe im Qualitätssicherung unterstützt. Dadurch wird eine bessere Qualität bei gleichzeitig geringeren Kosten und Ressourcen erreicht, was eine potenzielle Erhöhung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit ermöglicht.

LITERATUR

[1] Zeng, Y., Müller-Welt, P., Hunger, S., Bause, K. & Ott, S. (2022). Auswirkungen von Wechselwirkungen zwischen Produkt- und Prozessparametern in der Produktion von Batteriezellen: Entwicklung eines Inline-Qualitätssicherungskonzepts mittels Model-Based Systems Engineering (MBSE). In Tag des Systems Engineering 2022. (in Veröffentlichung)

AUTOREN

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Albert Albers
 Dipl.-Ing. Katharina Bause
 Dipl.-Ing. Sascha Ott
 Yuning Zeng, M. Sc.
 IPEK - Institut für Produktentwicklung
 Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Speed4E

Hyper-Hochdrehzahl für den elektrifizierten automobilen Antriebsstrang zur Erzielung maximaler Reichweiten

Gesamtziel des Verbundvorhabens Speed4E war es, einen Hyper-Hochdrehzahl Antriebsstrang für reinelektrische Fahrzeuge zu konzipieren, entwickeln, konstruieren, fertigen und schließlich zu erproben und erforschen. Dabei galt es, die maximale Antriebsdrehzahl bis auf 50.000 1/min zu erhöhen, um die aktive Masse der Elektromotoren zu minimieren und so die Leistungsdichte zu steigern und Kosten zu reduzieren [SC20]. Durch die hohen Drehzahlen mussten zahlreiche Herausforderungen u. a. hinsichtlich Konstruktion, Auslegung, Wirkungsgrad und Akustik gelöst werden. Um die durch zusätzliche Getriebestufen und die Hochdrehzahl entstehenden Verlustleistungen zu kompensieren, wurden ganzheitliche Systembetrachtungen und intelligente Betriebsstrategien verfolgt und innovative Komponenten sowie Auslegungsansätze eingesetzt. Auch die Effizienzsteigerung des Gesamtsystems – und somit die Reichweite des Referenzfahrzeugs (BMW i3s) – stand im Vordergrund.

ANTRIEBSSYSTEMTOPOLOGIE

Die Vorteile einer Doppel-E-Architektur im elektrifizierten Antriebsstrang konnten bereits im Rahmen des Vorgängerprojekts Speed2E erfolgreich aufgezeigt werden [F17]. Das dort gewonnene Know-how floss bei der Konzeptfindung ein, sodass für den Speed4E-Antriebsstrang eine Doppel-E-Architektur in „U-Anordnung“ gewählt wurde. Dies wirkt sich sowohl auf die Montage als auch auf das Packaging im Versuchsfahrzeug positiv aus. Die resultierenden Teilantriebsstränge können unabhängig voneinander betrieben und beispielsweise auf zwei Antriebswellen geteilt werden, sodass ein Allradantrieb dargestellt werden kann.

Darüber hinaus wurden gleiche Dimensionen für unterschiedliche E-Motorenarten gewählt, welche nach dem Plug-and-Play Prinzip ausgelegt wurden. Hierdurch sind unterschiedliche Leistungsklassen darstellbar. Die entsprechenden Leistungselektronikmodule können alle E-Motorenarten bedienen und entsprechen dem Baukastenprinzip.

ELEKTROMOTOREN

Um eine zugkraftunterbrechungsfreie Schaltung zu ermöglichen, Potenziale von unterschiedlichen E-Motorenarten gleichzeitig zu nutzen und dabei Nachteile zu kompensieren, wurden ein permanenterregte Synchronmaschine (PMSM) und eine Asynchronmaschine (ASM) gewählt. Dabei erreicht die PMSM eine Höchstdrehzahl von 50.000 1/min. Um die bei den extrem hohen Umfangsgeschwindigkeiten auftretenden Zentrifugalkräfte aufzunehmen,



Bild 1: Der Speed4E Antriebsstrang (nach [SC22])



wurden für die PMSM innovative Bandagen auf Basis von Kohlenstoff Faserverbundwerkstoffen entwickelt und gefertigt [GE20].

LEISTUNGSELEKTRONIK

Um die hohen Drehzahlen darstellen zu können, bedarf es eines Umrichters mit hohen Schaltfrequenzen. Dieser konnte durch den Einsatz von SiC-Halbleitern erfolgreich konzipiert und in Betrieb genommen werden [RE22]. Dank der hohen Schaltfrequenz ließen sich Schaltverluste erheblich reduzieren. Durch die modulare Bauweise können die Umrichtermodule sowohl für PMSM als auch für ASM eingesetzt werden.

HOCHDREHZAHLAGETRIEBE

Den durch die hohen Drehzahlen entstehenden Verlustleistungen in Dichtungen, Lagern und Zahnrädern wurde mit einer fundierten Komponenten- und Schmierauswahl begegnet, um die Gesamteffizienz des Getriebes unter dem Gesichtspunkt der hohen Antriebsdrehzahlen zu optimieren. Ein innovatives Schaltungskonzept, aktuiert von einem Tauchspulenaktuator, ermöglicht eine Dreigängigkeit [SC19]. Durch den Einsatz eines Planetengetriebes konnte die Drehzahl bereits in der ersten Stufe signifikant reduziert werden.

Antriebssystemsteuerung

Dank einer innovativen und intelligenten Antriebssystemsteuerung kann die Systemeffizienz in möglichst jedem Fahrzustand maximiert werden. Real-Time Optimierungsalgorithmen bestimmen stets die ideale Leistungsaufteilung zwischen den beiden Teilantriebssträngen zusammen mit der besten Gangwahl, um beispielsweise die Gesamtsystemeffizienz zu maximieren bei gleichzeitiger Minimierung der Geräusch- anregung. [TA20]

THERMOMANAGEMENT

Das innovative Thermomanagementsystem basiert auf einem ganzheitlichen Ansatz, wobei alle Komponenten des E-Antriebsstrangs mit ein und demselben Fluid gekühlt bzw. geschmiert werden. Bei dem Fluid handelt es sich um ein wasserhaltiges Fluid, welches reibungsarme Schmierungs- eigen-

schaften mit günstigen kalorimetrischen Eigenschaften für die Kühlung der elektrischen Komponenten vereint. [MO20]

ZUSAMMENFASSUNG

Der entwickelte Antriebsstrang und die darin enthaltenen innovativen Subsysteme wurden erfolgreich entwickelt und in Betrieb genommen. Zudem wurde der Antriebsstrang in das Referenzfahrzeug (BMW i3s) geometrisch integriert. Durch umfangreiche experimentelle Untersuchungen an den Prüfständen konnten zahlreiche neue Kenntnisse hinsichtlich Hyper-Hochdrehzahlbetrieb und dessen Auswirkungen auf Effizienz, Akustik und Dynamik untersucht werden. Die Betriebssicherheit wurde bis 30.000 1/min erfolgreich abgesichert sowie die Maximaldrehzahl von 50.000 1/min erreicht. Die Leistungsdichte konnte durch den Hochdrehzahlansatz von 1,85 kW/kg (Referenzfahrzeug) auf 3,51 kW/kg gesteigert werden.

LITERATUR

- [SC20] Schweigert, D.; Gerlach, M.; et al.: On the Impact of Maximum Speed on the Power Density of Electromechanical Powertrains, Vehicles, MDPI (2020).
- [FI17] Fischer P.; Stahl K.: Schlussverbundbericht "Speed2E – Innovatives Super-Hochdrehzahl-Mehrgang-Konzept für den elektrifizierten automobilen Antriebsstrang für höchste Effizienz und höchsten Komfort", DLR-Elektromobilität (2017).
- [SC22] Schweigert, D.; Otto, M.; Stahl, K.: Results of the joint research project Speed4E and vibration behavior of the high-speed gearbox. E-Motive Expert Forum 2022 (2022).
- [GE20] Gerlach, M.; Zajonc, M.; Ponick, B.: Methodology to Evaluate the Mechanical Stress in High Speed Electric Machines with Buried Magnets, 2020 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (2020).
- [RE22] Reitmeier, D.; Mertens, A.: SiC Inverter for electric high-speed drivetrains. E-Motive Expert Forum 2021 (2021).
- [SC19] Schöneberger, D.; Mileti, M.; Stahl, K.; Rinderknecht, S.: Development of

an Innovative Shift Actuator for Electrified Multispeed Transmissions, ICAVP, Hefei, China 2019 (2019).

[TA20] Tao, Y.; Schöneberger, D.; et al.: Model Predictive Energy Control Including Mechanical Fatigue Life of a Two-Motor Multi-Speed Electric Vehicle, IFAC-PapersOnLine, Volume 53, Issue 2 (2020).

[MO20] Morhard, B.; Schweiger, D.; et al.: Efficient lubrication of a high-speed electro-mechanical powertrain with holistic thermal management, Forsch. Ing (2020).

AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl
 Bernd Morhard, M.Sc.
 Daniel Schweigert, M.Sc.
 Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebesysteme
 Technische Universität München



Datengetriebene Konstruktionsforschung

Methodenprüfstand zur Untersuchung von Konstruktionsmethoden

In der Konstruktionsforschung ist die Messung von Erfolgsfaktoren wie Anwendbarkeit oder Nutzen einer Methode eine Herausforderung. Fallstudien im Unternehmensumfeld können erste Hinweise auf diese Erfolgsfaktoren geben. Datenmengen, wie sie in der Systemforschung durch bspw. statistische Versuchsplanung an Prüfständen möglich sind, werden so jedoch nicht erreicht. Dadurch können meist keine statistisch belastbaren Aussagen abgeleitet werden.

GROßVOLUMIGE STUDIEN MIT QUANTITATIVER DATENERFAS-SUNG

Ein Lösungsansatz hierzu sind großvolumige Studien, in denen viele (oft weit über 100) Probanden eine reduzierte Aufgabe bearbeiten. Ein Beispiel ist das Lösen mathematischer Gleichungen durch Umlegen eines Streichholzes. In diesen Aufgabenstellungen können durch Nutzung von geeigneten (bspw. web-basierten) Werkzeugen schnell große Datenmengen erzeugt werden. Eine Übertragung dieser Aufgaben in die Konstruktionsforschung scheiterte bislang an der Komplexität des Umfelds, in dem Konstruktionsmethoden genutzt werden. Es fehlen geeignete "Methodenprüfstände", mit denen belastbare Aussagen zu Erfolgsfaktoren von Konstruktionsmethoden und strategien möglich werden.

METHODENPRÜFSTAND FÜR DIE KONSTRUKTIONSFORSCHUNG

Ausgehend von der Notwendigkeit belastbarer Aussagen in der Methodenforschung und der mangelnden Realitätsnähe von großvolumigen Studien wurde ein Methodenprüfstand entwickelt, mit dem realitätsnahe Aufgabenstellungen in großvolumigen Studien untersucht werden können. Dieser Prüfstand beinhaltet ein experimentelles Studiendesign sowie web-basierte Werkzeuge zur Unterstützung von Methoden-anwendung in großvolumigen Studien.

GROßVOLUMIGE STUDIEN AUF DEM METHODENPRÜFSTAND

Um die Fähigkeit des Methodenprüfstands zur Handhabung großvolumiger Studien zu prüfen, wurde eine initiale Studie durchgeführt, in der eine Methode zum Aufbau von Konstruktionswissen als einer zentra-

len Aktivität der Konstruktion untersucht wurde. In Kooperation mit dem pdlz der ETH Zürich wurden dazu web-basierte Konstruktionsaufgaben entwickelt.

Die Studiendurchführung erfolgte mit etwa 400 Studierenden. In der virtuellen Durchführung wurde die Konstruktionsaufgabe unter Nutzung einer web-basierten CAD-Umgebung gelöst. Hierdurch wurde die Konstruktion zeitlich gerafft abgebildet, da keine Einarbeitung in die dazu notwendige CAD-Umgebung notwendig war und konstruktive Änderungen von beliebigen Endgeräten browserbasiert durchgeführt werden konnten.

In der Durchführung werden in Echtzeit quantitative Daten erfasst, die ohne weitere Aufbereitung für die statistische Auswertung genutzt werden können. So war es möglich, eine Studie dieser Größenordnung mit nur zwei Studienleitern durchzuführen und anschließend ohne weitere Aufwände innerhalb kürzester Zeit Ergebnisse diskutieren zu können. Fazit: großvolumige Studien mit Konstruktionsaktivitäten sind durch Nutzung von Struktur und Werkzeugen des Methodenprüfstands möglich. Für die detailliertere Untersuchung von Erfolgsfaktoren von Konstruktionsmethoden ist allerdings eine Erweiterung der möglichen Aufgabenstellungen notwendig.

REALITÄTSNAHE AUFGABENSTELLUNG AUF DEM METHODENPRÜFSTAND

Um den Methodenprüfstand in der Konstruktionsforschung nutzen zu können, muss er auf die Aufgabenstellung der untersuchten Methode anpassbar sein. Hierzu wurde die Aufgabenstellung der großvolumigen Studie um den Aufbau von Konstruktionswissen durch Testing erweitert. Für die auch hier notwendige zeitliche Raffung wurde in die web-basierte CAD-Umgebung eine Schnittstelle zur Rapid-Prototyping Fertigung implementiert. Ein erster Probelauf mit Prof. em. Dr.-Ing. Klaus Ehrlenspiel und Prof. Dr.-Ing. Herbert Birkhofer zeigte das Potential dieser Erweiterung (Abbildung 1). Da in dem Methodenprüfstand Methoden vermittelt und anschließend direkt angewandt werden, eignet er sich auch zur Weiterbildung im Unternehmensumfeld. Die Echtzeit-Verfügbarkeit der Daten zum individuell erzielten Erfolg ermöglicht einen maximalen Lerneffekt für TeilnehmerInnen von Weiterbildungsmaßnahmen.

AUTOREN

Univ.-Prof. Dr.-Ing Sven Matthiesen
 Patric Grauberger, M.Sc.
 IPEK - Institut für Produktentwicklung
 Lehrstuhl für Gerätekonstruktion und Maschinenelemente
 Karlsruher Institut für Technologie



Abbildung 1: Realitätsnahe Aufgabenstellung auf dem Methodenprüfstand: Aufbau von Konstruktionswissen durch Testing.

© IPEK – Institut für Produktentwicklung

Unterstützungssysteme für den Menschen

Mensch-Maschine Kollaboration - Modelle zur Entwicklung einer physischen Kopplung von Exoskelett und Akkuschauber

„Die Herausforderungen einer zukunftsorientierten Produktentwicklung bestehen nicht darin den Menschen durch technische Systeme zu substituieren, sondern seine Stärken in technische Systeme zu integrieren und ihn dort zu unterstützen wo er es benötigt“ [1].

Dabei gilt es die Flexibilität, Intuition und Kreativität des Menschen mit der Geschwindigkeit und Genauigkeit von Maschinen zu vereinen, um eine echte Kollaboration zu ermöglichen. So stellt das Bundesministerium für Bildung und Forschung die Rolle des Menschen im Rahmen der Hightech-Strategie 2025 in den Mittelpunkt. Exoskelette zur Unterstützung des Menschen bei körperlich belastender Arbeit sind hier ein Beispiel für eine Mensch-Maschine Kollaboration.

DIE "RICHTIGE" UNTERSTÜTZUNG

Neben modernen Power-Tools bietet die voranschreitende kommerzielle Verfügbarkeit von Exoskeletten eine Möglichkeit den Menschen physisch bei anspruchsvollen manuellen Tätigkeiten, welche z.B. bei Montageprozessen oder im Baugewerbe vorkommen, körperlich zu entlasten. Dabei stellt sich die entscheidende Frage: Was ist die „richtige“ Unterstützung?

Die optimale Unterstützungskraft ist ein essenzieller Bestandteil der Wahrnehmung des Menschen und bedingt damit die Akzeptanz des Exoskeletts bei der Mensch-Maschine Kollaboration. Mit einer zu geringen Unterstützungskraft wird das Potential der Unterstützung durch die Maschine nicht vollständig ausgenutzt und es findet keine ausreichende Entlastung des Anwenders statt. Gleichzeitig darf beim Menschen aber auch nicht das Gefühl auftreten, die Kontrolle über die Arbeitsaufgabe zu verlieren. Dies erfordert, dass auch bei Unterstützung durch das Exoskelett ein Minimum der menschlichen Bedienkraft noch vorhanden sein muss.

KOPPLUNG VON POWER-TOOL UND EXOSKELETT

Durch eine informationstechnische Kopp-

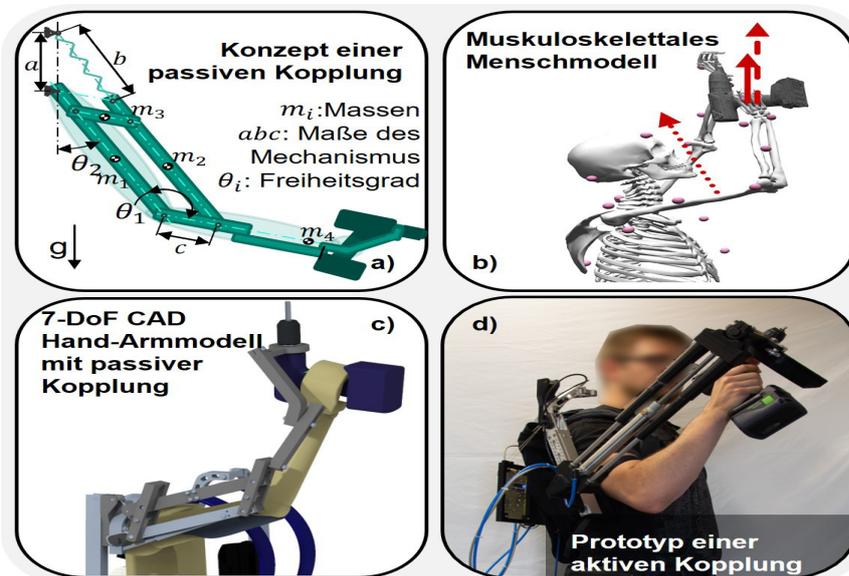


Abbildung 1 Modelle und Entwicklungsstadien der physischen Kopplung von Exoskelett und Akkuschauber

lung von Akkuschauber und Exoskelett ergeben sich neue Potentiale für eine anwendungsorientierte Unterstützung des Menschen. Bspw. kann die Einschraubphase durch den Akkuschauber detektiert und gezielt eine Anpassung der Unterstützungskraft durch das Exoskelett bereitgestellt werden.

Darüber hinaus zeigen erste Arbeiten, dass auch eine mechanische Kopplung von Exoskelett und Akkuschauber den Menschen bei der Tätigkeit unterstützen kann, indem bspw. das Akkuschauber-Gewicht mit Hilfe einer physischen Kopplung von Exoskelett und Akkuschauber kompensiert wird (Abbildung 1a). Weiter bieten aktive Kopplungen das Potential, in Abhängigkeit der Schultererelevation, Ellenbogenflexion sowie der aktuellen Arbeitsphase (bspw. Einschrauben) eine zusätzliche Unterstützungskraft mit Hilfe eines Aktors für den Arbeitsprozess bereit zu stellen (Abbildung 1d). Digitale Modelle des Exosketts sowie des Menschen können zur Bewertung der menschlichen Beanspruchung eingesetzt werden und liefern somit einen Mehrwert bei der Systementwicklung (Abbildung 1b & 1c) [2].

LITERATUR

[1] Matthiesen, Sven (2022): Editorial „Industrie 5.0 als Kernbereich der nutzerzentrierten Produktentwicklung“, In: Verein Deutscher Ingenieure e.V. (Hg.):

Konstruktion (2022), Nr. 11-12. Düsseldorf, Deutschland: VDI Fachmedien GmbH & Co. KG (4), S. 3.

[2] Molz, C., Yao, Z., Sänger, J., Gwosch, T., Weidner, R., Matthiesen, S., . . . Miehling, J. (2022). A Musculoskeletal Human Model-Based Approach for Evaluating Support Concepts of Exoskeletons for Selected Use Cases. Proceedings of the Design Society, 2, 515-524. doi:10.1017/pds.2022.53

ANSPRECHPARTNER

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen¹
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Weidner^{2,4}
 Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack³
 Dr.-Ing. Jörg Miehling³
 Johannes Sänger, M. Sc.¹
 Zhejun Yao, M. Sc.²
 Carla Molz, M. Sc.³

¹IPEK – Institut für Produktentwicklung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

²LaFT – Laboratorium Fertigungstechnik, HSU Hamburg

³KTmfk – Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, FAU Erlangen-Nürnberg

⁴Institut für Mechatronik, Professur für Fertigungstechnik, Universität Innsbruck

Die Autor:innen danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung (435242218: WA 2913/41-1, MA 5940/11-1 und WE 6430/3-1).

JB4WT – Journal Bearings for Wind Turbines

Von der Modellkette bis hin zum Zustandsüberwachungssystem und Benchmark-Test für den Einsatz von Planetenradgleitlagern in Windenergieanlagen

Die Windenergie ist bereits eine der tragenden Säulen der regenerativen Stromgewinnung. Um die Wirtschaftlichkeit und somit den weiteren Ausbau von Windenergieanlagen (WEA) realisieren zu können werden neue Anlagengenerationen mit steigender Leistungsdichte und somit niedrigeren Stromgestehungskosten erforderlich.

GLEITLAGER - GARANT FÜR VERBESSERTE ANLAGENPERFORMANCE

Zur Erhöhung der Leistungsdichte moderner WEA-Triebstränge wird in den verbauten Planetengetrieben die Größe der Planetenräder reduziert und gleichzeitig die Anzahl der Planetenräder erhöht. Da der Bauraum für die Lagerung der Planetenräder beschränkt ist, werden anstelle von Wälzlagern vermehrt Gleitlager zur Lagerung der Planetenräder aufgrund ihres geringen radialen Bauraums eingesetzt. Gleitgelagerte Planetenräder sind in der Windindustrie bereits verfügbar, allerdings ist die Prognosegüte des Verschleißes von Planetenradgleitlagern im Kontext von WEA-Getrieben nicht vollständig quantifiziert. Zusätzlich sind die Erfahrungen hinsichtlich des Einsatzes von Gleitlagern in WEA über die Anlagen-Gesamtlebensdauer von bis zu 30 Jahren bislang nicht vorhanden. Darüber hinaus müssen WEA zunehmend auch unter schwierigen Einsatzbedingungen z. B. weniger stetigen Windverhältnissen verlässlich Strom erzeugen. Derartige Betriebspunkte resultieren in häufigen Anfahrvorgängen oder niedrigen Drehzahlen und sind für Gleitlager hinsichtlich des Verschleißes von besonderer Relevanz. Um eine Beschädigung der Gleitlager zu vermeiden, müssen diese Betriebspunkte bereits bei der Auslegung berücksichtigt werden. Im Projekt JB4WT am Center for Wind Power Drives (CWD) in Aachen wird daher mittels der Entwicklung einer Modellkette, eines Zustandsüberwachungssystems und ein Benchmark-Test zur vergleichenden Bewertung von Gleitlagern und Schmierstoffen der Rahmen für den Einsatz von Gleitlagern als Planetenradlagerung in WEA geschaffen. Ziel ist, den zuverlässigen Betrieb

gleitgelagerter Planetenräder in WEA sicherzustellen.

MODELLKETTE FÜR EINE MULTISKALIGE VERSCHLEIßBERECHNUNG

Erstes Teilziel von JB4WT ist die Entwicklung einer multiskaligen Modellkette, welche die Verknüpfung mehrerer Simulationsmodelle auf verschiedenen Abstraktionsniveaus ermöglicht. Mittels der Simulationsmodelle auf verschiedenen Abstraktionsniveaus kann der Transferpfad „Windlast → Kontaktzustand im Gleitlager → resultierender Verschleiß“ simulativ abgebildet werden. Die Modellkette wurde für das Fallbeispiel eines realen WEA-Triebstrangs aufgebaut (Bild 1).

Die aufgebaute Modellkette besteht aus einem Mehrkörper-WEA-Modell, einem elastohydrodynamischen (EHD) Gleitlagermodell und einem Verschleißmodell, welche untereinander Schnittstellen zur Datenweitergabe besitzen. Die Mehrkörpersimulation der WEA berücksichtigt die co-simulierte Reglerdynamik, wodurch eine Ermittlung der Lasten innerhalb eines WEA-Triebstrangs, welche aus der anlagenspezifischen Reglerdynamik resultieren, ermöglicht wird. Durch die Aufprägung von Kräften auf die Rotorblätter, die aus vorgegebenen Windfeldern berechnet werden,

kann somit ein möglichst realistisches Anlagenverhalten simuliert werden. Mit dieser Methodik werden für die Gleitlagerauslegung relevante Lastfälle wie Anlagenstart, -stopp und Turbulenzen abgebildet. Die aus der Mehrkörpersimulation stammenden Lagerlasten werden dann auf das EHD Modell des Planetenradgleitlagers aufgeprägt, um kritische Kontaktzustände im Gleitlager zu ermitteln. Ein kritischer Kontaktzustand liegt bei Berührung der Rauheitsspitzen vor, welcher zur Mischreibung, zum Verschleiß und zur Konturänderung des Gleitlagers führen kann. Derartige Zustände erhöhen die Gefahr für einen Totalausfall des Gleitlagers. Die vom EHD-Modell errechneten verschleißbeeinflussenden Größen wie beispielsweise lokaler Festkörperkontakt- und Reibkoeffizient werden daher dem Verschleißmodell übergeben, anhand dessen die Verschleißtiefe der Lagerkontur errechnet wird. Die hieraus resultierende Änderung der Lagerkontur wird in die EHD-Berechnung zurückgespielt. Die Konturänderung nimmt wiederum einen Einfluss auf den sich ausbildenden Druck im Gleitlager und damit auf den weiteren Verschleißfortschritt. Der Datenaustausch zwischen EHD Modell und Verschleißmodell erfolgt in regelmäßigen Abständen. Auf diese Weise resultiert eine iterative Berechnung des Verschleißfortschritts. Diese endet, sobald sich eine konstante Verschleißrate oder eine Ver-

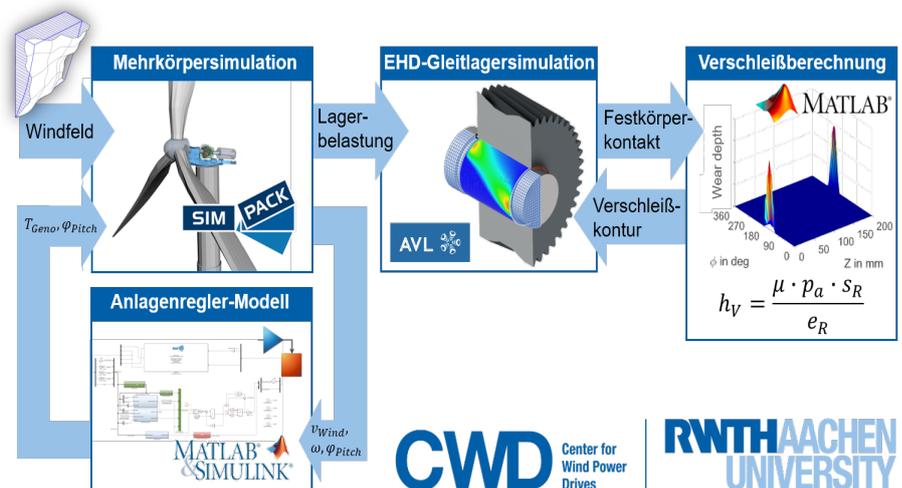


Bild 1: Im Projekt JB4WT entwickelte Modellkette für die Berechnung von Verschleiß an gleitgelagerten Planetenrädern

schleißrate von null einstellt, da ab diesem Zeitpunkt eine lineare Extrapolation des Lagerverschleißes möglich ist. Die Berechnung des Verschleißfortschritts endet weiterhin, sobald eine zuvor definierte kritische Verschleißtiefe des Gleitlagers erreicht wird.

VALIDIERUNG UND STEIGERUNG DER MODELLGÜTE

Im weiteren Verlauf des Projekts werden experimentelle Versuche durchgeführt, um die Berechnungen der Modellkette zu validieren und durch weitere Daten zu stützen. Diese erfolgen auf Lagerebene, Getriebee-ebene und Gondel-ebene. Auf einem Lagerprüfstand werden Verschleißparameter ermittelt. Auf einem Getriebeprüfstand werden Einflussfaktoren auf den Lagerverschleiß wie Werkstoff, Oberflächenrauheit oder Lagergeometrie untersucht und die gewonnenen Erkenntnisse für die weitere Parametrierung der Modellkette genutzt.

Schließlich werden die mit der Modellkette berechneten Gleitlagerkontaktzustände auf einem 4MW-Gondelprüfstand validiert.

AUSBlick

Neben der Modellkette bilden die Definition eines Benchmark-Tests für Planetenradgleitlager und die Erstellung eines Zustandsüberwachungssystems von Planetenradgleitlagern weitere Ziele von JB4WT. Der Benchmark-Test wird zur vergleichenden Bewertung des Leistungs- und Verschleißverhaltens von Gleitlagern und Schmierstoffen verwendet. Parallel dazu soll anhand des Zustandsüberwachungssystems eine zuverlässige und frühzeitige Detektion von gleitlagerschädigenden Betriebszuständen ermöglicht werden. Die Modellkette, der Benchmark-Test und das Zustandsüberwachungssystem stellen in der Gesamtheit das Ergebnis von JB4WT dar. Sie bilden den Rahmen für den Einsatz von Gleitlagern als Planetenradlagerung in WEA, indem sie

verschiedene Möglichkeiten der Verschleißbetrachtung darstellen und Fragestellungen bezüglich der Simulation, der Zustandsüberwachung und der Ölverträglichkeit klären.

AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Georg Jacobs
 Dr.-Ing. Francisco Gutiérrez Guzmán
 Dr.-Ing. Dennis Bosse
 Benjamin Lehmann M.Sc.
 Thomas Decker M.Sc.
 Mattheüs Lucassen M.Sc.
 Center for Wind Power Drives
 RWTH Aachen

Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung

2te Auflage

Das vorliegende Buch beschreibt nach einer Einführung in die Grundlagen der additiven Fertigung Spezifikationen von Bauteilen und Prozessen, Methoden zur Abschätzung der Bauteileignung und Anwendungen der additiven Fertigung sowie zur Entwicklung von Konzepten und Entwürfen. Weiter werden die Konstruktion von Bauteilen, deren Gestaltung zur Sicherstellung funktionaler Anforderungen und der Herstellbarkeit sowie Methoden und Werkzeuge zur Bauteiloptimierung dargestellt. Daraus abgeleitet werden Maßnahmen zur Sicherstellung von Qualitätsaspekten charakterisiert. Weiterhin werden die Integration von additiven Fertigungsverfahren in bestehende Prozesse und die Wertschöpfungsketten bzw. Geschäftsmodelle der additiven Fertigung diskutiert. Die Inhalte werden im Buch ganzheitlich im Sinne von Entwicklungsprozessen der Produktentstehung miteinander verknüpft. Abschließend wird der Frage nachgegangen, wie und wann sich die additive Fertigung unter Nachhaltigkeitsaspekten lohnt. Ergänzend zur ersten Auflage werden die Themenaspekte Bauteilauswahl, Prozesskettengestaltung und die Validierung sowie die Qualitätskontrolle detaillierter vorgestellt. Des Weiteren wurden weite

Teile des Buchs aktualisiert, um der dynamischen Entwicklung der additiven Fertigung gerecht werden zu können. Ergänzt wird das Buch durch ein Glossar sowie Konstruktionskataloge der additiven Fertigungsverfahren und Gestaltungsregeln der additiven Fertigung im Anhang.

AUTOREN

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer
 Tobias Ehlers, M. Sc.
 Institut für Produktentwicklung und Gerätebau
 Leibniz Universität Hannover



Bild 1: Entwicklungsmethodik für die Additive Fertigung

Selbstverstärkendes Lernen zur Automatisierung von Konstruktionsprozessen

Vorteile und Einsatzmöglichkeiten für Selbstverstärkendes Lernen in der virtuellen Produktentwicklung

Maschinelle Lernprozesse sind in der Produktentwicklung oft hilfreich, um Daten aus vergangenen Produktgenerationen zu erfassen, zu vernetzen und zukünftigen Produktgenerationen als Information zur Verfügung zu stellen. Dabei ist es häufig schwierig nachzuvollziehen, wie die Vernetzung stattgefunden hat, so dass die Vorhersagen nur indirekt geprüft oder nachvollzogen werden können. Beispielsweise ist es bei der Anpassungskonstruktion üblich, dass für neue Anforderungen, neue Merkmalsausprägungen gefunden werden müssen. Wird ein überwachter, maschineller Lernprozess eingesetzt, der die Merkmalsausprägungen auf Basis der neuen Anforderungen und der vorangegangenen Produktgenerationen approximiert, ist es für die Produktentwickler schwierig zu erkennen, auf Basis welcher Zusammenhänge die neuen Merkmalsausprägungen bestimmt wurden. Um einen Einblick zu erhalten, kann Selbstverstärkendes Lernen eingesetzt werden.

ERLERNEN DES ANPASSUNGSPROZESSES

Selbstverstärkendes Lernen (engl. Reinforcement Learning) ist die neben überwachten und nicht-überwachten Lernmethoden die dritte Kategorie des maschinellen Lernens. Es kombiniert Aspekte der Mehrzieloptimierung mit denen der tiefen, künstlichen neuronalen Netze. Wie bei der Mehrzieloptimierung werden zunächst zufällige Stichproben durchgeführt und bewertet. Im Beispiel der Anpassungskonstruktion repräsentiert eine Stichprobe eine Ausprägung für jedes Merkmal. Die resultierenden Eigenschaften werden dann den Anforderungen gegenübergestellt, sodass abgeschätzt werden kann, wie gut diese Ausprägungen die Anforderungen erfüllen. Auf Basis dieses Feedbacks wird ein tiefes, künstliches neuronales Netz (sog. DQN, Deep Q-Learning Network) trainiert. Die Vorhersagen des DQNs beschreiben jedoch nicht die Zusammenhänge zwischen Merkmalen und Eigenschaften per se, sondern wie die Merkmalsausprägungen anzupassen sind, um die Anforderungen besser zu erfüllen. Wird dem Algorithmus zusätzlich die Möglichkeit gegeben, diese Anpassungen

in der Entwicklungsumgebung selbst umzusetzen, entsteht sein selbstverstärkender lernender Agent. Dessen Interaktion mit der Konstruktionsaufgabe lässt sich durch iterative Anpassung der Merkmalsausprägungen beschreiben. Durch die Folge aus Merkmalsausprägungen und Änderungen erhalten Produktentwickler einen Einblick, welches Merkmal der Agent wie angepasst, um die resultierenden Eigenschaften näher an die Anforderungen zu bringen. Wie diese Einblicke helfen, die Entscheidungen eines Algorithmus besser zu plausibilisieren, zeigt folgendes Beispiel. Bild 1 illustriert das Vorgehen eines DQNs am Beispiel der Anpassung der Zähne einer Blechmassivumformung aus. Die Merkmale (A0, L0, R1, R2 und W0) sollen so gewählt werden, dass ein möglichst großes Kontaktverhältnis bei möglichst kleiner Umformkraft vorliegt. Auf der X-Achse des Diagramms sind die Zeitschritte (engl. Time Step) der Anpassung dargestellt. Jeder Zeitschritt repräsentiert eine Kombination aus Merkmalsausprägungen, die den Zustand des Zahns widerspiegeln. Die Y-Achse stellt die gewichtete Summe der Anforderungen als Belohnung (engl. Reward) dar. Ein Wert von 0,0 drückt aus, dass ein vorgegebenes Kontaktverhältnis mindestens erreicht wurde und zeitgleich eine definierte Umformkraft nicht überschritten wurde. Das Diagramm repräsentiert die Strategie des DQNs für die Anpassung der Zahngeometrie. Auf dessen Eingangsneuronen erhält es den momentanen Zustand (Zeitschritt 0). Dieser wird verarbeitet und auf den Ausgangsneuronen für jede Änderungsmöglichkeit ein Wert wiedergegeben. Je höher dieser

sogenannte Q-Wert ist, desto besser wird diese Änderungsmöglichkeit eingeschätzt. Die Änderungsmöglichkeit mit dem höchsten Wert wird ausgewählt und die Merkmale entsprechend angepasst. Dies wird als Aktion (engl. Action) bezeichnet. Der neue Zustand (Zeitschritt 1) wird anschließend erneut an das DQN übergeben. Aus der entstehenden Folge aus Zuständen und Aktionen können Produktentwickler plausibilisieren, ob die Anpassungen den Erwartungen entsprechen. Beispielsweise kann aus den Merkmalskombinationen in der Legende von Bild 1 abgelesen werden, dass der Winkel in der Zahnspitze (A0) sowie die Zahnlänge (L0) vergrößert und die Zahnbreite (W0) sowie der Radius R2 reduziert werden, um die gewünschten Anforderungen zu erreichen.

NUTZEN

Neben der Möglichkeit, die Anpassung der Merkmale zu plausibilisieren, können die erlernten Zusammenhänge als Gewichte des DQNs persistent gespeichert und wiederverwendet werden. Das macht Selbstverstärkendes Lernen interessant für Anwendungsfälle mit vielen Produktgenerationen, wie beispielsweise für individualisierte Produkte. Da hier das DQN nicht von Grund auf neu trainiert werden muss.

AUTOREN

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack
 Fabian Dworschak, M. Sc.
 Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
 Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

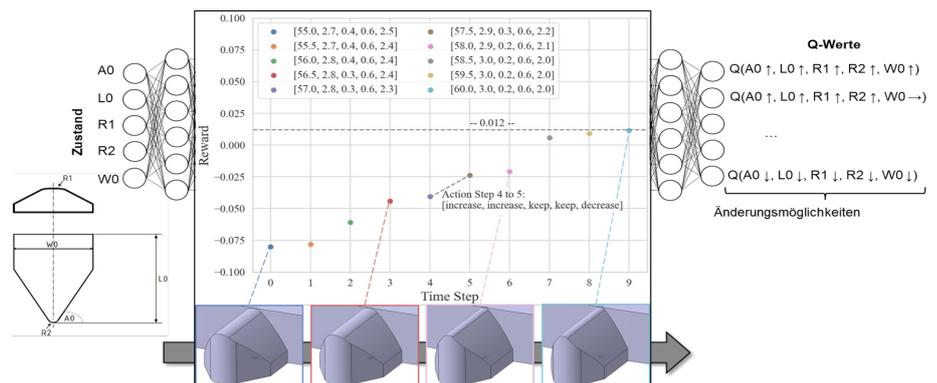


Bild 1: Anpassung einer Zahngeometrie mit Hilfe eines Selbstverstärkenden Lernprozesses

GEEVal-Framework – Anschlussfähiges Software-Ökosystem auf der Basis von REXS

Projektstart vom FVA-geförderten Forschungsvorhaben zum getriebe-zentrierten Digitaler Zwilling

In der Getriebeentwicklung und -forschung spielen realspezifische Qualitätskontrolle und Simulationsvalidierung eine zunehmend gewichtigere Rolle, um die Tragfähigkeit in verschiedensten Schadenskriterien eindeutig einzuordnen.

VORARBEITEN

In einem vorhergehenden Forschungsvorhaben (FVA 223 XXI) wurde mit der Entwicklung des Softwaremethodenträgers GEEVal (Gear Evaluation & Validation Tool) ein erster Schritt unternommen, um die digitale Erfassung zur Dokumentation von Schadensfällen und eine photogrammetrische Vermessung der Zahnflanke im REXS-Datenformat (Reusable Engineering Exchange Standard) zu ermöglichen. Im Umfeld der Industrie 4.0, wurde hiermit ein Beitrag zur Verknüpfung von Versuchs- und Simulationsdaten von Verzahnungslaufversuchen geleistet werden. Hierbei kann die Flankentextur mit den Ergebnissen aus unterschiedlichen Zahnkontaktanalysen gegenübergestellt werden (Bild 1).

SPEZIFIKATION DES FRAMEWORKS ALS DIGITALER ZWILLING

Dennoch besteht weiterhin die Herausforderung in der Entwicklung weiterführender Auswertungs- und Analysemethoden. Dazu bedarf es einer Herangehensweise, die eine vollständige Integration von digitaler und simulativer Betrachtung mit Hilfe eines digitalen Pendants, dem Virtuellen Zwillings, umsetzt. Diese soll die verfügbaren Informationen in der Getriebeentwicklung miteinander verknüpfen und Rückkopplungsschleifen zur Verfügung stellen, die bisher in der Getriebeentwicklung

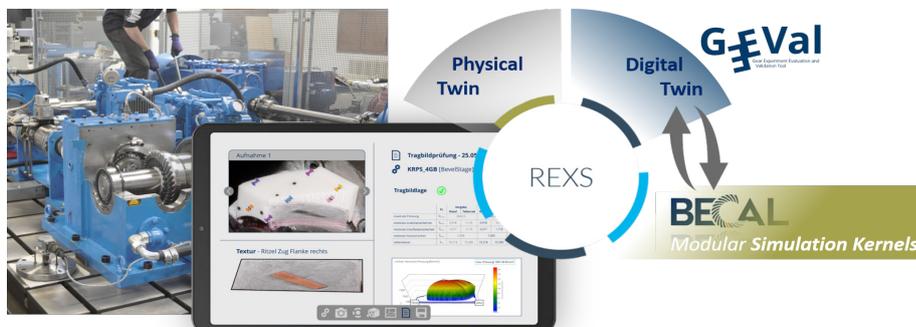


Bild 1: REXS-Schnittstelle des Digitalen Zwillings

nicht bereitstehen. Das Hauptaugenmerk des Forschungsvorhabens liegt somit auf der Erforschung und Definition eines allgemeingültigen, aber simulations-zentrierten digitalen Zwillings am Beispiel von Zahnkontaktanalysen. Dieses Validierungs- und Evaluations-Framework ermöglicht als substantielle Plattform unterschiedliche neue Anwendungen im Getriebe-Produktlebenszyklus. Das REXS-Datenformat, eine standardisierte Schnittstelle für den Austausch von Getriebedaten, soll dabei im Zentrum der Datenverarbeitung und Weiterentwicklung als quelloffene-Schnittstelle stehen (Bild 2). Der zukünftige Software-Methodenträger wird anhand einzelner Use-Cases (Wartung in Service Station, Montage von Kegelradverzahnungen) gemeinsam mit den Industriepartnern praxisnah erprobt.

PHOTOGRAMMETRISCHEN MESS- UND AUSWERTUNGSVERFAHREN

Aufbauend auf dem Vorgängervorhaben soll die photogrammetrische Erfassung durch die Erweiterung auf Smart Devices (Smartphone, Tablet) vereinfacht werden. Insbesondere Erweiterung auf eine inte-

grierte Simultankalibrierung, sowie die automatisierte Punktkorrespondenzfindung einer Messschablone steht dabei im Vordergrund.

ZAHNKONTAKTSIMULATION – SCHÄDIGUNGSFORTSCHRITT

Am Beispiel einer Anbindung eines BECAL-Berechnungsmoduls zur automatisierten Tragbildkorrektur/Schadensfortschrittsrechnung erfolgt die Integration eines Rechenkerns in das GEEVal-Framework, sowie die Entwicklung eines analytischen Modells zur Einbaumaßkorrektur. Dennoch basiert die grundlegenden REXS-Schnittstellendefinition (Bild 2) im Hinblick auf die Anbindung beliebiger FVA-Rechenkerns (z.B. BECAL, RIKOR, STIRAK) auf einer allgemeingültigen Server-Client-Architektur des Digitalen Zwillings.

INTERDISZIPLINÄRES TEAM

Die unterschiedlichen Schwerpunktthemen werden von einer fachübergreifenden Kooperation an der Technischen Universität Dresden erarbeitet. Dazu zählt das Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, die Professur für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion und die Professur für Virtuelle Produktentwicklung.

FVA 223 XXI - GEFÖRDERT DURCH:



AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold
Dipl.-Ing. Arthur Hilbig
VPE – Professor für Virtuelle Produktentwicklung
Technische Universität Dresden

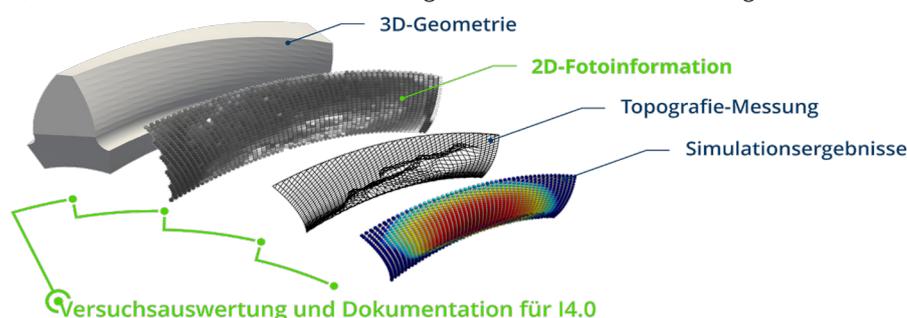


Bild 2: Ergebnisse des Vorgängervorhabens FVA 223XXI

Zertifizierungsgerechte Modellierung von Wirkketten in der Automobilindustrie

MBSE-Projekt mit Automobilhersteller erfolgreich abgeschlossen – Nachvollziehbarkeit von Systemabhängigkeiten befähigt Ingenieure zur Analyse von funktionalen Wirkzusammenhängen

Die Anzahl von Funktionalitäten und Wechselwirkungen bei der Entwicklung komplexer technischer Systeme steigt stetig an. Externe Institutionen wie die „United Nations Economic commission of Europe“ (UN ECE) definieren Regularien für die Entwicklung derartiger Systeme. Die UN ECE-Regularie 156 „Software update and software update management system“ reguliert seit Anfang 2022 softwarebasierte Funktionalitäten im Automobil. Sie beinhaltet Anforderungen an die Dokumentation und Nachweispflicht für softwareintensive Systeme. Die Einhaltung dieser Anforderungen stellt die Automobilbranche insbesondere bei der Sicherstellung der Rückverfolgbarkeit (Traceability) sowie bei der Analyse von Wirkzusammenhängen bei Software-Updates vor neue Herausforderungen. Zur Lösung der Herausforderungen werden Wirkketten mit SysML modelliert, um Relationen von Systemelementen nachvollziehbar abzubilden und auszuwerten.

PIONIERARBEIT BEI ZERTIFIZIERUNGSGERECHTER WIRKKETTEN-MODELLIERUNG

Professorin Iris Gräßler und ihr Team am Lehrstuhl für Produktentstehung des Heinz Nixdorf Instituts der Universität Paderborn erforschen die Modellierung von zertifizierungsgerechten Wirkketten. In einem einjährigen Projekt brachten sie die Ergebnisse bei einem der größten OEMs der Automobilindustrie in die Anwendung. Als Grundlage für das Vorgehen dient die eigens am Lehrstuhl entwickelte Model-based Effect Chain Analysis (MECA) Methode. Diese Methode befähigt Entwickler dazu, Wirkketten zu modellieren, um Wechselwirkungen und Propagationseffekte nachvollziehbar abzubilden. Im Vergleich zu Methoden der modellbasierten Systementwicklung, bei denen zwingend das vollständige System-Modell als zentrales Entwicklungsartefakt gefordert wird, wird bei der Wirkkettenmodellierung systematisch der kleinstmögliche Satz notwendiger Artefakte und Abhängigkeiten identifiziert. Dadurch werden zertifizierungsrelevante Informationen in unmittelbare Ursache-

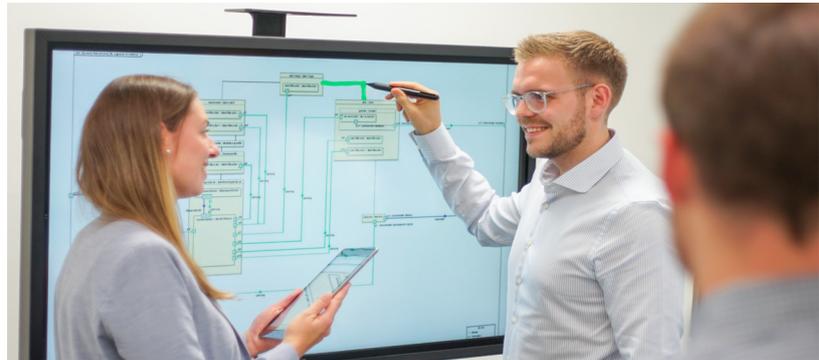


Abbildung 1: Bereitstellung von Wirkketten-Informationen für das Review durch Systemmodellierer

Wirkungs-Beziehungen zueinander gestellt. Im Rahmen der Industriebeauftragung wurden sechs verschiedene Fahrzeugbaureihen und -derivate des Automobilherstellers betrachtet. Der Fokus lag dabei sowohl auf elektrischen als auch hybriden Fahrzeugen. Diese Fahrzeuge bestehen aus über 100 Sub-Systemen, die miteinander vernetzt sind, beispielsweise Bremsregelsystem und Crasherkenkung. Um die Komplexität und die Vielzahl an Abhängigkeiten abzubilden, arbeiteten bis zu acht Mitarbeiter:innen parallel an der Wirkkettenmodellierung. In über 300 Workshops wurden Daten zu den Sub-Systemen erhoben, um Wirkketten zu modellieren und diese anschließend zu validieren. Die resultierenden Wirkketten beinhalten eine vierstellige Anzahl an Modellelementen. Sie stellen damit das umfangreichste und detaillierteste SysML-Modell dar, welches bei dem Unternehmen vorliegt.

Als herausfordernd erwies sich die parallele Abstimmung mit den mehreren hundert beteiligten Entwicklern und Experten sowie die Dokumentation und Wissensbündelung der Workshop-Ergebnisse. Hierbei galt es, die inhaltliche und methodische Validierung der Systeme effizient durchzuführen sowie die systematische Klärung von Inkonsistenzen an Systemschnittstellen sicherzustellen. Insgesamt wurden in der Projektlaufzeit von 14 Monaten eine vollumfängliche Datenerhebung, Wirkkettenmodellierung sowie abschließende Validierung mit den disziplinspezifischen Experten durchgeführt. Zum Projektabschluss liegen damit vollständige und konsistente Informationen vor, die

ausschlaggebend für die hohe Aussagekraft und Güte der Wirkketten sind.

AUSBLICK

Durch das systematische Vorgehen bei der Workshop-Durchführung und Wirkkettenmodellierung konnte die MECA-Methode bei einem der größten OEMs aus dem Automobilbereich angewendet und bedarfsgerecht angepasst werden. Professorin Iris Gräßler und ihr Team stellten damit unter Beweis, dass die in der Theorie erforschte und entwickelte MECA-Methode im Industrieumfeld von großem Nutzen ist. Der Projekterfolg zeigt, dass die Potenziale der modellbasierten Systementwicklung insbesondere in Bezug auf die Analysierbarkeit und Wiederverwendbarkeit für neue Baureihen erschlossen werden konnten. Das methodische Vorgehen ist für zukünftige Industrieprojekte adaptierbar und weist auch für Automobilzulieferer das Potenzial auf, eine zertifizierungskonforme Entwicklung durchzuführen. Die Erkenntnisse fließen bereits in das vom BMBF geförderte Projekt ImPaKT (IKT-befähigte modellbasierte Auswirkungsanalysen in der Produktentwicklung) des Lehrstuhls ein.

Autoren

Univ. Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler
Hendrik Kramer
Anna-Sophie-Koch
Heinz Nixdorf Institut
Lehrstuhl für Produktentstehung
Universität Paderborn

NewNormal – Kompetenz- und Bedarfsoptimierte Lehrstrategie

Kompetenz- und bedarfsoptimierte Lehrstrategie für die Studieneingangs- und Studiumsphase mit kriterienbasierten Leitlinien für analoge und digitale sowie synchrone und asynchrone Lehransätze und -formate

Getrieben durch die Pandemie und den damit verbundenen Einschränkungen mussten sich die Hochschulen rapide auf ein Lehren mit digitalen Lehransätzen und -formaten umstellen. Diese Umstellung brachte ein Mehr an Lehrmethoden und -medien, die im Laufe der Pandemie ihre Vorteile, aber auch Nachteile zeigten. Mit dem Rückgang der Fallzahlen kehren die Hochschulen nun zur gewohnten Normalität, den Präsenzveranstaltungen, zurück.

NEWNORMAL

Die Ausschreibung NewNormal des Bayerischen Staatsministeriums für Wissenschaft und Kunst möchte diesem Rückgang zur gewohnten Normalität gegensteuern und ein neues „Normal“ der Lehrvermittlung an Hochschulen etablieren. Dabei sollen die gewonnenen Erfahrungen mit digitalen Lehransätzen und -formaten aufgegriffen und eine Verzahnung von digitalen und analogen Elementen in der Lehrvermittlung erreicht werden. Um eine Stärkung der kompetenzorientierten Lehre zu erreichen, sollen hierbei

- die Präsenzlehre durch innovative Lehr- und Lernformate ergänzt,
- digitale Tools sinnvoll genutzt,
- eine Kommunikation zwischen Lehrenden und Lernenden gefördert
- und das Erreichen der Lernziele im Sinne des Constructive Alignment überprüft werden.

NEWNORMAL@TUM

Das Projekt „Kompetenz- und Bedarfsoptimierte Lehrstrategie“ der TU München unter der Leitung des Lehrstuhls für Maschinenelemente (FZG) greift diese Gedanken auf. Gemeinsam erarbeiten ProLehre – Medien und Didaktik und mehrere Lehrstühle des Grundlagenstudiums Maschinenbau eine Lehrstrategie, die eine Verzahnung von digitalen und analogen Elementen in der Lehrvermittlung beinhaltet. Diese Strategie soll für die Studieneingangs- und Studiumsphase konkrete Leitlinien für analoge und digitale sowie synchrone und asynchrone Lehransätze und -formate bieten. Der Digitalisierungsgrad der Lehrvermittlung wird dabei an

die Bedürfnisse und den zu erwerbenden Kompetenzen der Studierenden ausgerichtet. Das zugrundeliegende Konzept dafür basiert auf den drei Grundbedürfnissen nach Deci und Ryan (2000) [1]. Verschiedene Lehr- und Lernelemente sollen das Gefühl der Eingebundenheit, des Kompetenzerlebens und der Autonomie stärken und dadurch die Motivation der Studierenden im Verlauf des Studiums hochhalten. Zu Beginn des Studiums in der „Eingangsphase“ ist es vor allem wichtig, eine soziale Eingebundenheit der Studierenden zu erreichen, denn dieser Abschnitt stellt für sie einen neuen Lebensabschnitt dar, oft mit fehlenden sozialen Kontakten. Dafür ist es wichtig, dass den Studierenden eine soziale Integration ermöglicht wird und diese in ihrem neuen Umfeld rasch Fuß fassen können. Auch frühzeitige Erfolgserlebnisse spielen eine wichtige Rolle, um sich bereits zu Beginn als kompetent zu erleben. Im weiteren Verlauf des Studiums in der „Studienphase“ gewinnt neben dem Bedürfnis nach sozialer Eingebundenheit und Kompetenzerleben das Bedürfnis nach Autonomie an Bedeutung. Es ist wichtig eine Lehre auf hohem fachlichem und didaktischem Niveau anzubieten, damit die Zufriedenheit und Motivation der Studierenden weiterhin hochgehalten werden kann. So soll beispielsweise die systematische Integration von Plan-Do-Check-Zyklen in Lehrveranstaltungen integriert werden oder durch die gezielte Nutzung von „Selbstlernphasen“ das Kompetenzerleben und die Selbstwirksamkeit der Studierenden erhöht werden. Essentiell dabei ist die Kompetenzorientierung des Lehr- und Lernprozesses (Constructive Alignment). Dafür sollen nicht nur Inhalt und Ziele, sondern auch spezifische Lehr- und Lernmethoden sowie Lernmedien auf die zu erreichenden Kompetenzen ausgerichtet werden.

Die jeweiligen Vorteile der Lehransätze und -formate sollen hierbei bestmöglich in den verschiedenen Phasen des Studiums eingesetzt werden. Es kann zwischen digitalen und analogen und zwischen synchronen und asynchronen Elementen unterschieden werden. Unter „analog“ können Elemente verstanden werden, die präsent vor Ort

stattfinden (bspw. Vorlesung im Hörsaal), aber auch Selbstlernphasen, in denen sich die Studierenden treffen (bspw. Laborarbeiten). Digitale Elemente hingegen können als online-Elemente verstanden werden, wie beispielsweise Videokonferenzen oder auf Moodle zu Verfügung gestellte Materialien. Der Unterschied zwischen synchron und asynchron besteht darin, dass asynchrone Elemente zeit- und ortsunabhängig sind, wohingegen synchrone Elemente zu festen Zeiten und teilweise auch an festen Orten stattfinden. Analog synchrone Formate - Präsenzveranstaltungen - fördern den sozialen Austausch sowie die Identifikation mit der Hochschule und dem Studium am stärksten. Dagegen ermöglichen digital asynchrone Formate wie Vorlesungsaufzeichnungen, eine zeitliche und örtliche Flexibilität und bieten die Chance des selbstgesteuerten Lernens. Durch diese Autonomie kann die Lernmotivation gesteigert und Selbstwirksamkeit und Kompetenz erlebt werden. Grundidee des Projekts ist es, die Studierenden in der Eingangsphase durch einen hohen Anteil an Präsenzveranstaltungen in ihren neuen Lebensabschnitt einzuführen und schrittweise an digitale, asynchrone Formate heranzuführen. Digitale Angebote sollen punktuell unterstützen. In der Studienphase nimmt der Anteil an digital asynchronen Formaten zu, um ein selbstgesteuertes Lernen der Studierenden zu fordern und zu fördern. Jedoch sind auch in dieser Phase des Studiums Präsenzelemente ein wichtiger Anker.

LITERATUR

[1] Ryan R.M., Deci E.L. Intrinsic and Extrinsic Motivations: Classic Definitions and New Directions. *Contemp. Educ. Psychol.* 2000;25:54–67. doi: 10.1006/ceps.1999.1020.

AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl
Dr.-Ing. Thomas Lohner
Dr. Alexandra Strasser
M.Ed. Rudolf Motzet
Lehrstuhl für Maschinenelemente (FZG)
ProLehre – Medien und Didaktik
Technische Universität München

Ontologien als Datenquelle für Prädiktive Simulation

Statusbericht zum Forschungsprojekt KnowNow

Das Forschungsprojekt KnowNow (Keramische Multilayer-Entwicklung durch Neugestaltung Ontologie-basierter Wissenssysteme) hat sich zum Ziel gesetzt eine Ontologie zu entwickeln, mit deren Hilfe das Produktverhalten in Abhängigkeit der Herstellungsprozessparameter und verwendeten Materialien vorausgesagt werden kann. Im Forschungsprojekt dient eine eingebettete Spule als Anwendungsbeispiel; diese wird aus mehreren Schichten gegossener, keramischer Folien mit eingebetteten metallischen Bahnen für die elektro-technische Funktion hergestellt. Der Herstellungsprozess umfasst in einem ersten Schritt das Laminieren, um den Verbundwerkstoff zu stabilisieren, gefolgt vom Stanzen, um die äußere Form des Bauteils zu definieren. Schließlich wird das Bauteil bei hohen Temperaturen und unter Druck gesintert. Typisch während der Herstellung von Multi-Material Verbänden sind Rissbildung und Verzug, die eine Abhängigkeit zur Materialauswahl, zu Schichtdicken sowie zu Herstellungsprozessparametern wie Temperaturen und Drücken stehen. Für die Voraussage des Produktverhaltens werden Simulationen an die Ontologie gebunden und Parameter entweder durch den Nutzer gezielt gesetzt, beziehungsweise aus dem Bestand der Ontologie hinzugezogen. Dadurch können in der Praxis die Anzahl an Versuchen reduziert werden, um ein bestimmtes Materialverhalten zu erzielen. Zudem kann das über die Versuchsreihen hinweg entstehende Wissen reproduzierbar abgelegt werden. In diesem Sinne wird ein Beitrag zur Zielsetzung der Plattform Material Digital gesetzt.

PLATTFORM MATERIAL DIGITAL

Die Plattform Material Digital (PMD) ist ein durch das BMBF geförderte Initiative, in der ein virtueller Datenraum für die hierarchische und strukturierte Ablage von Werkstoff- und Materialdaten entsteht. Dabei orchestriert die PMD das Zusammenwirken mehrerer Projekte mit unterschiedlichen Werkstoffen und Nutzungsszenarien. Die Datenlagerung selbst erfolgt dezentral innerhalb der unterschiedlichen Projekte. Die Erkenntnisse für die Digitalisierung beispielsweise zur Erstellung von Ontologien für die Materialforschung werden zwischen

den Projekten geteilt. Als Grundlage für die Zusammenarbeit werden einige Service-Bausteine bereitgestellt. Auf Basis der Projekterkenntnisse soll der virtuelle Datenraum und Digitalisierungshub für die Materialforschung entstehen und mittelfristig für die produzierende Industrie zugänglich gemacht werden.

ZWECKMÄSSIGER AUFBAU VON ONTOLOGIEN

Im Rahmen des Projekts wurde dem Ablauf zur Erstellung von Ontologien von [1] gefolgt. Dabei wurden zunächst die High-Level Ontologien PMD-Core [2] sowie die EMMO [3] Ontologie initial im Rahmen der Projektanbahnung und im Weiteren dann im Ramp-Up untersucht und auf ihre Eignung zur Nutzung im Kontext keramischer Werkstoffe untersucht. Beide Ontologien beschäftigen sich grundsätzlich mit den Materialwissenschaften, jedoch nicht zugeschnitten auf Keramische Werkstoffe. Die PMD-Core Ontologie berücksichtigt den Herstellungsprozess auf einer generischen Ebene. Hier setzt das KnowNow Projekt an, indem die Herstellung von keramischen Halbleitern mit ihren Prozess- und Materialdaten als Anwendungsbeispiel herangezogen wird. Um einen detailliertes Fit-Gap der bestehenden High-Level Ontologien mit den konkreten Aufgaben der KnowNow Ontologie durchzuführen, war zunächst eine Detaillierung der Zielstellung mit den Anwendern notwendig. Auf dieser Basis wurde dann eine Landkarte der Datenquellen und -senken, sowie der Werkzeuge entlang des Informationsflusses während der Herstellung erstellt. Diese liefert einen guten Überblick über die gesamte Informationsmenge für alle Projektbeteiligten und sorgt gleichermaßen für eine Abstimmung welche Daten konkret übergeben werden müssen. Um auf dieser Basis eine Applikation zu erstellen wurden UserStories nach dem Vorgehen der User Story Mapping Method (USM) [4] erstellt. Diese ermöglichen es aus der Landkarte, die relevanten Daten und Informationen zur Ablage in der Ontologie zu identifizieren und ebenso das User Interface näher zu spezifizieren. Die Daten der Landkarte wurden in ein RDF Schema übertragen. Dabei erfolgt die Überlegung, welche Daten- und Informationen

als Klasse generisch vorliegen, an welche Klassen aus den High-Level Ontologien sie anschließen, für die neu gebildeten Klassen eine Definition entsprechend dem Thesaurus nach [1], Abhängigkeiten zwischen den Klassen und einer Relation zu den jeweiligen Instanzen. Hierbei ist das spätere Abfrageverhalten aus den User Stories zu berücksichtigen. Die in RDFS visualisierten und abgestimmten Klassen wurden in einem weiteren Schritt in Protégé modelliert und von dort als OWL exportiert. Der hier wasserfallartig beschriebene Prozess ist in der Realität mit Iterationen behaftet bedingt durch die parallele Abstimmung mit den Nutzern und den konkreten Bedarfen und Möglichkeiten der Werkzeuge. Dabei wurde augenscheinlich, dass das Modellieren der Klassen und Instanzen in Protégé aufwändig ist, jedoch für die spätere Nutzung der Ontologie als OWL auf dem Server nicht zielführend. Folglich wurde an dieser Stelle nach einer Vereinfachung gesucht. Diese haben wir durch einen Visual Studio Code in MS Visio erzielt. Dabei werden alle im RDF Schema erstellten Definitionen und Zusammenhänge direkt aus der übersichtlich modellierten Umgebung als OWL exportiert. Dieses Vorgehen bietet den Vorteil, dass Protégé aus der Kette der Applikationen entfällt und somit ein schlanker Prozess möglich ist, weiterhin konnten wir eine zeitliche Verkürzung von etwa 30% gegenüber der Vorgehensweise mit Protégé aufzeigen und zusätzlich ein Werkzeug mit einer einfach zu erfassenden Oberfläche anbieten. Diese Heuristiken basieren auf den Arbeiten innerhalb des Projekts. Durch das vereinfachte Modellieren der Taxonomie wird der bei [1] beschriebene empirische Schritt durch ein Werkzeug unterstützt weitere Möglichkeiten zu kleinschrittigeren Iterationen geschaffen.

IT-ARCHITEKTUR ZUM ZUSAMMENSPIEL DER KOMPONENTEN

Die Ontologie selbst wurde in eine IT-Architektur mit den Materialeigenschaften, Prozessparametern und Modelle integriert, siehe Abbildung 1. Die Ontologie selbst bezieht sich dabei auf die zuvor beschriebenen TopLevel Ontologien und deren Konzepte. Im nächsten Schritt werden die verschiedenen Datenquellen (Versuchsda-

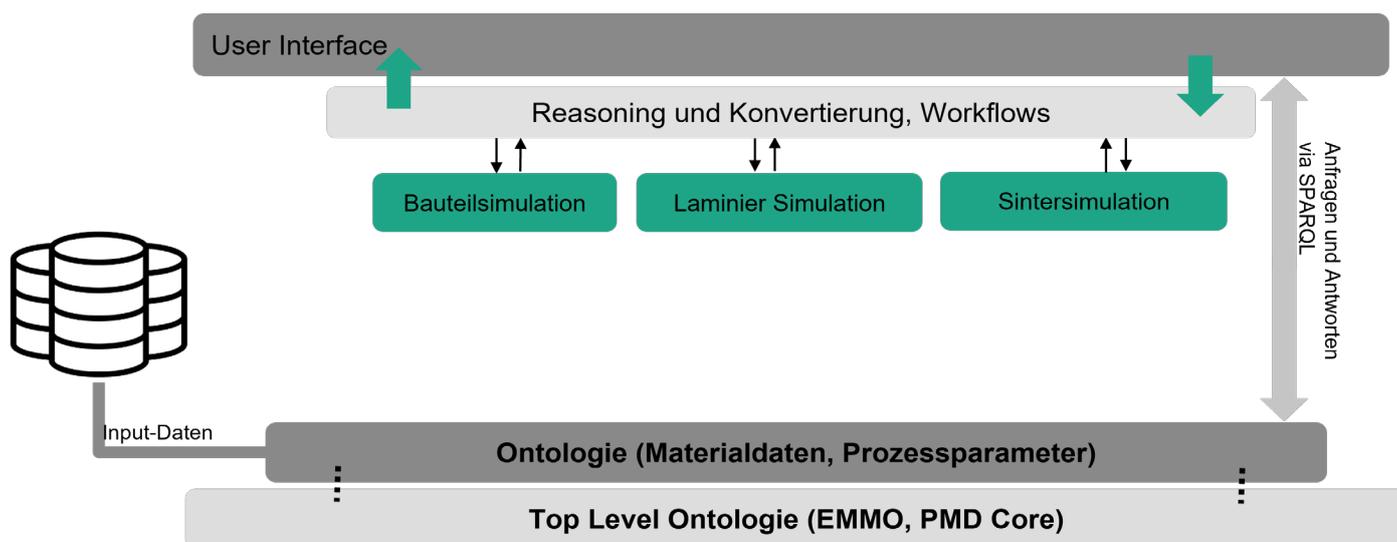


Abbildung 1: Architektkonzept KnowNow

ten, Berechnungsdaten usw.), die in Abb. 1 als Input-Daten gekennzeichnet sind, an die Ontologie angebunden.

Die vielfältigen experimentellen Daten wurden zunächst zentral auf einem Server gespeichert und mit der Ontologie verknüpft. Aufgrund der Heterogenität der Datenquellen hinsichtlich Datenformaten und Terminologien, wurden die Daten der Projektpartner im Rahmen eines Vorverarbeitungsprozesses in ein vergleichbares Format gebracht (Mapping). Die Vorverarbeitung erfolgte mithilfe von ETL-Tools (Extract-Transformation-Load) und Parsern (z. B. RDFLib), um normalisierte Informationen aus den Datenquellen zu erhalten. In einem nächsten Schritt wurden die Datenquellen, in RDF (Resource Description Framework) [7], eine maschinenlesbare Sprache, konvertiert. Die Umwandlung zu RDF wurde mithilfe der Mapping-Sprache RML [8] durchgeführt. Die Plattform MaterialDigital bietet das OntoDocker Tool, ein Flash-Anwendungsprototyp für den Zugriff auf eine Blazegraph- und Jena-Instanz über eine GUI und eine API, um die RDF Daten zu speichern [9]. Durch diese Form der Speicherung in Tripel Stores bietet sich auch die Möglichkeit, die Daten über SPARQL-Endpoints abzufragen. Nach der RDF-Logik sind T-Box (Klassen) und A-Box (Instanzen) beides Tripel. Die experimentellen Daten wurden als Data Property auf der Grundlage der definierten Terminologie (T-Box) instanziiert, welche als A-Box bezeichnet wird. Die Daten werden dann mit SPARQL instanziiert und abgefragt. Der OntoDocker bietet einen API-Port an, der SPARQL-Abfrage erkennt und beantwortet.

NÄCHSTE SCHRITTE IM PROJEKT

Um die Ontologie und die Simulationen in einer für Anwender geeigneten Form ansprechen zu können, wird ein User Interface erstellt, dunkel grün dargestellt in Abbildung 1. Das User Interface soll Abfragen in natürlicher Sprache in Sparql Code übersetzen.

Darunterliegend befindet sich ein Layer für Workflows, der Befehle abfragt, an die Anwendungen weitergibt, Daten sucht und bereitstellt und errechnete Ergebnisse an die Anwender zurückgibt. Hierzu sollen die beiden konfigurierbaren Frameworks Pyiron [5] und Simstack [6], die im Umfeld der PMD entstanden sind, herangezogen werden und mit den jeweiligen Simulationen in Verbindung gebracht werden. Im Projekt sind drei Simulationstypen relevant: 1. Eine Bauteilsimulation in Comsol/Multiphysics mit der die elektrische Leistungsfähigkeit der Spule in Abhängigkeit der Geometrie und Materialparameter errechnet werden kann 2. eine Diskrete Elemente Methode (DEM) Simulation mit der das innere Gefüge während des Laminiervorgangs und damit potentielle Verzüge und Reißbildung simuliert werden kann und 3. eine Finite-Elemente Methode (FEM) Simulation zur Abschätzung des Bauteilverzugs während des Sintervorgangs. Dabei sind unterschiedliche Ausführungsorte, teils lokal bei den Projektpartnern der Simulationen und unterschiedliche Schnittstellen/APIs mit Bezug zu den jeweiligen Werkzeugen zu berücksichtigen.

Der Aufbau ermöglicht es Herstellungs- und Prozessparameter mit Materialdaten in Beziehung zu setzen und vorausschauende

Simulationen gezielt mit Daten zu versorgen.

DANKSAGUNG

Die Durchführung des Projekts wird durch die Finanzierung des BMBF ermöglicht. Ebenso danken wir unseren Forschungspartnern im Projekt, der Bundesanstalt für Materialforschung, der Ernst-Abbe Hochschule Jena und dem Fraunhofer IKTS für das konstruktive Zusammenarbeiten, bei der Erstellung und Verwendung der Daten.

LITERATUR

- [1] Ahmed, Saeema, Sanghee Kim, and Ken M. Wallace. „A methodology for creating ontologies for engineering design.“ (2007): 132-140.
- [2] <https://github.com/materialdigital/core-ontology>
- [3] emmo-repo.github.io/versions/0.9.9-beta/emmo.html
- [4] Patton, Jeff. „It's All in How You Slice It“. „Better software“ (2005): 16-40.
- [5] <https://pyiron.org>
- [6] <https://www.simstack.de>
- [7] <https://www.w3.org/RDF/>
- [8] <https://rml.io/specs/rml/>
- [9] <https://materialdigital.github.io/pmd-server/pages/services/onto-docker/>

AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark
 Dr.-Ing. Carina Fresemann
 MSc. Sahar Ben Hassine
 Fachgebiet Industrielle Informationstechnik
 TU Berlin

Virtuelle, vernetzte Produktentwicklung mit motego

Rund 40% ihrer Zeit verbringen Ingenieur*innen mit der Suche nach Informationen für eine typische Entwicklungsaufgabe [1]. In einem Drittel der Fälle ist diese Informationssuche offenbar nicht erfolgreich – und im Unternehmen werden schon vorhandene Lösungen noch einmal neu entwickelt [2]. Im Kontext zukünftig steigender Komplexität, Vernetzung und Diversifizierung technischer Systeme machen diese schon heute alarmierenden Zahlen das Informationsmanagement der Produktentwicklung zu einem entscheidenden Wettbewerbsfaktor für das gesamte Unternehmen. In unseren Industrie- und Forschungsprojekten haben wir drei Schlüsselherausforderungen in der Produktentwicklung identifiziert: Erstens müssen Daten in einer eindeutigen, aktuellen Form verfügbar sein und Datenänderungen transparent sowie objektiv begründet durchgeführt werden. Zweitens müssen interdependente Daten miteinander vernetzt sein – mindestens informativ, besser inklusive der genauen technischen, ökonomischen oder organisatorischen Wechselwirkung. Drittens müssen Daten einheitlich und am besten maschinenlesbar formalisiert sein, sodass Algorithmen einfache Routineaufgaben durchführen und bei anspruchsvollen Problemstellungen angemessen unterstützen können.

MOTEGO

Zur Überwindung dieser Herausforderungen wurde am Institut für Maschinenelemente und Systementwicklung der RWTH

Aachen (MSE) die holistische, modellbasierte Systementwicklungsmethode motego entwickelt. Motego basiert auf dem Grundgedanken der modellbasierten Produktentwicklung, in der alle an der Entwicklung beteiligten Stakeholder zusammen in einem zentralen Systemmodell arbeiten. In diesem Systemmodell werden alle Entwicklungsdaten formalisiert, maschinenlesbar abgelegt und miteinander vernetzt. Dies ermöglicht die vernetzte, transparente und agile Entwicklung mechatronischer Produkte. Die Grundidee von motego besteht aus drei Schritten: Entwicklungsdaten werden durchgängig vernetzt (Model), Simulationsmodelle zur virtuellen Absicherung integriert (Test) sowie automatisiert in Workflows ausgeführt (Go):

Model: Das Systemmodell strukturiert und verknüpft alle Entwicklungsdaten in vier Kategorien – Anforderungen, Funktionen, Lösungen und die Produktrealisierung – und erhöht so die Transparenz von Abhängigkeiten, Entscheidungen und Änderungen in der Produktentwicklung.

Test: Das Klassifikationsschema strukturiert gewachsene Modelllandschaften und Daten in vordefinierte Kategorien. So lassen sich alle Simulationsmodelle aus den Domänen Engineering, Produktion und Controlling einfach in das Systemmodell integrieren und effizient wiederverwenden.

Go: Prozesse für Systementwurf, -optimierung und -validierung werden als wiederver-

wendbare, (teil)automatisierte Workflows im Systemmodell implementiert. So können mechatronische Produkte im Systemmodell jederzeit einfach und automatisiert virtuell entwickelt und simuliert werden.

Nach der Entwicklung am Lehrstuhl wurde motego in enger Zusammenarbeit mit Partnern aus Industrie und Forschung getestet. Insbesondere die Funktionsorientierung, die nahtlose, modulare Integration von Simulationsmodellen, sowie die intuitive Usability haben immer wieder ein positives Feedback hervorgerufen. Interessierte Produktentwickler*innen können auf der neuen Website motego.info einen tieferen Einblick in motego bekommen und die Vorteile des Ansatzes erleben. Wir freuen uns, motego zusammen mit Partnern aus Industrie und Forschung in die Anwendung zu bringen und kontinuierlich weiterzuentwickeln.

LITERATUR

[1] Robinson, M. A. (2010). An empirical analysis of engineers' information behaviors. *Journal of the American Society for information Science and technology*, 61(4), 640-658.

[2] European Commission (DG Research), European Patent Office (2007). Why researchers should care about patents.

AUTOREN

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Jacobs

Dr.-Ing. Christian Konrad

Kathrin Spütz, M.Sc.

Thilo Zerwas, M.Sc.

Lehrstuhl und Institut für Maschinenelemente und Systementwicklung RWTH Aachen

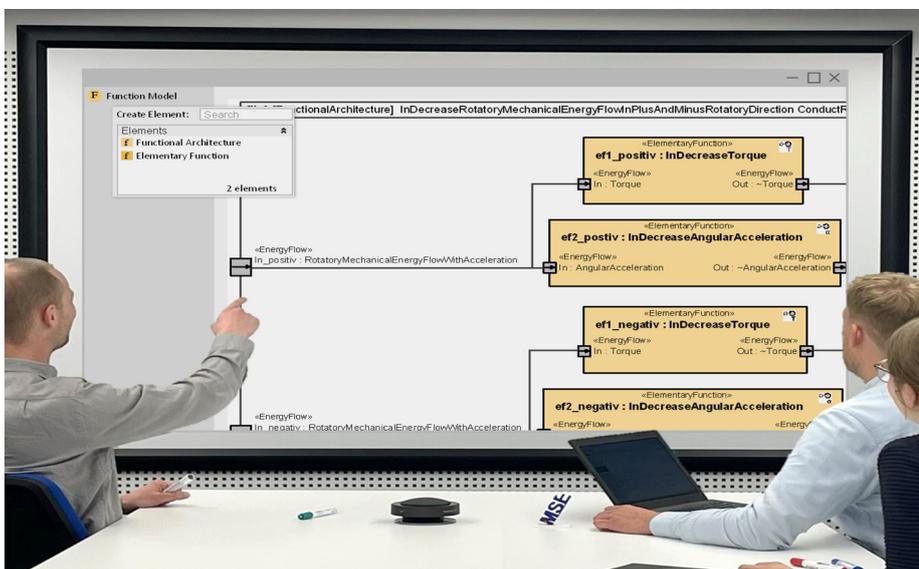


Bild 1: Virtuelle, vernetzte Produktentwicklung mit motego am MSE

Mehr Effizienz in der Produktentwicklung durch KI-basierte Abhängigkeitsanalysen

Lehrstuhl für Produktentstehung schließt das BMBF-Projekt ARCA erfolgreich ab: proaktives Management von Anforderungsänderungen erfolgreich in der Automobilindustrie validiert

Die Entwicklung komplexer technischer Systeme ist durch hohe Komplexität, Dynamik und Unsicherheit geprägt. Neue Informationen oder veränderte Rahmenbedingungen erfordern eine kontinuierliche Anpassung der Anforderungen an das zu entwickelnde System. Solche Anforderungsänderungen verursachen besonders in späten Entwicklungsstadien Verzögerungen, hohe Kosten und sind häufig Ursache für Projektfehlschläge. Ohne eine ganzheitliche Perspektive auf das System werden die Risiken von geänderten Anforderungen oftmals unterschätzt und ineffizient gehandhabt. Paderborner Forschende des Lehrstuhls für Produktentstehung haben gemeinsam mit dem Industriepartner IAV GmbH eine neue, auf künstlicher Intelligenz (KI) basierende Methode zur Risikoberechnung und -steuerung von Anforderungsänderungen erforscht. IAV ist ein weltweit führender Entwicklungsdienstleister der Automobilindustrie. Das Projekt zur „Automated Requirement Change Analysis for the development of complex technical systems“ (ARCA) wurde nach einer Laufzeit von zwei Jahren im März 2022 erfolgreich abgeschlossen. Es war Teil des Programms „Software Campus“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) zur Förderung von Nachwuchs-Führungskräften.

PROAKTIVES MANAGEMENT VON ANFORDERUNGSÄNDERUNGEN

Aktuell fehlen in der industriellen Praxis Vorgehensweisen, die über das reaktive Management von Anforderungsänderungen hinausgehen. Um das zu ändern, hat das Projektteam am Lehrstuhl von Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler neue Methoden für ein proaktives Management von Anforderungsänderungen (Proactive Management of Requirement Changes, kurz ProMaRC) sowie einen entsprechenden Software-Prototyp entwickelt. Durch ProMaRC werden Ingenieur:innen befähigt, Änderungsrisiken von Anforderungen mithilfe von KI frühzeitig abzuschätzen und vorausschauend Gegenmaßnahmen einzuleiten. Durch den



Abbildung 1: Christian Oleff und Daniel Preuß diskutieren die Projektergebnisse am Beispiel eines Heckflügelhalters

automatisierten Ansatz zur Bewertung des Änderungsrisikos wird der Aufwand für das Risikomanagement in der Praxis begrenzt. Die entwickelte Methodik wurde in der Praxis in Zusammenarbeit mit IAV evaluiert. Pilotanwender des Unternehmens haben die Methodik in drei Entwicklungsprojekten operativ angewandt. „Die KI-basierte Abhängigkeitsanalyse ermöglicht hohe Effizienzpotenziale und hat ihre Anwendbarkeit und Nützlichkeit unter Beweis gestellt“, sagt Christian Oleff, Projektleiter von ARCA und wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktentstehung. „Proaktives Risikomanagement für Anforderungsänderungen ist ein bisher kaum erforschtes Feld. Unser Ansatz ermöglicht eine effizientere Produktentwicklung, indem der Handlungsspielraum in der industriellen Praxis erweitert und negative Auswirkungen reduziert werden.“

ERKENNTNISSE FÜR WEITERE PROJEKTE

An diesen Erfolg knüpfen weitere Forschungsprojekte, an denen der Lehrstuhl für Produktentstehung beteiligt ist, an. Die Erkenntnisse aus ARCA fließen bereits in das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderte Projekt zu „Bionik und KI für nachhaltige Integration von Produktentwicklung für einen ressourceneffizienten Leichtbau“ (BIKINI) ein. In dem Vorhaben geht es um die Integration formalisierter Anforderungen in die generative und nachhaltige Produktentwicklung.

Auch das BMBF-Projekt zur „IKT-befähigten modellbasierten Auswirkungsanalyse in der Produktentwicklung“ (ImPaKT) des Lehrstuhls für Produktentstehung verwendet Elemente der ProMaRC-Methodik zur modellbasierten Auswirkungsanalyse von technischen Änderungen.

LITERATUR

Die Ergebnisse des ARCA Projekts haben Gräßler, Oleff und Preuß in dem Open-Access-Journal MDPI „applied sciences“ veröffentlicht: <https://doi.org/10.3390/app12041874>.

AUTOREN

Univ. Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler
Christian Oleff
Daniel Preuß
Heinz Nixdorf Institut
Lehrstuhl für Produktentstehung
Universität Paderborn



Strahlenschutz am CERN: Wie können Ausfälle hochsensibler elektronischer Systeme aus der Ferne sicher vorhergesagt werden?

Datenbasierte Methoden erlauben die Zustandsüberwachung elektronischer Systeme.

Methoden zur prädiktiven Wartung werden vielerorts eingesetzt, um eine möglichst effiziente und kostengünstige Instandhaltung von Produkten und Systemen zu ermöglichen. Dies erfordert eine genaue Zustandsüberwachung, um Bauteile oder -gruppen rechtzeitig vor dem vorhergesagten Ausfall warten oder austauschen zu können. Dadurch können die Ausfallwahrscheinlichkeit geringgehalten und unvorhergesehene Fehler vermieden werden. Häufig sind Systeme jedoch während des Betriebs für eine Zustandsüberwachung nicht zugänglich, da eine aufwändige Demontage erforderlich wäre oder Systeme sich in gesperrten Bereichen befinden. In diesem Fall können datenbasierte Methoden verwendet werden, um aus der Ferne den Systemzustand und die Degradation zu überwachen. Dies ist insbesondere dann vorteilhaft, wenn viele Einheiten eines Systems gleichzeitig überwacht werden sollen. Eine Möglichkeit zur datenbasierten Zustandsüberwachung ist die Verwendung von Anomalie-Erkennung in Datensätzen. Dabei werden Fehlerindikatoren als Anomalien erkannt und so eine Fehlervorhersage ermöglicht. Für mechanische Systeme ist dies eine weit verbreitete und gut erforschte Methodik. Hier können Daten aus Vibrations- oder Temperatursensoren Aufschluss über den Systemzustand geben und Fehlerindikatoren beinhalten. Für elektronische Systeme stellt die Auswahl geeigneter Daten allerdings eine große Herausforderung dar. Insbesondere für neue Systeme, bei denen noch keine Informationen zu Fehlerindikatoren in den Datensätzen vorliegen, ist die Auswahl geeigneter Charakteristika für die Anomalie-Erkennung schwierig. Ein neuer Lösungsansatz basierend auf der Analyse von Störungen und Rauschen in Signalen soll eine Erkennung von Fehlerindikatoren in Datensätzen elektronischer Systeme ermöglichen. Ein erhöhtes Rauschen kann bei elektronischen Bauteilen, wie zum Beispiel bei Kondensatoren, ein Indikator fortgeschrittener Degradation sein. Dazu müssen erstens Störungen und Rauschen

aus Rohsignalen extrahiert werden um diese gezielt bewerten zu können. Zweitens muss ein Prozess entwickelt werden, der durch geeignete Charakteristika und Algorithmen des maschinellen Lernens Fehlerindikatoren in den Datensätzen erkennbar macht.

DER ANWENDUNGSFALL

Das Projekt entstand in einer Kooperation bestehend aus dem Institut für Maschinenelemente (IMA) der Universität Stuttgart und der Europäischen Organisation für Kernforschung (CERN). Das CERN beherbergt das größte Labor für hochenergetische Teilchenphysik der Welt und betreibt Grundlagenforschung zum Ursprung des Universums. In einem Komplex aus mehreren sukzessiv angeordneten Teilchenbeschleunigern werden kleinste Teilchen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Die dadurch entstehenden hochenergetischen Teilchen werden anschließend in mehreren Experimenten zur Kollision gebracht. Durch die bei den Kollisionen freiwerdende Energie können Teilchen entstehen, die von Detektoren erfasst und von Physikern analysiert werden. Zudem kann an den Teilchenbeschleunigern und den Experimenten ionisierende radioaktive Strahlung entstehen. Um Personen und die Umwelt vor dieser gefährlichen Strahlung zu schützen, werden diverse Sicherheitseinrichtungen eingesetzt. Das am CERN neu entwickelte Strahlungsüberwachungssystem, genannt CROME, ist ein aktives elektronisches System zur Überwachung der Dosisleistung der radioaktiven Strahlung (Abbildung 1). Werden bestimmte Grenzwerte überschritten, können Alarmer ausgelöst oder die Experimente aktiv abgeschaltet werden. Da das CROME-System sicherheitskritisch ist, sind die Zuverlässigkeitsanforderungen sehr hoch. Um unerwartete Ausfälle zu verhindern, ist eine gezielte Wartung aller Geräte erforderlich. Alle CROME-Geräte senden in Echtzeit Daten zu internen Messgrößen wie Spannungen und Temperaturen an eine Datenbank. Diese Daten sollen genutzt werden, um Fehlerindikatoren zu erkennen und Wartungsmaßnahmen dementspre-

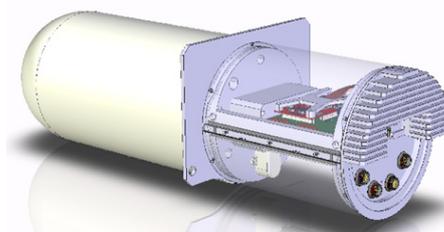


Abbildung 1: CROME-System zur Überwachung der Dosisleistung. Ionisationskammer (weiß, links), Messelektronik (rechts).

chend rechtzeitig durchführen zu können.

DER LÖSUNGSANSATZ

Zur Extraktion der Störsignale wird die Wavelet-Transformation verwendet, die, im Gegensatz zur Fourier-Transformation, für nicht-stationäre, sich schnell ändernde Signale geeignet ist. Nach erfolgter Konfiguration der Wavelet-Transformation können Störsignale und Rauschen von den Rohsignalen separiert und weiterverarbeitet werden. Im nächsten Schritt werden Merkmale berechnet, die sich auf die statistische Verteilung der Messwerte im Signal beziehen. So kann zum Beispiel die Schiefe der statistischen Verteilung oder die Anzahl der Nulldurchgänge eines Signals bewertet werden. Diese Merkmale werden sowohl für die Rohsignale als auch für die extrahierten Störsignale berechnet. Anschließend werden Algorithmen des maschinellen Lernens verwendet, um Anomalien in den Roh- oder Störsignalen zu erkennen. Diese Algorithmen basieren auf der Annahme, dass Anomalien eine geringe Häufigkeit haben und sich hinsichtlich bestimmter Merkmale stark von anderen, normalen, Daten unterscheiden. Die angewandten Algorithmen folgen dem Prinzip des unüberwachten Lernens und benötigen somit keine Definition der zu erkennenden Anomalien. Einer der beiden verwendeten Algorithmen (Isolation Forest) erfordert sogar keinerlei Training und kann direkt zur Anomalie-Erkennung eingesetzt werden, während der zweite Algorithmus (Autoencoder) zunächst auf den Normalzustand des Systems trainiert werden muss. Im Gegensatz dazu wird bei Algorithmen des überwachten Lernens das Ergebnis

(also z.B. Anomalie oder Normalzustand) für jedes Element des Training-Datensatzes vorgegeben. Allerdings ist eine für das überwachte Lernen notwendige vollständige Beschreibung aller Anomalien für reale Systeme nur in seltenen Ausnahmefällen verfügbar.

DIE ERGEBNISSE

Basierend auf den entwickelten Merkmalen der Roh- und Störsignale konnten die Algorithmen Signale mit unüblichen Charakteristika erkennen. Scharfe Spitzen in der gemessenen Dosisleistung, mit unüblich hohen Werten, konnten durch die Schiefe der statistischen Verteilung der Messwerte erkannt werden. Des Weiteren wurden Signale mit negativer gemessener Dosisleistung basierend auf der Anzahl der Nulldurchgänge identifiziert (Abbildung 2). Eine negative Dosisleistung ist physikalisch nicht möglich. Darüber hinaus wurden durch Algorithmen, die zeitliche Zusammenhänge in Datensätzen erlernen können, unübliche Korrelationen zwischen zwei Variablen erkannt. Beispielsweise wurde eine Anomalie identifiziert, bei der die gemessene Luftfeuchtigkeit mit sinkender Temperatur abnimmt, was nicht mit dem üblichen physikalischen Verhalten übereinstimmt.

WAS FOLGT?

Das Ergebnis des Anomalie-Erkennungsprozesses ist ein Anomalie-Score, der eine Identifikation von Signalen ermöglicht, die von den Algorithmen als anomal angesehen werden. Um diese Ergebnisse für die prädiktive Wartung nutzen zu können, muss

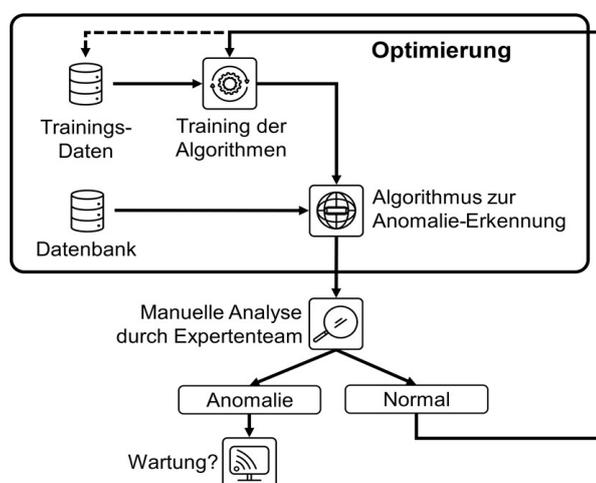


Abbildung 3: Prozess zur Integration von Expertenwissen in den Anomalie-Erkennungsprozess (Feedback-Loop). Durch nachträgliche Klassifizierung kann der Algorithmus optimiert werden.

eine Verknüpfung zwischen den erkannten Anomalien und den Fehlerindikatoren hergestellt werden, da seltene Messereignisse mit einzigartigen Eigenschaften nicht zwangsläufig auch Fehlerindikatoren sein müssen. Um diese Verknüpfung herzustellen, sollen die erkannten Anomalien durch ein Expertenteam bewertet werden. Dazu werden Signale, die von den Algorithmen als anomal bewertet wurden, ausgewählt und manuell analysiert. Sollte es sich tatsächlich um ein Fehlverhalten des Systems oder um einen Fehlerindikator handeln, muss entschieden werden ob Wartungsmaßnahmen nötig sind. Stellt ein Signal aber ein normales Systemverhalten dar, kann diese Information verwendet werden, um das Training des Autoencoders weiter zu verbessern. Diese nachträgliche

Bewertung, auch Feedback-Loop genannt, ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt. Durch das so generierte Wissen über das Systemverhalten können erkannte Anomalien zur prädiktiven Wartung genutzt werden, um Systemausfälle vorherzusagen und Instandhaltungsmaßnahmen bedarfsgerecht zu planen. Dies erlaubt es, unvorhergesehene Ausfälle zu verhindern und die Ausfallraten sicherheitskritischer elektronischer Systeme wie dem CROME-System gering zu halten.

AUTOREN

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche
 B. Sc.Dr.-Ing. Martin Dazer
 Felix Waldhauser
 Institut für Maschinenelemente Universität Stuttgart

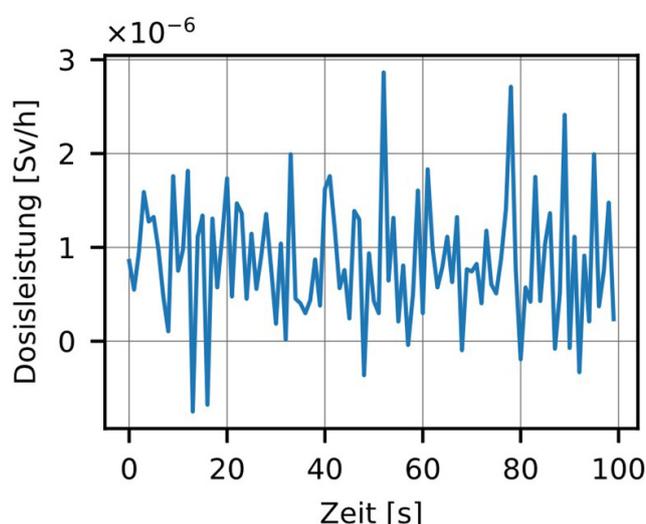


Abbildung 2: Beispiel einer erkannten Anomalie mit gemessener negativer Dosisleistung.

Zukunftsrobustes, modulares Mischsystem für das Unternehmen Glass GmbH & Co. KG

Glass Mischsysteme sind in der Lage von 15 bis 2.700 Liter Mischgut in kürzester Zeit zu vermengen unter den strengen Hygieneauflagen der Lebensmittel- und Chemieindustrie. Die Mischsysteme von Glass finden unter anderem Anwendung in der Vermengung von Backteig für die Fleischproduktion, mischen von diversen Suppen, oder das Trockenvermengen von Gewürzmischungen für Fertigprodukte. Um den strengen Hygieneauflagen der Lebensmittel- und Chemieindustrie gerecht zu werden, müssen alle Werkstoffe und Komponenten der Anlage für intensivste Reinigungsverfahren gestaltet sein. Faktoren wie Wasserdichtigkeit und Korrosionsresistenz spielen hierbei eine große Rolle, damit die Maschinen und Anlagen langfristig ohne Störungen betrieben werden können.

Diese Mischanlagen werden typischerweise in Stückzahl eins bestellt sowie angeboten, konstruiert und hergestellt. Das vom Lehrstuhl für Produktentstehung des Heinz Nixdorf Instituts von Frau Professor Iris Gräßler gemeinsam mit der Firma Glass GmbH & Co. KG entwickelte Modularisierungskonzept ermöglicht die Einsparung von Zeit und Kosten bei der kundenindividuellen Konfiguration der Mischsysteme.

Das Unternehmen Glass ist ein Sondermaschinenbauer und entwickelt Mischer, Prozessanlagen und Lebensmittelmaschinen. Kundenindividuelle Anforderungen sind ein wesentlicher Bestandteil jedes Mischsystems und werden in jedem Verkaufsgespräch vereinbart.

Eine vom Lehrstuhl durchgeführte Vorfeldstudie zeigt auf, dass in 80 Prozent neuer Angebotszeichnungen auf bestehende Konstruktionsdaten zurückgegriffen wird. Dies verdeutlicht das hohe wirtschaftliche Potenzial eines Baukasten-Systems.

Im Angebot variieren vor allem geometrische Maße wie Breite und Höhe oder die Prozesstaktung und der Durchsatz pro Takt. Die Anlagen von Glass erfüllen Funktionen wie das Beschicken der Trommel, das Vakuumieren, das Mischen und Kneten, das Heizen bzw. Kühlen, das Abstreifen und Entleeren sowie das Reinigen. Zudem müssen ergonomische Randbedingungen berücksichtigt werden, beispielsweise bei Auslegung einer schwenkbaren Trommel, einer Deckelbetätigung und von Zusatzkomponenten wie einem Lift zur Beschickung.

Anhand der Kundenanforderungen und Mischer-Konfigurationen wurde im Projekt eine Baukasten-Systematik entwickelt. Damit werden Außendienstmitarbeiter:innen in die Lage versetzt, die Auswahl aus 3.800 möglichen Konfigurationen zielgerichtet und mit direkter Visualisierung innerhalb der Angebotserstellung mit dem Kunden zu treffen. Um diese Erkenntnisse nutzbar zu machen, wurde in Abstimmung mit Herrn Karsten Ollesch, Prokurist des Unternehmens, sowie Mitarbeitern aus der Konstruktionsabteilung ein Online-Konfigurator entwickelt. Der Konfigurator bildet das Baukasten-System

regelbasiert ab und ermöglicht die gemeinsame interaktive Konfiguration direkt beim Kunden. Als besonderes Feature kann sich der Kunde das Mischsystem im Konfigurator als 3D-Modell anschauen und automatisiert eine technische Zeichnung ausgeben lassen. Dies erfolgt durch ein Python-Skript auf Basis von STEP.

Das System hat bereits für Begeisterung auf den Messen Anuga, FoodTec 2022 und IFFA 2022 gesorgt. Dem Unternehmen Glass gelingt es so, den wachsenden Kundenanforderungen gerecht zu werden und gleichzeitig die Produktion zu standardisieren.

AUTOREN

Univ. Prof. Dr.-Ing. Gräßler, Iris
Daniel Roesmann
Michael Hieb
Heinz Nixdorf Institut
Lehrstuhl für Produktentstehung
Universität Paderborn



Abbildung 1: Projekttreffen vor einer 300-Liter Emulgiermischanlage bei der Firma Glass GmbH & Co. KG (von links: Karsten Ollesch (Prokurist der Firma Glass), Prof. Dr.-Ing Iris Gräßler, M.Sc. Daniel Roesmann, Dr.-Ing Jens Pottebaum)

Automatisierte Prüfung und Anpassung von Bauteilen für die additive Fertigung

Automatisierte Prüfung und Anpassung von Bauteilen für die additive Fertigung

Im Rahmen des Forschungsprojekts Hochtemperaturanwendungen 2.0 (HTA 2.0) wird am Fachgebiet Industrielle Informationstechnik ein Softwareprototyp entwickelt. Es soll untersucht werden, wie sich Erkenntnisse über Fähigkeiten und Grenzen von additiven Verfahren (auch 3D-Druck [1]) innerhalb einer Softwareumgebung für Produktentwickler*innen nutzbar machen lassen.

HINTERGRUND UND LÖSUNGSANSATZ

Anders, als oft angenommen, kann nicht jedes Bauteil problemlos additiv gefertigt werden. Die Verfahren unterliegen bestimmten Restriktionen, beispielsweise bei der Fertigbarkeit filigraner Strukturen [2]. Je nach Verfahren ergeben sich unterschiedliche Arten von Restriktionen und Grenzwerte, welche von den Fertigungsbedingungen abhängen.

Im Rahmen des Projekts werden diese speziell für additiv gefertigte Metallbauteile für Hochtemperaturanwendungen im Bereich Gasturbinen von anderen beteiligten Partnern ermittelt.

Dieses Expertenwissen soll genutzt werden, um Bauteile zu analysieren und eine Aussage über deren Fertigbarkeit zu treffen. Aufgrund der hohen Komplexität (Wissen und oft auch Bauteile) ist eine manuelle Analyse sehr aufwändig und nicht immer praxistauglich. Deshalb soll hierfür ein Software-Tool entwickelt werden. Dieses wird im Rahmen des Projekts prototypisch umgesetzt. Das Tool ist als Plugin in die CAD-Konstruktionsumgebung Siemens NX eingebunden (siehe auch Bild 1).

Um die ermittelten Restriktionen im Tool nutzbar zu machen, werden diese in einer zentralen Datenbank abgelegt. Diese



Bild 1: Studentischer Mitarbeiter bei der Arbeit am Tool

Datenbank dient als Wissensspeicher und kann kontinuierlich angepasst und erweitert werden. Über eine definierte Schnittstelle werden die Daten dem Plugin bereitgestellt. Diese Architektur hat den Vorteil, dass innerhalb der Datenbank Vorverarbeitungsschritte und Berechnungen durchgeführt werden können. Außerdem ist in einem realen Anwendungsszenario so sichergestellt, dass Plugins auf mehreren Rechnern mit der gleichen Datenbasis arbeiten. Bestehende Wissens Elemente, wie Ontologien können an die Datenbank gekoppelt werden.

AKTUELLER STAND DER ENTWICKLUNG

Bei der Bauteilanalyse wurden Detektionsmechanismen für verschiedene kritische Geometrielemente (beispielsweise geschlossene Hohlräume und dünne Wände) umgesetzt. Dabei wird auf die Datenbank zur Ermittlung spezifischer Grenzwerte zurückgegriffen.

Das Analyseergebnis soll zusätzliche Informationen mit Begründungen und möglichen Abhilfemaßnahmen beinhalten. Ein Projektpartner hat das Wissen darüber in Form eines Wikis abgelegt, auf welches aus dem Tool verwiesen werden kann.

Neben der Analyse bietet das Tool auch Möglichkeiten zur automatischen Problembekämpfung an. Insbesondere bei Bohrungen gibt es dafür Potenzial. Wenn das Loch der Bohrung für die Funktionserfüllung nicht rund sein muss, kann man die Form kritischer Bohrungen, die nicht fehlerfrei gefertigt werden könnten, anpassen. Oft wird hierfür beispielsweise eine sogenannte „Teardrop“-Form gewählt [3]. Diese Form hat nur unten eine klassische Rundung und läuft oben spitz zu, wie ein Tropfen. Dadurch sind diese Bohrungen additiv gut fertigbar. Mit dem Tool können kritische Bohrungen identifiziert und automatisch angepasst werden. Ein Beispiel ist in Bild 2 dargestellt. Neben der Anpassung von Bohrungen bieten sich weitere Möglichkeiten dafür etwa bei dünnen Strukturen. Diese Anpassungen benötigen jedoch in der Regel eine manuelle Kontrolle und ggf. Nacharbeit.

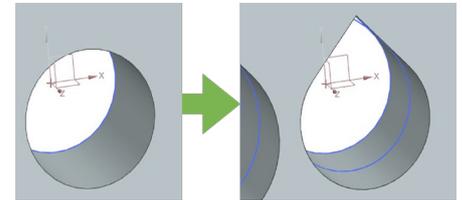


Bild 2: Umwandlung einer Bohrung

AUSBLICK

Zukünftig werden die entwickelten Funktionen des Tools unter einer Gesamtoberfläche gebündelt und weitere Funktionen von beteiligten Projektpartnern angebunden.

Dazu zählt beispielsweise die Verzugkompensation. Dabei wird der Fertigungsprozess vorab simuliert und der zu erwartende Verzug (ungewollte Verformung) des Bauteils bestimmt. Anschließend ist das Ziel, diesen Verzug möglichst weit abzuschwächen. Hierzu wird das Bauteil dem Verzug entgegengesetzt digital verformt. Bei der Fertigung soll so die Formabweichung zur Zielgeometrie verringert werden. Abschließend soll das entwickelte Tool beim Einsatz mit Produktentwickler*innen validiert werden. Dabei soll auch die mögliche Zeiteinsparung durch die Verwendung des Tools bestimmt werden.

Das Projekt wird durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) kofinanziert.

LITERATUR

- [1] A. Gebhardt, Additive Fertigungsverfahren, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016.
- [2] M. K. Thompson, G. Moroni, T. Vaneker, G. Fadel, R. I. Campbell, I. Gibson, A. Bernard, J. Schulz, P. Graf, B. Ahuja und F. Martina, „Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints,“ CIRP Annals, Bd. 65, p. 737–760, 2016.
- [3] O. Diegel, A. Nordin und D. Motte, A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing, Springer Singapore, 2019.

AUTOR

Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark
 Claudius Ellsel, M. Sc.
 Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb
 Fachgebiet Industrielle Informationstechnik
 Technische Universität Berlin

Effiziente Methoden für die Fahrzeugaußengeräusch-Entwicklung und -Homologation

Bei der Entwicklung und Produktion neuer Fahrzeuge existieren heutzutage viele Vorschriften und Gesetze, die die Hersteller vor neue oder sich ändernde Herausforderungen stellen. Somit steigt der Bedarf an neuen Methoden, welche bereits frühzeitig im Produktentwicklungsprozess, bei einer Betrachtung auf Komponentenebene unterstützen. Durch diese können ungünstige Einflüsse von Teilsystemen des Fahrzeugs auf das Gesamtsystem früher identifiziert und gegebenenfalls vermieden werden. Im Bereich der Lärmemission von Fahrzeugen, sind insbesondere die komplexen Schallübertragungspfade von Komponente zum Außengeräusch eine große Herausforderung. Dadurch werden Vorhersagen über die akustischen Auswirkungen von bspw. Bauteiländerungen auf das Gesamtsystem erschwert. Eine abschließende Bewertung und Beurteilung ist daher oft erst nach der Entwicklung des Gesamtfahrzeugs möglich ist. Änderungen und Optimierungen zu diesem Zeitpunkt gehen in der Regel mit hohem Aufwand und Kosten einher. Das IPEK – Institut für Produktentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) arbeitet deshalb im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projektes an effizienten Methoden zur NVH-gerechten Entwicklung neuer Antriebskomponenten im Gesamtfahrzeugkontext.

Relevante Optimierungspotenziale ergeben sich dabei u.a. im Bereich der Homologation von Fahrzeugen bezüglich des Außen-geräuschs. Für die Homologation von Kraftfahrzeugen darf deren abgestrahltes Geräusch während einer Vorbeifahrt einen durch den Gesetzgeber definierten Grenzwert nicht überschreiten. Das Vorbeifahrtsgeräusch kann unter Laborbedingungen in einer akustischen gedämmten Halle bei der sogenannten simulierten Vorbeifahrt untersucht werden (siehe Bild 1, links). Für die Messungen auf dem Prüfstand werden jedoch große Akustikhallen benötigt, deren Bau mit sehr hohen Kosten verbunden sind. Daher gibt es für dieses Verfahren den Ansatz, den Messaufbau so zu skalieren, dass die Messungen auch in kleinen Hallen durchgeführt werden können, um somit Baukosten und Aufwand bei den Versuchen zu verringern. Voraussetzung dafür ist, dass die Hauptschallquellen des Fahrzeugs auf

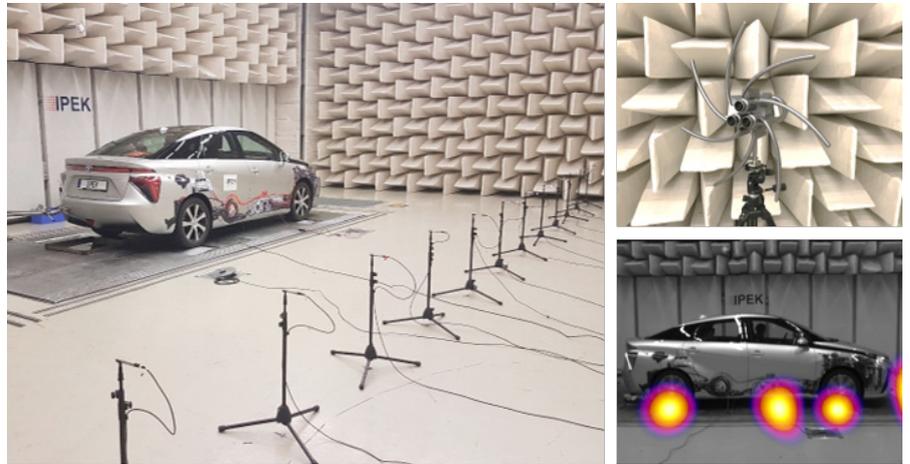


Bild 1: Versuchsaufbau für die Außengeräusch-Untersuchung eines Brennstoffzellenfahrzeuges auf dem IPEK-Akustikrollenprüfstand mit Mikrofonarray (links), akustischer Kamera (rechts oben) sowie Software-Ausgabe der akustischen Kamera (rechts unten) [2]

einen repräsentativen Punkt, dem sogenannten akustischen Zentrum, zusammengefasst werden. Auf dieses Zentrum kann dann das gesamte Messverfahren skaliert werden. [1]

Zur Bestimmung der Hauptschallquellen des Fahrzeugs kommt im Rahmen des Forschungsprojektes die am IPEK vorhandene akustische Kamera zum Einsatz (siehe Bild 1, rechts oben). Mit deren Hilfe können die Einzel-Schallquellen des Fahrzeugs, wie z. B. Reifen, Elektromotor, Getriebe oder Brennstoffzellensystem, identifiziert, lokalisiert und quantifiziert werden (siehe Bild 1, rechts unten). Im Verlauf des Projektes wurde eine Methode zur Berechnung des akustischen Zentrums aus diesen Teilschallquellen entwickelt. Dazu werden die Positionen der Schallquellen mit deren Beitrag zum Gesamtgeräusch in Verhältnis gesetzt und miteinander verrechnet (ähnlich Schwerpunktsatz). Dank der akustischen Kamera kann somit zu jedem Zeitpunkt eines Fahrmanövers der Beitrag der Einzelschallquellen ermittelt und für die Berechnung berücksichtigt werden. [2]

Im Verlauf des Projekts wurde außerdem eine Methode entwickelt, mit deren Hilfe die identifizierten Einzel-Schallquellen virtuell „ausgetauscht“ oder neue Schallquellen hinzugefügt werden können. Damit können Änderungen an Komponenten, bspw. im Rahmen einer Produktgenerationsentwicklung, am physischen Restfahrzeug der vorherigen Generation simuliert und deren akustische Auswirkung auf das Gesamtfahr-

zeuggeräusch untersucht werden. Somit können schon frühzeitig im Produktentwicklungsprozess Vorhersagen über das Fahrzeugaußengeräusch getroffen werden, ohne auf teure Prototypen zurückgreifen zu müssen.

DANKSAGUNGEN

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projektnummer 426490586

Gefördert durch



LITERATUR

- [1] Robens, G., Ein Handlungssystem zur Skalierung der simulierten Vorbeifahrt mittels Mikrofonarray für eine effiziente Validierung in kleinen Halbfreieldräumen im Fahrzeugentwicklungsprozess, IPEK Forschungsbericht Band 61, Hrsg.: o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. A. Albers, ISSN 1615-8113
- [2] Weber, Y., Behrendt, M., Gohlke, T., Albert, A., Method for Localisation of Sound Sources and Aggregation to an Acoustic Center, Inter-Noise, Washington, 2021

AUTOREN

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers
Yannik Weber, M. Sc.
IPEK – Institut für Produktentwicklung
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Erneuerung der Dauerfestigkeitsschaubilder für Schraubendruckfedern

Methodenentwicklung und -anwendung zur Verbesserung der Auslegung von Druckfedern

Im Forschungsprojekt IGF 19693 BR wurde eine neue Methode zur Entwicklung von Schwingfestigkeitskennlinien für Druckfedern erarbeitet, die dann genutzt wurde, um für aktuelle Werkstoffe und Fertigungsverfahren passende Dauerfestigkeitsschaubilder zu erstellen. Dazu wurden mehrere tausend Federbrüche statistisch ausgewertet.

IN DIN EN 13906-1 ENTHALTENE SCHWINGFESTIGKEITEN VERALTET

Für die Auslegung und Berechnung von zylindrischen Schraubendruckfedern bilden die in Norm DIN EN 13906-1 [1] enthaltenen mathematischen Beziehungen und Goodman-Diagramme die wesentliche Grundlage. Die Schaubilder werden international eingesetzt, sind allerdings über 50 Jahre alt und entsprechen nicht mehr dem aktuellen Stand. Die meisten Einflüsse auf die Schwingfestigkeit können nach Norm derzeit nicht in der Auslegung berücksichtigt werden. Für die Anwender der Norm folgt daraus eine gewisse Unsicherheit, was derzeit durch kostenintensive Schwingversuche ausgeglichen werden muss. Hersteller und Anwender sind bei der Auslegung von

Federn zwingend auf aussagekräftige und aktuelle Normen bzw. Richtlinien angewiesen. Das wesentliche Ziel des Forschungsvorhabens war deshalb die Entwicklung einer Methode und insbesondere die Erstellung neuer Dauerfestigkeitsschaubilder. Sie sollten so einfach wie die etablierten Goodman-Diagramme und für Standardfedern direkt anwendbar sein.

BERECHNUNG NEUER ZULÄSSIGER SCHWINGFESTIGKEITEN

Die rechnerische Neubestimmung von Schwingfestigkeitskennlinien erfolgte unter Anwendung des Richtlinienentwurfs Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Federn und Federelemente aus IGF 18495 BG bzw. der darin entwickelten, gleichnamigen FKM-Richtlinie [2]. Die errechneten Schwingfestigkeitskennlinien wurden durch die Anwendung eines ebenfalls in der Richtlinie enthaltenen, zweistufigen Sicherheitskonzepts derart verringert, dass sie hinsichtlich realer Versuchsdaten als konservativ zu bewerten sind.

Insgesamt wurden 24 Schaubilder in je zwei Darstellungsformen (Goodman-/Haigh-Diagramm) für die Schwingzahl $N=10^6$ und $N=10^7$ erzeugt, welche die Drahtsorten

FDSiCr, VDSiCr, VDSiCrV, DH, 1.4310 und 1.4568 abbilden (Bild 1).

Zusätzlich wurde eine neue Methode entwickelt, um eine rechnerische Übertragung von Schwingfestigkeiten aus den Schaubildern auf andere, ähnliche Federn zu ermöglichen. Die Auslegungsqualität kann so weiter gesteigert werden – was aber nur bei kritischen Auslegungen notwendig ist.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens wurden so aufbereitet, dass eine einfache Anwendbarkeit sichergestellt ist. Damit haben die neu erzeugten Schaubilder das Potential, zukünftig in die DIN EN 13906-1 aufgenommen zu werden, um die veralteten Schaubilder zu ersetzen. Der Normungsprozess ist angestoßen.

FÖRDERHINWEIS

Das IGF-Vorhaben 19693 BR der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichtes kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.

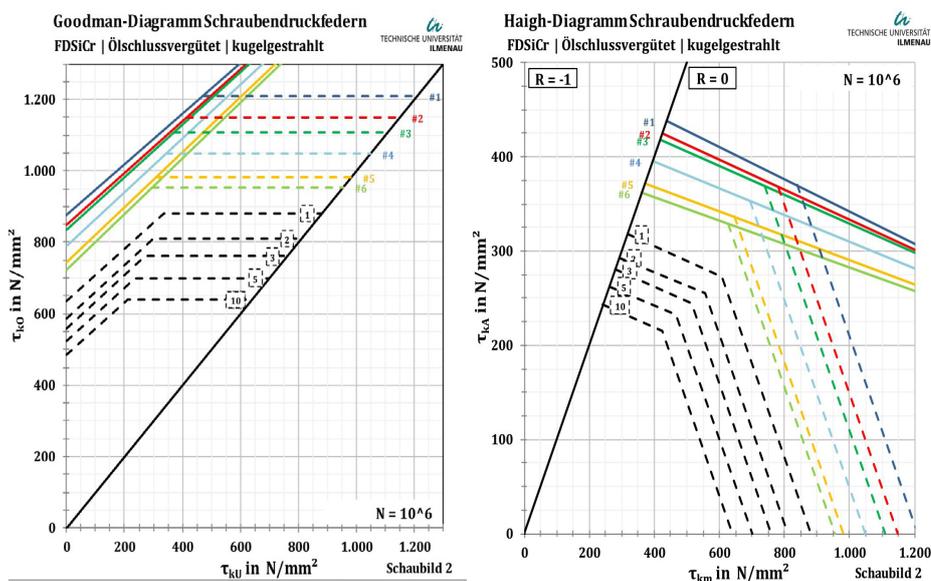


Bild 1: Beispiel neuer Festigkeitsschaubilder (als Goodman- und Haigh-Diagramm) für Federn aus ölschlussvergütetem Material. Zusätzlich sind farbige Strichlinien als Hinweis auf die statische Auslastung eingezeichnet. Die schwarzen Strichlinien zeigen die gültigen Kennlinien der aktuellen Norm für diese Federvariante.

LITERATUR

- [1] DIN EN 13906-1: Zylindrische Schraubenfedern aus runden Drähten und Stäben - Berechnung und Konstruktion – Teil 1: Druckfedern, 2013
- [2] FKM FORSCHUNGSKURATORIUM MASCHINENBAU E.V. (Hrsg.): Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Federn und Federelemente – FKM-Richtlinie für Federn und Federelemente. VDMA-Verlag, Frankfurt a. M., 2020

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Ulf Kletzinger
 M. Sc. Martin Petrich
 Fachgebiet Maschinenelemente
 Technische Universität Ilmenau

DigIT Simulator – Hybrider Zwilling einer Tunnelbohrmaschine

Hardware-in-the-Loop als Ansatz eines virtuellen Tunnelbohrmaschinen-Simulators für XR-Training

Der Aufbau und Einsatz digitaler Zwillinge hat in den letzten Jahren durch die zunehmende Digitalisierung eine höhere Verbreitung und einen verbesserten Reifegrad durchlebt. Jedoch bestehen weiterhin erhebliche Probleme in der zum Großteil manuellen Erstellung und der potenziellen Nutzung dieser Zwillinge. Die immer weiter zunehmende Komplexität der abzubildenden Systeme erschwert den Fortschritt des gesamtheitlich angedachten Ansatzes digitaler Zwillinge.

In diesem Artikel stellen wir ein Projekt vor, dessen Ziel ein virtueller Simulator einer Tunnelbohrmaschine (TBM) war. Durch die Ankopplung einer Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) mitsamt dem hinterlegten Steuerprogramm wurde ein Hardware-in-the-Loop (HiL) Ansatz verfolgt. Zusätzlich an die SPS kann ein physisches Steuerpult angeschlossen werden, welches dem auf der Baustelle eingesetztem gleicht (Bild 1). So können sich zukünftige Maschinenoperatoren mit der Haptik vertraut machen und eine gefahrenfreie Umgebung zum Erlernen des Maschinenführers nutzen. Zukünftig soll der implementierte HiL-Ansatz ermöglichen, die Simulation zu nutzen, um Maschinenkomponenten einzeln, oder in Gruppen anzudocken, um die Entwicklung von Subsystemen nächster Generationen effizienter voranzutreiben oder Validierungsprozesse entkoppelt vom Gesamtsystem zu ermöglichen.

Da hier ein Zusammenspiel zwischen der intelligenten virtuellen Simulation der Maschine, der SPS und des Steuerpults entstand, verwenden wir auch den Begriff des „Hybriden Zwillings“, um zu verdeutlichen, dass das Abbild der Maschine nicht rein digital ist.

VERWANDTE ARBEITEN

Der hochspezifische Anwendungsfall einer Tunnelbohrmaschine (TBM) ist eine breit gefächerte Implementierung mit mehreren Teilsystemen zur Bewältigung unterschiedlichster Aufgaben während des Tunnelbauvorgangs. Die vollständige physikalische Simulation einzelner Teilaufgaben erfordern enorme Mengen an Rechenleistung und -zeit, welche für Echtzeitfähigkeit stark

reduziert werden müssen. Bohreigenschaften durch verschiedene Untergrundtypen wie weichen Boden oder Geröll können mit numerischen Mitteln wie FEM offline simuliert werden. Für den Vortrieb des gesamten Tunnelbauprozesses gab es analytische, numerische und KI-basierte Ansätze wie Fuzzy-Logic und Machine-Learning [1]. Virtuelle Darstellungen von TBMs wurden bisher nur selten implementiert, meist aufgrund eines fehlenden Mehrwerts im Produktlebenszyklus selbst. Weitere Arbeiten zu Virtuellen Zwillingen von TBMs wurden außerdem zu Forschungszwecken speziell für die Anwendung immersiver Technologien erstellt [2,3]. Isolierte Teilmodule der TBM wie das Navigations- und Steuerungssystem oder die Zylinderpressen wurden virtualisiert [4]. Weitere Arbeiten ähneln unserem Projekt, um das Wissen über die Funktionalitäten innerhalb einer TBM an andere Ingenieure zu vermitteln [5]. Die meisten der genannten Arbeiten sind auf bestimmte Forschungsbereiche einer TBM im Offline-Einsatz spezialisiert. Es existieren zwar einige Ansätze zur Erzeugung virtu-



Bild 1: Physischer Steuerstand mit zwei Displays

eller TBMs, jedoch nicht so komplex wie unser System, da wir eine SPS mit realem Maschinensteuerungscode integriert haben, die in Echtzeit an die virtuelle Simulation gekoppelt ist.

ZIEL DES SIMULATORS

Der Simulator soll einem angehenden Maschinenoperator eine sichere Trainingsumgebung zu Schulungszwecken bieten, die eine realistische Schnittstelle enthält und das Verhalten der Maschine so realitätsnah

wie möglich darstellt. Es können unvorhergesehene Grenzfälle wie Störungen, Fehler und Lastspitzen vordefiniert, reproduziert und sicher trainiert werden. Dazu wird ein digitales Abbild der Maschine im Boden erstellt und zur Simulation im Erdreich verwendet.

IMPLEMENTIERUNG

Ein Einblick in den Zustand der Maschine wird dem Maschinenoperator auf einem visuellen Armaturenbrett präsentiert (siehe Bild 1). Dies ist sowohl für die reale Maschine als auch für den Simulator notwendig, um zu gewährleisten, dass der

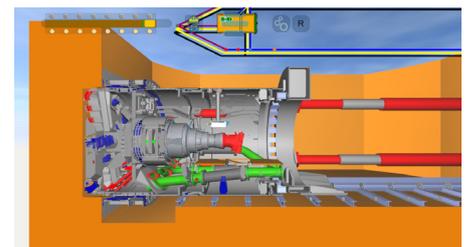


Bild 2: Virtuelle Simulation der Maschine

Lernende das gleiche haptische Gefühl und die gleichen visuellen Hinweise wie auf der Baustelle hat. Die Displays zeigen Informationen zu Systemen wie dem Schneidrad, Hydrauliken für Vortrieb und Schneidkopfstellung, sowie Temperaturen und Flüssigkeitskreisläufen.

Die Implementierung besteht aus mehreren Modulen. Der Simulator besteht aus drei wesentlichen Teilen: Dem physikalischen Bedienpult, der Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) und einer Maschinensimulation, die in weitere Module unterteilt ist. Die Simulation ist über die SPS mit dem Pult verbunden. Das Steuerungsprogramm der TBM ist über das Kommunikationsprotokoll OPCUA mit der Maschinensimulation gekoppelt. Die SPS wird von der Echtzeitsimulation der Maschine mit Eingangsdaten versorgt, als ob eine reale Maschine vorhanden wäre und bohren würde. Zu den Eingängen gehören Sensordaten (Drücke, Geschwindigkeiten, Laserdistanzmessungen, Temperaturen) und Aktuatordaten (Ventilstellungen, Leistungseinstellungen von Pumpen und Motoren, Zylinderstellungen).

Zwischen dem Steuerstand und der Simulation läuft das SPS-Programm, das für das Verhalten der einzelnen beweglichen Komponenten der TBM verantwortlich ist. In diesem Programm werden die Daten jeglicher Sensoren zusammengeführt und verarbeitet. Abhängig von den gesetzten Zielen und Sicherheitsgrenzen wird ein bestimmtes Verhalten (z. B. Stromabschaltung oder Stellung der Sicherheitsventile) in die Software programmiert, um sowohl die Maschine als auch das Personal in der Nähe zu schützen. Diese Software steuert ebenfalls das Reaktionsverhalten auf die Eingaben des Operators (z. B. variable Pumpenleistung, Ventilstellung, Motordrehzahlen). Auf der virtuellen Seite des Simulators, wie in Bild 2 dargestellt, deckt die virtuelle Darstellung die TBM bis zu einem gewissen Detailgrad ab. Im optimalen Fall der Implementierung wäre die Maschine praktisch identisch mit dem realen Gegenstück. Aufgrund klassischer Beschränkungen wie der Rechenleistung und der Echtzeitvorgabe musste die Simulation vereinfacht werden, insbesondere im Hinblick auf den Detailgrad und das Verhalten der mechanischen Teile sowie die Präzision der physikalischen Simulationen.

Die virtuelle TBM besteht aus der visuellen Darstellung der Maschine, welche aus dem CAD-Modell abgeleitet wird. Dafür wird die zugrunde liegende STEP-Datei beim Start der Simulation eingelesen und verarbeitet. Eine geometrische Darstellung ermöglicht dem Nutzer, genaue 3D-Darstellung der Ausdehnungen der Steuerzylinder, der Lenkfähigkeit des Schneidkopfs und der Drehgeschwindigkeit des Schneidrads zu

sehen. Die Berechnung der dafür notwendigen Parameter basiert auf einem physikalischen Modell.

Folgende Teilsysteme bilden zusammen die modulare Architektur der Simulation: Der Antrieb der gesamten TBM erfolgt über hydraulisch betätigte Zylinder, um die Maschine in die Erde zu treiben. Der Schneidkopf wird von einem Hydraulikmotor angetrieben, welchem Parameter wie Schluckvolumen, Drehmoment und Drehzahl angehören. Ein weiteres Simulationsmodul beinhaltet den Wasserkreislauf mit allen integrierten Pumpen, Ventilen und Sensoren. Schließlich werden die hydraulischen Steuerzylinder mit einem einfachen Mehrkörpersystem simuliert. Eine Übersicht über die einzelnen Teilsysteme und Interaktionsschnittstellen ist in Bild 3 zu sehen.

SOFTWARE UMGEBUNGEN

Während die SPS auf proprietärer Software wie Siemens-PLC läuft und in TIA programmiert wird, wird die virtuelle Seite des Simulators in unserer hauseigenen open-source Virtual-Engineering-Engine „PolyVR“ entwickelt und betrieben [7]. Diese 3D-Engine wurde an unserem Institut IMI am KIT für Forschungs- und industrielle Anwendungsfälle entwickelt, welche vor allem den Maschinenbau, aber auch in interdisziplinäre Projekte aus anderen Forschungsbereichen wie der Gebäudeplanung, der Chemie und Materialwissenschaften sowie Bildung umfassen. Wir setzen PolyVR ein, um hochimmersive Visualisierungssysteme wie CAVEs oder 3D-Powerwalls zu betreiben, und haben sie in den letzten Jahren auf HMDs wie VR-Brillen erweitert.

Während der Quellcode der Engine, mit allen Interfaces für den Datenaustausch, für die Kommunikationsprotokolle und die interaktiven Simulationen, auf GitHub öffentlich einsehbar ist [8], liegt der Programm-Code individueller Projekte in der Regel nicht öffentlich vor.

LITERATUR

- [1] Wu, H., Zhu, Q., Guo, Y., Zheng, W., Zhang, L., Wang, Q., et al. (2022). Multi-level voxel representations for digital twin models of tunnel geological environment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 112, 102887.
- [2] Jun, C., Yadong, G., and Jianyu, Y. (2009). Research of simulation for tunnel boring machine based on virtual reality. In *2009 International Conference on New Trends in Information and Service Science (IEEE)*, 1038–1041
- [3] Li, G., Cao, Y., Yao, Y., and Wang, W. S. (2010). A desktop virtual reality-based interactive tunnel boring machine simulation system. In *Advanced Materials Research (Trans Tech Publ)*, vol. 139, 957–960
- [4] Mao, S., Shen, X., Lu, M., and Wu, X. (2013). Real-time tablet-based virtual reality implementation to facilitate tunnel boring machine steering control in tunnel construction. In *Proceedings of the 13th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality (CONVR2013)*, London, UK
- [5] Sepasgozar, S. M. (2020). Digital twin and web-based virtual gaming technologies for online education: A case of construction management and engineering. *Applied Sciences* 10, 4678
- [6] Häfner, V. (2019). PolyVR-a virtual reality authoring framework for engineering applications. Ph.D. thesis, Dissertation, Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2019
- [7] Häfner, V. (2014). PolyVR source. <https://github.com/Victor-Haefner/polyvr>. Besucht: 2022-09-22

AUTOREN

Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr.h.c. Jivka Ovtcharova
 Dr.-Ing. Victor Häfner
 Felix Longge Michels, M.Sc.
 Institut für Informationsmanagement im
 Ingenieurwesen
 Karlsruher Institut für Technologie

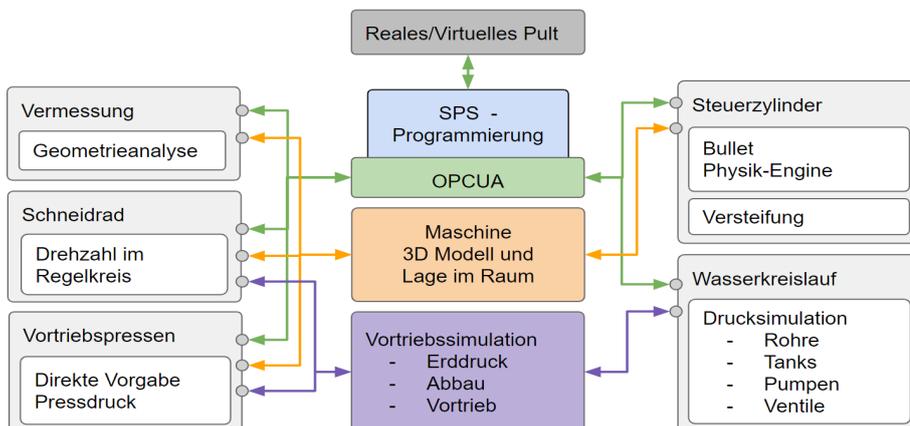


Bild 3: Übersicht der high-level Architektur des Simulators

Smart Products, Engineering and Services

Neue Lehrveranstaltung der Institute pmd, IMS und TIM der TU Darmstadt startet im Sommersemester 2022 durch und lehrt praxisnah Entwicklung und Einsatz smarter Produkte

Am Fachbereich Maschinenbau der TU Darmstadt ist um Studierende auf den immer größer werdenden Digitalisierungsanteil in allen Teildisziplinen des Maschinenbaus vorzubereiten die neue Lehrveranstaltung „Smart Products, Engineering and Services“ (SPES) entstanden. SPES ist Bestandteil des Wahlpflichtbereichs „Digitalisierung“ der 2021 novellierten Studienordnung. Themen wie Big Data, Cyberphysische Systeme, Rapid Prototyping, Condition Monitoring sowie die damit verbundenen Geschäftsmodelle lassen sich nur noch schwer aus dem Ingenieursalltag wegdenken und gehen mit der Nachfrage nach vielseitig versierten und flexiblen IngenieurInnen einher, die auch in der Lage sind, sich schnell in neue Themenkomplexe einzuarbeiten. SPES greift diese Nachfrage auf und behandelt in der Vorlesung Themen, die von smarten mechatronischen Systemen und sensorischen Maschinenelementen über rapide Fertigungsverfahren und agilen Produktentwicklungsmethoden hin zu den Anwendungen smarter Systeme, bspw. dem Condition Monitoring, reichen.

KONZEPT

Das Konzept der Lehrveranstaltung zielt

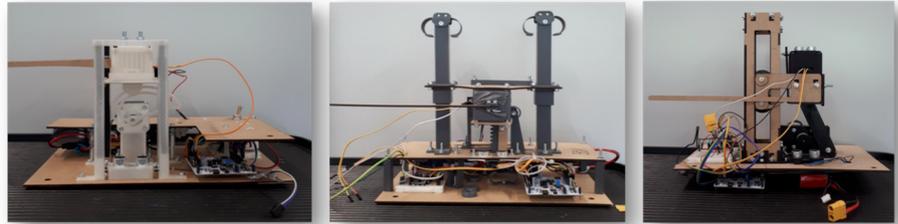


Abbildung 2: Ergebnisse des Projekts (Auswahl)

auf eine Vertiefung theoretischem Wissen durch zwei praktische, studentenzentrierte Lehrensätze ab. Neben dem ex cathedra Ansatz der klassischen Vorlesung, wird der auf Frontalunterricht basierte Lehrensatz durch den Einsatz von Flipped Classroom Übungen sowie einer Projektarbeit erweitert. Die Studierenden werden so mit den Problemen einer realen, ingenieurtechnischen Aufgabe konfrontiert.

In zehn Vorlesungen werden die Grundlagen für die erfolgreiche Entwicklung smarter Produkte vermittelt. Acht dieser Vorträge decken ein breites Spektrum interessanter Methoden in wachsenden F&E-Bereichen ab. Kerngedanken sind dabei Implikationen und Methoden für die Entwicklung von Produkten in unserer beschleunigten Welt unter Nutzung der verfügbaren Technolo-

gien wie Rapid Prototyping, KI-Methoden und Big Data. Abschließend werden die ökonomischen Aspekte des modernen Ingenieurwesens und des Einsatzes smarter Produkte in Vorlesungen zu Geschäftsmodellen, Marktanalyse und -akzeptanz, Innovationsmanagement und Konzepten zur Ideenfindung betrachtet.

Im Rahmen des Flipped Classrooms bearbeiten studentische Teams individuell eine Aufgabenstellung, die lose im Zusammenhang mit der Vorlesung steht. Die erarbeiteten Ergebnisse, insbesondere die gewonnenen Erkenntnisse werden den restlichen Teilnehmern der Lehrveranstaltung im Plenum vorgestellt und diskutiert. Durch diese Art von Übung lassen sich problemlösungsorientierte Methoden deutlich besser lehren als durch klassischen Frontalunterricht. Während der Projektarbeit entwickeln die Studierenden ein smartes Produkt, welches eine auf einem Schwingungsprüfstand einen Prüfkörper in einem Weg und Beschleunigungskorridor entgegen einer externen Anregung bewegen muss. Die Anordnung simuliert so die Aufgabe einen Passagier oder Gegenstand durch eine aktive Gegenbewegung des Fahrzeugs oder der Fahrgastzelle von der externen Anregung durch Straße und Fahrdynamik zu entkoppeln. Der Prüfstands Aufbau und einer der im Projekt entstanden Prototypen sind in Abbildung 1 zu sehen. Das Produkt wird unter dem Einsatz agiler Entwicklungsmethoden konzipiert, entworfen, prototypisch mittels rapider Fertigungsverfahren hergestellt und auf einem Prüfstand getestet, wo die Regelungsaufgabe bewältigt werden muss. Dabei stehen den Studierenden nur begrenzt Ressourcen in Form von Verbrauchsmaterial, Beratung und Anlagenzeit zur Verfügung, um reale Bedingungen aus der Wirtschaft zu simulieren.

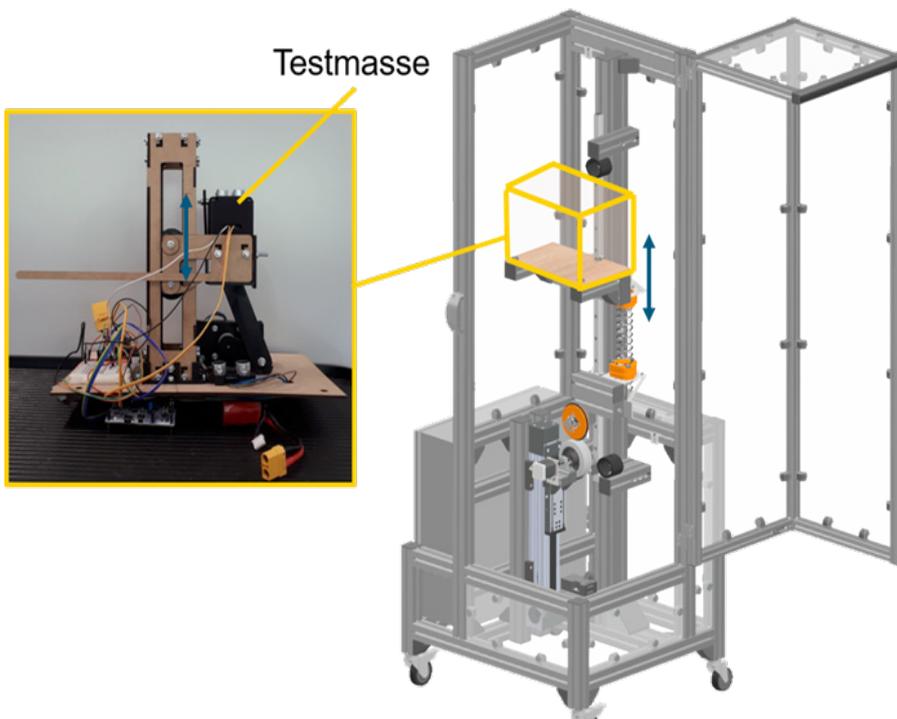


Abbildung 1: Prüfstands Aufbau und Prototyp des smarten Produkts

ERSTER DURCHLAUF

Die 29 teilnehmenden Studierenden, verteilt auf sechs Teams, konnten zum Ende der Projektlaufzeit ein betriebsfähiges smartes Produkt präsentieren, s. Abbildung 2. Die Anwendung agiler Entwicklungsmethoden, im speziellen des Scrum Frameworks wurde von allen Gruppen positiv bewertet und konnten in den Dokumentationen schlüssig nahegelegt werden. Rund 83% der Systeme konnten die Regelungsaufgabe ohne wesentliche Einschränkungen erfüllen, das verbliebene System zeigte das Potential innerhalb weniger Entwicklungs-

zyklen in Form weiterer Sprints ein sehr gutes Regelungsergebnis zu liefern. Allgemein wurde die Veranstaltung von allen Studierenden sehr positiv bewertet und ihr Mehrwert auch von internationalen Studierenden als englischsprachige Lehrveranstaltung betont. Das erhobene Feedback sowie die Ergebnisse der Teams fließen in die Lehrpläne zukünftiger Jahrgänge mit ein, um sowohl die Qualität der zu verbessern als auch innerhalb des Themenspektrums aktuellsten wissenschaftlichen Themen Rechnung zu tragen. Ein Beispiel dafür ist die in folgenden Semestern verstärkte Nut-

zung sensierender Maschinenelemente zur Zustandsüberwachung, im speziellen des am pmd entwickelten sensierenden Wälzlagers.

AUTOREN

Univ. Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner
Kris Rudolph
Florian Schmitt
Institut für Produktentwicklung und Maschinenelemente
Technische Universität Darmstadt

VR-basierte Produktionsplanung und -optimierung

Der Lehrstuhl für Produktentstehung des Heinz Nixdorf Instituts unterstützt das Unternehmen Hadi-Plast GmbH in der VR-basierten Beurteilung eines neuen Fabrikhallenlayouts. Aufgrund einer Steigerung der Absatzzahlen zieht das Unternehmen mit seinen 29 Spritzgießmaschinen in eine größere Produktionsstätte um. Damit die Produktion nach dem Umzug erfolgreich anläuft, unterstützt der Lehrstuhl von Professorin Gräßler mit einer VR-basierten Beurteilung des neuen Hallenlayouts. Neben dem Erkennen von Planungslücken und weiterem Handlungsbedarf soll hiermit auch die Mitarbeiterakzeptanz gewährleistet werden.

Die Beurteilung des Hallenlayouts durch den Produktionsleiter, planende und ausführende Mitarbeiter fand im Smart Innovation Lab des Lehrstuhls für Produktentstehung

statt. Das Smart Innovation Lab ist aufgrund der eingesetzten Interaktionsmedien und des Beobachtungssystems für die Untersuchung von virtuellen Prototypen hervorragend geeignet. Der Aufbau zur Beurteilung des Hallenlayouts sieht die Nutzung einer Oculus Quest, einem Multi-Touch-Display, einem Multi-Touch-Tisch und drei Laptops vor. Über die Oculus Quest und das Multi-Touch-Display wird den Teilnehmern das virtuelle Hallenlayout immersiv zugänglich gemacht. Parallel ermöglichen Multi-Touch-Tisch und Laptops das Kommentieren und Einfügen von evaluationsbegleitenden Annotationen.

Die Infrastruktur des Labors ermöglicht es, zentrale Punkte des Hallenlayouts zu diskutieren und alternative Lösungen zu erarbeiten. Durch das immersive Erleben der Fabrikhalle in VR wurden beispielsweise

Rohrleitungen der Materialversorgung identifiziert, die das Rüsten einiger Spritzgießmaschinen erheblich eingeschränkt hätten. So konnte unter Einbeziehung der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter die Produktionsplanung verbessert werden und die Akzeptanz für das zukünftige Hallenlayout sichergestellt werden.

AUTOREN

Univ. Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler
Philipp Hesse
Heinz Nixdorf Institut
Lehrstuhl für Produktentstehung
Universität Paderborn



Abbildung 1: Produktionshallenplanung mit benachbarten Besprechungsräumen mittels VR Hilfsmitteln

33. Symposium Design for X in Hamburg

Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT) richtet 33. DfX-Symposium aus

Am 22. / 23.09.22 hat im Privathotel Lindtner in Hamburg das 33. DfX-Symposium stattgefunden, welches vom Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT) organisiert wurde. Insgesamt wurden 23 Beiträge aus den Themenbereichen Modularisierung & Variantenmanagement, Strukturanalyse, Simulation & Test, Leichtbau, Modellbasierte Entwicklung / Systems Engineering und dem Design for X vorgestellt und diskutiert. Abgerundet wurde die Veranstaltung durch die spannenden Keynote-Vorträge von Frau Dr. Sabine Muschik (TRUMPF SE + Co. KG) zum Thema „Human-centered product development tomorrow – a utopia“ und von Herr Dr. Bahram Hamraz (Siemens Healthineers AG), der über „Modular Circularity“

referierte. Wie immer wurde viel Raum zum Fragen und Diskutieren gelassen, der durch die anwesenden Professor*innen und Industrievertreter*innen intensiv genutzt wurde, um den Vortragenden Anmerkungen zu geben. Der Preis für den besten Beitrag ging an Johannes Mayer (KTmfk, FAU Erlangen-Nürnberg), während Christoph Rennpferdt (PKT, TU Hamburg) die Auszeichnung für die beste Präsentation erhielt. Die Preisgelder in Höhe von jeweils 200,- wurden netterweise vom Ehemaligenverein des KTmfk (ENmfk) gesponsert.

Die Beiträge zum 33. Symposium Design for X sind online über die Homepage der Design Society verfügbar.

Das DfX-Symposium wird alternierend von Prof. Krause (PKT, TUHH), Prof. Wartzack (KTmfk, FAU) und Prof. Paetzold-Byhain (VPE, TU Dresden) ausgerichtet. Nach dem diesjährigen Symposium in Hamburg findet das DfX nächstes Jahr vom 14.-15.09. in Bamberg statt.

AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause
Lukas Schwan, M.Sc.
Philipp Hüttich, M. Sc.
Institut für Produktentwicklung und Konstruktionstechnik (PKT)
Technische Universität Hamburg (TUHH)



Projektstart DIAA-H2 – Digitale Abbilder für Anlagen zur H2-Gewinnung

Digitale Abbilder und Plant Lifecycle Management zur Unterstützung der Entwicklung und Nutzung Digitaler

Im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms „Technologieoffensive Wasserstoff“ haben sich die Siemens AG, die Siemens Energy Global GmbH & Co. KG, die Josef Pfaffinger Bauunternehmung GmbH und das Institut für Maschinenelemente und Maschinenkonstruktion der TU Dresden zusammengetan, um die methodischen und technischen Grundlagen für die Erzeugung und Nutzung Digitaler Abbilder für Prozessanlagen am Beispiel einer Wasserstofferzeugungsanlage (Elektrolyseanlage) zu entwickeln (Bild 1).

EIGENSCHAFTEN DES DIGITALEN ABBILDS

Das Digitale Abbild dient Digitalen Zwillingen als Referenz und Anknüpfungspunkt zu einer physischen Anlageninstanz. Es bildet hierfür zu jedem Zeitpunkt des Betriebs eine digitale Repräsentanz der realen Anlage. Änderungen an der Anlageninstanz, z.B. durch Um-, Rückbau oder Komponententausch, müssen im Digitalen Abbild registriert und gepflegt werden. Dazu soll das digitale Abbild sowohl strukturelle als auch komponentenspezifische Daten (z.B. Seriennummern) speichern und verwalten. Als Bezugspunkt Digitaler Zwillinge wird das Digitale Abbild darüber hinaus die Schnittstellen zur weiteren Datenquellen (z.B. zu Sensordaten, Inbetriebnahmedokumente, Qualitätsprotokollen, etc.) beinhalten. Dabei verbleiben diese Daten innerhalb Ihrer jeweiligen Verwaltungssysteme. Das Digitale Abbild dient als zentrale Referenzierungsstelle für die Zusammenführung der verteilten Informationen der Komponenten der Prozessanlage.

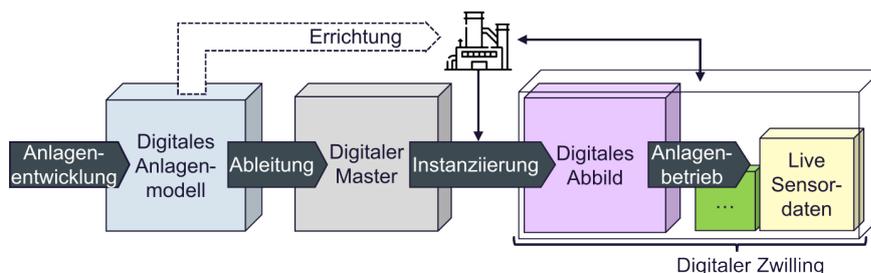


Bild 2: Bestandteile zur Bildung des Digitalen Abbilds (entnommen aus [1])

Digitale Zwillinge werden mit dem Digitalen Abbild verknüpft und können über die darin gespeicherten Verweise und Zugriffsmöglichkeiten auf die benötigten Datenquellen zugreifen. Des Weiteren ermöglicht das Digitale Abbild den Digitalen Zwillingen zu prüfen, ob ihre Simulationsmodelle noch die reale Anlageninstanz abbilden. Bei Abweichungen kann, z.B. durch Anpassung des Simulationsmodells, die Konsistenz der Digitalen Zwillinge zur Anlage wiederhergestellt werden.

DATENMANAGEMENT FÜR DIGITALE ABBILDER

Zur Bildung Digitaler Abbilder ist ein durchgängiges und konsistentes Datenmanagement ab Beginn der Entwicklungstätigkeiten von Prozessanlagen notwendig (Bild 2). Dazu werden die Strategien des Product Lifecycle Managements auf die Spezifika des Anlagenbaus angepasst und erweitert. Dies führt im Projektverlauf zu einem ersten Prototyp eines Plant Lifecycle Management Systems. Innerhalb des Plant Lifecycle Management Systems werden alle relevanten Informationen und Dokumente entlang

des Anlagenlebenszyklus, beginnend mit der Kundenausschreibung und der Konzeptentwicklung verwaltet. Aktuell existiert im Anlagenbau noch kein Konzept für ein durchgängiges, disziplin-, und unternehmensübergreifendes Datenmanagement. Die Identifikation und Definition, der dafür notwendigen disziplin-übergreifenden Datenmodelle, Methoden und Schnittstellen sind zentraler Projektgegenstand. Ein weiteres Ziel in Bezug auf die Datenmodelle ist die Entwicklung geeigneter Modularisierungs- und Standardisierungsmethoden, u.a. auf Basis der VDI-Richtlinie 2776-1 [2]. Mit Hilfe des Plant-Lifecycle-Management Systems entsteht zum Ende des Entwicklungsprozesses ein Digitales Anlagenmodell, das als Grundlage für die Tätigkeiten in den nachfolgenden Lebenszyklusphasen dient.

BILDUNG DES DIGITALEN ABBILDS
Zur Erstellung des Digitalen Abbilds ist eine Reduktion der Informationen und Daten des Digitalen Anlagenmodells notwendig, da diese nicht zur Gänze für die Anwendungsfälle des Digitalen Abbilds benötigt werden. Eine solche Reduzierung senkt die Aufwände des Datenmanagement auf das notwendige Minimum. Ergebnis der Reduktion ist der Digitale Master, der die Grundstruktur des Digitalen Abbilds definiert.

Der Digitale Master wird über die Instanzierung während der Produktion und Errichtung der Anlage mit den Informationen der nun real existierenden Komponenten angereichert. So werden zur eindeutigen Identifikation z.B. die Seriennummern der verbauten Komponenten erfasst. Mit der Erfassung der komponentenspezifischen Informationen wird der Digitale Master zum Digitalen Abbild qualifiziert.



Bild 1: Die Teilnehmenden des DIAA-H2-KickOffs im Juli 2022

Mit Inbetriebnahme der physischen Anlage existiert nun die initiale Version des Digitalen Abbilds.

IMPLIKATIONEN WÄHREND DES ANLAGENBETRIEBS

Das Digitale Abbild ist während der Betriebsphase der Prozessanlagen einem dynamischen Umfeld ausgesetzt, da häufig sowohl komponentenspezifische als auch strukturelle Änderungen an den Anlagen notwendig sind. Diese Änderungen erfordern eine Anpassung der Daten und Strukturen des Digitalen Abbilds. Hierzu werden Methoden und Maßnahmen erforscht, die eine Registrierung und Berücksichtigung der Änderungen durch das Digitale Abbild sicherstellen.

Das Digitale Abbild dient somit Digitalen Zwillingen als repräsentativer Ankerpunkt zu vielfältigen Informationen aus dem

gesamten Lebenszyklus der Prozessanlage.

LITERATURVERZEICHNIS

[1] Saske, Schwoch et al.: Digitale Abbilder als Basis Digitaler Zwillinge im Anlagenbau: Besonderheiten, Herausforderungen und Lösungsansätze. IM 385(2022), S. 21-24. DOI: https://doi.org/10.30844/IM_22-5_21-24

[2] VDI-Richtlinie 2776-1:2020-11: Verfahrenstechnische Anlagen - Modulare Anlagen – Blatt1: Grundlagen und Planung modularer Anlagen

Das Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert (Förderkennzeichen 03EI3067D). Die Verantwortung für die veröffentlichten Inhalte liegt bei den Autoren. Die Autoren danken für die Unterstützung.

AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold

Dr.-Ing. Bernhard Saske

Dipl.-Ing. Sebastian Schwoch

Professur für Virtuelle Produktentwicklung

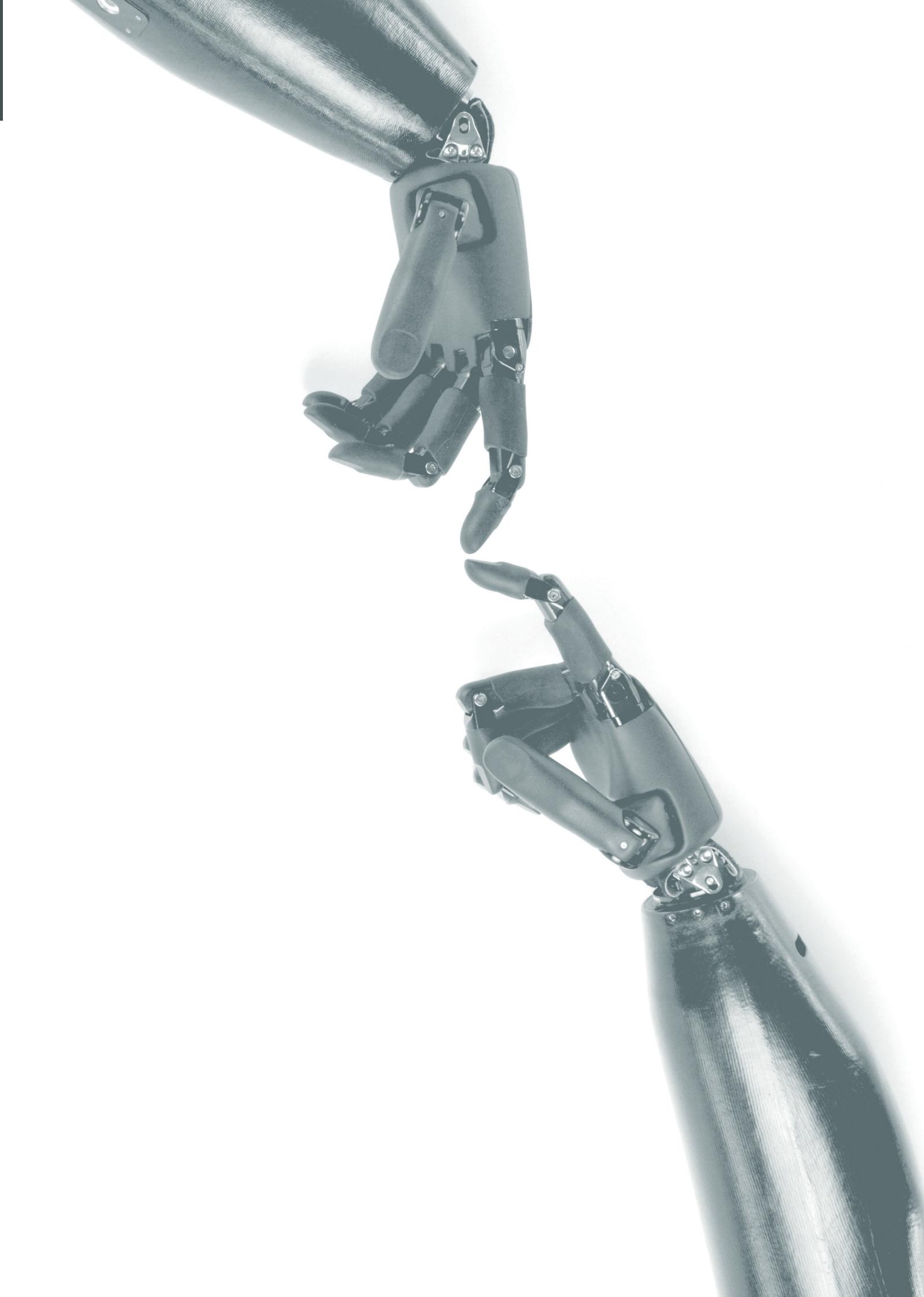
Technische Universität Dresden

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Mehr Innovationskraft durch Zusammenarbeit von Wissenschaft und Wirtschaft

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



WiGeP

Wissenschaftliche Gesellschaft
für Produktentwicklung

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 1762 3471

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

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause
(Sprecher des Vorstands und für Methoden & Prozesse in der Produktentwicklung)

Institut für Produktentwicklung und
Konstruktionstechnik
Technische Universität Hamburg

Denickestraße 17
21073 Hamburg

Tel.: +49 (0) 40 142878 3231

E-Mail: krause@tuhh.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen
(Sprecher für Lehre & Weiterbildung)

IPEK - Institut für Produktentwicklung
Karlsruher Institut für Technologie

Kaiserstraße 10
76131 Karlsruhe

Tel.: +49 (0) 721 1 608 47156

E-Mail: sven.matthiesen@kit.edu

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

Fachgebiet Produktentwicklung und Maschinenelemente
Technische Universität Darmstadt

Otto-Berndt-Straße 2
64287 Darmstadt

Tel.: +49 (0) 6151 1 1621171

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

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack
(Sprecher für Virtuelle Produktentwicklung)

Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
Universität Erlangen

Martensstraße 9
91058 Erlangen

Tel.: +49 (0) 9131 1 85 27987

E-Mail: wartzack@mfk.uni-erlangen.de

Ordentliche Mitglieder:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Abramovici (Ruhr-Universität Bochum), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Albert Albers (Karlsruher Institut für Technologie), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reiner Anderl (TU Darmstadt), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Beate Bender (Ruhr-Universität Bochum), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Betsche (Universität Stuttgart), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Lucienne Blessing (Singapore University of Technology and Design), Univ.-Prof. Dr. sc. techn. Paolo Ermanni (ETH Zürich), Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Detlef Gerhard (TU Wien), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kilian Gericke (Universität Rostock), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jens C. Göbel (Technische Universität Kaiserslautern), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dietmar Göhlich (TU Berlin), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Iris Gräßler (Universität Paderborn), Univ.-Prof. Dr. sc. ETH Alexander Hasse (TU Chemnitz), Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Hannes Hick (TU Graz), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Georg Jacobs (RWTH Aachen), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Eckhard Kirchner (TU Darmstadt), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ulf Kletzin (TU Ilmenau), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Krause (TU Hamburg), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Roland Lachmayer (Leibniz Universität Hannover), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Robert Liebich (TU Berlin), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Armin Lohrengel (TU Clausthal), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Mantwill (Helmut-Schmidt-Universität Hamburg), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen (Karlsruher Institut für Technologie), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Mirko Meboldt (ETH Zürich), Univ.-Prof. Dr. Athanasios Mihailidis (Aristotle University of Thessaloniki), Univ.-Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h.c. Jivka Ovtcharova (Karlsruher Institut für Technologie), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold (TU Dresden), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gerhard Poll (Leibniz Universität Hannover), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Oliver Riedel (Universität Stuttgart), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Schindler (RWTH Aachen), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Berthold Schlecht (TU Dresden), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hubert Schwarze (TU Clausthal), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karsten Stahl (TU München), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rainer Stark (TU Berlin), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Tenberge (Ruhr Universität Bochum), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Roman Teutsch (Technische Universität Kaiserslautern), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus-Dieter Thoben (Universität Bremen), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor (TU Braunschweig), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek (Leibniz Universität Hannover), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack (Universität Erlangen), Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Michael Weigand (TU Wien), Univ.-Prof. DI Dr. Klaus Zeman (Johannes Kepler Universität Linz), Univ.-Prof. Dr. Markus Zimmermann (TU München).

Mitglieder im Ruhestand:

Prof. Dr.-Ing. Fath C. Babalik (Uludag Üniversitesi), Prof. Dr.-Ing. Hansgeorg Binz (Universität Stuttgart), Prof. Dr. h.c. Dr. h.c. Dr.-Ing. Herbert Birkhofer (TU Darmstadt), Prof. Dr. rer. nat. C. Werner Dankwort (TU Kaiserslautern), Prof. Dr.-Ing. Ludger Deters (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg), Prof. Dr.-Ing. Klaus Ehrfenspiel (TU München), Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-Jürgen Schorcht (TU Ilmenau), Prof. Dr.-Ing. habil. Ralph Stelzer (TU Dresden), Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Sándor Vajna (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg (Universität Bayreuth), Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Laurenz Rinder (TU Wien), Prof. Dr.-Ing. Bernd Sauer, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Dieter Spath (Universität Stuttgart), Prof. Dr.-Ing. Heinz Mertens a.D. (TU Berlin), Prof. em. Dr.-Ing. Heinz Peeken (RWTH Aachen), Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart (TU München), Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann (TU München), Prof. Dr.-Ing. habil. Heinz Linke (TU Dresden), Prof. Dr.-Ing. Harald Meerkamm (Universität Erlangen-Nürnberg), Prof. Dr.-Ing. Frank-Lothar Krause (TU Berlin), Prof. Dr.-Ing. Konrad Langenbeck (Universität Stuttgart), Prof. Dr.-Ing. Erhard Leidich (TU Chemnitz), Prof.

Dr.-Ing. Bernd-Robert Höhn (TU München), Prof. Dr.-Ing. habil. Guenter Höhne (TU Ilmenau), Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. z. Gustav Kollmann (TU Darmstadt), Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier (Universität Paderborn), Prof. Dr.-Ing. Peter W. Gold (RWTH Aachen), Prof. Dr.-Ing. Karl-Heinrich Grote (Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg), Prof. Dr.-Ing. Martin Eigner (TU Kaiserslautern), Prof. Dr.-Ing. Jörg Feldhusen (RWTH Aachen), Prof. Dr.-Ing. Hans-Joachim Franke (TU Braunschweig), Prof. Dr.-Ing. Gerhard Wagner (Ruhr-Universität Bochum), Prof. Dr.-Ing. Christian Weber (TU Ilmenau), Prof. Dr.-Ing. Dieter Wüstenberg (TU Kaiserslautern), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Detmar Zimmer (Universität Paderborn).

Industriekreis:

Reinhold Achatz (Thyssen Krupp AG), Dipl.-Ing. Dirk Adamczyk (ZF Friedrichshafen AG), Urban August (Siemens PLM Software Thomas Bayer (Wittenstein AG), Kurt Bengel (Cenit AG), Dr.-Ing. Thomas Bertolini (Dr. Fritz Faulhaber GmbH & Co. KG Antriebssysteme), Herbert Bickelmann (Autodesk GmbH), Dr. Jörg Böcking (Vibracoustic GmbH), Carsten Burchardt (Siemens Digital Industries Software GmbH), Dr. Jens Cattarius (Bombardier Transportation), Dr. Rolf Döbereiner (AVL List GmbH), Dr.-Ing. Tobias Düser (AVL Deutschland GmbH), Dr. Gunnar Ebner (Capgemini Deutschland GmbH), Dipl.-Ing. Richard Einstmann (Bechtle GmbH), Dr. Michael Engelbreit (Wittenstein Alpha), Prof. Dr.-Ing. Gerd Fricke (PEKU Folien GmbH), Dr.-Ing. Matthias Gatzen (Baker Hughes), Roland Gerhards (ZAL – Zentrum für angewandte Luftfahrtforschung GmbH), Detlef Gierling (ZF Sachs AG), Dr. Gunnar Gödecke (VULKAN Kupplungs- und Getriebebau), Bernhard Hackforth GmbH & Co. KG), Dr.-Ing. Axel Gomerger (Testo SE & Co. KGaA), Dipl.-Kaufm. Michael Grethler (SolidLineAG), Prof. Dr.-Ing. Peter Gutzmer (SCHAEFFLER Gruppe), Dr.-Ing. Günter Hähn (Wirtgen GmbH), Dr.-Ing. Ralf Hambrecht (Flender GmbH), Dipl.-Ing. Jörg Hartmann (Meyer Werft GmbH), Dr. Stefan Heilmann (Paul Wurth S.A.), Dr.-Ing. Katharina Helten (Vitesco Technologies Germany GmbH), Dr.-Ing. Jörg Hermes (SEW-EURODRIVE GmbH & Co. KG), Hans Huber (Mayr GmbH & Co. KG), Dr. Martin Husemann (Phi GmbH), Dr. Daniel Kähy (LS Telcom AG), Prof. Alfred Katzenbach (Katzenbach Executive Consulting), Prof. Dr. phil. Michael Ketting (IBAF GmbH), Karl-Ludwig Kimmig (LuK GmbH & Co. KG), Dr.-Ing. Markus Klaiber (Schunk GmbH & Co. KG), Dr.-Ing. Frank Koch (Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI), Dr.-Ing. Marcus Krastel (em engineering methods AG), Ulrich Kreher (Elektor Airsystems GmbH), Werner Kröger (BMW AG), Klaus Löckel (Dassault Systemes Deutschland GmbH), Dr. Christoph Lutz (Julius Blum GmbH), Dr. Dr. Hansjörg Maier (Dr.-Ing. h.c. F. Porsche AG), Dr.-Ing. Georg Mecke (Airbus Operations GmbH), Dr.-Ing. Stefan Möhringer (Simon Möhringer Anlagenbau GmbH), Dr. Ottmar Müller (VAT Vakuumventile AG), Razvan Olosu (b1 Engineering Solutions GmbH & Co. KG), Dr. Bernd Pätzold (ProSTEP AG), Dr.-Ing. Marc Pein (ThyssenKrupp Marine Systems GmbH), Dr. Burkhard Pinnekamp (RENK AG), Dr.-Ing. Robert Plank (Horiba Europe GmbH), Prof. Dr.-Ing. Peter Post (Festo AG & Co. KG), Hartmut Rauen (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA)), Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Sauer (TU Kaiserslautern), Dr. Olaf Schadoffsky (HILTI Entwicklungsgesellschaft mbH), Jörg Schiebel (Tyco Integrated Fire & Security), Dr.-Ing. Thomas Schneider (TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH & Co. KG), Dr. Alfred Schreiber (C. & E. Fein GmbH), Dr.-Ing. Rudolf Schubert (Continental AG), Dr. Kristin Sittig (Volkswagen AG Dr.-Ing. Jörg Stahlmann (ConSenses GmbH), Dr. Martin Stark (ms invcon Beteiligungs- und Beratungsgesellschaft mbH), Dr.-Ing. Frank Thielemann (UNITY AG), Dr.-Ing. Jürgen Vogt (CADFEM GmbH), Dr.-Ing. Stefan Wallmeier (KAMAX Holding GmbH & Co. KG), Dipl.-

Stand: Dezember 2022
Internet: www.wigep.de
Auflage: 800 Exemplare
ISSN 1613-5504

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

