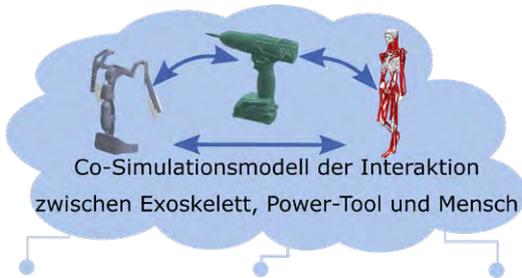
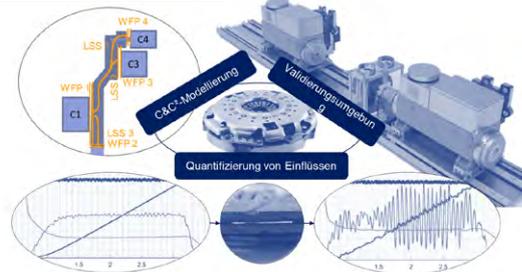


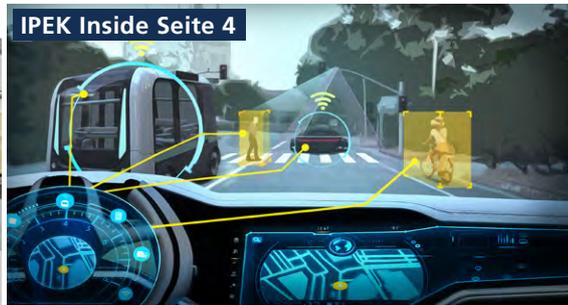
IPEK Inside Seite 20



IPEK Inside Seite 6



IPEK Inside Seite 4

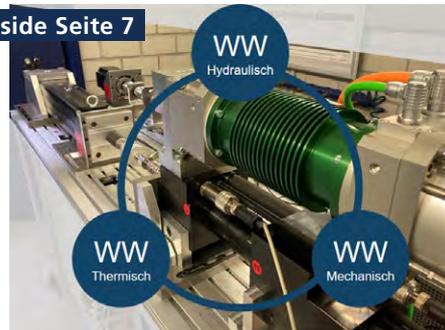


„Wir können nicht mit den Methoden des 20. Jahrhunderts die Herausforderungen in der Produktentwicklung des 21. Jahrhunderts angehen – deshalb forschen wir an neuen Methoden, Prozessen und Systemen als Lösungen für die Praxis!“

A. Albers



IPEK Inside Seite 7



IPEK Inside Seite 3



IPEK

## Liebe Leserinnen und Leser,

Das diesjährige IPEK-Inside ist überschrieben mit einem Zitat von mir: „Wir können mit den Methoden, Prozessen und Lösungen des 20. Jahrhunderts die Herausforderungen des 21. Jahrhunderts nicht bestehen“. Ich möchte Ihnen meine Gedanken hinter diesem Zitat erläutern.

Über viele Jahrzehnte haben Ingenieurinnen und Ingenieure des Maschinenbaus, der Elektrotechnik und des Fahrzeugbaus, immer wieder durch Inventionen – also neue Konzepte und deren Gestaltung – die sich ergebende Nachfragesituation aus den Märkten mit Produktlösungen erfolgreich bedient. Diese haben das Leben der Menschen in der Freizeit und im Beruf erleichtert und bereichert. Die in vielen Generationen entwickelten technischen Lösungen haben dabei eine immer höhere Leistungsfähigkeit erreicht. Die Herausforderung ist dabei, die Erfüllung der ständig steigenden Anforderungen mit immer größerem Funktionsumfang bei sinkendem Energie- und Materialaufwand unter den Kostenrandbedingungen der Märkte. Stichworte sind hier z.B. der Leichtbau in seinen vielfältigen Ausprägungen oder die Steigerung der Leistungsdichte im Bereich der Antriebssystemlösungen. Ergänzt wurde diese Entwicklung durch die konsequente Integration von informationstechnischen Lösungen in die Produkte unter dem Stichwort Mechatronik. Für mich ist Maschinenbau und Fahrzeugbau immer Mechatronik, da wir bereits seit mehr als zwei Jahrzehnten diese erfolgreiche und innovative Symbiose aus den Welten der Hardware und der Software in unseren Produktlösungen erleben. Einhergegangen mit dieser konsequenten Steigerung der Leistungsfähigkeit ist allerdings auch eine zunehmende Komplexität. Während wir im vorigen Jahrhundert eigentlich immer Lösungen entwickelt haben, die ihre Aufgabe weitestgehend in sich selbst erfüllt haben, ist im 21. Jahrhundert ein klarer Trend hin zur Vernetzung, Digitalisierung und der Bildung von System of Systems – SoS – feststellbar. Unter SoS ist dabei nicht eine Ansammlung von vielen Systemen in einem größeren System zu verstehen. Gemeint ist der spezifische Charakter der sich aus der Interaktion von, in ihren Entscheidungen und auch in ihren Zwecken selbständigen Systemen, in einem Netzwerk ergeben. Im Netzwerk werden Informationen ausgetauscht und so ganz neue robuste Funktionen realisiert. So verstanden, ist das Mobilitätssystem natürlich ein System of Systems, aber auch jede moderne Fabrik auf der Basis von Industrie 4.0-Lösungen. Erkannt wurden die Herausforderungen für die Produktentstehung bereits in einer Studie für das BMBF, die Jürgen Gausemeier und ich im Jahre 2010 durchführen durften. Darin wurde festgestellt, dass die Entwicklung weg von den einzelnen Produkten, hin zu integral betrachteten Systemlösungen die Herausforderung der Zukunft in den Ingenieurdomänen ist. Unsere Hoffnung, dass die ergänzende Methodik für die interdisziplinäre Zusammenarbeit bis zum Jahr 2020 weitestgehend geschaffen werden kann, ist allerdings enttäuscht worden. Die Systeme sind noch komplexer geworden und die eigentlich notwendige durchgängige Entwicklungsmethodik gibt es immer noch nicht! Genau an dieser Stelle müssen weitere Forschung in der Wissenschaft und Implementationsarbeiten in den Unternehmen geleistet werden. Die Entwicklung komplexer technischer Systeme kann nicht mehr allein durch die einfache Vernetzung von unterschiedlichen Disziplinen in den Unternehmen erfolgen, da so die Wechselwirkung, die Emergenz, nicht abgebildet werden kann. Daher versagen die domänenorientierten Designmethoden und Prozesse, aber auch das propagierte agile Arbeiten der Software-Entwicklung allein ist keine Lösung in der Welt der komplexen Mechatronik. Ich glaube es ist notwendig die erforderliche Kompetenz für die Produktentwicklung neu zu definieren. Ich schlage dazu ein Zwei-Ebenen-Kompetenz-Modell vor, das bei allen Mitarbeitenden in den Unternehmen entwickelt werden muss! Ich bin überzeugt, dass die tiefe domänenspezifische Kompetenz mit ihren Methoden der verschiedenen Disziplinen auch in Zukunft von sehr großer Bedeutung sein wird. Auch ein autonom betriebenes Fahrzeug benötigt natürlich ein Fahrwerk, einen Antriebsstrang und eine entsprechend gestaltete Mensch-Maschine-Schnittstelle. Allerdings ist die Systemsynthese der heutigen komplexen Produktlösungen nur möglich, wenn eine zweite Ebene zur Kommunikation, der Zusammenarbeit, aber auch zur verbindlichen Klärung von Herausforderungen eingerichtet wird. Diese Ebene nenne ich die Ebene der domänenübergreifenden Vernetzungskompetenzen, Sie basiert auf den Grundlagen der Systemtheorie, erweitert durch die Ansätze des Systems-Engineering und nun umsetzungsfähig gemacht durch moderne Ansätze der Unterstützung auf Basis des Model Based Systems Engineering.

Ich bin zutiefst überzeugt, dass diese beiden Ebenen in der Zukunft in den Unternehmen, aber auch in Forschung und Lehre, adäquat bedient und durch Forschung gestaltet werden müssen. Dazu ist ein Umdenken notwendig. Zukünftig geht es darum gemeinsam – sowohl auf den jeweils fachspezifischen Ebenen, als auch in der Interaktion auf der systemischen Ebene – Lösungen zu synthetisieren. Genau dazu forscht das IPEK-Team sowohl an neuen Methoden und Prozessen, als auch an der Entwicklung neuer Systeme, wie Brennstoffzellen, Batteriesysteme, Antriebssystemlösungen für die Zukunft der Mobilität und Geräte. Meine Überzeugung ist es, dass wir mit diesen neuen Methoden und Prozessen die zukünftigen herausfordernden technischen Systeme sehr erfolgreich hier in Deutschland entwickeln und – das ist mir wichtig – auch produzieren können. Hierzu gehören Ansätze des Produkt- und Produktions-Co-Design an denen wir gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen des wbk, aber auch anderen Instituten, forschen. Glauben ist eine innere Gewissheit über die Zukunft. Ich glaube fest daran, dass wir in Deutschland in der Lage sind, die zukünftigen Herausforderungen zu meistern, egal, wie diese gestaltet sind. Ein Kern ist dabei aber, wie wir es in unserer Forschung schon immer formuliert haben, den Menschen in den Mittelpunkt stellen. Wenn wir die Menschen nicht mitnehmen auf diesen neuen Weg, verlieren wir Kompetenz, Fantasie und Engagement.

Wir im IPEK werden diese Zukunft aktiv mitgestalten und bei den aufkommenden Fragestellungen an Ihrer Seite stehen. In diesem Sinne möchte ich Ihnen die folgenden Beiträge der diesjährigen IPEK INSIDE ans Herz legen. Sie nehmen diese Gedanken in unterschiedlichster Ausprägung konsequent auf. Wenn Sie sich zu meiner These mit mir austauschen wollen, zögern Sie nicht, sprechen Sie mich einfach an.

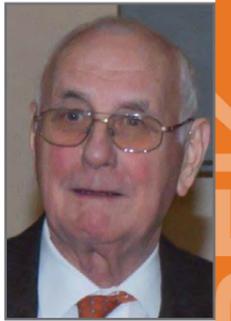
  
Ihr Albert Albers

## Das IPEK trauert um Prof. Dr.-Ing. Rudolf Haller

Am 01. Februar 2021 verstarb Herr em. Prof. Dr.-Ing. Rudolf Haller im Alter von 90 Jahren nach langer Krankheit. Er war der Vorgänger von Herrn Prof. Albers auf dem Redtenbacher-Lehrstuhl im IPEK – damals Institut für Maschinenkonstruktionslehre. Er hat diesen Lehrstuhl von 1973 bis 1996 inne und das Institut als Nachfolger von Prof. Karl Kollmann geleitet. Prof. Haller war mit ganzem Herzen

Hochschullehrer. Auch noch nach seiner Emeritierung im Jahre 1996 war er dem IPEK weiter eng verbunden. Er hat viele unserer Aktivitäten in Forschung und Lehre mit Aufmerksamkeit begleitet. Rudolf Haller war eines der Gründungsmitglieder der „Wissenschaftlichen Gesellschaft für Maschinenelemente und Konstruktion – WGMK“ und hat sich dort in die Arbeit aktiv eingebracht.

Wir werden ihn sowohl als Wissenschaftler wie auch als Mitglied der Institutsfamilie in guter Erinnerung behalten und ihm ein ehrendes Andenken bewahren.



## Lern- und Anwendungszentrum Mechatronik: Das Zusammenspiel zwischen Produkt und Produktion im Ganzen erforschbar machen

Konstruktion und Produktion müssen gemeinsam gedacht werden. Das ist schwierig. Um die Herausforderungen zu verstehen, forschen wir am IPEK daran, wie innovative Konstruktionen in den Köpfen von Konstrukteurinnen und Konstrukteuren entstehen.

Als Reallabor wird das Lern- und Anwendungszentrum (LAZ) als Forschungscampus 4.0 derzeit gebaut. In diesem Gebäude können Herausforderungen aus Unternehmen realitätsnah in einem Laborumfeld abgebildet und die Ursachen sowie mögliche Lösungen erforscht werden. Das LAZ wird dazu als Modell eines schnell agierenden Mittelständlers aufgebaut, in dem alle Phasen des Produktentstehungsprozesses von der Produktstrategie über die Gestaltung und Fertigung bis hin zur Messung der Produktperformance durchgängig betrachtet und vermessen werden können. Durch die integrierte

studentische Prototypen-Werkstatt mit neuesten digital unterstützten Fertigungstechnologien können die entwickelten Produkte direkt vor Ort in einer digitalisierten Blechfabrik gefertigt und getestet werden. Diese Betrachtung des Produktentstehungsprozesses an einem Ort ist bisher einmalig und ermöglicht eine ganzheitliche und datengetriebene Produktentstehungsforschung.

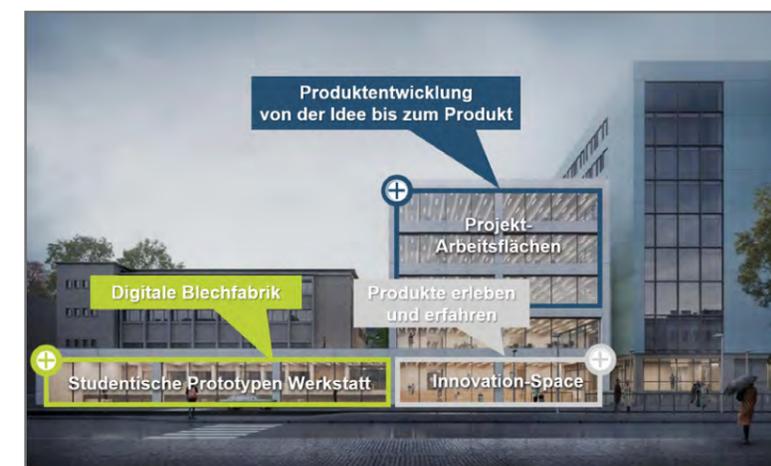
Für die Realisierung kooperiert das IPEK mit der Firma TRUMPF. Als führendes Unternehmen im Bereich der Blechfertigung bringt TRUMPF Expertise in den Bereichen Konstruktion und Fertigung mit. Blech ist ein idealer Werkstoff, da er besonders nachhaltig und werthaltig ist. Mit Blech kann die Fertigung, das Testen und die Weiterentwicklung einer Vielzahl unterschiedlicher Bauteile innerhalb eines Semesters stattfinden. TRUMPF stellt dem LAZ modernste digitalisierte



Dr. Schneider (TRUMPF) und Prof. Matthies bei der Unterzeichnung des Kooperationsvertrags für das Lern- und Anwendungszentrum

Werkzeugmaschinen für die Blechfertigung sowie IT- und Produktionskapazitäten zur Verfügung. Dadurch wird die Grundlage geschaffen, den gesamten Produktentstehungsprozess digital zu verfolgen, abzubilden und zu vermessen.

Durch die Kooperation des IPEK mit TRUMPF bietet das Lern- und Anwendungszentrum am KIT die einzigartige Möglichkeit, Studierenden bereits früh im Studium den gesamten Produktentstehungsprozess erlebbar zu machen. Gleichzeitig kann der gesamte Prozess von der Idee im Kopf des Konstrukteurs bis hin zum gefertigten und getesteten Bauteil digital vermessen und validiert werden. Hier entsteht eine einzigartige Umgebung. Dadurch ergibt sich großes Potential für Forschung, Lehre und Innovation. Um dieses Potential weiter ausschöpfen zu können, suchen wir noch weitere Partner aus Industrie und Forschung mit Anknüpfungspunkten an den Produktentstehungsprozess.



Die Vision des Lern- und Anwendungszentrums als Forschungscampus 4.0

## Studie „Kognitives Auto“ – Die Zukunft der Automotivbranche in Thüringen



Vorstellung der Studie „Kognitives Auto“ durch den IPEK Geschäftsführer Sascha Ott im Beisein des thüringischen Wirtschafts- und Wissenschaftsministers Wolfgang Tiefensee

Die Entwicklung der Mobilität in Richtung der Nutzung von autonomen Systemen stellt nicht nur OEMs, sondern auch die ganze Zulieferindustrie vor große Herausforderungen und Transformationsbedarfe. Um die auf die Unternehmen im Automobilbe-

Die Ergebnisse der Studie mit drei Handlungsfeldern und 11 identifizierten konkreten Projektideen, wurden zusammen mit Minister Wolfgang Tiefensee vor einer Vielzahl Thüringer Unternehmen vorgestellt (<https://youtu.be/jd2LBxPApeQ> bzw. <https://>

durch Expertengespräche und eine Kompetenzanalyse der Region wurden hieraus spezifische Entwicklungsfelder mit konkreten Projektideen abgeleitet, um die Thüringer Wertschöpfung zu einem zukunftsrobusten Wertschöpfungsökosystem weiterzuentwickeln.

Für die Region Thüringen konnten die Handlungsfelder Künstliche Intelligenz, Sensorik und Produkt-Produktions-CoDesign als zukunftsrobuste Entwicklungsfelder ausgemacht werden. Es entstanden 11 konkrete Projektideen, mit messbar formulierten Ergebnissen, die durch geeignete Konsortien durchgeführt werden können. Die hierdurch erworbenen Kompetenzen dienen der Weiterentwicklung der Region und Sicherung der zukünftigen Wettbewerbsfähigkeit und schlussendlich der Sicherung von Arbeitsplätzen.

Sie sind unsicher, wie sich ihre Zielmärkte zukünftig entwickeln und wie Sie mit Ihren Kernkompetenzen weiterhin erfolgreich bleiben können? Mit unserer Methodik und Ihrer Expertise entwickeln wir gemeinsam zukunftsrobuste Strategien mit denen Sie ihr Leistungsportfolio gezielt ausrichten können.

Titelbild der Studie „Kognitives Auto“ – Hauptherausforderungen sind die sichere Erkennung von Hindernissen bei allen Bedingungen sowie die Ableitung und Durchführung der richtigen Reaktionen

reich des Landes Thüringen zukommenden Herausforderungen und die sich daraus ergebenden Chancen zu analysieren, beauftragte das Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und digitale Gesellschaft das IPEK mit der Erstellung der Studie „Kognitives Auto“. Dazu war Ziel der Studie, die Unternehmenslandschaft Thüringens zu verstehen und geeignete Entwicklungsziele zu formulieren, um Arbeitsplätze und Wertschöpfung auch langfristig in der Region zu halten.

[www.cluster-thueringen.de/kognitives-auto/](http://www.cluster-thueringen.de/kognitives-auto/)). In diesem Zuge wurde die Studie als Kurz- und Langfassung veröffentlicht und auf <https://www.cluster-thueringen.de/kognitives-auto/> bereitgestellt.

In der Potentialanalyse wurden die Voraussetzungen der Region durchgängig einbezogen. Es wurden Technologietrends der Mobilitätsbranche, Szenarien der Mobilität und Implikationen auf Fahrzeugkomponenten und deren Fertigung analysiert. Gestützt

## Wie sollte ein erfolgreiches Produkt-Produktions-CoDesign zur Bewältigung der Komplexität heutiger und künftiger Produkte aussehen?



Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza und Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers bei ihrer Einführungsrede zur Herbsttagung des Produkt-Produktions-CoDesigns

Mit dem Voranschreiten der Digitalisierung steigt die Nachfrage nach zunehmend komplexer werdenden vernetzten mechatronischen Systemen. Diese vernetzten mechatronischen Systeme werden in Kombination mit Services als integrierte Produkt-Service-Systeme entwickelt und vertrieben. Durch die dadurch ebenfalls wachsende systemische Komplexität, wird zwingend auch die Komplexität der zugehörigen Produktentstehungsprozesse erhöht. Zukünftige, große Innovationspotenziale können durch eine strukturierte Zusammenarbeit von Produkt- und Produktionssystementwicklung von Anfang an gehoben werden. Dies bezeichnen wir als Produkt-Produktions-CoDesign (siehe IPEK Inside 2020).

In Kooperation mit dem wbk – Institut für Produktionstechnik erforscht das IPEK Methoden und Prozesse, um Potenziale von Produkt-Produktions-CoDesign für die Wettbewerbsfähigkeit und Nachhaltigkeit zu nutzen. Im Projekt Wertstromkinematik wird die Agilität in der Produktentstehung mit Hilfe hochflexibler Produktionssysteme deutlich gesteigert. Weiter wird im Rahmen der Kooperation untersucht, wie durch gezieltes Produkt-Produktions-CoDesign Produkte, technische Systeme und deren Subsysteme über mehrere Lebenszyklen im

Markt hinweg für eine verbesserte Ressourceneffizienz genutzt werden können.

Erstmals wurden diese Potenziale und Herausforderungen des Produkt-Produktions-CoDesign aus Sicht der Forschung und der Anwendung im Unternehmen auf der Karlsruher Tagung für Produkt-Produktions-CoDesign diskutiert. Die Tagung fand im Herbst des Jahres 2021 statt. Innerhalb der Tagung wurde die Bedeutung der integrativen Zusammenarbeit von Produktentwicklung und Produktionssystementwicklung mit Vertretern der Wissenschaft und Industrie besprochen. Hierbei waren unter anderem Univ. Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza des wbk, Dr.-Ing. Tom Schneider von Trumpf, Dr.-Ing. Peter Börsting von Dematic, Dr. Dr. Hansjörg Maier von Porsche sowie die Professoren unseres Instituts vertreten.

Um das Produkt-Produktions-CoDesign langfristig in Forschung und Lehre zu integrieren, gestaltet Baden-Württemberg mit dem Bau des LAZ – Lern- und Anwendungszentrum Mechatronik (siehe Beitrag Seite 3) am KIT eine einzigartige Möglichkeit. Gemeinsam mit dem Unternehmen TRUMPF wird eine Konstruktions- und Produktionsumgebung geschaffen, mit der realitätsgetreue Produktentstehung

vermittelt werden kann und für Studierende erlebbar wird. TRUMPF ermöglicht die Fertigung im LAZ durch die Bereitstellung von Know-how und professionellen Werkzeugmaschinen.

In Kooperation mit dem wbk – Institut für Produktionstechnik werden bereits aktive Impulse in der Forschung gesetzt und durch die gemeinsam gestaltete Tagung mit Experten aus den Unternehmen diskutiert. Mit dem Bau des LAZ wird eine langfristige Möglichkeit geschaffen, das hochrelevante Thema praktisch und in Kooperation mit Unternehmen zu erforschen.

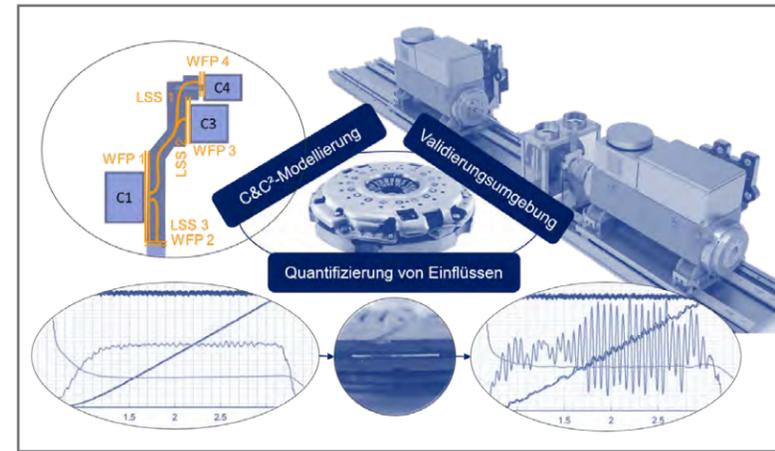
Auch Sie sehen die Potenziale des Produkt-Produktions-CoDesign und möchten das Thema für Ihr Unternehmen aufnehmen. Dann zögern Sie nicht uns anzusprechen. Wir unterstützen Sie mit unseren Analysen, Konzepten und Schulungen.

## Mit dem C&C<sup>2</sup>-Modell Einflussfaktoren auf das Kupplungsrupfen identifizieren, quantifizieren und gezielt Reduktionsmaßnahmen ableiten

In einem von der DFG geförderten Forschungsprojekt erforscht das IPEK Potenziale der C&C<sup>2</sup>-Modellierung zur Beschreibung von Gestalt-Funktion-Zusammenhängen (GFZ) in der konkreten Anwendung bei der Analyse und Reduktion der Schwingungsanregungen durch das Phänomen Kupplungsrupfen in Fahrzeugen und Maschinen. Die C&C<sup>2</sup>-Modellierung dient dabei zur strukturierten Abbildung der Zusammenhänge des Kupplungsrupfens in Wechselwirkung der Teilsysteme im Antriebsstrang.

Dadurch lassen sich Konstruktionsregeln und Vorgehensweisen systematisieren und machen sie zur Synthese neuer Kupplungsgenerationen nutzbar. Das Verständnis für die GFZ wird durch die C&C<sup>2</sup>-Modellierung verbessert, wodurch die gezielte Ableitung von Reduktionsmaßnahmen für Kupplungsrupfen möglich wird (siehe Abbildung 1). Dazu nutzen die Forscher aktiv auch die Methoden der PGE – Produktgenerationsentwicklung genutzt, um Referenzen für Reduktionsmaßnahmen zu identifizieren.

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse werden in einem Konstruktionsleitfaden auf Basis des C&C<sup>2</sup>-Modells zusammengefasst. Damit sollen dann Produktentwicklern bei der Neusynthese komplexer Kupplungssysteme unterstützt werden, um so bereits in der Konstruktion die Auftretenswahrscheinlichkeit von Kupplungsrupfen zu reduzieren oder zu vermeiden. Der Leitfaden unterstützt in der Praxis bei auftretenden Problemen durch Identifikation von Ursachen und Ableitung von besseren Gestaltungslösungen.



Die umsetzungsorientierte, kundenspezifische Konstruktion von Kupplungssystemen und deren Validierung sind Ihr Thema – Sprechen Sie uns an, wir unterstützen Sie gerne.

C&C<sup>2</sup>-Modellierung zur Erklärung der Wechselwirkungen möglicher Einflussfaktoren auf zwangserregtes Kupplungsrupfen sowie mit einem Prüfaufbau gewonnene Messergebnisse zur Validierung und Quantisierung der möglichen Einflussfaktoren.

## Eine Validierungsumgebung zur Erprobung von Hochdrehzahlssystemen im automobilen Antriebsstrang

Eine Steigerung der Leistungsdichte [kw/kg] in elektrifizierten Antriebsystemen kann durch den Einsatz hochdrehender Motoren erreicht werden. Zur Validierung von Antriebsstrangkomponenten im Einsatz in Hochdrehzahlanwendungen wird eine Prüfumgebung benötigt, welche realitätsnah die Betriebsbedingungen abbilden kann.



Hochdrehzahlaufbau für Kupplungen und Zahnradstufen am Power-Pack-Prüfstand mit 30.000 min<sup>-1</sup> Maximaldrehzahl und modularem Berstschutz

Beispielsweise forscht das IPEK an der Entwicklung und Validierung für Höchstdrehzahlgetriebe und Kupplungen. Hierbei kommen auch innovative Materialien für die Gestaltung der Komponenten zum Einsatz. So werden z.B. Hochleistungskunststoffe wie Poly-Ether-Ether-Keton (PEEK) im Hauptantriebsstrang von Elektrofahrzeugen untersucht.

Aufgrund der geringen Dichte des Polymers sollen Vorteile in der Dynamik des Antriebsstrangs erzielt werden. Durch eine sich in der Entwicklung

befindende Erweiterung des Prüfstands für ein Getriebemodul soll eine gezielte Untersuchung von Schmierstoffen ermöglicht werden.

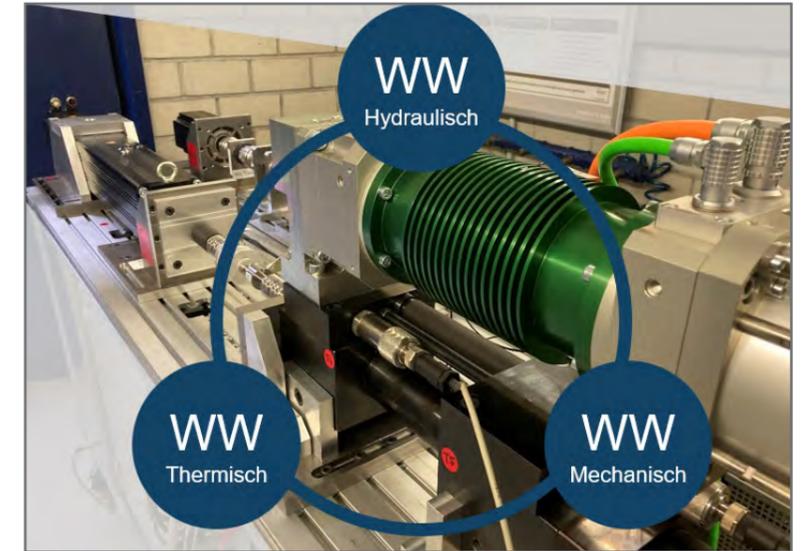
Mit dem am IPEK entwickelten Hochdrehzahl-Prüfmodul können Kupplungs- oder Getriebesysteme bei einer Drehzahlen bis 30.000 min<sup>-1</sup> untersucht werden. Wir bieten Ihnen

eine Prüfumgebung an, in der Sie Kupplungs- oder Getriebesysteme bei hohen Drehzahlen erproben können. Außerdem können Sie Messungen zum Wirkungsgrad, Systemtribologie

und Leistungsfähigkeit ihrer Antriebsstrangkomponenten und/ oder Schmierstoffe im Hochdrehzahlbereich durchführen.

## Steigerung der Systemzuverlässigkeit bei der Entwicklung passgenauer, hochintegrierter Aktuatorssysteme

Die Systemzuverlässigkeit ist eine zentrale Herausforderung bei Produkten mit hoher Funktionsintegration wie hochintegrierten Aktuatorssystemen. Durch die Integration neuer Funktionen und der Erhöhung der Leistungsdichte wird die Berücksichtigung von Wechselwirkungen der Teilsysteme immer relevanter, was für die Funktions- und Zuverlässigkeitsbewertung eine große Herausforderung ist. Um dieser Herausforderung zu begegnen, forschen wir an neuen Testmethoden und Prüfstandskonzepten.



Prüfstand zur Funktions- und Zuverlässigkeitsbewertung von hochintegrierten Aktuatorssystemen unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen (WW)

Ein solcher Prüfstand für passgenaue, hochintegrierte Aktuatorssysteme zukünftiger Flugsteuersysteme ist in der Abbildung dargestellt. Hieran entwickeln wir neue Testmethoden zum effizienten Testen des Aktuators. Wir nutzen thermische Koppelsysteme, um die Wärmeströme über die Systemgrenze zu übertragen und

damit realistische Einsatzbedingungen für die Performance- und Lebensdauertests einzustellen.

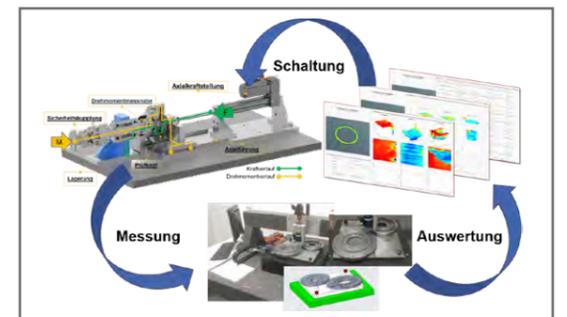
Wir unterstützen Sie gerne durch neue Testmethoden bei der Steigerung der Systemzuverlässigkeit Ihrer Systeme.

## Zuverlässiges Kupplungs- und Bremsverhalten durch gezielte Vorkonditionierung

Gezielte Vorkonditionierungsmaßnahmen liefern einen wesentlichen Beitrag dafür, dass trockenlaufende Friktionspaarungen mit Beginn der Anwendung berechenbare und optimale Leistungsfähigkeit besitzen. Das Vorhaben der IPEK-Forschung zielt darauf, die Aufwendungen für Vorkonditionierungsprozesse zu minimieren und gleichzeitig die Funktionsrobustheit von Kupplungen und Bremsen zu erhöhen. Bisherige Forschungsergebnisse haben gezeigt, dass die Charakteristik der Oberflächen von Reibbelag und Gegenreibeischeibe relevante Informationen zum Vorkonditionierungsstatus enthalten. Daher werden in diesem Forschungsvorhaben oberflächentopografische Untersuchungen über die Einlaufprozeduren hinweg durchgeführt,

um ein modellbasiertes Verständnis für den Zusammenhang des Reibverhaltens und der Oberflächentopografie zu generieren.

Hierzu werden mehrere Tausend Schaltungen mit unterschiedlichen Belastungskollektiven und Reibmaterialien an einem speziell dafür entwickelten Prüfstand durchgeführt (vgl. Abb. links). Repräsentative Reibflächenbereiche werden mithilfe der Weißlichtinterferometrie analysiert (vgl. Abb. unten). Hierbei zeigte sich, dass



Vorgehen zur Untersuchung der Oberflächentopografie während eines Vorkonditionierungsprozesses. Ein Untersuchungsintervall beinhaltet Versuche an einer speziell für diese Anwendungen konzipierten Prüfinfrastruktur. Anschließend Messungen an einem Weißlichtinterferometer liefern hochpräzise Oberflächenaufnahmen, die anhand einer eigens entwickelten Software analysiert werden können.

eine einfache kennzahlenbasierte Oberflächencharakterisierung nicht hinreichend komplex ist. Die aufgenommenen Oberflächendaten werden daher durch ein neues

Softwaretool ausgewertet (vgl. Abb. rechts). Neben der Begutachtung der Entwicklung typischer Oberflächennennwerte und einer übersichtlichen Oberflächendarstellung in 3-D bietet

dieses Programm die Möglichkeit zur Animation der Topologieänderung über den Versuchsverlauf. Die Ergebnisse dieser Forschung können dazu beitragen, Reiboberflächen bereits

bei der Produktentstehung so zu gestalten, dass die Aufwendungen für Vorkonditionierungsprozesse deutlich reduziert werden.

## Ansätze zur zukunftsrobusten Produktportfolioentwicklung

Die zukunftsrobuste Entwicklung von zunehmend komplexeren Produkten und Systemen erfordert die generationsübergreifende Planung und Entwicklung des Produktportfolios mit einem Horizont von vielen Jahren bis hin zu Jahrzehnten.

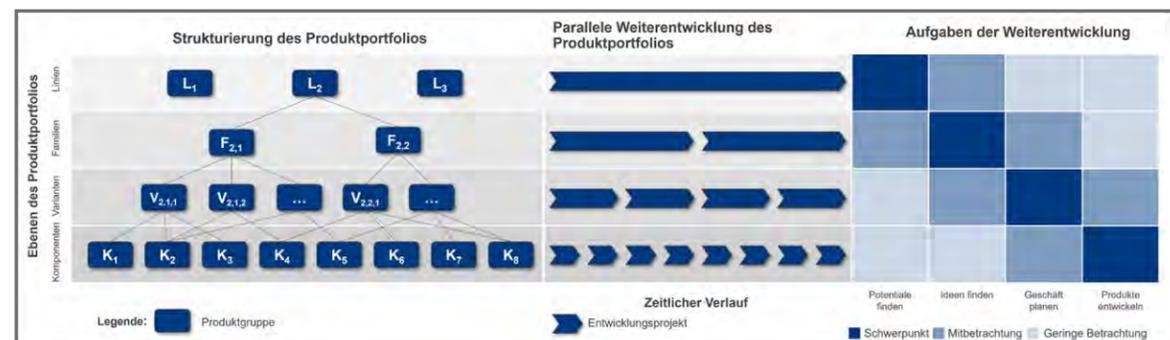
Um Methoden und Prozesse zur zukunftsrobusten Produktportfolioentwicklung bereitzustellen, werden, in einem von der DFG geförderten Grundlagenprojekt, Aktivitäten des 4-Zyklus Modells nach Gausemeier des Heinz-Nixdorf-Institut (HNI) in das Beschreibungsmodell der SGE – Systemgenerationsentwicklung nach Albers integriert.

Einleitend dazu werden zunächst Herausforderungen in Unternehmen durch Interviews mit Verantwortlichen der Produktentwicklung aus unterschiedlichen Unternehmen konkretisiert und Handlungsbedarfe abgeleitet, um gezielt und zukunftsrobust Produktportfolios weiterzuentwickeln.

Ein mögliches Kernkonzept, um die zukunftsrobuste Portfolioentwicklung systematisch zu beschreiben, ist das Modell der SGE, im Sinne der Abbildung und Weiterentwicklung von neuen Produktportfolios, durch die Variationsoperatoren der PGE auf Basis eines Referenzsystems.

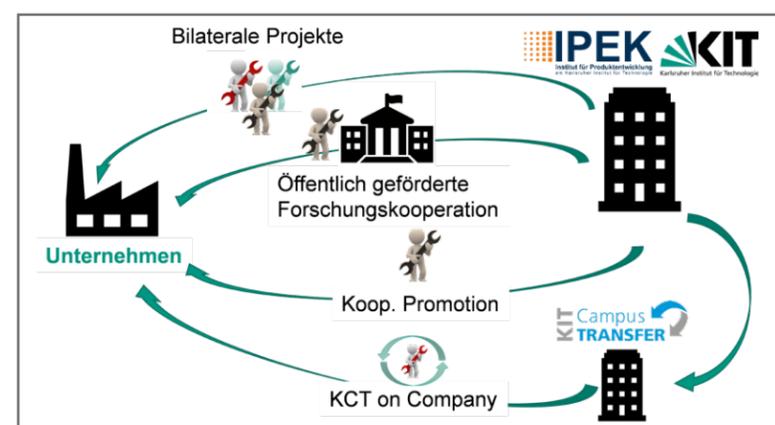
Die Erarbeitung und Evaluation von Lösungen wird ebenfalls begleitet durch einen engen Austausch mit den Unternehmen, welche die Praxis in die Forschung einführen.

Stehen Sie Herausforderungen in der Entwicklung von zukunftsrobusten Lösungen gegenüber? Dann profitieren Sie von den Erkenntnissen des DFG-geförderten Projektes „Zukunftsrobuste Produktentwicklung“ und sprechen Sie uns an!



Auszüge erster Ergebnisse, wie aktuell Produktportfolios in der Praxis entwickelt werden, auf Basis der Interviews mit Expertinnen und Experten der Produktentwicklung aus unterschiedlichen Unternehmen.

## Transformation – Unterstützung des Wandels durch systematische und methodische Innovationsunterstützung



Auswahl an Möglichkeiten des Wissenstransfers zwischen Unternehmen und Forschungseinrichtungen zur wertstiftenden Zusammenarbeit

Mit den sich stetig ändernden Anforderungen an neue Produkte durch volatile Veränderungen und Einschränkungen (Mobilitätsbereich, Klimaschutzziele, etc.), sowie neuen Trends (Digitalisierung, KI Integration, etc.) stehen Unternehmen zunehmend unter dem Druck, das notwendige Wissen des Unternehmens aber auch die Prozesse und anzuwendenden Methoden deutlich verändern zu müssen. Als Forschungseinrichtung in der Produktentwicklung unterstützen wir Ihren Transformationsprozess durch speziell dafür entwickelte Herangehensweisen und Methoden.

Dabei integrieren wir ggf. auch über unser Netzwerk geeignete Wissensträger und Spezialisten. Im Fokus stehen hierbei die effektive und effiziente Nutzbarmachung von Erkenntnissen aus der Forschung für innovative Prozesse und Produkte. Oftmals sehen wir, dass die Möglichkeiten

der Förderung / Kooperation, die es von staatlichen Stellen aus gibt, nicht vollständig bekannt sind und wichtiges Wissen fehlt, wie mit Forschungseinrichtungen wertstiftend zusammengearbeitet werden kann. In Kooperation mit dem IPEK können Sie von den unterschiedlichsten

Fördermöglichkeiten profitieren, wobei wir Ihnen gerne die Möglichkeiten und Chancen aufzeigen, welche sich aus den Plattformen ergeben.

## Digitalisierung in der Produktentwicklung – mit intelligenter Assistenz zur fertigungsoptimierten Konstruktion

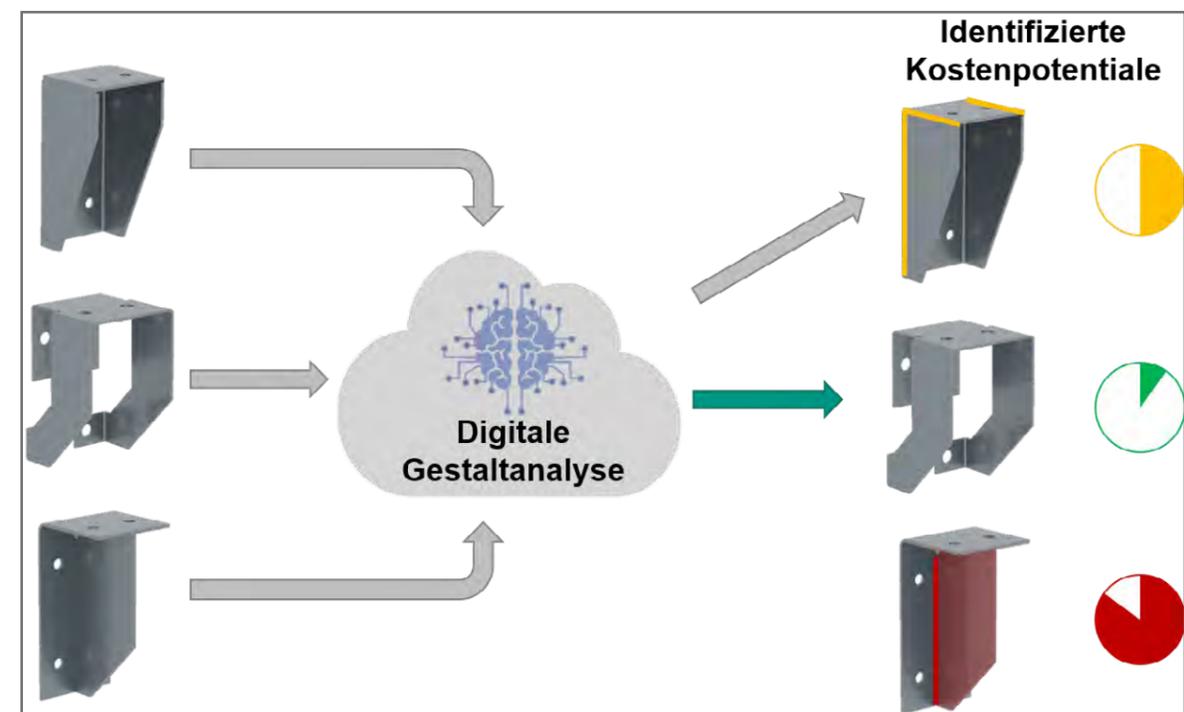
Nur wer die Potentiale der Fertigungsverfahren vollständig ausnutzen kann, kann Funktionserfüllung zu niedrigen Kosten realisieren. Stehen neue Möglichkeiten zur Verfügung, wie Konstruktionen bereits im frühen Stadium auf Einsparpotentiale bei den Fertigungskosten geprüft werden können, können diese Potentiale gehoben werden. Dazu müssen geeignete Werkzeuge für Konstrukteurinnen und Konstrukteure entwickelt werden.

Assistenz bereitgestellt werden, um eine Konstruktion für die Fertigung zu optimieren. Dabei konzentrieren wir uns im ersten Schritt auf die Blechverarbeitung als Fertigungsverfahren.

Um die Gestaltanalyse in einen Algorithmus zu überführen, ist ein detailliertes Erklärbarkeitsmodell notwendig. Dieses beinhaltet die Gestaltmerkmale der Konstruktion, welche den größten Einfluss auf Herstellkosten und die Fertigbarkeit eines Bauteils aus Blech besitzen. In Zusammenarbeit mit der Firma TRUMPF, als Experten im Bereich Blechfertigung, identifizieren wir diese Faktoren. Für eine individualisierte und automatisierte Erklärung und Bewertung der Konstruktionen benötigen Machine Learning Ansätze große Datensätze. Durch die Kooperation von TRUMPF und IPEK können dazu sowohl Datensätze zu individuellen Problemstellungen

aus Unternehmen als auch große und vergleichbare Datensätze von studentischen Entwicklungsteams genutzt werden. Ein solches, intelligentes Tool kann nicht nur automatisiert CAD-Daten von Blechbaugruppen analysieren und anschließend hinsichtlich Einsparpotential in den Fertigungskosten bewerten, sondern kann anhand bestimmter Kriterien auch direkt passende Gestaltungsrichtlinien vorschlagen, um die Baugruppe zu optimieren.

Aktuell werden die Probleme beim Vordenken der Fertigung nur mit dem Wissen der jeweiligen Konstrukteurinnen und Konstrukteure gelöst. In Zukunft können wir Modelle aufbauen, die in verschiedenen Fertigungsverfahren das Wissen vieler tausend Konstrukteurinnen und Konstrukteure beinhalten und fertigungsoptimierte Konstruktionen erzeugen.



Gestaltanalyse und Aufbau eines Erklärbarkeitsmodells für die Potentialerkennung in der Blechfertigung

## Projekt MoSyS – Menschorientierte Entwicklung komplexer System of Systems im Kontext des Advanced Systems Engineering

Intelligente Produkte, veränderte Mobilitäts- und Verhaltensmuster in der Produktnutzung und die Verschärfung gesetzlicher Rahmenbedingungen takteten die Weiterentwicklung von Unternehmensstrategien. Zudem führen neue Wettbewerber in etablierten Märkten zu Veränderungen in Wertschöpfungsnetzwerken und Unternehmen müssen sich unter diesen veränderten Randbedingungen über eine am Markt konkurrenzfähige Produktpformance behaupten.

Vor allem für die Entwicklungsabteilungen in den Unternehmen ändern sich die Randbedingungen sowie die Anforderungen an die Kompetenzen ihrer Mitarbeitenden. Keine Frage,

stellen, in zukunftsgerichtete Methoden und Kompetenzen umzumünzen und die Anforderungen vernetzter Systeme in Ihren Umgebungen in die Validierungsaktivitäten im Entwicklungsprozess zu integrieren, wird auch zukünftig Innovationen hervorbringen und Märkte prägen können.

„Wir können nicht mit Methoden und Prozessen des 20. Jahrhunderts die Herausforderungen der Produktentwicklung des 21. Jahrhunderts angehen (Zitat Prof. Albers)“.

Hier setzt das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Forschungsprojekt MoSyS an. In MoSyS arbeiten 9 An-

Änderungs- und Auswirkungsanalysen in der Produktentwicklung, Musterbasiertes Architekturmanagement, KI-unterstütztes Engineering, Rahmenwerke für einen digitalen Zwilling und Änderungsmanagement hin zu einer agilen Systems Engineering Organisation werden neue Methoden, Prozesse und IT-Werkzeuge entwickelt. Begleitend über alle Schwerpunktthemen steht zudem die Entwicklung übergeordneter Rahmenwerke für die Kollaboration und das Engineering von SoS – System of Systems – zur Integration der Ergebnisse in eine ganzheitliche, nachhaltige Form. Grundlage und Bindeglied über die Rahmenwerke hinweg bildet das Modell der PGE - Produktgenera-

### Domänen-übergreifende Vernetzung



### Domänen-spezifische Entwicklung

#### Kontinuierliches Wechselspiel zwischen Domänen-spezifischer Entwicklung und Domänen-übergreifender Vernetzung im Advanced Systems Engineering

deutsche Unternehmen spielen in der Weltspitze innovativer Produkte auf vielen Gebieten wie dem Maschinenbau, Fahrzeugbau, der Verfahrenstechnik oder dem Werkzeugmaschinenbau eine entscheidende Rolle! Aber die Erhaltung dieses Status ist in Anbetracht der genannten Veränderungen keine Selbstverständlichkeit. Nur wer es schafft die Herausforderungen, die künftige Nutzungsszenarien an die heutige Entwicklung

wenderunternehmen, 4 Enabler, die Tools und Methoden bereitstellen, 4 Forschungseinrichtungen und eine Gewerkschaft zusammen an den Herausforderungen zukünftiger Produktentwicklung. Übergeordnetes Ziel ist die Entwicklung ganzheitlicher Lösungen, die integriert sowohl systemische Aspekte als auch menschenorientierte Aspekte in der Kollaboration der Individuen im Unternehmen adressieren. In den fünf Schwerpunktthemen

tionsentwicklung. Durch die enge Abstimmung zwischen den Arbeitspaketen werden Ergebnisse konsistent und im Gleichschritt weiterentwickelt.

Ein Schlüsselfaktor zur Umsetzung und Anwendung der entwickelten Lösungen, ist deren bedarfsgerechte Einführung in der Praxis. Daher werden in MoSyS, einem vom BMBF geförderten Verbundprojekt, basierend auf den übergeordneten Rahmenwerken,

### Auf dem Weg zum IPEK-ASE-Framework



ebenfalls Methoden und weitere Hilfsmittel wie bspw. Handlungsleitfäden zur Umsetzung der Ergebnisse entwickelt, die zukünftig auch über das Projekt hinaus zur Verfügung stehen.

Dieses Zusammenspiel der Ergebnisse soll Unternehmen dabei unterstützen, das „Engineering von morgen“ im Sinne des ASE – Advanced Systems Engineering – einzuführen und umzusetzen. Da verschiedene Player in den Wertschöpfungsnetzwerken unterschiedliche Anforderungen an zukünftige Entwicklungsumgebungen stellen, wurde ein heterogenes Konsortium mit dem Ziel der Sicherstellung einer Anwendungsfall-gerechten Umsetzung der in MoSyS erzeugten Ergebnisse gegründet. Die Partner im Konsortium lassen sich dabei in drei Dimensionen unterscheiden. Neben den beschriebenen unterschiedlichen Positionen in Wertschöpfungsnetzwerken, sind mit den Domänen Maschinenbau, Softwareentwicklung, Elektrik-/Elektronik, Mechatronik und Soziologie die in der Zukunft der Produktentwicklung relevanten Domänen vertreten. Zuletzt unterscheiden sich die Anwenderunternehmen maßgeblich durch ihre Produktportfolios, sodass die Diversität ausreichend hoch ist, um die Vielfalt an zukünftigen Anwendungsfällen in der Entwicklung der MoSyS-Ergebnisse sicherzustellen.

Mit der Einführung und Umsetzung der entwickelten Methoden, Hilfsmittel und IT-Werkzeuge wird ein Paradigmenwechsel im Arbeitsumfeld des heutigen Engineerings diskutiert. Diese Transformation erfordert neben der Bereitstellung von Ressourcen und der damit verbundenen „Top-Down“ Einführung vor allem einen Wechsel der mentalen Modelle in den Köpfen einzelner Mitarbeitender: weg von der nur fachspezifischen Betrachtung, hin zu einer Kombination aus tiefer fachlicher Kompetenz und zusätzlich einer übergeordneten System- und Vernetzungskompetenz.

Gerade für solche Umbruchsituationen bietet das IPEK maßgeschneiderte Einführungs- und Schulungskonzepte, um Ansätze des ASE – wie z.B. die vernetzte Systemmodellierung, das richtige Maß an Agilität in Prozessen sowie die enge Vernetzung von Fach- und Systemkompetenzen – durch geeignete Werkzeuge in das unternehmerische Arbeitsumfeld zu integrieren. Unser Ziel ist es Ihnen zu helfen, Ihre Mitarbeitenden individuell in ihrem Kompetenzprofil in der konkreten Arbeit des Entwicklungsalltags zukunftsfähig zu machen. Dabei werden die initiale Entwicklung und Implementierung von Prozessen und Rahmenwerken sowie die gezielte Schulung und Befähigung der Mitarbeitenden und Entscheidenden

vorangetrieben. Zusätzlich wird das für die erfolgreiche Umsetzung der Transformation benötigte Commitment des Top-Managements sowie eine breite organisatorische und individuelle Akzeptanz der Mitarbeitenden aufgebaut.

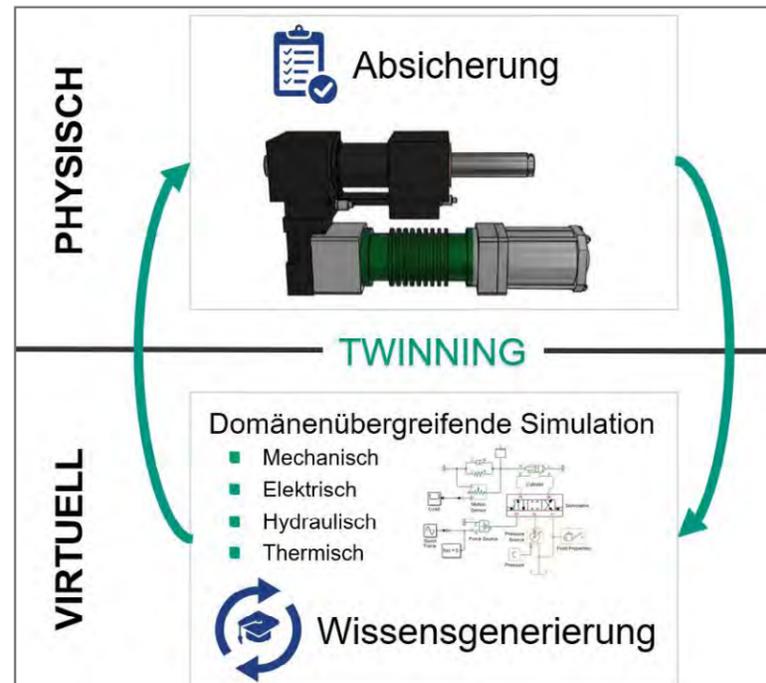
Mit unseren adaptiven, iterativen und interaktiven Konzepten wird eine menschenorientierte und an den spezifischen Bedarfen des Unternehmens angepasste Einführung von Ansätzen des ASE nachhaltig unterstützt und damit eine Grundlage geschaffen, mit der Unternehmen dabei erfolgreich werden die Methoden des 21. Jahrhunderts mit Ihren Mitarbeitenden in die Breite zu bringen.

Sind auch Sie daran interessiert, die Methoden des 21. Jahrhunderts in Ihr Unternehmen und zu Ihren Mitarbeitenden zu bringen? Dann sprechen Sie uns an!

<https://www.advanced-systems-engineering.de/>



## Digitale Zwillinge in der Produktentwicklung – Wissensgenerierung und Absicherung durch Twinning



Konzept eines Digitalen Zwillings am Beispiel eines elektrohydrostatischen Aktuators aus der Luftfahrt

Mit steigender Anzahl an aufgezzeichneten Felddaten und steigender Rechenleistung stehen der datengetriebenen Produktentwicklung neue Möglichkeiten zur Verfügung. Dabei

spielt der Digitale Zwilling eine Schlüsselrolle. Zu einem Digitalen Zwilling gehören ein physisches Produkt, ein virtuelles Modell sowie ein bidirektionaler Datenaustausch zwischen

diesen beiden Elementen, das sogenannte Twinning. Digitale Zwillinge in der Produktentwicklung können beispielsweise eingesetzt werden, um die Nutzung und das Verhalten eines Produktes zu analysieren und damit Wissen für eine zielgerichtete Entwicklung für die nächste Produktgeneration zu generieren oder auch die Funktion eines physischen Systems abzusichern. Dies bildet die Grundlage für innovative, nutzerzentrierte, aber auch nachhaltige Produkte. Herausforderungen für die Nutzung von Digitalen Zwillingen in der Produktentwicklung stellen unter anderem die Auswahl eines geeigneten Detaillierungslevels des virtuellen Modells, die effiziente Validierung des Modells sowie die Identifikation der relevanten Messdaten für das Twinning dar. Unsere langjährige Forschung zur Modellbildung, Messtechnikintegration, Validierung und Kopplung von physischen und virtuellen Systemen mit Hilfe des IPEK-XiL-Ansatz bilden eine optimale Grundlage, um auch Sie bei der Entwicklung und dem Einsatz von Digitalen Zwillingen ihrer Produkte zu unterstützen. Sprechen Sie uns gerne an.

## Nutzerzentrierte Entwicklung im Mensch-Maschine-System – Der menschliche Einfluss und dessen Produktwahrnehmung im Fokus der Validierung

Die nutzerzentrierte Entwicklung von Produkten mit einer starken physischen Interaktion zum Nutzer stellt eine besondere Herausforderung dar. Einerseits wird die Interaktion mit diesen Produkten sehr intensiv von ihren Nutzern wahrgenommen und das Verhalten des Nutzers wirkt sich unmittelbar auf die Funktion dieser Produkte aus. Gleichzeitig sind die Validierung und Abstimmung solcher Produkte auf den Nutzer bisher oft nur mit physischen Prototypen möglich und können daher erst in einer späten Phase der Produktentwicklung stattfinden. Dies wiederum führt häufig zu späten und teuren Iterationen

im Entwicklungsprozess. Um Produkte entsprechend kosten- und zeiteffizienter für ihre späteren Nutzer zu optimieren, muss die Entwicklung solcher Mensch-Maschine-Systeme zukünftig so unterstützt werden, dass die Wechselwirkung zwischen Mensch und Maschine und die daraus resultierenden Einflüsse schon möglichst früh im Produktentwicklungsprozess berücksichtigt werden können. Allerdings fehlen bisher noch wichtige Erkenntnisse über den Einfluss des Menschen auf das Produkt und umgekehrt des Produkts auf den Menschen.

Um dieser Herausforderung zu begegnen haben wir uns am IPEK zum Ziel gesetzt, auf Basis von **validen Messgrößen** den Menschen in seiner Interaktion mit dem technischen System zu verstehen und in physischen und psychologischen **Menschmodellen** abzubilden, um Anforderungen an das technische System für die Produktentwicklung abzuleiten. Auf diese Weise entstehen bei uns beispielsweise:



Das Ziel der Erforschung von Mensch-Maschine-Systemen am IPEK ist es, valide Messgrößen für die Interaktion zwischen Mensch und Maschine wie beispielsweise bei der Nutzung eines Winkelschleifers (rechts oben) durch den Einsatz verschiedener Sensoren am Menschen und im Power-Tool aufzubauen. Die so erfassten Eigenschaften bilden in Menschmodellen, wie Impedanzmodellen des menschlichen Hand-Arm-Systems (Mitte unten) ab und machen diese zum Beispiel in Validierungsumgebungen für das automatisierte Testen von Power-Tools (links oben) für die Produktentwicklung nutzbar.

- **mechanische Ersatzmodelle**, welche die Impedanz des menschlichen Hand-Arm-Systems abbilden und zur Schwingungsbewertung eingesetzt werden können,

- **Regelungen für unsere automatisierten Power-Tool-Prüfstände**, mit denen sich die Bewegungen und Kräfte des Anwenders bei der Nutzung von Power-Tools mittels Roboterprüfstandssimulationen lassen,

- **muskuloskelettale Modelle des Menschen**, die eine Bewertung der physischen Belastung auf den Menschen in der Nutzung der Produkte ermöglichen,

- **Schwingungsfiler** zur Vorhersage des kognitiv wahrgenommenen Vibrationskomforts,

- **Modelle des Nutzerverhaltens**, mit denen reale Nutzer hinsichtlich ihrer Expertise automatisiert definierten Nutzerprofilen zugeordnet werden können.

Mit dem Wissen und den von uns entwickelten Menschmodellen können wir Sie bei der nutzerzentrierten Entwicklung Ihrer Produkte unterstützen, indem wir:

- Studienumgebungen bereitstellen, welche Sie in die Lage versetzen, unter objektiven, reproduzierbaren Bedingungen gezielt die Bedürfnisse der von Ihnen adressierten Nutzer und ihren Einfluss auf das Produkt zu untersuchen,

- Prüfstände und Simulationsmodelle aufbauen, welche das

Nutzerverhalten und die Eignung Ihrer Produkte für die adressierte Zielgruppe untersuchen und vorhersagen können,

- durch unser Wissen und die Erkenntnisse über die Interaktion zwischen Mensch und Maschine mit Ihnen neue Potenziale für die Weiterentwicklung Ihrer Produkte identifizieren.

Zukünftig können damit Produkte mit enger physischer Interaktion mit dem Nutzer zielgerichteter, effizienter und valide entwickelt werden und sind spezifisch auf Ihren adressierten Kunden optimiert.

## Smart Engineering – was wurde aus den Prognosen des Jahres 2010?

„Voraussetzung für den nachhaltigen Innovationserfolg ist [...] ein Wandel von einer fachdisziplinarorientierten Produktentwicklung hin zu einer vorausschauenden und systemorientierten Produktentstehung“, postulierten Albers und Gausemeier in ihrem Beitrag zu den 10. Karlsruher Arbeitsgesprächen – Produktionsforschung 2010. Im Rahmen einer durch das BMBF beauftragten Studie wurden damals unter anderem zukünftige Forschungsbedarfe im Bereich der Innovationsprozesse und Produktentwicklung bis 2020 identifiziert. Heute ist nun 2021 – es lohnt ein Rückblick auf vier damals identifizierte Handlungsfelder, die von Forschung und Unternehmen gemeinsam angegangen werden sollten. Wo stehen wir denn nun heute?

Das erste Handlungsfeld war die Strategische Entwicklung von Produktinnovationen. Zukünftige Markt- und Technologieentwicklungen sind hierbei in einer systematischen Potenzialfindung vorauszuenden. Aspekte wie Ressourcenschonung und Nachhaltigkeit wurden besonders priorisiert. Ein gewisses Umdenken hat in diesem Bereich stattgefunden, ein genereller Bewusstseinswandel der Unternehmen aber bislang noch nicht. Hier sind dringend weitere Anstrengungen in der Forschung und in den Unternehmen notwendig.

## Interdisziplinäre Problemlösung – Rechts- und Technikwissenschaften entwickeln gemeinsam einen Design-Raum für autonome Mobilitätssysteme

Am 28. Mai 2021 hat der Bundesrat einer neuen Fassung des Gesetzes zum autonomen Fahren zugestimmt. Das Gesetz ermöglicht jedoch nur bestimmte Einsatzszenarien für SAE Level 4 unter hohen Betriebsanforderungen. Der Rahmen zur rechtssicheren Entwicklung, Zulassung und dem Betrieb autonomer Mobilitätssysteme muss daher weiterentwickelt werden.

Die zentrale Herausforderung dabei: Es kann keine prospektive rechtliche Regulation von in der Entwicklung befindlichen Technologien geben. Umgekehrt können Unternehmen

Das zweite Feld war die Integrierte Produktentwicklung/-entstehung. Es wurde identifiziert, dass der Prozess von der Produktidee bis über den Produktionsanlauf hinaus als Ganzes gesehen werden muss, wobei Produkt- und Produktionssystemkonzeptionen frühzeitig im Wechselspiel entwickelt werden. Aktuell gibt es einige Forschungsbestrebungen dazu, es sei auf den Artikel zum Produkt-Produktions-CoDesign verwiesen. Der eingeforderte Durchbruch wurde in den 10 Jahren aber nicht erreicht. Es besteht Handlungsbedarf.

Im dritten Feld wurde die Produktentstehung als Wissensarbeit eingefordert. Der Umgang mit Wissen werde zentrales Merkmal der vorausschauenden und systemorientierten Produktentstehung sein und müsse nicht nur personengebunden, sondern als sozioökonomische Herausforderung verstanden werden. Auch hier gibt es erste Ansätze aber ein Durchbruch ist noch nicht erreicht. Die Herausforderung der Wissenssicherung ist dabei heute wegen des bevorstehenden demographischen Wandels gerade in Deutschland in dieser Dekade noch wichtiger. Weitere Forschung und ein umfassendes Umdenken sind zwingend zu fordern.

Das letzte identifizierte Handlungsfeld waren die Werkzeuge der

Produktentstehung. Konsequente Virtualisierung wurde als zentrales Element angesehen. Diese hat sich bis heute erheblich verbreitet. Die Corona-Pandemie mit weitgehender Umstellung auf standortverteilte, digitale Arbeitsweisen kann hier sicherlich als weiterer Beschleuniger dieser Entwicklung angesehen werden. Die Herausforderung ist allerdings, dass die Produkte durch die Vernetzung und Steigerung der Komplexität zumindest teilweise die heutigen Modellbildungsmöglichkeiten an die Grenze führen. Der digitale Zwilling steckt immer noch in den Anfängen!

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Handlungsfelder richtig identifiziert wurden und auch einiges passiert ist, wir aber längst nicht fertig sind! Gerade das Themengebiet des Advanced Systems Engineering (ASE), das auch auf die Untersuchungsergebnisse aufbaut, hat an Relevanz zugenommen. Das IPEK forscht z.B. in den BMBF geförderten Projekten AdWiSE und MoSyS mit Partnern aus Forschung und Unternehmen auf diesem Zukunftsfeld. Allerdings ist man heute noch lange nicht so weit, wie damals gefordert wurde. Es ist noch sehr viel in Forschung und Umsetzung zu tun! Das IPEK-Team ist dabei – gerne auch in gemeinsamen Projekten mit Ihnen.



In HEiKA werden Methoden und Prozesse für die gemeinsame Entwicklung eines Design-Raums für autonome Mobilitätssysteme entwickelt

zukünftige rechtliche Rahmenbedingungen nur unsicherheitsbehafet berücksichtigen. Es wird ein Ansatz benötigt, um den Design-Raum für die autonomen Mobilitätssysteme der Zukunft zu gestalten und deren nahtloses Zusammenwirken in einem System-of-Systems zu ermöglichen.

Das IPEK arbeitet mit Rechts- und Gesellschaftswissenschaftlerinnen und -Wissenschaftlern der Universität Heidelberg in einem Konsortium mit weiteren Instituten des KIT daran, Methoden und Prozesse für die interdisziplinäre Zusammenarbeit zu entwickeln, um gemeinsam schneller

zu technischen und rechtlichen Innovationen für die Gesellschaft zu kommen. Sie stehen vor interdisziplinären Herausforderungen? Gehen Sie diese gemeinsam mit uns methodisch an!

## Extended Reality am IPEK – Anwendung in Forschung, Lehre und Innovation

Extended Reality (XR) Technologien sind in der Produktentwicklung weit mehr als eine Modeerscheinung, sondern ein bereits heute nutzenstiftendes Werkzeug für Entwickelnde.

Im Rahmen der Entwicklung von Systemen, Methoden und Prozessen der KaSPo werden aktuell im XR-Lab am IPEK Einsatzmöglichkeiten für XR-Technologien erforscht. Potenziale konnten dabei in den Handlungsfeldern Forschung, Lehre und Innovation identifiziert und bereits gehoben werden. Exemplarisch wollen wir Ihnen hierfür drei aktuelle Projekte vorstellen.

### Forschung: Generierung von Lösungskonzepten im VR-Entwicklungssimulator

Die heute oft globale Produktentwicklung erfordert zunehmend standortverteiltes und virtuelles Arbeiten. Hierfür hat das IPEK eine praxisnahe Lösung entwickelt – den Entwicklungssimulator – für ein unternehmensnahes, standortverteiltes Arbeiten. In einem Kooperationsprojekt konnte erstmalig ein interdisziplinäres Team aus Programmierern, Designern und Maschinenbauern unterstützt durch VR, Lösungskonzepte für das Biegemodul einer neuen Produktgeneration einer Drahtbiegemaschine entwickeln.

### Lehre: Kollaborative XR-Lernumgebung in der Maschinenkonstruktionslehre 1

Das Kennenlernen von wichtigen Maschinenelementen und Maschinensystemen ist eine der Grundlagen unserer Maschinenkonstruktionslehre. Erstmals konnten dabei 400 Studierende der Ingenieurwissenschaften mithilfe von XR-Technologien geschult werden. Das in der Vorlesung gelernte technische Wissen wurde beim Aufbau eines virtuellen Getriebes angewandt. Dass der Einsatz von XR-Technologien hierbei förderlich für den Lernerfolg ist, zeigt eine durchgeführte Evaluation. Das Erkennen funktionaler Zusammenhänge sowie die Reflexion erfolgreicher Denk- und Vorgehensstrategien können so auch im virtuellen Raum geschult werden.

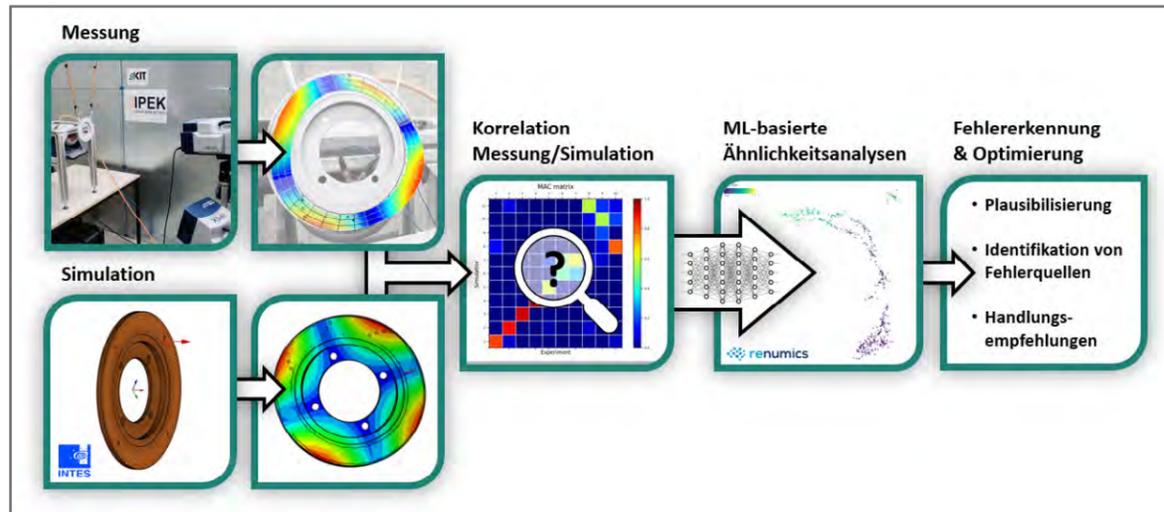
### Innovation: VR-Fahrsimulator zur Validierung suggestiver Sounddesigns

Bei Elektrofahrzeugen wird das fehlende akustische Feedback des Verbrennungsmotors durch ein künstliches Motorengeräusch ausgeglichen. Eine fahrsituations-abhängige Veränderung dieser Geräusche eröffnet neue Potenziale für akustische Fahrerassistenzsysteme. XR Technologien ermöglichen eine frühe entwicklungsbegleitende Validierung neuer Sound Design Konzepte in realitätsnahen und immersiven Fahrzenarien. In einer initialen Probandenstudie konnte erstmals ein suggestives Sound Designs in einem VR-basierten Fahrsimulator validiert werden.



Wollen Sie Ihre Kompetenzen im Bereich Extended Reality ausbauen? Angepasst auf Ihr Unternehmen finden wir von der Implementierung von XR Prototypen, kundennahen Validierungsstudien für Ihre Produkte bis zur Schulung von Mitarbeiter\*innen gemeinsam Lösungen! Sprechen Sie uns an!

# VibroAI – Robuste Schall- und Vibrationsanalysen auf Basis Maschinelles Lernverfahren



NVH und Schwingungsanalyse sind ein wichtiger Teil des Produktentstehungsprozesses von Fahrzeugen und insbesondere für akustische und

müssen die Simulationsmodelle auf die Eigenschaften realer Bauteile angepasst werden. Die Erstellung solcher Modelle ist allerdings sehr auf-

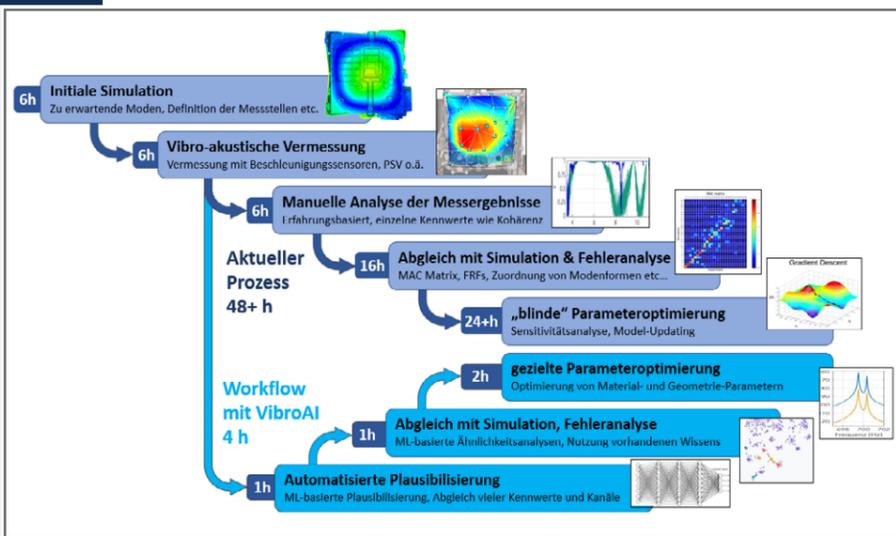
Durch ML-basierte Ähnlichkeitsanalysen können dann neue Messdaten analysiert und mit der Datenbank bestehender Mess- und Simulationsdaten verglichen werden. Als Ergebnis liefert der Algorithmus Aussagen über ähnliche vergangene Messungen, sowie Vorschläge, wie das Modell angepasst werden kann. Dies kann sowohl bzgl. geometrischer Abweichungen, als auch bzgl. Abweichungen von Materialparametern wie E-Modul oder Dichte erfolgen.

Gleichzeitig kann durch diesen Ansatz auch eine Aussage über die Messung selbst getroffen werden. Systematische Abweichungen zu früheren Messungen, Ausreißer einzelner Messpunkte, falsch zugeordnete Kanäle oder ungünstig gewählte Anregungspunkte können automatisiert erkannt werden. Durch die vereinfachte Auswertung und die schnellere Parametrierung von Simulationsmodellen können die Entwicklungszyklen in vielen Branchen stark verkürzt werden. Das neue Verfahren unterstützt durch einen niederschweligen Zugang ohne vertiefte Simulations- und ML-Kenntnisse besonders kleine und mittlere Unternehmen. Möchten auch Sie ohne detaillierte Expertise im Bereich der Simulation- und ML-Technologie dieses Potenzial bewerten bzw. erschließen? Wir sind bereit Sie dabei zu unterstützen!

komforttechnische, aber auch für sicherheitskritische Fragestellungen relevant. NVH Messungen sind allerdings extrem aufwändig und können häufig nur erfahrungsbasiert durchgeführt werden. Auch Simulationsansätze wie FEM oder BEM können nicht ohne Weiteres umgesetzt werden: Simulationen rechnen mit idealisierten geometrischen Modellen, reale Bauteile weisen im Rahmen ihrer Toleranzen und in der Materialqualität Abweichungen auf. Damit die Simulation verlässliche Ergebnisse liefert,

wendig, da die Ursachen für mögliche Abweichungen sehr vielfältig sind und in der Regel viele Abweichungen gleichzeitig vorliegen.

Im Projekt VibroAI wird für diese Problematik ein neuartiger Ansatz auf Basis Maschinelles Lernverfahren (Machine Learning, ML) umgesetzt: Bestehende Mess- und Simulationsdaten werden durch sog. Auto-Encoder selbstlernend analysiert und kategorisiert, sodass ein aufwändiges manuelles Daten-Labeling entfällt.



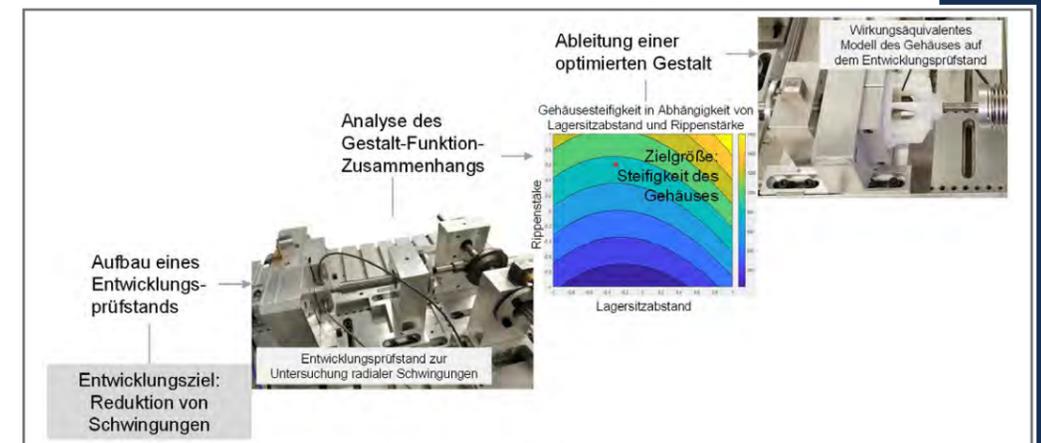
# Kosten und Zeit reduzieren durch abgesichertes Wissen in der Konstruktion

Um das Prinzip „Trial and Error“ und damit oft hohe Kosten und langwierige Iterationen im Produktentwicklungsprozess zu reduzieren, forschen wir am IPEK an Testmethoden und umgebungen, um früh im Produktentwicklungsprozess abgesicherte Zielgrößen für die Konstruktion zu erhalten. Durch den Einsatz von Entwicklungsprüfständen und unseren Testmethoden erreichen wir es, bereits vor der Phase physisch vorliegender Prototypen abgesicherte Aussagen über die Gestalt-Funktion-Zusammenhänge zu treffen und damit Konstruktionszielgrößen für das Design abzuleiten. Unter einer Zielgröße für die Konstruktion verstehen wir beispielsweise die Steifigkeit des Gehäuses, die durch die Konstruktion der Gehäusegeometrie, die Anbindung der Lagerstellen und das Material indirekt beeinflusst wird. Zur Ableitung von Konstruktionszielgrößen nutzen wir Teilsystemprüfstände

auf Basis des X-in-the-Loop-Konzepts. Diese ermöglichen Einflussgrößen, Effektstärken und Interaktionen sowohl zu identifizieren als auch zu quantifizieren, um für die zielgerichtete Konstruktion notwendiges Systemwissen aufzubauen. So forschen wir derzeit am Einsatz eines Entwicklungsprüfstands zur zielgerichteten Beeinflussung der Schwingungen eines Hochdrehzahltriebstrangs für handgehaltene Power-Tools. Als ein Gestaltparameter mit großer

Effektstärke wurde die Steifigkeit des Gehäuses identifiziert. Durch den Einsatz der entwickelten Systemmodelle konnte aus der identifizierten Steifigkeit ein Gehäuse abgeleitet und auf dem Entwicklungsprüfstand getestet werden, dass zu einer geringeren Beanspruchung des Anwenders und der Antriebskomponenten führt. Wenn Sie sich auch deutlich früher in der Entwicklung abgesicherte Konstruktionszielgrößen wünschen, sprechen Sie uns gerne an

Vom Entwicklungsziel zu abgesicherten Zielgrößen

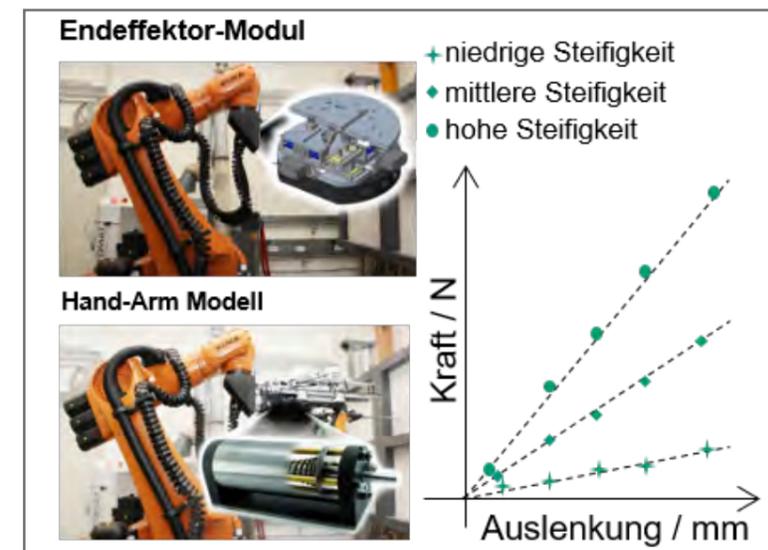


# Entwicklung mechatronischer Systeme mit adaptiven Steifigkeitseigenschaften

Das dynamische Systemverhalten eines Produkts ist das Resultat der Wechselwirkungen zwischen der Anregung und

den Eigenschaften des Systems. In rein mechanischen Systemen können diese Eigenschaften meist nicht verändert

werden. Mechatronische Systeme dagegen bieten das Potential adaptiver Systemeigenschaften. Damit wird eine Anpassung der Systemeigenschaften auf Anwendungsfälle mit variierenden mechanischen Anregungen möglich.



Beispielsysteme Endeffektor-Modul und Hand-Arm Modell für die Nutzung adaptiver Steifigkeitseigenschaften in der flexiblen Fertigung und im Power-Tool Testing

Unsere Forschung in diesem Bereich betreiben wir an zwei Beispielsystemen. Für das Testing von Power-Tools entwickeln wir Hand-Arm Modelle mit adaptiven Steifigkeitseigenschaften, um die Impedanz des Menschen in automatisierten Tests besser abbilden zu können. Für die flexible Fertigung der Zukunft in der Wertstromkinematik entwickeln wir Endeffektor-Module mit adaptiven Steifigkeitseigenschaften, um Roboter flexibel an Anwendungsfälle anpassen zu können. Dabei erforschen wir auch die Anwendung von Entwicklungsmethoden, wie zum Beispiel die modellbasierte Absicherung von Systemeigenschaften.

# Hybrides Arbeiten im Entwicklungsprozess – eine Herausforderung und Chance auch für die Zeit nach der Corona-Pandemie

Die Folgen der Corona-Pandemie auf das Arbeiten im Allgemeinen und das Entwickeln mechatronischer Systeme hat uns in den Unternehmen und der Forschung vor die Herausforderung gestellt, Problemlösungen neu zu denken und auf neue Wege anzugehen. Das Arbeiten aus dem Homeoffice ist für viele erzwungenermaßen zum Hauptarbeitsschwerpunkt geworden. Erstaunlicherweise hat dies trotz vieler Bedenken oft auch gut funktioniert. Was erwartet uns nun in der Zeit nach der Corona-Pandemie?

Um hier zunächst die Sichtweise von Unternehmen zu verstehen hat das IPEK eine Umfrage mit 44 Mitarbeitenden aus Unternehmen durchgeführt. 84 % der Befragten gehen davon aus, dass der Anteil standortverteilter Zusammenarbeit auch unter Nutzung des Konzepts des mobilen Arbeitens durch das Aufzeigen des Potentials während der Corona-Pandemie im Gegensatz zur Zeit vor Corona zunehmen wird.

In der Forschung des IPEK ist das Thema einer teilweise virtuellen Zusammenarbeit bereits seit mehreren

Jahren Forschungsgegenstand. Hieraus ergab sich auch in der Reaktion auf die Herausforderungen der Corona-Pandemie ein deutlicher Vorteil. Wir konnten unsere Konzepte aus der Forschung direkt in die Prozesse von Unternehmen bringen. Im Rahmen dieser Forschungsvorhaben untersuchen wir die Auswirkungen, die das hybride Arbeiten auf die Zusammenarbeit im Entwicklungsprozess haben wird und wie die Zusammenarbeit optimal gestaltet werden kann. Das hybride Arbeiten beschreibt dabei das Zusammenspiel von virtueller (wie bspw. dem Remote Work) und der Zusammenarbeit vor Ort (bspw. gemeinsam aus dem Office). Erste Ergebnisse zeigen, dass sich entlang des Produktentstehungsprozesses Aktivitäten gut (z.B. das Managen von Wissen), andere hingegen weniger gut (z.B. die kreative Ideenfindung), für die hybride Bearbeitung eignen. Basierend darauf konnten schon erste konkrete Maßnahmen abgeleitet und iterativ in unseren Live-Labs integriert und validiert werden.

Basierend auf diesen Erkenntnissen haben wir mit dem Live-Lab „ProVIL

– Produktentwicklung im virtuellen Ideenlabor“ ein Konzept erarbeitet, in dem wir Lösungen für Aufgabenstellungen von Unternehmen in Kooperation mit Studierenden des KIT und der HKA gemeinsam virtuell und standortverteilt entwickeln. Seit 2016 wird ProVIL in jedem Sommersemester durchgeführt. Bei der Durchführung im Jahr 2020 musste Corona-bedingt der Anteil standortverteilter Zusammenarbeit nochmals extrem erhöht werden, der sonst übliche Anteil der Zusammenarbeit vor Ort musste vollständig entfallen. Dadurch wurde gleichzeitig eine sehr gute Möglichkeit geboten, um die Auswirkungen einer vollständig standortverteilter Zusammenarbeit zu untersuchen. Es zeigte sich, dass durch fehlendes Teambuilding sowie fehlende vertrauensbildende Maßnahmen die virtuelle Zusammenarbeit, gerade in den wichtigen frühen Projektphasen Herausforderungen bereitet hat.

Im Live-Lab „IP – Integrierte Produktentwicklung 2021/22“ wurde gemeinsam mit dem Unternehmen Faurecia vor allem der hybride Wissenstransfer und -austausch an den



Den Höhepunkt des IP-Projektes stellte die hybride Abschlussveranstaltung dar, bei der ein kleiner Kreis von Studierenden, das Faurecia- und IPEK-Projektteam sowie ausgewählte Unternehmensvertreter vor Ort teilnahmen. Weitere 150 Familienangehörige, Freunde und Unternehmenspartner konnten der Veranstaltung virtuell beiwohnen und so an den Diskussionen interaktiv teilhaben.

Meilensteinen fokussiert. 42 Studierende entwickelten Lösungen, um die Mobilität der Zukunft von standardisierten, fahr(er/in) orientierten Innenraumsystemen für Fahrzeuge hin zu einem insassenzentrierten well being Erlebnis weiter zu treiben.

Die Erkenntnisse aus der anwendungsnahen Lehre wurden erfolgreich

in zwei Transformationsprozessen mit namenhaften Unternehmen angewendet. Die gesammelten Erkenntnisse ermöglichen es uns Sie auf Ihrem Weg hin zur optimalen hybriden Zusammenarbeit zu begleiten. Dazu zählt nicht nur, dass für Ihr Unternehmen geeignete Maß an virtueller und Vor-Ort Zusammenarbeit zu identifizieren, sondern auch gemeinsam mit

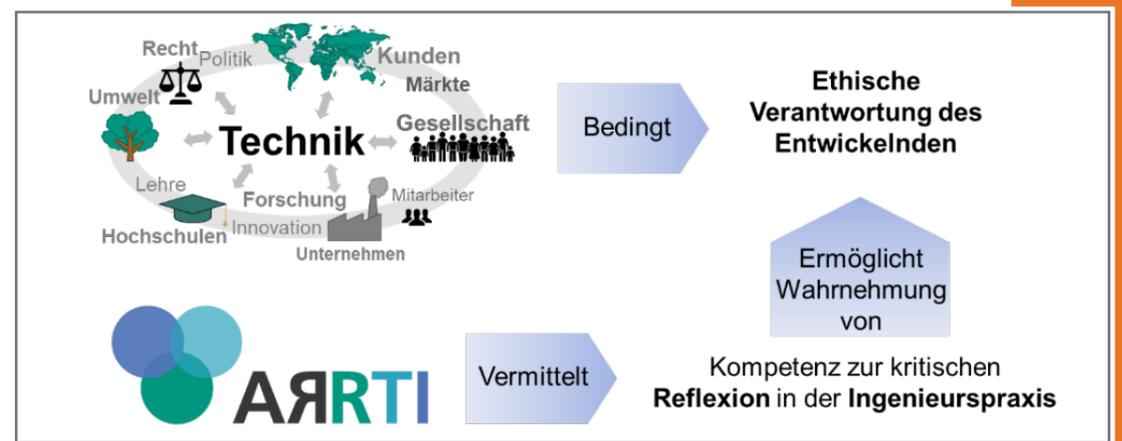
Ihnen Maßnahmen zur Umsetzung (wie bspw. hybride agile Arbeitsweisen) abzuleiten und einzuführen. Wir freuen uns Sie auf Ihrem Transformationsprozess in der Zeit nach Corona zu begleiten und gemeinsam Ihren individuellen Weg zu finden. Sprechen Sie uns an!

## Academy for Responsible Research, Teaching and Innovation (ARRTI) – Forschende und Studierende auf dem Weg zur verantwortungsvollen Forschung und Innovation begleiten

Der Kern der Tätigkeit von Ingenieurinnen und Ingenieuren ist die Synthese von technischen Lösungen für Probleme der individuellen Kunden, aber auch für gesellschaftliche Herausforderungen wie dem Klimawandel. Diese Synthesetätigkeit erfordert ein hohes Maß

an Verantwortungsbewusstsein, da Entwicklerinnen und Entwickler die ethischen und gesellschaftlichen Dimensionen ihres Handelns richtig abschätzen und daraus Entscheidungskriterien ableiten müssen.

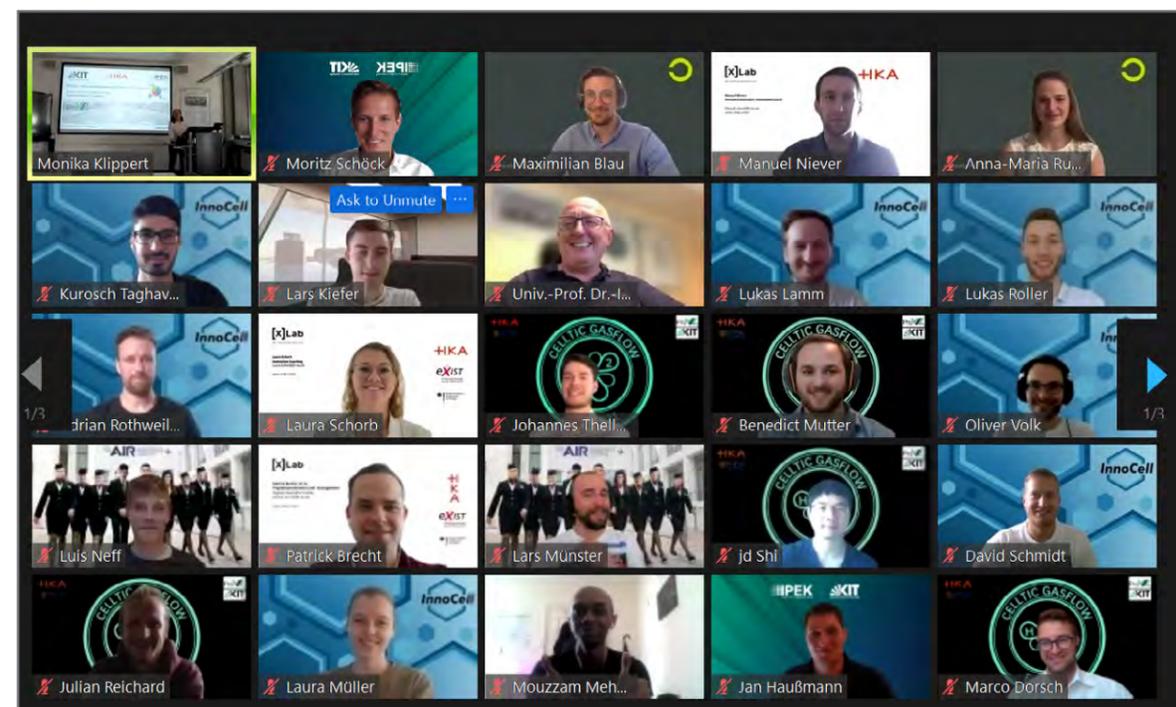
Die aus der Exzellenzinitiative entstandene Academy for Responsible Research, Teaching and Innovation



ARRTI verfolgt das Ziel einer stärkeren Berücksichtigung techniekethischer Themen in Forschung, Lehre und Innovation

(ARRTI) verfolgt das Ziel, Reflexionskompetenz in ethischen und gesellschaftlichen Fragen bei Studierenden und Forschenden aufzubauen. Ein Beispiel für die Realisierung ist die Integration in das Live-Lab IP – Integrierte Produktentwicklung des IPEK. Neben Vorträgen von Vorbildern aus der Unternehmenspraxis werden die zukünftigen Produktentwicklerinnen

und Produktentwickler vom ARRTI-Team gecoacht, um Ihre Produktideen auch hinsichtlich ethischer Gesichtspunkte bewerten zu können. Ziel ist es, Erfahrung zu sammeln, wie Studierenden Beurteilungskompetenz vermittelt werden kann. Sie interessieren sich für diesen erweiterten Blick auf Forschung und Innovation? Dann sprechen Sie uns an!



Erfolgreiche Implementierung von hybriden Socializing Methoden In ProVIL 2021 in zwei unterschiedlichen Produktentwicklungsprozessen mit Airbus zum Thema "XPAIRIENCE – Business opportunities around travel disruptions" und dem IPEK zum Thema "Steigerung des Fahrerlebnisses in Brennstoffzellenfahrzeugen durch effiziente Nutzung von Energie- und Stoffströmen" zur Begegnung von identifizierten Herausforderungen.

## Erforschung der Interaktion von Mensch und Exoskelett für die Entwicklung passgenauer Unterstützungssysteme für den Menschen

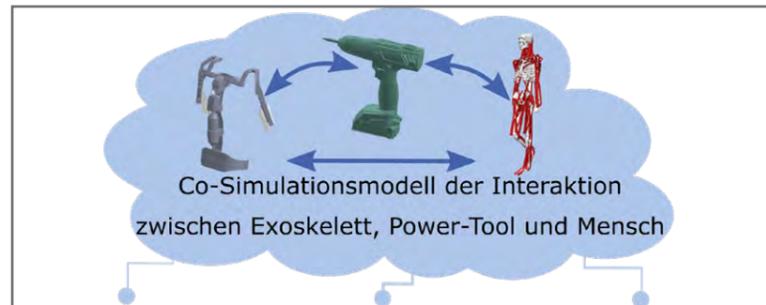
Der Einsatz von Exoskeletten in den unterschiedlichsten Bereichen unseres Alltags steigt, bspw. zur Unterstützung des Menschen bei harter körperlicher Arbeit auf Baustellen oder in der Montage. Dabei stellt die enge Interaktion des Exoskeletts mit dem Menschen in der späteren Anwendung eine Herausforderung für die passgenaue Entwicklung dieser Unterstützungssysteme dar. Am IPEK forschen wir daher an der Analyse und Modellierung der Interaktion

von Mensch und Exoskelett, um das technische System an die individuellen Anforderungen des späteren Nutzers anzupassen und damit die Produktentwicklung von Unterstützungssystemen zu unterstützen.

In unserer DFG-geförderten Grundlagenforschung in Kooperation mit Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartack (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg) und Herrn Univ.-Prof.

Dr.-Ing. Robert Weidner (Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Universität Innsbruck) analysieren wir die Interaktion von Mensch und technischem System und erstellen hieraus Modelle, welche Grundlage für die Auslegung und den Betrieb der Unterstützungssysteme sind. Damit kann eine anwendungsfallabhängige Unterstützung der Anwenderin und Anwenders erreicht werden, wie bspw. die gezielte Unterstützung beim Anheben des Oberarms beim Schraubvorgang. Dadurch werden Anwenderin und Anwender nicht nur entlastet, sondern es wird gleichzeitig eine präzise Führung der Maschine ermöglicht und damit ein gutes Arbeitsergebnis sichergestellt. In einem durch die Carl-Zeiss-Stiftung geförderten Projekt erforschen wir Simulationsmodelle, welche bei der Auslegung personalisierbarer Exoskelette unterstützen und das System aus Mensch und Technik integrativ betrachten, um bspw. intelligente Regelungen für die Unterstützungssysteme auszulegen und zu testen.

Wir unterstützen Sie gerne bei der Analyse und Modellierung der Mensch-Maschine-Interaktion sowie bei der Entwicklung von passgenauen Unterstützungssystemen.



Co-Simulationsmodell zur Auslegung der Interaktion zwischen Unterstützungssystem, Power-Tool und Anwender in unterschiedlichen Anwendungsfällen

## Universitär gebildet und interdisziplinär erfahren – projektbasierte Lehrkonzepte für die Ingenieurinnen und Ingenieure von morgen

Technische Innovation entsteht an den Schnittstellen verschiedener Disziplinen.

Ingenieur\*innen von morgen müssen daher in der Lage sein, diese Schnittstellen aktiv zu gestalten. Dazu benötigen sie Kompetenzen in interdisziplinärer Teamarbeit zur Produktentwicklung. Daher entwickelt das IPEK im Rahmen einer Fellowship in der universitären Bildung ein neues Lehrkonzept, das angehenden Ingenieurinnen und Ingenieuren ver-

schiedener Fachrichtungen bereits im Bachelorstudium den Aufbau dieser Kompetenzen ermöglicht.

Den Kern des Konzepts bildet eine neue Projektarbeit für Studierende verschiedener Fachrichtungen, welche das Erleben von mechatronischer Produktentwicklung von der Idee bis zur Inbetriebnahme des entwickelten Produkts möglich macht. Auf dem Weg zum Produkt müssen die Studierenden sich selbstständig Kompetenzen in verschiedenen Rollen aneignen (Systemarchitekt\*in, Informationstechnikingenieur\*in, Testingenieur\*in, Methodeningenieur\*in, Gruppenleitung



Eindrücke aus der interdisziplinären Projektarbeit

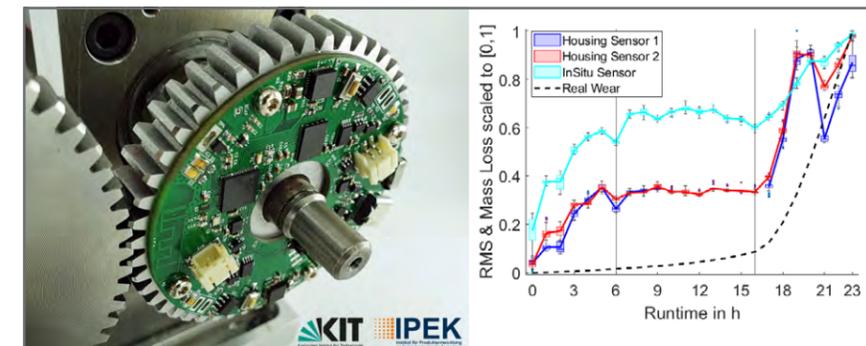
und weitere) und die Synergien der unterschiedlichen beteiligten Fachdisziplinen optimal nutzen lernen, um Schwierigkeiten im Entwicklungsprozess zu überwinden.

Mit dem innerhalb des KaLeP entstehenden Lehrkonzept leisten wir einen

wichtigen Beitrag für die Bildung der Ingenieurinnen und Ingenieure von morgen. Ein weiterer Baustein, um die Interdisziplinarität zu ermöglichen bildet die Fertigstellung des Lern- und Anwendungszentrum Mechatronik (LAZ), das Studierenden 3.000m<sup>2</sup> Lernfläche und die notwendige Infrastruktur für

die Fertigung auf 650m<sup>2</sup> bereitstellt. Im LAZ werden ab 2024 hunderte Studierende pro Jahr die Konsequenzen ihres eigenen Handelns in der interdisziplinären Projektarbeit erleben und reflektieren können, wodurch sie bereits im Studium Erfahrungen in der Produktentwicklung aufbauen.

## Sensorintegration als Schlüsselement für die Zukunft im Maschinenbau / Industrie 4.0



Am Beispiel von Kleintrieben untersuchen wir am IPEK direkt am Zahnrad integrierte Beschleunigungssensoren (links) auf Eignung zur Verschleißdetektion. Ausgewertete Messdaten der integrierten Sensorik zeigen Verschleißverlauf (rechts).

Die Integration von Sensorik in Maschinenelemente eröffnet enorme Potentiale u. a. im Bereich der Zustandsüberwachung von technischen Systemen, dem Predictive Maintenance, der Kreislaufwirtschaft und Industrie 4.0. Das prozessnahe Messen ermöglicht die Reduzierung von Unsicherheiten und somit das Generieren von qualitativ hochwertigen Daten auch an bisher schwer zugänglichen Stellen. Zusätzlich entsteht Wissen zum Zustand des individuellen Maschinenelements, was u.a. das Remanufacturing im Zuge der Kreislaufwirtschaft unterstützt. Die in-situ gemessenen Daten bilden die Basis für eine diagnosegestützte Betriebszustandsregelung, was zur Erhöhung der Lebensdauer beiträgt.

Hierzu sind Forschungsaktivitäten nötig, da zahlreiche Herausforderungen

wie bspw. Bauraumrestriktionen und harsche Umgebungsbedingungen im Inneren von Maschinen bestehen.

Für die Entwicklung von solchen sensorintegrierenden (Maschinen-) elementen forscht das IPEK an den dazu notwendigen Grundlagen. Mit interdisziplinären Entwurfsmethodiken, welche die elektro-mechanischen Schnittstellen und den Informationsaustausch berücksichtigen, lösen wir bspw. Zielkonflikte in der Sensorauswahl zwischen Messbereich, Genauigkeit und Energieverbrauch, was wir am Beispiel von kompakten Sensormodulen für Kleintriebe zeigen (siehe Abb.).

Im Rahmen eines DFG-Schwerpunktprogramms und dem InnovationsCampus Mobilität der Zukunft werden mechanisch-physische Eigenschaften von

Bauteilen und Elementen sensorisch nutzbar gemacht. Die additive Fertigung bietet hierbei das Potenzial, Sensorik in die Struktur der Elemente zu integrieren, was wir am Beispiel von im Reifenlatsch integrierter Sensorik beforschen.

Die kontinuierliche Datenerfassung in Produkten „von der Wiege bis zum Grab“ eröffnet gänzlich neue Ansätze in der Produktentstehung und im Betrieb. Eine direkte Nutzung der Sensordaten schon während der Fertigung mit dem Ziel, die Kosten zu senken und die Qualität der Produkte zu erhöhen, die Früherkennung von Schäden und adaptiver Zustandsregelung und Rekonfiguration im Betrieb sowie das Rückspielen der gewonnenen Daten in den Design- und Validierungsprozess der Nachfolgegeneration sind nur einige von vielen Beispielen unserer Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten.

Die Daten, die Sie aus ihren technischen Systemen durch Sensorintegration gewinnen können, bieten ihnen viele Vorteile. Neben einem Wettbewerbsvorteil können Sie Kosten sparen. Das IPEK steht Ihnen gerne als starker Partner in der Entwicklung und Validierung von Sensorintegrationslösungen in Ihren Produkten von Morgen zur Seite.

## Herausforderungen neuer Antriebssysteme in der Produktentstehung

Um auch zukünftig das Bedürfnis der Menschen nach Mobilität zukunftsorientiert und somit ressourcenschonend decken zu können, muss das Mobilitätssystem als Ganzes neu gedacht werden. Das Mobilitätssystem ist dabei als ein Zusammenspiel

technischer Lösungen auf den Gebieten Infrastruktur, Services sowie auch der Antriebssysteme für verschiedene Mittel der Fortbewegung systematisch zu gestalten und durch gezielte Innovationen voranzubringen. Eine wichtige Rolle spielt dabei der Wandel

der Antriebssysteme, wo früher der verbrennungsmotorische Antrieb in den meisten Lösungen zu finden war, wird sich zukünftig eine Diversifizierung der Antriebssysteme zeigen – in Abhängigkeit des Produktprofils, das den spezifischen Bedarf beschreibt.

Um der gesamtsystemischen Betrachtung in der Entwicklung sowie der Lösungsvielfalt umzugehen, ist auch die Produktentstehung neu zu denken und zu gestalten – dies betrifft die Kernbereiche der Entwicklung, der Validierung sowie der Produktion.

Die erfolgreiche Entwicklung solcher Antriebssysteme unter der Prämisse der Elektrifizierung, Effizienzsteigerung und Automatisierung erfordert somit neue Ansätze, Methoden und Werkzeuge. Gleichzeitig bieten neue Fertigungsmöglichkeiten Chancen Systeme neu zu gestalten. Beispielsweise lassen sich integrierte Designs umzusetzen bis hin zur Integration von Sensoriken zur Erfassung von Daten über den gesamten Produktentstehungsprozess. Diese können ein Schlüssel sein, über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts durch geeignete Datenauswertung zu lernen und so wiederum Wissen für die Entwicklung, Validierung und Produktion der nächsten Produktgeneration zu schaffen. Das IPEK forscht hierbei an der Verzahnung aller drei Bereiche um dadurch die Produktentstehung neuer Antriebssysteme durch Ansätze der Modularisierung in zukunftsrobuste, funktionsorientierte Baukästen unter Umsetzung des Produkt-Produktions-CoDesigns zu unterstützen.

Insbesondere die Kunden- und Marktorientierung der Lösungen entscheidet über den Erfolg oder Misserfolg eines neuen Produkts, sodass kundenwerte Vorteile sowie Skaleneffekte in der Produktentstehung relevant werden. Das IPEK widmet sich deshalb zum Beispiel der Fragestellung, wie durch eine **Modularisierung des Brennstoffzellensystems** die Nutzung des gesamten Systems oder einzelner Module in verschiedenen Anwendungsfeldern ermöglicht werden kann. Zunächst steht dabei die technische Umsetzbarkeit zur Kopplung systemfremder Szenarien im Fokus. Auf dem Gebiet der Batteriesysteme arbeitet das IPEK aktuell daran, Lösungen für **Leichtbautraktionsbatterien** zu entwickeln und diese gemeinsam mit Partnern der Industrie direkt in die Umsetzung zu bringen. Hierfür werden systemische Ansätze zur Bewertung des Leichtbaupotenzials und des Einflusses der Fertigungsverfahren entwickelt, die die Berücksichtigung von Chancen verschiedener Fertigungsverfahren

ermöglichen. Des Weiteren wird durch die Bereitstellung eines **Batteriersatzmodells** die Möglichkeit geschaffen bereits in der Entwicklung die Auswirkungen von Ereignissen zu validieren, deren Absicherung mit realen Zellen nicht möglich ist, wie z.B. das Auftreten und die Auswirkungen eines Thermal Run Away. Der Aufbau von Produktwissen früh in der Entwicklung spielt insbesondere in der ersten Generation einer Entwicklung eine zentrale Rolle. Eine Option ist – unter anderem durch neue Fertigungsmöglichkeiten und **Miniaturisierung** – die Einbringung von Sensoren in bisher im Betrieb nicht oder nur bedingt zugänglicher Subsysteme. Dies wird derzeit in der **Brennstoffzelle** umgesetzt, indem an Lösungen der Sensorintegration zur Evaluierung der Systemzustände und des Systemverhaltens in für den Betrieb mobiler Antriebssysteme relevanten Bereichen gearbeitet wird.

#### Modulares Brennstoffzellensystem für die parallele Nutzung in verschiedenen Anwendungen

Die aktuelle Elektrifizierung im Bereich der Mobilität bringt eine technologieoffene Diversifizierung von Antriebssystemen mit sich. Neben batterieelektrischen Antriebssystemen bieten so z. B. auch Brennstoffzellensysteme eine effiziente und emissionsfreie Lösungsmöglichkeit für die ressourcenschonende Mobilität von Morgen. Trotz vieler Vorteile, die Brennstoffzellen mit sich bringen, erweist sich die Platzierung dieses Produkts gerade im privaten Segment als schwierig - nicht zuletzt bedingt durch die noch teils sehr hohen Kosten bei der Produktion und Anschaffung.



Entwicklung eines Modularisierungskonzepts für die Mehrfachnutzung eines Brennstoffzellensystems in verschiedenen Anwendungen – von der Idee zum Prototyp

Aus diesem Grund werden am IPEK im Rahmen des ICM-Projekts „ModBSZ-Sys – Modulares Brennstoffzellensystem“ neue Produktentwicklungsansätze untersucht, die die Kopplung systemfremder Szenarien durch Modularisierungsansätze fokussieren. Am Beispiel eines Brennstoffzellensystems wird hierzu ein Modularisierungskonzept entwickelt, welches es dem privaten Endkunden erlaubt, das Brennstoffzellensystem aus seinem Fahrzeug durch die Entkopplung einzelner Module auch in weiteren Anwendungen wie Leichtkraftadern oder als mobilen Stromerzeuger zu nutzen. Das Zukunftsszenario der dadurch steigenden Kundenakzeptanz und Kaufbereitschaft von Brennstoffzellen im privaten Bereich spielt dabei eine wesentliche Rolle bei der Kostensenkung und Etablierung von Brennstoffzellensystemen.

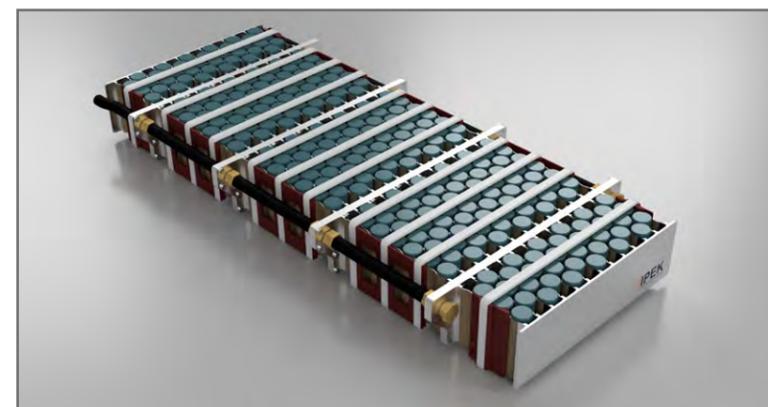
Beginnend mit einer umfangreichen Marktanalyse von möglichen Nutzungsszenarien wird ein Zielsystem des zu entwickelnden modularen Brennstoffzellensystems für die Nutzung in verschiedenen Anwendungen definiert, und so ein geeignetes Produktprofil abgeleitet. Für die anschließende Synthese des Modularisierungskonzepts werden bestehende Methoden und Ansätze des Model Based System Engineering verwendet und weiterentwickelt, um bestehende interne Schnittstellen eines nicht modularen Systems zu strukturieren und daraus externe Modulschnittstellen abzuleiten, sowie zugehörige Gestaltmerkmale zu definieren. Die anschließende Gestaltgebung für ein mechanisches Integrationskonzept der Modularisierung wird durch die über viele Jahre erworbene Erfahrung des IPEK aus dem Bereich der CAE unterstützt. Die Struktur- und

Thermosimulationen zur Optimierung der Gestalt hinsichtlich Leichtbaupotentialen und thermischer Belastung sind auf verschiedenste Branchen übertragbar.

Von unserer Expertise können auch Sie profitieren. Wir unterstützen Sie von der Konzeptionierung technischer Lösungen bis zu Prototypen. Sprechen Sie uns an!

#### Multi-Material-Design: Wie systemischer Leichtbau das richtige Material an den richtigen Ort bringt

Mit den beschlossenen Klimaschutzverordnungen des Bundes wird der Ruf nach Leichtbau über alle Branchen hinweg immer lauter. Hierbei kommen häufig Materialsubstituti-



MMD-Traktionsbatteriemodul

onen auf Komponenten- statt Systemebene zum Einsatz, wodurch Gewicht und somit CO<sup>2</sup> eingespart werden kann, jedoch nicht das volle Leichtbau-Potential genutzt wird. Ein vielversprechender Ansatz, um das Potential besser zu nutzen, ist das Multi-Material-Design (MMD), bei dem das jeweilige Material, welches sich für die Funktionserfüllung am besten eignet, an den dafür idealen Stellen im System eingesetzt wird. Die Herausforderung bei diesem Ansatz ist jedoch das notwendige Systemverständnis zu schaffen, um die Frage beantworten zu können:

*Welches Material muss in welcher Gestalt an welche Stelle eingesetzt werden und lassen sich diese Materialien miteinander kombinieren?*

Dieser Fragestellung widmet sich unsere Forschung seit vielen Jahren und die Ergebnisse werden in

verschiedensten Industrie- und Forschungsprojekten stetig evaluiert und weiterentwickelt. So konnte am Beispiel einer Traktionsbatterie ein neues Moduldesign in MMD (siehe Abbildung 2) zusammen mit einem Industriepartner entwickelt werden, welches **über 60% der Masse im Vergleich zur Referenz aus einem Material einspart**. Um dieses Moduldesign zu generieren, kamen die Ansätze des systemischen Leichtbaus zum Einsatz, um bspw. Komponenten mit zu hohem Gewicht zu identifizieren und deren Leichtbau-Potential zu analysieren. Durch die Kopplung von CFD-, Thermo- und Struktursimulationen sowie begleitenden Versuchen konnten direkt in der Designphase bereits erste Absicherungen sowie die Wechselwirkungen aus Produkt und Fertigung berücksichtigt werden.

Durch diese systemische Vorgehensweise kann nicht nur die Masse unter Gewährleistung gleicher Funktionalität reduziert werden, sondern auch die Kosten können durch geschickte Wahl der Werkstoffe gesenkt werden.

Das IPEK ist Ihr Partner, wenn auch Sie Ihre Produkte auf Systemebene hinsichtlich Leichtbau und MMD weiterentwickeln möchten. Sprechen Sie uns an!

#### Batteriersatzmodelle – der Schlüssel zur Validierung sicherheitskritischer Produkteigenschaften

Die Validierung, also die Beantwortung der Frage „Wird das richtige Produkt entwickelt“, ist nicht nur die zentrale Aktivität der Produktentstehung, sondern muss kontinuierlich über alle Phasen der Produktentstehung mitgedacht und durchgeführt

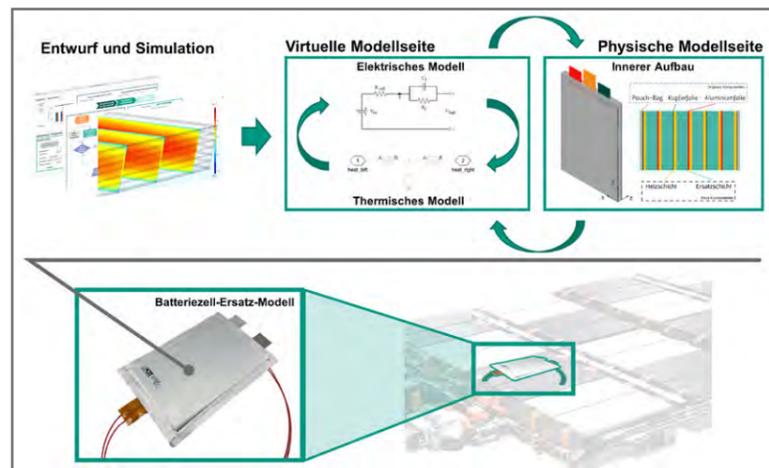
werden, denn nur so kann letzten Endes der Kundennutzen sichergestellt werden.

Durch geeignete Abstraktion und auf das Validierungsziel abgestimmte **physisch-virtuell-gemischte Modellbildung und den IPEK X-in-the-Loop Ansatz** ermöglichen wir so kürzere Entwicklungszeiten und Kostenersparnisse. Am Beispiel der Entwicklung eines Temperiersystems für Hochvolt-Traktionsbatterien tauschen wir nach dem Motto „**Lass weg, was stört**“ die echten Batteriezellen mit physischen Modellen aus, die die gleiche äußere Form haben. Im Inneren aber verzichten wir auf gefährliche chemische Verbindungen, wie sie häufig im Elektroden- und Elektrolytmaterial zu finden sind und integrieren eine elektrische Temperierung, sowie innovative Messtechnik, z. B. durch die Verwendung faseroptischer Verfahren. So ermöglichen wir **gefahrloses und hochspannungsfreies Testen**, sogar von kritischen Grenzzuständen, sowie **schnellere Validierung** durch Wegfallendes Laden, Entladen und Balancing der Zellen. Die Wärmeentwicklung innerhalb der Zellmodelle hängt nun nicht mehr vom Ladestand oder der Temperatur ab und kann frei durch die Ingenieurinnen und Ingenieure eingestellt werden, sodass z.B. durch die Verwendung des zugehörigen virtuellen elektrischen Zellmodells stationäre hohe Strombelastungen wie das **Schnellladen**, aber auch **Fahrzyklen wie der WLTP** eingepreßt werden können. Neben der Elektromobilität sind weitere Einsatzfelder wie die Validierung **handgehaltener Geräte** möglich.

Wenn Sie von unserem System-, Methoden und Prozesswissen in der durchgängigen physisch-virtuell-gemischten Validierung Ihrer Produkte profitieren und zukünftig **performantere und sicherere Produkte in kürzerer Zeit und mit weniger Kosten** entwickeln möchten, sprechen Sie uns einfach an!

#### Sensorbasierte Brennstoffzellenentwicklung – Identifikation kritischer Zustände zur Optimierung von Konstruktion und Betriebsführung

Innerhalb der neu gegründeten Nachwuchsgruppe „Sensorbasierte



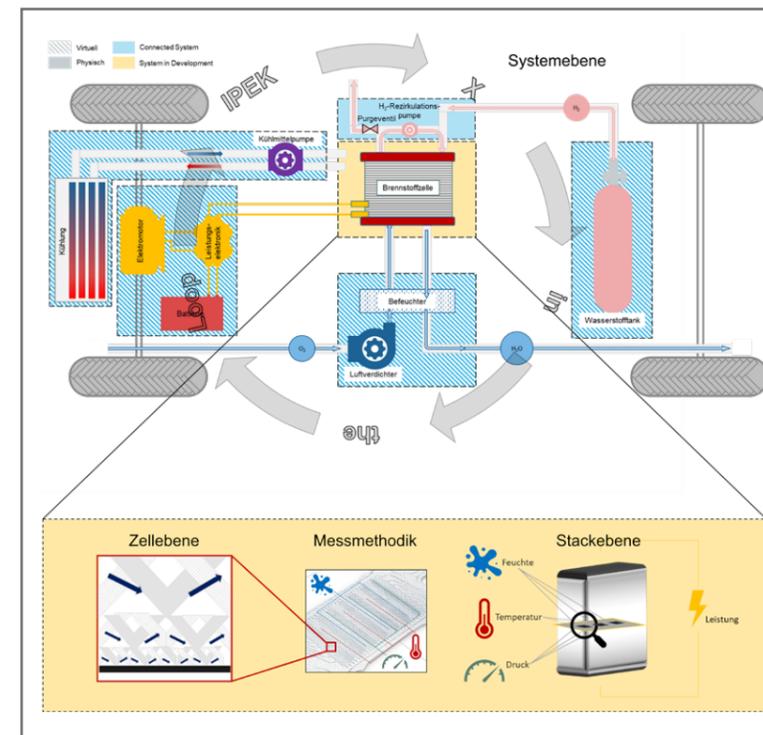
Anwendungsbeispiel eines Batteriezell-Ersatz-Modells im Modul einer Traktionsbatterie für Validierungs- und Entwicklungsaktivitäten; oben Übersicht über den Auslegungsprozess bestehend aus einer analytischen Vorauslegung, thermischen Simulationen und der Materialauswahl, sowie das daraus resultierende physisch-virtuell-gemischte Modell einer Pouchzelle aus dem Stand der Forschung

Entwicklung von H<sup>2</sup>-Brennstoffzellen (SensE2B)“ rückt die Weiterentwicklung von PEM-Brennstoffzellen durch eine gezielte Erfassung von Messdaten innerhalb der einzelnen Produktebenen in den Fokus. Die im Rahmen des Innovationscampus Mobilität der Zukunft (ICM) entstandene

Forschungsgruppe ermöglicht hierbei über ein interdisziplinäres Team die Verknüpfung der verschiedenen Entwicklungsebenen Zelle, Stack und System mit einer gekoppelten Messmethodik. Dabei werden auf jeder Ebene kritische Messgrößen gezielt über Sensoren erfasst und für die

Optimierung von Bauteilen und der Betriebsführung herangezogen. Für die Untersuchung und den Vergleich verschiedener Lösungen ist hierbei eine möglichst flexible Mess- und Prüfumgebung notwendig. Durch die Kopplung von physischen Komponenten des Brennstoffzellensystems mit virtuellen Simulationsmodellen über virtuell-physische Schnittstellen besteht durch den etablierten IPEK-X-in-the-Loop-Ansatz ein geeignetes Tool zur flexiblen Analyse und Optimierung von Bauteilen und Betriebsführungen, die stets im Zusammenhang des Gesamtsystems untersucht werden können (Abbildung 6). So kann z.B. anhand eines virtuellen Verdichters im IPEK-in-the-Loop-Framework die Auswirkungen verschiedener Produktlösungen auf die Leistungsverteilung im System, im Stack und schließlich in der einzelnen Zelle sensorbasiert ermittelt werden. Gerade in Bezug auf zukünftige Mobilitätslösungen mit Brennstoffzellenantrieb wird ein leistungsfähiges und hocheffizientes System gefordert,

welches eine lange Lebensdauer bei dynamischen Betriebsweisen ermöglicht. Je nach Anwendung werden unterschiedliche Anforderungen an Bauraum zur Integration des Brennstoffzellensystems und an die Dynamik und die Leistungsabgabe gestellt. Damit werden hohe Anforderungen an die Leistungsdichte der Brennstoffzelle und die Flexibilität in der Betriebsweise des Brennstoffzellensystems gestellt. Diese Anforderungen können nur durch die Kenntnis der genauen lokalen Zustände innerhalb der Brennstoffzelle erfüllt werden, die maßgeblich Einfluss auf die Leistungsdichte und die Lebensdauer haben. Genau diese Zustände sollen mit dem neu entwickelten System untersucht werden können. Hiermit ist schließlich eine ganzheitliche Betrachtung des Brennstoffzellensystems im Fahrzeug möglich.



Sensorbasierte Brennstoffzellenentwicklung anhand des IPEK X-in-the-Loop Ansatzes

## Preise und Auszeichnungen

### Thomas Nelius und Matthias Eisenmann mit dem Innovation Award der WiGeP ausgezeichnet

Im Rahmen der Herbsttagung der Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktentwicklung e.V. (WiGeP) wurden Herr Thomas Nelius und Herr Matthias Eisenmann am 23.09.2021 für ihre gemeinschaftlich entwickelte Methode „Design Analysis of Competing Hypotheses (Design-ACH)“ mit dem Innovation Award der Fachgruppe Methoden und Prozesse ausgezeichnet. Die WiGeP vergab 2021 zum ersten Mal die Innovation Awards zur Förderung von jungen Wissenschaftler\*innen und der Sichtbarkeit ihrer Innovationen

im gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Kontext.

Zur Entwicklung der Design-ACH wurden erstmalig Erkenntnisse zum unbewussten Denken von Konstrukteur\*innen in eine Problemlösemethode überführt. Mit der Anwendung der Methode in der Industrie wurden Problemstellungen gelöst und drohende Rückrufaktionen erfolgreich abgewendet. Die gemeinschaftliche Erforschung und Entwicklung zeigt, wie Erkenntnisse aus DFG-finanzierter Grundlagenforschung und bilateralen Entwicklungsprojekten die Basis für Innovationen in der methodischen Produktentwicklung bilden.



### ICED 2021 – IPEK-Team mit dem Reviewers' Favourite Award ausgezeichnet

Im Rahmen der „23<sup>rd</sup> International Conference on Engineering Design (ICED21)“ wurde das Autorenteam um Herr Prof. Albers, Herr Stürmlinger, Herr Revfi und Herr Prof. Behdinan für ihren Beitrag „Extended Target Weighing Approach (ETWA): Impact and risk analysis of lightweight concepts in the product-production system-co-design“ mit dem Reviewers' Favourite Award ausgezeichnet. Die von der Design Society ausgerichtete ICED stellt eine der größten und bekanntesten Konferenzen im Forschungsbereich der Produktentwicklung dar.

In der Veröffentlichung wird die am IPEK – Institut für Produktentwicklung entwickelte Methode „Erweiterter Target Weighing Ansatz (ETWA)“, mit Hilfe derer der Ingenieur/ die Ingenieurin bei der Entwicklung von ökonomischen und ökologischen Leichtbaukonstruktionen in frühen Phasen unterstützt wird, um



die Betrachtung der Einflüsse aus der Produktion erweitert.

Die Veröffentlichung können Sie über diesen QR-Code einsehen:



### R&D Management Conference 2021 – IPEK-Team mit „Best Paper in Track“ ausgezeichnet

Auf der „R&D Management Conference 2021“ wurden Herr Fynn Hellweg und Herr Dr. Matthias Behrendt für ihren Beitrag „Enabling Cost Efficient Product Design - An Interview Study on Relevant Manufacturing and Cost-Information in Early Phases of Product Development“ als bestes Paper im Track „Enabling technologies and product customisation“ ausgezeichnet. Die von der Research and Development Management Association (RADMA) ausgerichtete

Konferenz stellt seit 1980 eine der wichtigsten Konferenzen im Bereich R&D Management dar.

Die Veröffentlichung entstand im Rahmen einer Kooperation des IPEK – Institut für Produktentwicklung mit der Robert Bosch GmbH. Motiviert durch steigenden Kostendruck gewinnt die Reduzierung von Herstellkosten an Bedeutung. Eine offene Frage hierbei ist, welche Fertigungs- und Kosteninformationen in der Produktentwicklung benötigt werden. Hierzu wurde eine Interviewstudie durchgeführt, welche Bedarfe von Produktentwickelnden hinsichtlich Fertigungs- und Kosteninformationen analysiert.

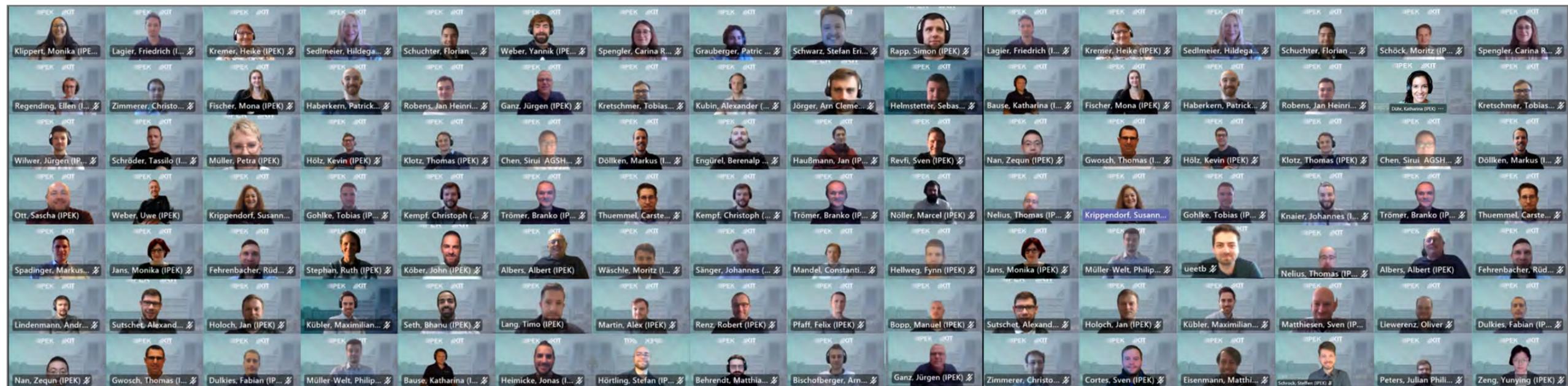
Die Veröffentlichung können Sie über diesen QR-Code einsehen:



### Dr. Martin Eisele mit dem Carl-Freudenberg-Preis ausgezeichnet

Im Rahmen der 12. Carl-Benz-Gedenkvorlesung wurde am 25. November 2021 der Carl-Freudenberg-Preis verliehen. Mit dem Preis werden bereits seit 1951 herausragende wissenschaftliche Arbeiten an der Universität Karlsruhe, dem heutigen KIT, ausgezeichnet. Zu den Preisträgern zählte in diesem Jahr mit Herrn Dr. Martin Eisele auch ein Alumnus des IPEK. Ihm wurde die Auszeichnung für seine Dissertation zum Thema „Entwicklungsbegleitende Validierungsumgebung für das Design von Kühlkonzepten bei der Batteriemodulentwicklung in der frühen Phase der Produktentwicklung“ verliehen.

Neben Herrn Eisele konnten sich zwei weitere Doktoren über eine Ehrung mit dem Carl-Freudenberg-Preis freuen, der von der Freudenberg Gruppe anlässlich ihres 100-jährigen Bestehens im Jahr 1949 gestiftet wurde und in diesem Jahr mit insgesamt 11.000 Euro dotiert war.



Ein virtuelles Teamfoto des IPEK in Zeiten der Corona-Pandemie.

## Promotionen

- **Tanautchawoot, Narucha**  
Entwicklung einer Methodik zur Unterstützung der Entscheidungsfindung auf der Grundlage heuristischer Entscheidungen in der Produktentwicklung und im Innovationsmanagement  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers
- **Reinemann, Jonas**  
Entwicklung einer Systematik zur Validierung interaktiver Produkte in Augmented-Reality-Umgebungen in der Frühen Phase im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers
- **Stegmiller, Marcus**  
Methodik zur Modellierung robuster Teilzielsysteme für Gewicht in der Automobilindustrie  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers
- **Peglow, Natalie**  
Systematik zur Bewertung von Varianten in der Angebotsphase von Common-Rail Pumpen der automobilen Zulieferindustrie auf Basis des Modells der PGE – Produktgenerationsentwicklung  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers
- **Rapp, Simon**  
Beitrag zur empirisch basierten Planung, Steuerung und methodischen Unterstützung von Variationen auf der Basis eines Referenzsystems im Modell der PGE – Produktgenerationsentwicklung  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers
- **Marthaler, Florian**  
Zukunftsorientierte Produktentwicklung - Eine Systematik zur Ableitung von generationsübergreifenden Zielsystemen zukünftiger Produktgenerationen durch strategische Vorausschau  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers
- **Wettstein, Andreas**  
Analyse und Simulation tangential-schlagender Anziehprozesse. Ein tribologisches Simulationsmodell zur Beschreibung von Schraubenanziehverfahren  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen
- **Schottmüller, Martin**  
Ein Ansatz zur dynamischen Charakterisierung und Bewertung von nichtlinearen Schwingungssystemen anhand des Beispiels Fliehkraftpendel  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers
- **Berger, Jan**  
Betrachtung der Abbildung und des Einflusses von Restsystemen bei Zweimassenschwungrad-Komponentenuntersuchungen im Kontext des OPEK-X-in-the-Loop-Ansatzes  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers
- **Eisele, Martin**  
Entwicklungsbegleitende Validierungsumgebung für das Design von Kühlkonzepten in der frühen Phase der Batteriemodulentwicklung  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers
- **Ebertz, Jona**  
Entwicklung einer Hochvolt-Traktionsbatterie als Produktgeneration 1 – Variationsinduzierte Validierungs- und Verifikationsplanung im Modell der PGE  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Albert Albers
- **Nelius, Thomas**  
Untersuchung des Confirmation Bias bei der Problemanalyse in der Konstruktion und Evaluation einer methodischen Unterstützung  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen
- **Horn, Sebastian**  
Entwicklungsmethode zur Mechanisierung von bautechnisch bewerteten Befestigungsmitteln am Beispiel eines chemischen Befestigungsmittels zur Integration eines Verschiebungssensors  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen
- **Hölz, Kevin**  
Analyse und Modellierung der Zusammenhänge zwischen der Tragfähigkeit und den Gewinnparametern von Holzschrauben durch die Entwicklung von Analysetechniken  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen

Sie haben Interesse an einem kostenlosen gedruckten Exemplar?  
Rufen Sie uns an.  
Ansprechpartner: Petra Müller (Sekretariat)  
Tel: +49 721 608-42371

### Veröffentlichungskennzahlen

■ 35 Journals ■ 72 Konferenzen (Peer-Review) ■ 36 sonstige Publikationen



**Beha, Felix**  
Auszubildender  
Technische Dienste  
September 2021



**Kern, Johannes**  
Wissenschaftlicher  
Mitarbeiter  
AST  
Dezember 2021



**Seth, Bhanu**  
Wissenschaftlicher  
Mitarbeiter  
ICM H2  
Oktober 2021



**Dulkies, Fabian**  
Mitarbeiter  
Technische Dienste  
Februar 2021



**Knaier, Johannes**  
Wissenschaftlicher  
Mitarbeiter  
ICM H2  
Mai 2021



**Spengler, Carina**  
Wissenschaftliche  
Mitarbeiterin  
MMS  
August 2021



**Farshi, Khadije**  
Wissenschaftliche  
Mitarbeiterin  
NVH/ SV  
April 2021



**Kubin, Alexander**  
Wissenschaftlicher  
Mitarbeiter EMM  
November 2020



**Stammnitz, Florian**  
Wissenschaftlicher  
Mitarbeiter  
EMM  
Oktober 2021



**Fischer, Mona**  
Auszubildende  
Administration  
September 2021



**Kübler, Maximilian**  
Wissenschaftlicher  
Mitarbeiter  
EMM  
August 2021



**Sutschet, Alexander**  
Wissenschaftlicher  
Mitarbeiter  
KTS  
Oktober 2021



**Fotler, Diana**  
Wissenschaftliche  
Mitarbeiterin  
MMS  
Februar 2021



**Liewerenz, Oliver**  
Wissenschaftlicher  
Mitarbeiter  
KM  
Dezember 2021



**Thümmel, Carsten**  
Wissenschaftlicher  
Mitarbeiter  
EMM  
November 2021



**Gohlke, Tobias**  
Wissenschaftlicher  
Mitarbeiter  
NVH/ SV  
April 2021



**Schätzle, Jonas**  
Wissenschaftlicher  
Mitarbeiter  
AST  
März 2021



**Wagenmann, Steffen**  
Wissenschaftlicher  
Mitarbeiter  
EMM  
November 2021



**Hoffmann, Sarah**  
Wissenschaftliche  
Mitarbeiterin  
ICM H2  
September 2021



**Schlegel, Michael**  
Wissenschaftlicher  
Mitarbeiter  
EMM  
November 2021



**Weber, Manfred**  
Wissenschaftlicher  
Mitarbeiter  
EMM  
November 2021



**Hörting, Stefan**  
Wissenschaftlicher  
Mitarbeiter  
AST  
September 2021



**Schöck, Moritz**  
Wissenschaftlicher  
Mitarbeiter  
EMM  
April 2021



**Zeng, Yuning**  
Wissenschaftliche  
Mitarbeiterin  
AST  
Mai 2021



**Kaeske, Jens**  
Wissenschaftlicher  
Mitarbeiter  
EMM  
Oktober 2021



**Schwarz, Stefan**  
Wissenschaftlicher  
Mitarbeiter  
EMM  
September 2021

## Kontakt



YouTube-Kanal des IPEK



### Institutsleitung

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. A. Albers  
(Sprecher)  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. S. Matthiesen  
Dipl.-Ing. S. Ott  
(Geschäftsführer)  
Telefon: +49 721 608-42371  
E-Mail: [ipek@ipek.kit.edu](mailto:ipek@ipek.kit.edu)  
[www.ipek.kit.edu](http://www.ipek.kit.edu)

### Postadresse

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
IPEK – Institut für Produktentwicklung  
Kaiserstraße 10  
76131 Karlsruhe

### Herausgeber

Präsident Professor Dr.-Ing. Holger Hanselka  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Kaiserstraße 12  
76131 Karlsruhe  
[www.kit.edu](http://www.kit.edu)  
Karlsruhe © KIT 2021

