

futur

VISION | INNOVATION | REALISIERUNG



MOBILITÄT DER ZUKUNFT

Die Räder am Rollen halten

Die Schlagzeilen zur Automobilindustrie in Deutschland verursachen derzeit vor allem Sorgenfalten. Fachleute am Fraunhofer IPK ebnen den Weg aus der Krise.

S. 16

Grün auf Blau

MAN baut Motoren für die größten Frachter der Welt – und hat damit maßgeblichen Einfluss auf die Zukunft des Schiffsbaus. Wir haben uns mit führenden Köpfen bei MAN Energy Solutions über ihre Strategie für einen nachhaltigen maritimen Verkehr unterhalten.

S. 30

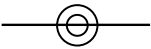
Mit Systemen digital durchstarten

Ein Passagierflug im Jahr 2050: emissionsarm, leise, sicher, bezahlbar? Die Luftfahrt steht vor enormen Herausforderungen auf dem Weg zu einer neuen Generation von Antrieben.

S. 38



Gut.
Güter.
Güterverkehr.



Produktionstechnisches Zentrum (PTZ) Berlin

KURZPROFIL Das Produktionstechnische Zentrum (PTZ) Berlin beherbergt zwei Forschungseinrichtungen: das Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb IWF der TU Berlin und das Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK. Als produktionstechnische Forschungs- und Entwicklungspartner mit ausgeprägter IT-Kompetenz sind beide Institute international gefragt. Ihre enge Kooperation im PTZ versetzt sie in die einzigartige Lage, die gesamte wissenschaftliche Innovationskette von der Grundlagenforschung über anwendungsorientierte Expertise bis hin zur Einsatzreife abdecken zu können.

Dabei unterstützen wir Unternehmen umfassend entlang der gesamten Wertschöpfung: In enger Zusammenarbeit mit Industriekunden und öffentlichen Auftraggebern entwickeln wir Systemlösungen, Einzeltechnologien und Dienstleistungen für die gesamte Prozesskette produzierender Unternehmen – von der Produktentwicklung, von der Planung und Steuerung der Maschinen und Anlagen, inklusive der Technologien für die Teilefertigung bis hin zur umfassenden Automatisierung und dem Management von Fabrikbetrieben. Zudem übertragen wir produktionstechnische Lösungen in Anwendungsgebiete außerhalb der Industrie, etwa in die Bereiche Verkehr und Sicherheit.

LIEBE LESERINNEN, LIEBE LESER,

Technik bewegt, und zwar im wahrsten Sinne des Wortes. Denn viele der bedeutendsten Erfindungen der Menschheitsgeschichte dienten der Mobilität – von der Erfindung des Rads, über die Dampfmaschine, die 1825 die erste Eisenbahn 42 Kilometer von Stockton nach Darlington zog, bis zu den vielen technischen Innovationen, die uns die Raumfahrt gebracht hat. Doch die Mobilität der Zukunft ist nicht nur ein technisches Thema, sondern auch ein gesellschaftliches. Wer hat Zugang zu welchen Fortbewegungsmitteln und zu welchem Preis? Wie vermeiden wir, dass der Verkehr zum Klimawandel beiträgt? Und wie wirkt sich der Wandel der Mobilitätslandschaft auf unser Wirtschaftssystem aus?

Unsere Forschung am PTZ Berlin zeigt, dass die Antworten auf diese Fragen nicht in der Ferne liegen, sondern bereits hier und jetzt die Weichen dafür gestellt werden. In dieser FUTUR-Ausgabe geben wir Ihnen einen Überblick über die neuesten produktionswissenschaftlichen Erkenntnisse zu den unterschiedlichsten Arten von Mobilität. Unsere Reise führt uns auf die Straße, durch die Luft, auf die Schiene und aufs Meer.

Beginnen wir mit dem Motor der deutschen Wirtschaft, der Automobilindustrie. Diese steht vor einer der wichtigsten Fragen seit Gründung der Bundesrepublik: Welche Antriebsform wird den fossilen Verbrenner ablösen? Dieser Frage widmen wir uns nicht nur in unserem Leitartikel, sondern auch in einem konstruktiven Streitgespräch zwischen Experten aus Industrie und Forschung. Selbst wenn irgendwann für die Automobilbranche das »Wohin geht die Reise« geklärt ist, stellt sich immer noch die Frage nach dem »Wie«. Welche neuen Prozesse, Werkstoffe und Technologien werden



nötig, wenn die Autos der Zukunft statt von fossilbetriebenen Otto- oder Dieselmotoren von Elektromotoren mit Batterie oder Brennstoffzelle angetrieben werden? Können E-Fuels für Verbrennungsmotoren eine Zwischenlösung sein? Um hier den Übergang zur Kreislaufwirtschaft zu ermöglichen, arbeiten unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an der Umsetzung von Batterie- und Produktpässen. Mit ihrer Hilfe sollen Lebenszyklusanalysen und Nachverfolgbarkeit verbessert werden.

Ein großes »Sorgenkind« in Bezug auf Emissionswerte ist momentan die Luftfahrt. Mithilfe durchgängiger Digitalisierung und Digitalen Zwillingen wollen unsere Forschenden Flugzeuge in Zukunft hybridelektrisch und damit nachhaltiger gestalten. Auch der Güterverkehr per Bahn und Schiff wird von der Verkehrswende nicht unberührt bleiben. Die wichtigsten hier anstehenden Änderungen präsentieren Ihnen zwei Fraunhofer-Alumni: Dr. Sascha Reinkober berichtet, wie die DB InfraGO AG das deutsche Schienennetz leistungsfähig gestalten möchte. Und Dr. Johanna Rauchenberger von MAN Energy Solutions erklärt gemeinsam mit ihrem Kollegen Dietmar Pinkernell im FUTUR-Interview, warum sich sowohl Ammoniak als auch Methanol als Schiffstreibstoff besser eignen als Wasserstoff.

Eine Lektüre, die vergeht wie im Flug, wünscht

Ihr

Eckart Uhlmann

Inhalt

08 Shortcuts

10 Forschung treibt an
Wasserstoff, Batterie, E-Fuels – welche Antriebstechnologie wird sich durchsetzen? Produktionswissenschaftliche Forschung liefert Industrie und Politik entscheidende Erkenntnisse.

16 Die Räder am Rollen halten
Die Schlagzeilen zur Automobilindustrie in Deutschland verursachen derzeit vor allem Sorgenfalten. Fachleute am Fraunhofer IPK ebnen den Weg aus der Krise.

22 Der Mix macht’s
Für die Mobilität der Zukunft sind bereits heute unterschiedliche Antriebstechnologien im Einsatz. Jede Technologie hat Vor- und Nachteile. Welche das sind und welche Technologie am Ende das Rennen machen wird, darüber diskutieren Kurt Blumenröder, CEO der T-Cell AG, Dr. Rüdiger Schwarz, Leiter Strategische Kommunikation PtX-Projekte bei EDL Anlagenbau sowie Prof. Dr. Dr. Eckart Uhlmann und Prof. Dr. Julian Polte vom Fraunhofer IPK.

Haben Roboter bald das nötige Know-how für die Demontage ...
↪ Mehr dazu ab Seite 28



... und das nötige Fingerspitzengefühl für die Montage?
↪ Mehr dazu ab Seite 44

44 Auf eigene Faust
In einem Auto sind Tausende Teile mit verschiedensten Geometrien verbaut. Die filigrane Montage können bald auch Roboter übernehmen, und das flexibel und autonom.

46 Fahren und Bauen – zwischen Anspruch und Machbarem
Die Schiene gilt als einer der klimafreundlichsten Verkehrsträger. Trotzdem steht sie in Deutschland häufig in der Kritik. Ein Gastbeitrag von Dr. Sascha Reinkober, Leiter Großmaschineneinsatz bei der DB InfraGO AG.

48 PTK 2025

49 Mehr Können

50 Impressum



»Überwiegend voll-elektrische Fahrzeuge sollten schon das Ziel sein, aber nicht heute und auch nicht morgen.«

Fraunhofer IPK-Institutsleiter Prof. Uhlmanns Einschätzung zu Antriebstechnologien der Zukunft.
↪ Mehr dazu ab Seite 22

28 Demontage durchgehend digitalisiert
Mehr Kreislaufwirtschaft, fordert die Politik. Voraussetzung dafür ist eine digitalisierte, automatisierte Altteil-Demontage. Doch für innovative KI-unterstützte Lösungen fehlt eine solide Datengrundlage.

30 Grün auf Blau
80 bis 90 Prozent aller Güter weltweit werden mit Lastschiffen transportiert. MAN baut Motoren für die größten Frachter der Welt – und hat damit maßgeblichen Einfluss auf die Zukunft des Schiffsbaus. Wir haben uns mit Dr. Johanna Rauchenberger, Head of Group Quality & HSE, und Dietmar Pinkernell, Head of Sustainability & Product Safety bei MAN Energy Solutions über ihre Strategie für einen nachhaltigen maritimen Verkehr unterhalten.

»Seine Stärken spielt der Batteriepass am Ende der Nutzungsdauer einer Batterie aus – bei Sammlung, Wiederverwertung und Recycling.«

Mehr über Datenökosysteme als Basis für Batteriepässe
↪ ab Seite 40

36 Batteriegehäuse aus Stahl: Alu-Alternative?
Stahl als nachhaltiger Leichtbauwerkstoff? Was auf den ersten Blick einen Widerspruch darstellt, könnte die Bauweise von Batteriegehäusen für Elektrofahrzeuge revolutionieren und damit E-Mobilität noch umweltfreundlicher machen.

38 Mit Systemen digital durchstarten
Ein Passagierflug im Jahr 2050: emissionsarm, leise, sicher, bezahlbar? Die Luftfahrt steht vor enormen Herausforderungen auf dem Weg zu einer neuen Generation von Antrieben.

40 Vom Ende gedacht
Pflichtaufgabe oder Chance für mehr Nachhaltigkeit? Ein Plädoyer für Batteriepässe als wertschöpfende Anwendung eines Datenökosystems



Unser Alumnus Dr. Sascha Reinkober berichtet über seine Arbeit bei der DB InfraGO AG.
↪ Mehr dazu ab Seite 46

IM DETAIL



Was hier gescannt wird, erfahren Sie in unserem Artikel »Auf eigene Faust«
↪ ab Seite 44.

DIE REISE RICHTUNG UMSETZUNG

Ab Februar 2027 gilt in der EU verpflichtend der Batteriepass mit Informationen über Zusammensetzung, CO₂-Fußabdruck, Leistung und Zirkularität. Das im April 2025 gestartete Projekt »BatteryPass-Ready« geht nun an die Umsetzung: Eine Testumgebung soll es KMU und anderen Anwendern aus der Industrie ermöglichen, Batteriepässe in der Praxis zu erproben – und damit ihre Einführung entlang der gesamten Wertschöpfungskette erleichtern. Gleichzeitig sollen auch Handlungsleitfäden für Politik und Unternehmen entstehen.



↪ **Weitere Informationen zu BatteryPass-Ready auf**
www.ipk.fraunhofer.de/battery-pass-ready

Mehr zu den Stärken des Batteriepasses
↪ ab Seite 41.

DIE ZAHL DER AUSGABE

41 000 km

müsste ein mit Wasserstoff-Brennstoffzellen betriebenes Auto fahren, um den CO₂-Ausstoß bei der Herstellung gegenüber einem Benziner beim aktuellen Strommix auszugleichen – also einmal um die ganze Welt.

↪ **Wie Forschung dabei hilft, die Herausforderungen der Wasserstoffantriebe zu bewältigen**, erfahren Sie ab Seite 12.

GUT GESAGT

»Wir werden einen Mix aus unterschiedlichen Antriebstechnologien haben, die wir auch von ›Cradle to Grave‹, von der Wiege bis zur Bahre denken und umsetzen müssen, wenn wir eine CO₂-neutrale Mobilität erreichen wollen.«

Kurt Blumenröder, CEO der T-Cell AG, im Gespräch mit Dr. Rüdiger Schwarz, Leiter Strategische Kommunikation PtX-Projekte bei EDL Anlagenbau, Prof. Dr. Dr. Eckart Uhlmann und Prof. Dr. Julian Polte
↪ Mehr dazu ab Seite 22



SCHNELLERE PRODUKTENTWICKLUNG DANK KI

Der Einsatz von KI-Modellen kann zeitaufwendige Aufgaben in der Produktentwicklung wesentlich erleichtern. Das gilt auch für die Automobilindustrie: Ingenieurinnen und Ingenieure müssen oft zahlreiche Designanforderungen, eine Vielzahl an Parametern und begrenzte Einbau-räume berücksichtigen. In einer Zusammenarbeit zwischen Fraunhofer IPK und BASF Polyurethanes GmbH wurde daher ein neuronales Netz entwickelt, das mögliche Geometrien von für den Fahrkomfort wichtigen Zusatzfedern für Stoßdämpfer vorhersagen kann.



↪ **Weitere Informationen zur Case Study unter**
s.fhg.de/case-study-basf

Forschung treibt an

Wasserstoff, Batterie, E-Fuels – welche Antriebstechnologie wird sich durchsetzen? Produktionswissenschaftliche Forschung liefert Industrie und Politik entscheidende Erkenntnisse.

Die Automobilindustrie in Deutschland 2024

613
Milliarden Euro Umsatz

> 770 000
Beschäftigte

Quellen: Statista, Statistisches Bundesamt

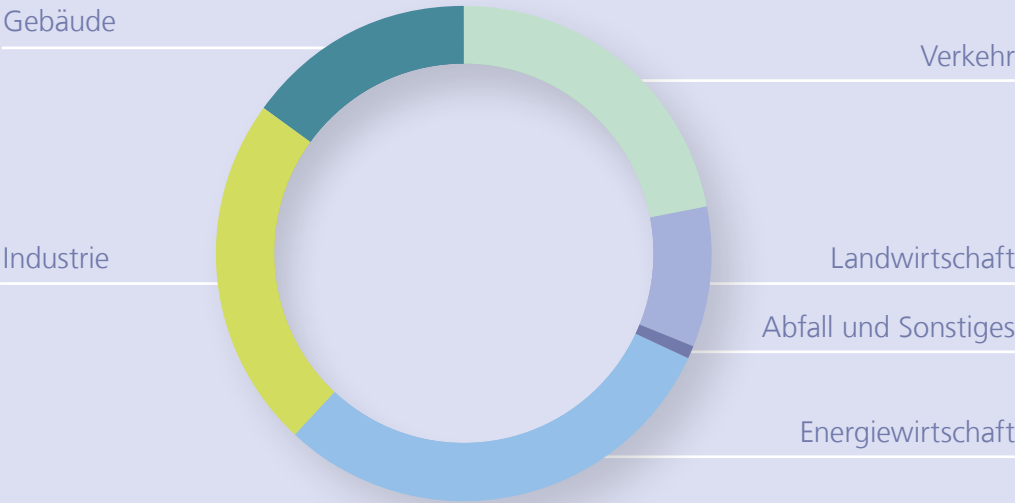
Die Automobilindustrie hierzulande ist »der mit Abstand bedeutendste Industriezweig in Deutschland«, so das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Das belegen auch Angaben von Statista, nach denen die Branche einen Umsatz von gut 613 Milliarden Euro und über 770 000 Beschäftigte vorzuweisen hat. Durch verschiedene globale, europäische und nationale Entwicklungen gerät dieser sprichwörtliche Motor der deutschen Wirtschaft jedoch zunehmend unter Druck.

So zum Beispiel durch verschärfte regulatorische Rahmenbedingungen: Der Europäische Green Deal verfolgt das Ziel, Europa bis 2050 zum ersten klimaneutralen Kontinent zu machen. Auf dem Weg dorthin sollen die Netto-Treibhausgasemissionen bis 2030 gegenüber 1990 um mehr als die Hälfte reduziert werden. Das Europäische Klimagesetz schafft einen rechtsverbindlichen Rahmen für die EU-Klimaneutralität bis 2050, während das deutsche Klimaschutzgesetz verbindliche Ziele zur Reduktion von Treibhausgasemissionen in Deutschland festlegt. Bis 2040 sollen dabei 88 Prozent der Emissionen im Vergleich zu 1990 eingespart werden.

Für über ein Fünftel der in Deutschland ausgestoßenen Treibhausgase (THG) war im Jahr 2023 der Verkehr verantwortlich. Er bietet somit einen bedeutenden Hebel zur Emissionsreduktion. Politik, Gesetzgebung und Gesellschaft geben deshalb Rahmenbedingungen für die Transformationen der Automobilindustrie vor.

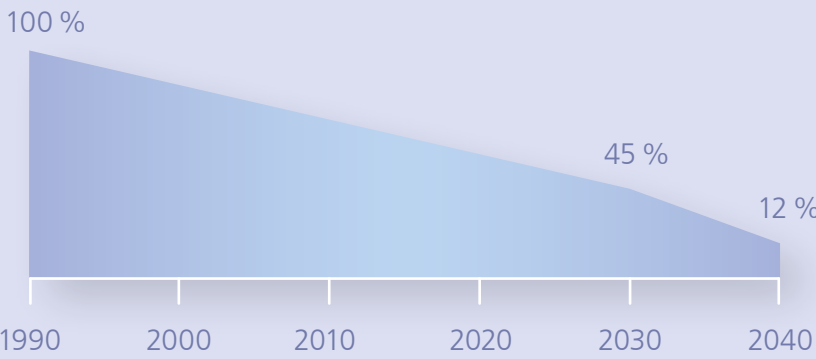
Klar ist: Der klassische Benziner hat bald ausgedient. Welche Antriebstechnologie sich aber an seiner Stelle durchsetzen wird, ist weniger eindeutig. Batteriebetriebene E-Fahrzeuge bekommen in der medialen Öffentlichkeit gemeinhin die meiste Aufmerksamkeit und sind unter Berücksichtigung der aktuell verfügbaren Ressourcen momentan auch die sinnvollste Technologie. In Wissenschaft und Forschung werden jedoch bereits die Weiterentwicklung und Integration von Wasserstofftechnologien diskutiert. Welche Szenarien und Perspektiven gibt es, und was bedeuten diese jeweils für die Automobil- und Zulieferindustrie in Deutschland?

Rolle des Verkehrs bei den Treibhausgasemissionen in Deutschland



Quelle: Umweltbundesamt

Geplante Reduktion von Treibhausgasemissionen in Deutschland



Quellen: Europäischer Green Deal, Klimaschutzgesetz

DER MARKT REAGIERT

Deutsche Unternehmen wie BMW und Volkswagen verfolgen unterschiedliche Strategien. BMW plant in Kooperation mit Toyota, bis 2028 das erste Wasserstoffauto in Serie auf den Markt zu bringen, während Volkswagen bis 2030 einen Anteil von 70 Prozent E-Autos anstrebt. Diese Trends zeigen, dass die Hersteller ihren Fokus eindeutig auf nachhaltige alternative Konzepte legen, um den regulatorischen und gesellschaftlichen Anforderungen gerecht zu werden. Sie alle treibt die Frage um, wie sich die unterschiedlichen Ansätze wissenschaftlich untermauern lassen. Oder anders gesagt: Auf welche Technologien sollten sie setzen? Verschiedene Antriebstechnologien sind unterschiedlich effizient. Gemessen wird das an ihrem Wirkungsgrad, der zentral ist für die Reduzierung der CO₂-Emissionen.

Unter den alternativen Antriebsformen besitzen batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEV) insgesamt den höchsten Wirkungsgrad. In der Produktion verursachen sie dagegen einen erheblichen CO₂-Ausstoß, vor allem durch die verwendeten Werkstoffe wie beispielsweise Cobalt oder seltene Erden. Bei der Herstellung von konventionell angetriebenen Fahrzeugen wird aktuell 39 Prozent weniger CO₂ im Vergleich zu batterieelektrischen Fahrzeugen freigesetzt.

Betrachtet man aber den gesamten Lebenszyklus eines Fahrzeugs, spielt über alle Antriebsformen hinweg der Betrieb eine größere Rolle als die Produktion. Bei E-Fuels, Wasserstoff und BEV werden die Emissionen durch den Strommix bestimmt. Aktuell bezieht Deutschland seinen Strom zu ca. 55 Prozent aus erneuerbaren Quellen. Die verbleibenden 45 Prozent aus überwiegend fossilen Quellen ziehen besonders bei Wasserstoff-angetriebenen Fahrzeugen aufgrund der geringen Wirkungsgrade einen erheblichen CO₂-Ausstoß nach sich. Selbst bei einer komplett klimaneutralen Stromerzeugung müsste ein Auto mit einem Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb insgesamt 41 000 km fahren, um den CO₂-Ausstoß bei der Herstellung gegenüber einem Benzinern auszugleichen – also einmal um die ganze Welt. Die Wasserstoffdirektverbrennung kann hier eine gute Alternative bieten, auch wenn der Wirkungsgrad etwas schlechter ist.

DIE KRUX MIT DEM WASSERSTOFF

Wasserstoff bietet gegenüber konventionellen Kraftstoffen wie Benzin oder Diesel einige Vorteile, ist aber auch mit Herausforderungen verbunden:

- Auf die Masse bezogen besitzt Wasserstoff den dreifachen Energiegehalt im Vergleich zu Benzin, allerdings beträgt aufgrund seiner geringeren Dichte der Energiegehalt pro Volumen nur ein Drittel. Bei einer Speicherung in Gastanks sind somit für eine gleiche Reichweite größere Tanks notwendig.
- Wasserstoff bietet sehr weite Zündgrenzen, was eine gute Teillasteffizienz ermöglicht, Wasserstoff in der Handhabung aber auch gefährlich macht.
- Die Zündenergie ist deutlich niedriger als bei anderen Ottokraftstoffen. Das macht Wasserstoff sehr empfindlich gegenüber ungewollter Vorentflammung.
- Fehlende Schmierung durch den Kraftstoff ist ein weiterer Nachteil gegenüber Kraftstoffen auf Kohlenwasserstoffbasis.



Selbst bei einer komplett klimaneutralen Stromerzeugung müsste ein Auto mit einem Wasserstoff-Brennstoffzellenantrieb insgesamt 41 000 km fahren, um den CO₂-Ausstoß bei der Herstellung gegenüber einem Benzinern auszugleichen – also einmal um die ganze Welt.

Wie umweltschonend sind unterschiedliche Antriebsarten wirklich?

Die Grafik zeigt den CO₂-Ausstoß bei Herstellung und Betrieb von Fahrzeugen verschiedener Antriebsarten in Gramm pro Kilometer. Die Berechnung des Wirkungsgrades geht (in den Fällen von BEV und Wasserstoff von elektrischer Energie, im Falle von Benzin von chemischer Energie des Benzins) bis zur Antriebsleistung im Fahrzeug.



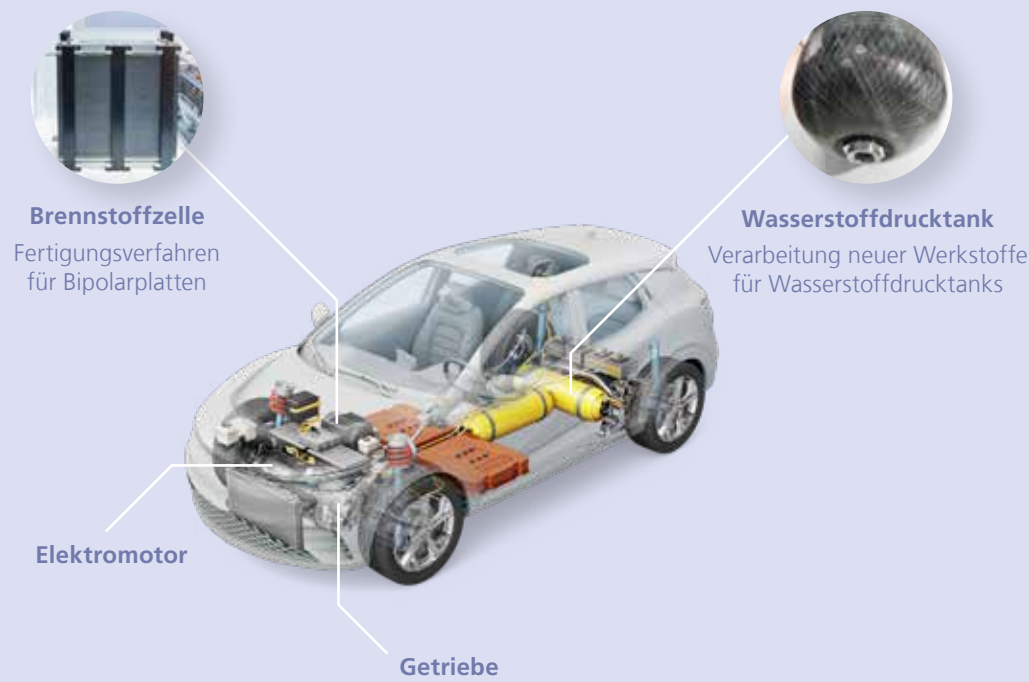
¹ Unter Berücksichtigung des deutschen Strommix’ Stand 2023, bei einer Fahrleistung von 150 000 km
² Anteil entfällt bei einer 100 % CO₂-neutralen Stromerzeugung
Datenquellen: ADAC, Electricity Maps, E.ON Energy Research Center, EPRS, Hydrogen Energy, IGEMBB, KfA, Öko-Institut, ORF, Statista, TÜV NORD, Umweltbundesamt

Wasserstoff in seiner ganzen Vielfalt

		CO ₂ -Emissionen pro MJ H ₂ ¹	
Farbe	Erzeugung	Heutiges Energiesystem ²	Zukünftiges Energiesystem ³
Grauer Wasserstoff	Mithilfe von Wasserdampf aus fossilen Brennstoffen wie Erdgas, Kohle oder Öl (Dampfreforming)	134 g	54 g
Blauer Wasserstoff	Wie grauer Wasserstoff, jedoch wird das entstandene CO ₂ unterirdisch gespeichert (CCS-Technik)	103 g	16 g
Türkiser Wasserstoff	Unter Hochtemperatureinwirkung (Pyrolyse) aus Methan	108 g	17 g
Grüner Wasserstoff	Durch Elektrolyse von Wasser	13 g	0 g

¹ Die Emissionswerte werden in g CO₂-Äq. pro MJ H₂ oder »Gramm CO₂-Äquivalente pro Megajoule Wasserstoff« angegeben
² mit dem Strommix der aktuellen allgemeinen Versorgung
³ mit Strom aus erneuerbaren Energiequellen

Ausgewählte FuE-Verbesserungspotenziale
beim Brennstoffzellenantrieb



Ausgewählte FuE-Verbesserungspotenziale
bei der Wasserstoffdirektverbrennung



Um diesen Herausforderungen zu begegnen, braucht es wissenschaftliche Lösungen: Produktions- und materialwissenschaftliche Forschung hat vielversprechende Verbesserungspotenziale an verschiedenen Stellen in Brennstoffzellenfahrzeugen (FCEV) identifiziert und arbeitet daran, diese zu heben.

Ein großes Potenzial bietet die Fertigung der Wasserstofftanks aus faserverstärkten Kunststoffen (CFK), die hohe Festigkeit bei gleichzeitig geringem Gewicht bieten. CFK-Tanks ermöglichen eine Gewichtseinsparung von bis zu 72 Prozent im Vergleich zu metallischen Tanks. Doch sie verursachen hohe CO₂-Emissionen in der Produktion – etwa 2210 kg CO₂e für 350-bar-Tanks und 2670 kg CO₂e für 700-bar-Tanks. Fortschritte in der Tankproduktion sind deshalb entscheidend, um die Wasserstoff-Brennstoffzelle als emissionsarme Mobilitätslösung wettbewerbsfähig zu machen.

Die Brennstoffzelle selbst besteht aus bis zu 200 Einzelkomponenten, in deren Zentrum die Bipolarplatten stehen, durch die der Wasserstoff geleitet wird. Anstatt sie einzeln zu fräsen, werden diese Platten zunehmend aus metallischen Materialien wie Edelstahl, Titan oder Aluminium in umformenden Prozessen in Serie gefertigt, was ihre Produktionskosten senkt und die Haltbarkeit verbessert. Optimierte Kanalstrukturen innerhalb der Bipolarplatten ermöglichen eine verbesserte Gasführung und erhöhen die Effizienz der Brennstoffzellen. Die direkte Umwandlung von chemischer in elektrische Energie ohne thermische Verluste führt zu einem Wirkungsgrad von bis zu 60 Prozent. Dadurch wird die Brennstoffzelle zu einer effizienten und umweltfreundlichen Antriebslösung.

WARUM ÜBER UMWEGE, WENN ES AUCH DIREKT GEHT?

Die Wasserstoffdirektverbrennung ist eine vielversprechende Brückentechnologie, die eine einfachere Integration in bestehende Verbrennungsmotoren ermöglicht. Somit ist sie weniger disruptiv als andere alternative Antriebstechnologien, da bestehende Motoren mit moderaten Anpassungen genutzt werden können.

Da die Wasserstoffflammen bis an die Zylinderwände brennen, sind die keramischen Beschichtungen der Kolben entscheidend, um thermische Belastungen und Verschleiß zu minimieren. Weil Wasserstoff hauptsächlich zu Wasserdampf verbrennt, hat diese Art der Verbrennung CO₂-freie Abgase sowie niedrigere Emissionen von Stickoxiden (NOx) zur Folge.

Die Einspritzung erfolgt über speziell entwickelte Injektoren, während das Ventilsystem durch eine hochgenaue Ventilsitzfertigung maximale Dichtheit und Effizienz gewährleisten muss. Um die NOx-Emissionen weiter zu reduzieren, sind zusätzliche Maßnahmen wie Abmagerung und eine gekühlte Abgasrückführung unter Hochdruck erforderlich.

Es gibt also im Bereich der Wasserstoffdirektverbrennung noch viel Forschungsbedarf, insgesamt stellt sie aber eine praktikable Lösung dar, um den Übergang zu emissionsfreien Antrieben zu erleichtern und bestehende Infrastrukturen zu nutzen. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am Fraunhofer IPK erforschen heute neue Technologien, um den morgigen Herausforderungen des Einsatzes von Wasserstoff als Energiequelle zu begegnen. Dabei berücksichtigen sie nicht nur die unmittelbar notwendigen neuen Komponenten, sondern auch die Implikationen entlang des gesamten Lebenszyklus eines Fahrzeugs. ♦

72 %
an Gewicht können bei CFK- anstelle von Metall-Tanks eingespart werden.

200
Einzelkomponenten können in einer Brennstoffzelle verbaut sein.

60 %
beträgt ihr Wirkungsgrad.

Quellen: CIKONI GmbH, TÜV Nord

IHRE ANSPRECHPERSONEN
Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Eckart Uhlmann
+49 30 39006-100
eckart.uhlmann@ipk.fraunhofer.de
Prof. Dr.-Ing. Julian Polte
+49 30 39006-433
julian.polte@ipk.fraunhofer.de

Die Räder am Rollen halten

Die Schlagzeilen zur Automobilindustrie in Deutschland verursachen derzeit vor allem Sorgenfalten. Fachleute am Fraunhofer IPK ebnen den Weg aus der Krise.

Die deutsche Automobilbranche schwächelt, und das ganze Land spürt es. Von Stuttgart bis Wolfsburg sorgen sich Angestellte von Automobilherstellern und Zulieferbetrieben um ihre Jobs, Entwicklungsingenieure und Konstrukteurinnen suchen den Weg in andere Branchen. Die Gründe für die Krise sind vielschichtig. Die Transformation im Antriebsstrang kommt in Deutschland schleppender voran als in anderen Ländern. Im Premiumsegment, wo deutsche Fahrzeughersteller bislang auf den internationalen Märkten führend waren, formiert sich starke Konkurrenz im Ausland. Diese drückt die Exportquote ebenso wie Strafzölle auf Autoimporte. Das ist problematisch für eine Branche, die drei Viertel ihrer Erzeugnisse ins Ausland verkauft.

Die sinkenden Absatzzahlen haben massiven Einfluss auf die Auslastung der Werke am Standort Deutschland. Hohe Lohn- und Lohnnebenkosten sowie hohe Energiekosten machen diese unwirtschaftlich, wenn sie – wie aktuell nicht unüblich – nur etwa zwei Drittel ihrer Kapazität produzieren. Da wun-

dert es nicht, dass die Schieflage der Branche auch den Bundestag beschäftigt. Sachverständige im Wirtschaftsausschuss äußerten sich zuletzt mehr als besorgt über die Situation der deutschen Automobilhersteller und -zulieferer. Die Präsidentin des Verbands der Automobilindustrie (VDA), Hildegard Müller, sprach in einer Anhörung Mitte November 2024 von einer »äußerst drängenden Situation« in der Automobilwirtschaft.

DIE TRANSFORMATION ANKURBELN

Ein paar Zahlen untermauern die Dringlichkeit. Die Branche ist gemessen am Umsatz die stärkste des Landes. In Ostdeutschland sind nach einer aktuellen Studie 25 Prozent der Industriearbeitsplätze mittel- oder unmittelbar von der Fahrzeugindustrie abhängig. Argumente genug, die Branche umfassend zu reformieren und auf zukunftsfähige Füße zu stellen. Die Voraussetzungen dafür sind besser, als die aktuelle Lage es vermuten lässt. Die Digitalisierung revolutioniert die Produktentwicklung und Produktionsprozesse, indem sie automatisierte Fertigung, Datenanalyse und Künstliche Intelligenz integriert, um Effizienz und Flexibilität zu steigern. Auch Mobilitätskonzepte und Kundenbedarfe wandeln sich: Neben Autos produzieren Fahrzeugfirmen mittlerweile eine Vielzahl neuer Klein- und Kleinstfahrzeuge mit Elektromotor – vom Scooter über E-Bikes bis zu E-Rollern. Und das alles in individualisierten Varianten von zum Teil Losgröße 1. Damit ändern sich auch Produktportfolios und Produktionsprinzipien in den Zulieferbetrieben.

Gleichzeitig wies Robert Drewnicki vom Transformationsnetzwerk für die Fahrzeug- und Zulieferindustrie in der Region Berlin-Brandenburg (ReTraNetz-BB) im Wirtschaftsausschuss darauf hin, dass mehr als doppelt so viele Forschungs- und Entwicklungsgelder in die ostdeutschen Arbeitsplätze im Fahrzeugbereich fließen wie in andere Arbeitsplätze. Das ist eine solide

Die Voraussetzungen, um die deutsche Fahrzeugbranche umfassend zu reformieren und auf zukunftsfähige Füße zu stellen sind besser, als die aktuelle Lage es vermuten lässt.

Basis, um den Wirtschaftszweig neu zu erfinden, ihn schneller, agiler, kreativer und effizienter zu machen.

Wo es gilt, einen produzierenden Industriezweig zu transformieren, ist Fraunhofer als Takt- und Richtungsgeber federführend dabei. Expertinnen und Experten aus dem Fraunhofer IPK sind im ReTraNetz-BB-Projekt aktiv und haben das Ohr eng an der lokalen Industrie. »Die Betriebe nennen Entwicklungsbedarfe in diversen Bereichen«, berichtet Professor Julian Polte, Leiter des Geschäftsfelds Produktionssysteme. »Da werden Antworten auf die Energiekrise gefordert, denn diese ist ein Killer für die Marge. Aber auch digitale, KI-unterstützte Assistenzsysteme sind ein großes Thema, genauso wie Ökosysteme für heutige und potenzielle Wertschöpfungsketten, die ganz anders aussehen können, als die Branche das bisher gewohnt ist.« Polte ruft Unternehmen, die ihre Transformation erfolgreich gestalten möchten, auf, mit ihm und seinem Team in Kontakt zu treten. Im November 2024 wurde am Institut ein Reallabor eröffnet,



das die Fahrzeug- und Zulieferindustrie in der Region Berlin-Brandenburg bei der Transformation zu einer umweltfreundlichen und effizienteren Fahrzeugproduktion unterstützen soll. Zudem soll es eine wichtige Basis für künftige Forschungsprojekte sowie die universitäre Lehre und die Aus- und Weiterbildung von Fachkräften werden.

AGENTEN SORGEN FÜR DURCHBLICK

Die Themen, die das Institut rund um das ReTraNetz-BB und weitere Forschungsprojekte mit Bezug zur Automobilwirtschaft betrachtet, sind vielfältig. Sie beginnen beim Blick auf das »große Ganze« in der Produktion. »Wenn es darum geht, Fertigung effizienter zu machen, ist Transparenz der richtige Ausgangspunkt«, resümiert Nikolaos Koutrakis, der die ReTraNetz-BB-Aktivitäten am Fraunhofer IPK leitet. Ein vielversprechender Ansatz besteht in diesem Kontext in der Schaffung eines echtzeitnahen Zustandsabbilds von Ressourcen und Prozessen. Auf seiner Basis lassen sich der aktuelle Produktionsstatus übersichtlich darstellen und die Kommunikation zwischen den verschiedenen Akteuren auf dem Shopfloor umfassend optimieren.

Voraussetzung für ein ganzheitliches Zustandsabbild ist die digitale Abbildung von Maschinen und Prozessen. Eine Lösung aus dem Fraunhofer IPK bildet dazu jede Entität in der Produktion – Produktionsmaschinen, Materialien, Lagerbestände, sogar Personen – als Agent ab. Die Agenten können miteinander kommunizieren und Entscheidungen treffen. Sie nutzen Simulation, um Zielkonflikte und potenzielle Probleme zu identifizieren und frühzeitig geeignete Gegenmaßnahmen einzuleiten. »In einer Produktion eingesetzt, können die Agenten die Steuerung und Überwachung von Komponenten übernehmen und ermöglichen eine flexible Planung und Umorganisation von Aufgaben in Echtzeit«, fasst Koutrakis zusammen. Die automatisierte Entscheidungsfindung

erfolgt in weniger als einer Minute, was eine schnelle Reaktion auf Veränderungen im Produktionsablauf ermöglicht. Das erhöht die Agilität der Produktion und ermöglicht eine Verbesserung der Kapazitätsauslastung.

DIGITALE ASSISTENTEN UNTERSTÜTZEN SHOPFLOOR-PERSONAL

Darüber hinaus ermöglichen Agenten eine hocheffiziente Unterstützung von Mitarbeitenden auf dem Shopfloor. Indem sie komplexe Informationen in Echtzeit bereitstellen und die Interaktion zwischen Menschen und



Bild:
Ob beim Einrichten einer Anlage oder beim Starten von Bearbeitungsvorgängen – smarte Assistenzsysteme bieten Schritt-für-Schritt Handlungshilfen.

Im November 2024 wurde am Fraunhofer IPK ein Reallabor eröffnet, das die Fahrzeug- und Zulieferindustrie in der Region Berlin-Brandenburg bei der Transformation zu einer umweltfreundlicheren und effizienteren Fahrzeugproduktion unterstützen soll.

Maschinen optimieren, adressieren digitale Assistenzsysteme eine Vielzahl von Herausforderungen in der operativen Fertigung. Sie helfen, Arbeitsabläufe effizienter zu gestalten und unterstützen Mitarbeitende bei der Durchführung von Prozessen. Sie reduzieren die Zeit, die mit der Suche nach relevanten Daten und Anleitungen verbracht wird und helfen, Dokumentationspflichten zu erfüllen. Sie steigern die Sicherheit und Qualität in der Produktion, indem sie eine fehlerfreie Ausführung von Arbeitsschritten unterstützen. Und das unabhängig von Sprachkenntnissen und vom Erfahrungslevel

der Mitarbeitenden, was eine bessere Integration ungeschulten oder nicht-deutschsprachigen Personals ermöglicht.

»Das mit den Sprachen klingt trivial, ist aber eine zentrale Herausforderung in der Produktion«, berichtet Koutrakis. In der Region Berlin-Brandenburg werden auf dem Shopfloor der Automotive-Zulieferbetriebe bis zu neun verschiedenen Sprachen gesprochen. Das ist nicht nur für die Kommunikation während der Arbeit, sondern auch für den Wissenstransfer zwischen Mitarbeitenden eine enorme Hürde.

Digitale Assistenten bieten auf diesem Gebiet enormes Potenzial. Ein Beispiel: Eine Mitarbeiterin aus dem Ausland soll einen Wartungsprozess an einer Anlage vornehmen und dokumentieren. Über ein mobiles Endgerät fordert sie in ihrer Muttersprache Informationen zu bestimmten Aspekten des letzten Wartungsvorgangs an der Anlage an. Der digitale Assistent findet die Informationen in der gespeicherten Dokumentation und liefert sie in der Muttersprache der Mitarbeiterin zurück. Diese nimmt die Wartung vor, dokumentiert sie in ihrer Muttersprache, der Assistent überträgt die Dokumentation ins Deutsche und legt sie zentral ab.

Und das ist noch lange nicht das sprichwörtliche »Ende der Fahnenstange«. Auf die Spitze getrieben würde der digitale Assistent die Dokumentation automatisch durchführen, während er die Fachkraft durch den Wartungsprozess leitet – und das in einheitlichem Stil und Wording. Insgesamt können digitale Assistenzsysteme nicht-wertschöpfende Tätigkeiten wie Informationssuche und Dokumentation massiv reduzieren, was die Wirtschaftlichkeit entscheidend erhöht. Außerdem eröffnen sie die Option, Menschen mit geringem Einarbeitungsaufwand flexibel zwischen Branchen hin und her zu schicken und damit auf Nachfrage- und Auslastungssituation zu reagieren.

MONITORING FÜR EFFIZIENTEREN ENERGIEEINSATZ

Dass Energiemonitoring für Automotive-Unternehmen eine große Relevanz hat, ist nicht verwunderlich. Die Energiepreise in Deutschland zählen zu den höchsten weltweit und sind ein maßgeblicher Bremser für die Wirtschaftlichkeit des Industriestandorts. Ein guter Grund, den Stromverbrauch einer Industrieanlage genau zu überwachen. Und nicht der einzige: Die Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) fordert von der Industrie, den Energiebedarf von Bauteilen nachzuweisen, was der ohnehin

schon belasteten Automobilbranche hohen Zusatzaufwand bereitet. Um diese Anforderung zu erfüllen, müssen zahlreiche Einzelverbraucher und Fertigungsschritte in der Prozesskette berücksichtigt werden.

Eine effektive Lösung besteht darin, sowohl alte als auch neue Fertigungsanlagen mit einem Energiemesssystem auszustatten, das den Energieverbrauch einzelner Komponenten präzise erfasst. Auf dieser Basis wird eine detaillierte Analyse des Energieverbrauchs möglich. Damit können Unternehmen nicht nur gesetzlichen Anforderungen nachkommen, sondern auch gezielte Maßnahmen zur Optimierung des Energieverbrauchs ergreifen – über die gesamte Prozesskette hinweg und wahlweise auf Bauteil-, Verfahrens- und Prozessebene.

DIGITAL UNTERSTÜTZTER BETRIEBSMITTELBAU

Apropos Bauteil: Nicht jedes Gerät, das in einem Fertigungsbetrieb gebaut wird, geht anschließend in den Verkauf. Die sogenannten Betriebsmittel werden für den Eigenbedarf in der Produktion angeschafft – oder hergestellt. Betriebsmittel sind Einrichtungen für die industrielle Fertigung, und sie reichen in Form und Größe von Schraubenschlüsseln und Spritzgussformen über Spannvorrichtungen bis hin zu ganzen Maschinen.

Bei bestimmten Betriebsmitteln ist es günstiger, sie selbst herzustellen, als sie einzukaufen oder gar auf Vorrat vorzuhalten. Insbesondere bei Teilen, die selten, dann aber unerwartet ersetzt werden müssen oder die sich nicht ohne weiteres nachkaufen lassen, lohnt sich der Eigenbau. In der Fahrzeugindustrie leisten individualisierte Montagevorrichtungen einen entscheidenden Beitrag zu Prozesssicherheit und Wiederholgenauigkeit. Besonders relevant ist dabei die Möglichkeit zur schnellen und kosteneffizienten Individualisierung dieser Betriebsmittel, etwa bei Modellwechseln, fahrzeugspezifischen Geometrien oder ergonomisch angepassten Handhabungslösungen.



Bilder:
1
Einfügen von Hairpins in einen Stator mithilfe eines Cobots
2
Umweltfreundlich, präzise und rückstandsfrei reinigen mit Kohlenstoffdioxid

Der sogenannte digital integrierte Betriebsmittelbau vereinfacht den Bauprozess enorm, indem er die schnelle und flexible Fertigung von Ersatzteilen ohne klassische technische Zeichnungen ermöglicht. Durch den Einsatz digitaler Modelle und Scans vorhandener Bauteile können benötigte Komponenten unmittelbar mittels 3D-Druck hergestellt werden. Dies reduziert Stillstandzeiten in der Produktion erheblich. Zudem erlaubt eine durchgängige digitale Prozesskette die schnelle Anpassung und Optimierung bestehender Bauteile, wodurch Unternehmen ihre Betriebsmittel effizient und ressourcenschonend instand halten können. Die Reaktionsfähigkeit und Flexibilität und damit die Resilienz der Fertigung werden so erheblich gesteigert.

FLEXIBLE HANDLANGER: COBOTS
Wenn es um die Unterstützung von Fachkräften in der Fertigung geht, können auch kooperative Roboter, kurz Cobots, wichtige Beiträge leisten. Eine beispielhafte Anwendung ist im ReTraNetz-Reallabor zu sehen: Hier wird das Einfügen von Hairpins in einen Stator mithilfe eines Cobots demonstriert. Cobots unterscheiden sich von traditionellen Industrierobotern durch ihre kompakte Bauweise, einfache Programmierbarkeit und insbesondere sichere Interaktion mit Menschen. Cobots sind mit hochsensiblen Sensoren ausgestattet, die Kollisionen vorhersehen und verhindern. Dadurch können sie ohne Schutzkäfige oder Abgrenzungen in unmittelbarer Nähe von Menschen arbeiten. Das spart Platz in den Produk-

tionsstätten und ermöglicht eine flexible Integration in bestehende Prozesse. Zudem können sie leicht transportiert und an immer neuen Orten in einer Fertigung eingesetzt werden. Eine wesentliche Voraussetzung dafür bringen Cobots intrinsisch mit: Sie sind intuitiv programmierbar. Dank benutzerfreundlicher Schnittstellen und lernfähiger Steuerungssysteme können sie innerhalb kürzester Zeit auf neue Aufgaben programmiert werden.

Beide Vorzüge – Mobilität und Programmierbarkeit – machen Cobots zu idealen Werkzeugen, um als hochflexible Produktionssysteme eine dynamische, variantenreiche Fertigung zu unterstützen. In direkter Interaktion mit Mitarbeitenden auf dem Shopfloor kombinieren sie die Stärken der beiden Partner, indem sie die Flexibilität

und Problemlösungsfähigkeit des Menschen mit der Präzision und Belastbarkeit einer Maschine vereinen. Die Arbeit mit Cobots reduziert repetitive oder körperlich belastende Tätigkeiten und ermöglicht es den Mitarbeitenden, sich auf anspruchsvolle Aufgaben zu konzentrieren. Gleichzeitig bleibt der Mensch im Mittelpunkt des Produktionsprozesses.

TROCKEN UND RÜCKSTANDSFREI REINIGEN

Im Bereich Reinigung wird das Regelkorsett für Unternehmen zusehends enger. Die Europäische Kommission hat mit dem Zero Pollution Action Plan das Ziel formuliert, bis 2050 die Luft-, Wasser- und Bodenverschmutzung so weit zu reduzieren, dass sie nicht mehr schädlich für Gesundheit und natürliche Ökosysteme ist. Auf dem Weg

dorthin werden giftige, natur- und wasserschädliche Stoffe schrittweise verboten. Das trifft den Bereich Reinigung unmittelbar: Hier müssen Alternativen für schädliche Chemikalien gefunden werden.

Reinigung mit Kohlenstoffdioxid (CO₂) ist ein vielversprechender Ansatz. Anders als ein Großteil der konventionellen Reinigungsverfahren hinterlassen CO₂-Strahlverfahren keine Rückstände auf dem Reinigungsobjekt. Das verwendete Strahlmedium sublimiert direkt nach dem Auftreffen auf die zu reinigende Oberfläche – es müssen weder Reste von Reinigungsmitteln entsorgt noch kontaminiertes Wasser gereinigt werden. Auch eine nachgelagerte und oft energieintensive Trocknung des Reinigungsobjekts ist nicht notwendig. Das spart viel Zeit und Energie. Bei dem verwendeten CO₂ handelt es sich um ein Abfallprodukt, das aus anderen Industrieprozessen gewonnen wird und daher eine neutrale Klimabilanz aufweist.

In der Automobilindustrie ermöglicht das Verfahren eine umfassende und schonende Reinigung vor wichtigen Prozessschritten wie der Oberflächenveredelung durch Lackierung. Zudem eignet es sich hervorragend zur Reinigung hochsensibler Komponenten. Die Risiken von Beschädigungen durch aggressive Chemikalien sowie durch nachfolgende mechanische oder energieintensive Trocknungsprozesse werden minimiert, während die notwendige technische Sauberkeit für die anschließenden Prozesse gewährleistet wird. So wird die Fahrzeugproduktion zur sauberen Sache. ♦

IHRE ANSPRECHPERSONEN
Nikolaos-Stefanos Koutrakis
+49 30 39006-213
nikolaos-stefanos.koutrakis@ipk.fraunhofer.de
Prof. Dr.-Ing. Julian Polte
+49 30 39006-433
julian.polte@ipk.fraunhofer.de

Weitere Informationen
www.ipk.fraunhofer.de/retranetz



Das Projekt ReTraNetz-BB wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages



Der Mix macht's

Für die Mobilität der Zukunft sind bereits heute unterschiedliche Antriebstechnologien im Einsatz. Jede Technologie hat Vor- und Nachteile. Welche das sind und welche Technologie am Ende das Rennen machen wird, darüber diskutieren Kurt Blumenröder, CEO der T-Cell AG, Dr. Rüdiger Schwarz, Leiter Strategische Kommunikation PtX-Projekte bei EDL Anlagenbau sowie Prof. Dr. Dr. Eckart Uhlmann und Prof. Dr. Julian Polte vom Fraunhofer IPK.



Prof. Dr. Dr. Eckart Uhlmann

ist Leiter des Fraunhofer IPK und Universitätsprofessor für das Fachgebiet Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Berlin. Seit Jahrzehnten ist er gemeinsam mit Automobilherstellern an der Schnittstelle von Forschung und Industrie aktiv und hat dabei den Begriff der digital integrierten Produktion maßgeblich geprägt.



Dr. Rüdiger Schwarz

leitet die Strategische Kommunikation PtX-Projekte bei EDL Anlagenbau. EDL ist ein innovativer Dienstleister für die Prozessindustrie, insbesondere in Raffinerie, chemischer und petrochemischer Industrie sowie Gastechnik. Das Unternehmen bietet Dienstleistungen im Engineering und Anlagenbau, von der Konzeptfindung bis zur Inbetriebnahme schlüsselfertiger Anlagen.



Prof. Dr. Julian Polte

leitet das Geschäftsfeld Produktionssysteme am Fraunhofer IPK und ist Universitätsprofessor für das Fachgebiet Maschinen und Technologien für die Additive Präzisionsfertigung metallischer Bauteile der TU Berlin. Gemeinsam mit den Forschenden seiner Teams arbeitet er in verschiedenen Projekten eng mit der Automobilindustrie zusammen.



Kurt Blumenröder

ist CEO der T-Cell AG. Das Unternehmen wurde 2022 als Start-up von erfahrenen Wissenschaftlern, internationalen Managern und Experten aus dem Energiesektor gegründet. Die T-Cell ist eine innovative Brennstoffzellentechnologie, die eine effiziente und nachhaltige Energieversorgung ermöglicht.

| futur | **Sie alle beschäftigen sich mit neuen Antriebstechnologien. Welche Antriebsformen werden sich Ihrer Ansicht nach durchsetzen und warum?**
/ UHLMANN / Wir beschäftigen uns intensiv mit dieser Frage, insbesondere in Bezug auf Energieeffizienz und Klimaneutralität von Automobilfahrzeugen. In Deutschland wurde die Elektromobilität in den letzten Jahren mit großer Vehemenz vorangetrieben, jedoch ohne die notwendige Infrastruktur in ausreichendem Maße mitzudenken. Der Automobilindustrie wurde im Prinzip ein Geschenk gemacht, indem viele elektri-

sche Technologien subventioniert wurden, selbst solche, die nicht unbedingt hilfreich und im besten Fall eine Brückentechnologie sind. Hybridfahrzeuge, zum Beispiel, verbrauchen viele Ressourcen und machen Fahrzeuge schwerer, ohne dass sie vollständig elektrisch betrieben werden können.

Um die Effizienz und Umweltverträglichkeit der verschiedenen Antriebstechnologien einschätzen zu können, muss man deren Wirkungsgrad und CO₂-Emissionen betrachten. Wir haben das für batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (BEV), Brennstoffzellenfahr-

zeuge (FCEV), Wasserstoffdirektverbrenner und Verbrennungsmotoren mit E-Fuels und Benzin getan. Unsere Analysen zeigen, dass batteriebetriebene E-Fahrzeuge den höchsten Wirkungsgrad haben, gefolgt von Brennstoffzellenfahrzeugen. Wasserstoffdirektverbrennung und E-Fuels sind dagegen alternative Technologien.

/ SCHWARZ / Wie haben Sie das berechnet?

/ UHLMANN / Wir sind von einem Pkw der Mittelklasse ausgegangen und haben den CO₂-Ausstoß des Fahrzeugs sowohl im Be-

trieb als auch in der Produktion berechnet. Die Emissionen in der Herstellung beziehen sich auf den gesamten Lebenszyklus eines Pkw bei einer angenommenen Lebensfahrleistung von 150 000 km. Die Emissionen im Betrieb haben wir anhand des Stroms berechnet, der zur Kraftstoffherstellung benötigt wird und dabei den aktuellen Strommix in Deutschland berücksichtigt. Bei unserer Betrachtung von E-Fuels sind wir von 100 Prozent reinen E-Fuels ausgegangen – momentan dürfen sie in der Luftfahrt nur minimal beigemischt werden.

/ SCHWARZ / Das ist unterschiedlich, es gibt gegenwärtig zehn international zugelassene Produktionspfade für die Herstellung von SAF – Sustainable Aviation Fuels für die Luftfahrt und die Beimischungsquoten reichen von fünf bis 50 Prozent. Das ist aber eher eine politische als eine technische Frage, denn 50 Prozent Beimischungsquote sind mit der Fischer-Tropsch-Synthese seit Jahrzehnten möglich. Zwischen 50 oder 100 Prozent ist es eine Frage der Dichtung bei bestehenden Flugzeugen. Neue Flugzeuge, die heute produziert werden, können schon mit 100 Prozent E-Fuels

fliegen. Aber ein Flugzeug hat eine durchschnittliche Laufzeit von 30 Jahren. Das heißt, für Bestandsflugzeuge werden noch 30 Jahre lang Kraftstoffe mit einer geringeren Beimischungsmenge benötigt.

Aber Sie sprachen schon die Infrastruktur an: Wieviel Strom haben wir denn zur Verfügung? Wir sind als EDL seit vier Jahren im Antragsprozess für ein Important Project of Common European Interest (IPCEI), das nennt sich »LHyVE – Leipzig Hydrogen Value Chain for Europe.« Hier wollen wir zusammen mit der VNG AG, der ONTRAS

Gastransport GmbH und den Stadtwerken Leipzig die gesamte Wertschöpfungskette zu Erzeugung, Speicherung, Transport, Verteilung, Endverbrauch von grünem Wasserstoff in der Region Leipzig realisieren und über die Infrastruktur mit europäischen Projekten, Städten und Kommunen vernetzen. Konkret planen wir, 50 000 Tonnen E-Fuels und 15 000 Tonnen grünen Wasserstoff im Jahr zu produzieren. Wenn wir eine Klimaneutralität in Mobilität und Logistik erreichen wollen, brauchen wir grünen Wasserstoff. Der ist nach Ihrer Rechnung aber nicht mehr grün.

/ UHLMANN / Brennstoffzellenfahrzeuge oder Wasserstoffdirektverbrenner verursachen beim heutigen Strommix im Betrieb noch recht hohe Emissionen, das ist richtig, weil Wasserstoff erzeugt werden muss. Können wir ihn viel besser herstellen, als wir es heute tun? Wenn wir anstatt den Überschussstrom aus Windrädern kostenpflichtig an Nachbarländer abzugeben, ihn nutzen um mit Elektrolyseuren Wasserstoff zu produzieren, dann vielleicht ja.



/ SCHWARZ / Es ist eine Illusion zu glauben, dass man den Überschussstrom in die Elektrolyseure einbringt. Das kann ich Ihnen an einer einfachen Rechnung erklären: Erstens, was kaum einer weiß, jeder Windkraftanlagenbetreiber bekommt 95 Prozent der Vergütung, auch wenn die Windräder stehen. Zweitens: Die EU fordert die Einhaltung einer Reihe von komplexen Strombezugskriterien für den Betrieb von Elektrolyseuren für die Produktion von grünem Wasserstoff, die im Ergebnis die Laufzeiten der Elektrolyseure in Deutschland auf unter 3000 bis 4500 Betriebsstunden im Jahr drücken. Elektrolyseure können aber prinzipiell gut 8400 Stunden im Jahr laufen und sich so leichter amortisieren. Das bedeutet im Ergebnis, dass der so gewonnene grüne Wasserstoff zwischen 3- und 4-mal teurer ist. Diese Differenz bezahlt Ihnen heute aktuell niemand.

/ UHLMANN / Genau, aber das ist ein politisches bzw. regulatorisches Problem.

/ SCHWARZ / Dieses Narrativ von »Überschuss-Strom« hat aber tiefsten Eingang in die Politik, die Ministerien und Verwaltungen gefunden. Wenn man die Ökonomie ausblendet, finden Prozesse in der Wirtschaft nicht statt. Dann werden bestimmte Technologien nicht gefördert.

/ BLUMENRÖDER / Ich gebe Ihnen recht, die Politik lässt die Stromerzeugung und Infrastruktur außen vor. Um Technologien zu bewerten, brauchen wir eine Betrachtung, die auch in ihren Prämissen vergleichbar ist, damit sie für politische Empfehlungen nutzbar ist. Dann hätte man nicht diesen entzweiten Weg zwischen technischen Lösungen mit entsprechender Effizienz einerseits und der politischen Vorgehensweise, Technologien zu fördern andererseits. Ingenieure müssen die Physik betrachten. Das kann ich nur empfehlen. Jeder andere Weg wäre der falsche.

/ UHLMANN / Dann betrachten wir doch die technischen Fakten: Mit dem aktuellen Strommix müssen wir leben. Sofort auf 100

Prozent erneuerbare Energien umzuschwenken, ist unrealistisch. Dann bedeutet das, dass wir sowohl bei Brennstoffzellen als auch bei der Wasserstoffdirektverbrennung im Betrieb durch die notwendige Wasserstoffherzeugung höhere Kosten haben. Die Herstellungskosten für die Fahrzeuge sind ähnlich wie beim Benzin, auch wenn zum Teil andere Werkstoffe benötigt werden. Brennstoffzellenfahrzeuge und Wasserstoffdirektverbrenner sehe ich deshalb als Zwischenlösung.

E-Fuels sind in meinen Augen eine weitere, in der Herstellung aber derzeit teure alternative Technologie, da sie hohe Energiekosten verursachen und viel CO₂ emittieren können. Ich glaube auch nicht, dass die aktuelle Produktion von E-Fuels ausreicht, um den Bedarf insbesondere in der Luftfahrt zu decken.

Das heißt also, überwiegend vollelektrische Fahrzeuge sollten schon das Ziel sein, aber nicht heute und auch nicht morgen, sondern wir müssen stufenweise dahin kommen. Das wird deutlich, wenn man berechnet, was wir an Strom bräuchten, wenn die 45 000 000 Fahrzeuge, die heute in Deutschland auf den Straßen unterwegs sind, alle elektrisch wären. Wir haben hierzulande einen Energiebedarf von 100 Terawatt. Ein Sechstel davon wäre nötig, um alle Fahrzeuge mit Strom zu bedienen. Das kriegen wir gar nicht hin. Deswegen brauchen wir Zwischentechnologien.

/ SCHWARZ / Wir benötigen die Zwischentechnologien noch aus einem anderen Grund, da sind wir bei der Luftfahrt. Keiner wirft ein funktionierendes Flugzeug weg, man muss die Restlaufzeit mit einrechnen. Auch die Milliarden Autos, die heute auf der Welt herumfahren, haben alle eine Restlaufzeit, die man berücksichtigen muss.

/ BLUMENRÖDER / Vielleicht hilft es, wenn wir in unserer Diskussion auf die Anwendung schauen, weil ohne Anwendung kein Nutzen entsteht. Batterieelektrische Antriebe finden im Straßenverkehr, insbesondere

im Pkw- und Nutzfahrzeugbereich eine gute Verwendung. 80 bis 90 Prozent der Anwendungsfälle sind hiermit abgedeckt – die nötige Infrastruktur zum Laden und natürlich die regenerative Stromerzeugung vorausgesetzt. Wasserstoff-Brennstoffzellen: Wasserstoff als Energieträger ist vor allem in Bereichen sinnvoll, in denen Batterien aufgrund von Gewicht und Ladezeiten nicht ideal sind. Das Handling von Wasserstoff, insbesondere die Speicherung ist sehr energieaufwendig und sicherheitsrelevant.

/ UHLMANN / Beim Speichern sind wir heute in der Lage, über CFK-Hochdruckbehälter bis 800 bar zu erreichen. Die Behälter sind entsprechend beschichtet, sodass die Reinheit des Wasserstoffs auch gewährleistet bleibt. Damit ist das Problem theoretisch gelöst.

/ BLUMENRÖDER / Theoretisch, stimmt. Hinzu kommt aber noch ein anderes technisches Problem, das mit einer potenziellen Vergiftung der Brennstoffzelle zu tun hat, wenn die erforderliche Reinheit des Wasserstoffs nicht vorhanden ist. Unreinen Wasserstoff kann ich nicht in einer PEM-Brennstoffzelle verwenden. Wer nicht 99,99997 Prozent Reinheit erreicht, kann diesen Technologiepfad nicht nutzen. Kein Anbieter eines kommerziellen Brennstoffzellensystems lässt sich darauf ein, ein Zehntel Prozent von diesem Reinheitsgrad ins Risiko zu gehen. Also Wasserstoff in der Brennstoffzelle zu nutzen, wird ein ganz schmaler Anwendungsweg sein.

/ POLTE / Ein Punkt, den ich mit Blick auf die OEMs ergänzen möchte: Hinter jedem Antriebskonzept steckt eigentlich ein neues Auto. Strukturell sehen die Fahrzeuge ganz unterschiedlich aus, auch wenn sie sich vielleicht äußerlich ähnlich sind. Wir werden nicht auf einen Schlag alle Fahrzeuge mit einem neuen Antriebskonzept ausstatten können, sondern müssen die Bestandsfahrzeuge mit im Blick haben.

/ BLUMENRÖDER / Ja, natürlich. In der Luftfahrt und im Straßenverkehr gibt es eine Bestandsflotte, die man bedienen muss. Es gibt aber andere Industriebereiche wie die Schifffahrt, die mit dem Thema Bestand deutlich innovativer umgehen. Wasserstoff herzustellen ist notwendig und wichtig für ganz viele Produkte, für die E-Fuels, für die Direktverbrennung, für die Brennstoffzelle. Das steht außer Frage. Aber wir müssen ihn speichern und wir müssen ihn transportieren können. In der Schifffahrt ist der Transport von Wasserstoff über große Entfernungen ökonomischer Unsinn.

Die internationale Schifffahrtsorganisation (IMO) hat Methanol und Ammoniak als die künftigen Schifffahrtskraftstoffe definiert. Beide Kraftstoffe bieten erhebliche Vorteile im Transport und in der Speicherung gegenüber Wasserstoff. Und sie lassen sich in ihren grünen Varianten in Brennstoffzellen, aber auch in Verbrennungsmotoren CO₂-neutral verbrennen. Beide Kraftstoffe sind im Übrigen schon heute in der chemischen Industrie und in der Landwirtschaft sehr weit verbreitet, ihre Herstellung ist großindustriell abgesichert. Fast alle asiatischen Firmen arbeiten mit Methanol.

/ SCHWARZ / Als »Rohstoffmann« möchte ich ergänzen: Ammoniak und Methanol sind sogenannte Global Trading Commodities. Die gibt es seit 120 Jahren, da existiert ein weltweites Handelssystem. Es gibt ein Pricing-System und es gibt einen Markt, der funktioniert.

/ BLUMENRÖDER / Es gibt 120 Häfen in der Welt, in denen Methanol und Ammoniak verarbeitet wird. Und zwar in Mengen, die wir uns nicht vorstellen können. Der weltweite Ammoniakbedarf beträgt ungefähr 200 000 000 Tonnen. Somit ist Ammoniak mit das am meisten produzierte chemische Produkt auf der Welt.

/ UHLMANN / Um auf den Automobilbereich zurückzukommen, was muss ich an



dem Motor und an den Aggregaten in einem Fahrzeug ändern, um Ammoniak als Treibstoff zu verwenden?

/ BLUMENRÖDER / Der Hubkolbenmotor ändert sich im Wesentlichen nicht. Man kann den Motor so konfigurieren, dass man beispielsweise Ammoniak ins Saugrohr einbringt und mit Wasserstoff anreichert. Aber Ammoniak im Pkw oder Lkw bringt ganz andere Herausforderungen mit sich. Ammoniak ist giftig und korrosiv, was zusätzliche Sicherheitsmaßnahmen für die Fahrzeuge selbst, aber auch für die Lagerung und den Transport von Ammoniak erfordert. Die Infrastruktur für die Nutzung von Ammoniak als Brennstoff ist noch in der Entwicklung.

/ POLTE / Also sind batteriebetriebene Elektrofahrzeuge kurzfristig eine gute Lö-

sung. Wir können die Infrastruktur relativ einfach nachziehen. Viele Städte arbeiten bereits zum Beispiel mit Laternenladestationen für E-Fahrzeuge.

/ BLUMENRÖDER / Wenn wir in Europa einen Durchdringungsgrad von 30 oder 40 Prozent für batterieelektrische Fahrzeuge erreichen wollen, dann reden wir über Jahrzehnte.

/ POLTE / Das sind auch die Informationen, die uns vorliegen. Allein beim Thema Elektromotor beziehungsweise Achsfertigung reichen die im Markt verfügbaren Kapazitäten gar nicht aus, um den Bedarf zu decken.

/ SCHWARZ / Die Marktkapazitäten kann ich in fünf bis zehn Jahren hochfahren. Ich möchte einen Punkt aus der Rohstoffwirtschaft einwerfen: Wo kommen eigentlich die Metalle her, die benötigt werden, um Batterien zu bauen? Die gibt es nämlich nicht bei uns, auch nicht in der EU. Wenn ich bestehende Systeme umstelle und dafür andere Metalle benötige, erzeuge ich eine Nachfrage nach diesen Metallen. Der EU Critical Raw Materials Act fordert, dass ab 2030 zehn Prozent der sogenannten technisch-strategischen Metalle in Europa erzeugt werden sollen, 40 Prozent des Bedarfs in Europa sollen aus dem Recycling gedeckt werden. Ich sehe in Deutschland

Wird die Frage der Rohstoffverbräuche mitgedacht oder nicht, wenn wir über Strategien für Antriebstechnologien diskutieren?

Dr. Rüdiger Schwarz

keine ausreichenden Forschungskapazitäten in dem Bereich. Wird die Frage der Rohstoffverbräuche mitgedacht oder nicht, wenn wir über Strategien für Antriebstechnologien diskutieren?

/ UHLMANN / Die müssen wir natürlich mitdenken. Für die Wasserstoffdirektverbrennung zum Beispiel werden austenitische Stähle benötigt oder auch spezielle Beschichtungen, die wir heute bereits beherrschen. Die Technologien, diese Werkstoffe herzustellen, sind verfügbar. Das ist überhaupt keine Frage. Wir brauchen aber neue Werkstoffe, beispielsweise um einen Elektromotor Neodym-frei zu machen. Neodym ist eine Seltene Erde, die wir möglichst vermeiden wollen. Da sind wir genau an dem Punkt, den Sie gerade benennen, dass wir alternative Werkstoffe entwickeln müssen.

/ SCHWARZ / Mein beruflicher Schwerpunkt waren neben dem aktuellen Thema der E-Fuels in den letzten 40 Jahren die sogenannten Seltenen-Erden-Lagerstätten. Und da komme ich zu der Frage: Wir wissen heute, dass die Umsetzung bestimmter politischer Vorgaben der letzten 10, 15 Jahre in Deutschland und Europa zumindest länger dauern wird, als man damals dachte. Sie sprechen jetzt von den Neodym-freien Motoren. Wie lange wird es dauern, bis Sie diese Werkstoffe entwickelt haben, bis sie in den Mengen produziert werden, die wir benötigen? Wann stehen diese Technologien aus Ihrer Sicht im industriellen Maßstab zur Verfügung, sodass wir damit auch Autos betreiben können?

/ UHLMANN / Kennen Sie den ersten Hauptsatz der Maschinenbauer?

/ SCHWARZ / Nein.

/ UHLMANN / Der Hauptsatz der Maschinenbauer heißt: Wer nicht anfängt, wird nicht fertig. Das Problem ist, dass wir mit



bestimmten Dingen nicht anfangen. Wir tun so, als müsste alles schon da sein, bevor wir in eine Technologie hineingehen, anstatt sie interdisziplinär zu erforschen und zu entwickeln. Deswegen insistiere ich auch in der Politik, dass, wenn wir die Wasserstoffdirektverbrennung verfolgen wollen, wir auch über Werkstoffe nachdenken müssen.

/ BLUMENRÖDER / Sie haben grundsätzlich recht. Das Thema der Materialien ist bei der Wasserstoffdirektverbrennung aber das geringste Problem. Stattdessen: einfach machen! Dann kann man sich darüber streiten, wie man die Wasserstoffverbrennung umsetzt. Man muss ein Brennvorgang auswählen, das tatsächlich sicher ist. Bisher sind von allen Motorenherstellern Wege verfolgt worden, die mit einem Zündstrahlverfahren funktionieren, das den

Nachteil hat, dass man Benzin oder Diesel zuführt und damit keine CO₂-freie Verbrennung realisiert. Das wird dann in der europäischen Regulation auch nicht gefördert.

/ UHLMANN / Dann müssen wir eine technische Lösung finden und Injektoren entwickeln, die Wasserstoff einspritzen können. Die Technologien sind zumindest schon angedacht und auch teilweise umgesetzt. Unser Problem in Deutschland ist doch, dass wir politisch oft auf nur eine Technologie fokussieren und alles andere ausblenden. Das müssen wir einerseits aufbrechen und andererseits fragen, in welcher Folgelogik, in welcher Timeline muss was erfolgen? Sie, Herr Schwarz, sehen für E-Fuels Potenziale im Luftverkehr. Dort sind sie jetzt schon eine Voraussetzung. Aber sind E-Fuels im Straßenverkehr für Sie ein Thema, auch im Sinne der Bestandsfahrzeuge und vor dem Hintergrund der Kosten?



»Electric only« wird auch in Zukunft nicht für alle Anwendungen sinnvoll sein. Wir werden einen Mix aus unterschiedlichen Antriebstechnologien haben.

Kurt Blumenröder

/ SCHWARZ / Wenn wir den Gedanken der Zeit einpreisen, sehe ich natürlich die E-Fuels als Brückentechnologie, auch im Straßenverkehr. Die kann ich sofort herstellen. Wenn ich die Rahmenbedingungen ändere, die den Strompreis belasten, dann kann ich sie auch wirtschaftlich herstellen. Dann fällt aber immer noch CO₂ an. Da bin ich bei einem Punkt, den wir

noch nicht berührt haben: Was machen wir eigentlich mit dem CO₂? Und warum sind wir politisch dagegen, CO₂ an Punktquellen abzuführen und als Wertstoff stofflich zu nutzen? Andere Länder haben bereits Geschäftsmodelle, um CO₂ aufzufangen und zwar an Stellen, wo es in Größenordnung-Mengen anfällt. Ein anderer Punkt: Die Amerikaner haben vor vier Jahren entschieden, dass das Verteidigungsministerium de facto zu jedem Preis jedes synthetische Kerosin kauft, das über verschiedenste neue Technologiepfade hergestellt wird. Und sie werden jetzt entscheiden, welche zwei oder drei dieser neuen Technologiepfade sie massiv in der industriellen Umsetzung fördern werden. Das ist eine technologieoffene Förderung, die wir hier in Deutschland nicht haben, aber dringend benötigen

/ UHLMANN / Richtig, wir müssen aber unterschiedliche Transformationswege gehen und verschiedene Technologieansätze verfolgen, um zu emissionsfreien Antrieben zu gelangen.

/ BLUMENRÖDER / »Electric only« wird auch in Zukunft nicht für alle Anwendungen sinnvoll sein. Wir werden einen Mix aus unterschiedlichen Antriebstechnologien haben, die wir auch von »Cradle to Grave«, von der Wiege bis zur Bahre denken und umsetzen müssen, wenn wir eine CO₂-neutrale Mobilität erreichen wollen. Der Mix dieser Technologien wird je nach Anwendung und Infrastruktur unterschiedlich aussehen, aber von den Synergieeffekten zwischen den verschiedenen Ansätzen werden alle profitieren. ♦

IHRE ANSPRECHPERSONEN

Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Eckart Uhlmann
+49 30 39006-100

eckart.uhlmann@ipk.fraunhofer.de

Prof. Dr.-Ing. Julian Polte

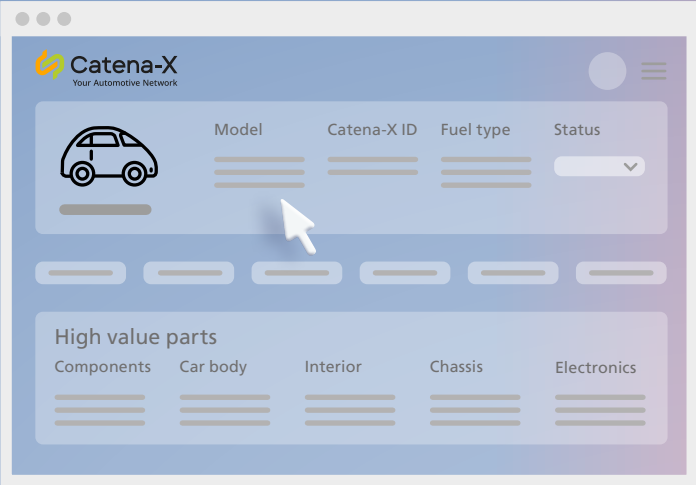
+49 30 39006-433

julian.polte@ipk.fraunhofer.de

Virtuelle Welt

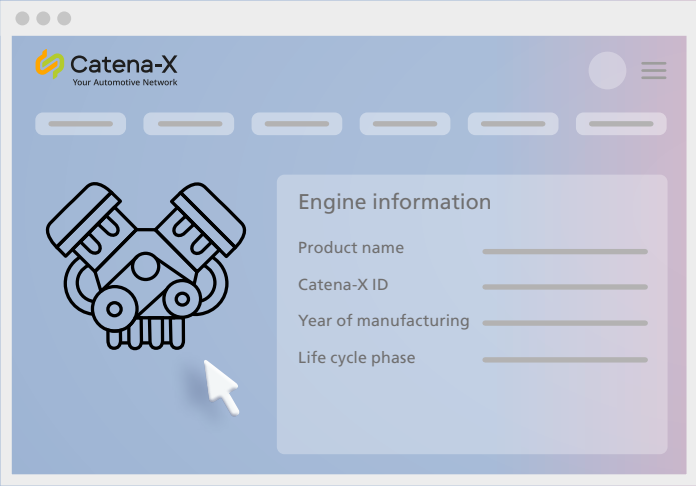
1.

Ein Fahrzeug, das für die Demontage vorgesehen ist, kann bereits virtuell begutachtet werden, noch bevor ein einziges Teil ausgebaut ist. Durch Eingabe der eindeutigen Identifizierungsnummer des zu demontierenden Fahrzeugs werden über die Catena-X-Plattform zur Verfügung gestellte Daten in Form eines Digitalen Zwillings abgerufen.



2.

Anhand der digital zur Verfügung gestellten Daten können einzelne Komponenten auf ihre Weiter- oder Wiederverwendung hin evaluiert werden, ohne dass sie physisch ausgebaut werden müssen. So kann beispielsweise die vom Hersteller angegebene durchschnittliche Lebensdauer dabei helfen einzuschätzen, ob eine Komponente bereits so lange in Betrieb ist, dass eine Wiederverwendung nicht mehr sicher möglich ist.



Demontage
durchgehend
digitalisiert

Mehr Kreislaufwirtschaft, fordert die Politik. Voraussetzung dafür ist eine digitalisierte, automatisierte Altteil-Demontage. Doch für innovative KI-unterstützte Lösungen fehlt eine solide Datengrundlage.

Forschende des Fraunhofer IPK haben ein umfassendes und kohärentes Digitalisierungskonzept für die Demontage von Fahrzeugen entwickelt. Im Zentrum des Konzepts steht der Circular-Economy-Assistent, ein semiautomatisches Entscheidungshilfe-Tool, das Unternehmen fit machen soll für

die Kreislaufwirtschaft. Zudem bietet der CE-Assistent eine einfache Übersicht über verschiedene Demontage-Lösungen und deren individuellen CO₂-Fußabdruck – und zeichnet sich damit durch ineinandergreifende Lösungen entlang des gesamten Demontageprozesses aus.

Physische Welt

3.

An dem ausgebauten Motor können mithilfe eines robotischen, intelligenten Kamerasystems sichtbare Bauteile erfasst und ihr Zustand beurteilt werden – und das vollkommen zerstörungsfrei und automatisch.



4.

Die Demontage des Motors führt eine Werkerin mithilfe ihrer AR-Brille aus. Diese zeigt ihr Schritt-für-Schritt-Anleitungen zum Ausbau der Einzelteile an und nimmt gleichzeitig den Demontageprozess auf.



NÄCHSTER HALT: MEHR AUTOMATISIERUNG

Für den hier gezeigten digitalisierten Demontageprozess ist das Ende der Fahnenstange noch nicht erreicht. Denn die Ansprüche an die Demontage steigen: Immer komplexere Fahrzeugkomponenten müssen auseinander gebaut werden, um die Einzelteile zweitzuverwerten. Um das auch in Zeiten des Fachkräftemangels möglich zu machen, braucht es weitere Automatisierungsmaßnahmen. Dazu werden beim Demontageprozess mithilfe von AR-Brillen Bilder aufgenommen, um eine KI zu trainieren. Auf Basis dieser multimodalen Datenaufnahme sollen in Zukunft auch Roboter die anstrengenden manuellen Arbeiten verrichten können.

IHRE ANSPRECHPERSON
Janine Mügge | +49 30 39006-299
 janine.muegge@ipk.fraunhofer.de

Grün auf Blau

80 bis 90 Prozent aller Güter weltweit werden mit Lastschiffen transportiert. MAN baut Motoren für die größten Frachter der Welt – und hat damit maßgeblichen Einfluss auf die Zukunft des Schiffsbaus. Wir haben uns mit Dr. Johanna Rauchenberger, Head of Group Quality & HSE, und Dietmar Pinkernell, Head of Sustainability & Product Safety bei MAN Energy Solutions über ihre Strategie für einen nachhaltigen maritimen Verkehr unterhalten.



Interview mit Dr. Johanna Rauchenberger und Dietmar Pinkernell, MAN Energy Solutions

| futur | **Sogenannte »Green Corridors« sollen künftig wichtige Handelshäfen miteinander verbinden. Hier dürfen nur Frachtschiffe fahren, die mit umweltfreundlichen Treibstoffen betrieben werden. Wie beurteilen Sie deren Bedeutung für die Gestaltung des Schiffsverkehrs der Zukunft?**

/ **RAUCHENBERGER** / Pilotprojekte wie die »Green Corridors« haben für uns eine ganz besondere Bedeutung. Sie sind mehr als nur ein Testfeld – sie markieren einen echten Wendepunkt für den Schiffsverkehr. Gerade in einer Branche, die vor einem grundlegenden Wandel steht, schaffen solche Initiativen den Raum, um neue Technologien unter realen Bedingungen zu erproben. Für uns als Motorenhersteller sind sie eine willkommene Gelegenheit,

um zu zeigen, was technisch bereits möglich ist – und wo es noch konkreten Handlungsbedarf gibt.

/ **PINKERNELL** / Vor allem bieten sie die Möglichkeit, emissionsarme Antriebslösungen nicht nur theoretisch zu diskutieren, sondern sie tatsächlich im Alltag zu testen. Und mit jedem getesteten Schiff, das sich durch einen solchen Korridor bewegt, lernen wir mehr darüber, wie diese Kraftstoffe sich im Betrieb verhalten – wie zuverlässig sie sind, wie effizient, wie gut sie in bestehende Systeme integriert werden können.

/ **RAUCHENBERGER** / Darüber hinaus helfen die »Green Corridors« auch auf regulatorischer Ebene. Sie erleichtern es Gesetzgebern, passende Rahmenbedingun-

gen zu schaffen – und zwar schneller, zielgerichteter und mit einem besseren Verständnis für die technischen Hintergründe. Gleichzeitig setzen solche Projekte auch Impulse für den Ausbau der Infrastruktur: Wo Schiffe mit neuen Treibstoffen fahren, entsteht automatisch ein Bedarf an Versorgungsnetzen, Tankmöglichkeiten und Logistiklösungen.

| futur | **MAN Energy Solutions setzt im Schiffsverkehr auf alternative Treibstoffe wie Ammoniak, Bio-Methanol aus Pflanzen oder E-Methanol aus Carbon-Capture-Technologien. Welche spezifischen Herausforderungen ergeben sich bei der Produktion und Materialauswahl für Ammoniak- oder Methanolmotoren im Vergleich zu konventionellen Schiffsantrieben?**

Dr. Johanna Rauchenberger

studierte Informatik an der RWTH Aachen und promovierte anschließend in den Ingenieurwissenschaften am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT in Aachen. Sie wechselte 2009 in den Maschinen- und Anlagenbau und übernahm zunächst die Qualitätsleitung bei MAN Energy Solutions am Standort in Zürich. Nach verschiedenen Stationen im In- und Ausland leitet sie heute die zentrale Qualitätsorganisation bei MAN Energy Solutions SE mit der globalen Verantwortung für die Themen Qualität, Managementsysteme, Arbeitssicherheit, Umwelt, Nachhaltigkeit und Produktsicherheit. »Was mich in meiner Zeit bei Fraunhofer besonders geprägt hat, war die interdisziplinäre Zusammenarbeit. Mobilität ist kein isoliertes Thema, sondern ein Zusammenspiel verschiedenster Bereiche: Antriebstechnologien, Infrastruktur, politische Rahmenbedingungen, Marktmechanismen – alles hängt zusammen. Das Erfolgsrezept ist, die verschiedenen Perspektiven miteinander zu verknüpfen und an einem gemeinsamen Ziel zu arbeiten.«



Dietmar Pinkernell

studierte Technomathematik und begann 1995 seine berufliche Laufbahn bei MAN B&W in Augsburg, der heutigen MAN Energy Solutions SE. Er durchlief verschiedene Entwicklungsstationen und leitete u. a. die Entwicklungskonstruktion für Großdieselmotoren. 2016 wechselte er in die zentrale Qualitätsorganisation des Unternehmens, wo er in einer Stabsfunktion die Governance für Arbeitssicherheit, Umweltschutz und Produktsicherheit verantwortete. Heute leitet er als Head of Sustainability & Product Safety ein interdisziplinäres Team und koordiniert unternehmensweit Nachhaltigkeitsinitiativen, strategische Projekte sowie die interne und externe Berichterstattung in seinem Wirkungsbereich.

/ PINKERNELL / Die Entwicklung von Großmotoren für solche alternativen Treibstoffe ist technisch anspruchsvoll und bringt ganz neue Herausforderungen mit sich. Bisher war der Schiffsmotor in erster Linie auf Schweröl oder Marine-Diesel ausgelegt – bewährte Kraftstoffe, deren Verhalten in Motoren wir seit Jahrzehnten im Detail kennen. Mit den neuen Energieträgern betreten wir in vielen Bereichen Neuland. Das betrifft nicht nur die Verbrennungseigenschaften selbst, sondern vor allem auch das Materialverhalten, die Sicherheit und die gesamte Motorarchitektur.

Ein zentrales Thema ist die Korrosionsbeständigkeit. Ammoniak ist extrem reaktiv und greift viele konventionelle Werkstoffe an, insbesondere kupferhaltige Legierungen. Deshalb müssen wir auf hochresistente Materialien ausweichen, darunter spezielle Edelstähle oder Nickel-Basis-Legierungen. Bei Methanol ist das Problem etwas anders gelagert: Zwar ist es weniger korrosiv, zieht

aber Wasser an, was die Materialermüdung langfristig verstärken kann. Auch hier kommen speziell beschichtete oder rostfreie Materialien zum Einsatz, um die Lebensdauer der Komponenten zu sichern.

Neben den Materialien stehen die Einspritz- und Verbrennungssysteme im Fokus. Ammoniak hat eine hohe Zündtemperatur und ist vergleichsweise zündunwillig. Um es dennoch effizient zu verbrennen, müssen wir entweder auf eine Pilotzündung mit Diesel oder Wasserstoff zurückgreifen oder komplett neue Zündsysteme entwickeln. Methanol wiederum lässt sich leichter entzünden, hat aber eine geringere Energiedichte. Das bedeutet: Es muss mehr Kraftstoff eingespritzt werden – was größere Einspritzsysteme und eine sorgfältig angepasste Verdichtung notwendig macht.

Auch die Sicherheitsanforderungen sind nicht zu unterschätzen. Ammoniak ist giftig – das bedeutet, dass jede Undichtigkeit

in Leitungen oder Tanks ein ernstzunehmendes Risiko darstellt. Die gesamte Kraftstoffführung muss also extrem dicht sein, ergänzt durch Sensorik und Notfallsysteme. Methanol ist weniger toxisch, dafür aber leicht entflammbar. Auch hier ist eine durchdachte Sicherheitsarchitektur gefragt.

/ RAUCHENBERGER / Ein oft unterschätzter Aspekt ist die industrielle Skalierung. Es reicht nicht, einzelne Prototypen zu bauen – entscheidend ist, diese neuen Technologien in eine wirtschaftliche Serienfertigung zu überführen. Dazu müssen wir neue Prozesse entwickeln, um spezielle Materialien zuverlässig, effizient und in hoher Stückzahl zu verarbeiten. Und auch die Prüfverfahren müssen an neue chemische und thermische Belastungen im Motor angepasst werden.

| futur | **Sie arbeiten auch an Dual-Fuel-Motoren, die mit Flüssiggas betrieben werden. Welche Rolle spielen solche**

Antriebstechnologien auf dem Weg zur Dekarbonisierung der maritimen Industrie?

/ RAUCHENBERGER / Dual-Fuel-Motoren sind ein zentraler Baustein für die maritime Energiewende. Gerade in einer Phase, in der die Branche unter hohem Druck steht, Emissionen zu reduzieren, ohne wirtschaftlich den Boden zu verlieren, bieten sie eine Möglichkeit, beides zu verbinden: unmittelbare Fortschritte bei der Klimabilanz und langfristige Investitionssicherheit.

/ PINKERNELL / Methanol oder Ammoniak werden auf absehbare Zeit nicht in ausreichender Menge zur Verfügung stehen. Das DF-Konzept erlaubt den gleitenden Übergang und kann sich dem Wachstum der Versorgungsinfrastruktur anpassen, weil die Schiffe je nach Verfügbarkeit den passenden Kraftstoff nutzen. Das gibt Reedereien Spielraum, auch heute schon

in Zukunftskraftstoffe zu investieren und Stranded Investments zu vermeiden.

Dazu kommt: Um die weltweiten Klimaziele zu erreichen, genügt es nicht, neue, klimafreundliche Schiffe zu bauen. Hochseeschiffe sind im Durchschnitt 25 bis 30 Jahre unterwegs. Auch diese Bestandsflotten müssen modernisiert werden. Das Dual-Fuel-Konzept macht das möglich, denn viele Schiffe können für den DF-Betrieb mit synthetischen Kraftstoffen ertüchtigt werden, ohne dass dazu der Motor ausgetauscht werden muss.

Dual-Fuel-Systeme beschleunigen aber auch die technologische Entwicklung hin zu echten Zero-Emission-Lösungen. Wer heute einen Motor für Methanol oder Ammoniak im Dual-Fuel-Betrieb betreibt, sammelt wertvolle Erkenntnisse – über das Verbrennungsverhalten, über die Materialbelastung, über das Zusammenspiel der Systeme. All das fließt direkt in die

nächste Generation emissionsfreier Motoren ein.

/ RAUCHENBERGER / Gerade deshalb sehen wir in der Dual-Fuel-Technologie nicht nur einen praktischen Kompromiss, sondern eine strategische Entscheidung. Sie vereint Umweltschutz, wirtschaftliche Vernunft und technologische Weitsicht.

| futur | **Ammoniak und Methanol sind beide Wasserstoffderivate, die durch Reaktionen mit Stickstoff bzw. Kohlenstoff hergestellt werden. Welche Vorteile bieten Ammoniak und Methanol im Vergleich zu grünem Wasserstoff als alternative Treibstoffe für Schiffe?**

/ PINKERNELL / Grüner Wasserstoff ist langfristig gesehen ein spannender und bedeutender Baustein in der Energiewende. Aber für die maritime Industrie, die schon heute Lösungen braucht, bieten

Methanol und Ammoniak einen klaren Vorsprung. Gerade auf See zeigen sich bei Wasserstoff noch schnell die Grenzen – vor allem, wenn man die Anforderungen an Reichweite, Sicherheit und Infrastruktur im Blick behält. In vielen Fällen sind Methanol und Ammoniak schlichtweg die praktikableren Lösungen.

Methanol und Ammoniak verfügen über eine deutlich höhere Energiedichte pro Volumen als Wasserstoff. Für den Langstreckenseeverkehr, bei dem Platz und Gewicht eine zentrale Rolle spielen, ist das ein unschlagbares Argument. Wasserstoff hingegen muss entweder extrem stark komprimiert oder bei minus 253 Grad Celsius verflüssigt werden – beides stellt enorme Anforderungen an Lagerung und Isolation. Im Vergleich dazu lassen sich Methanol bei Umgebungstemperatur und Ammoniak unter relativ einfachen Bedingungen lagern.

RAUCHENBERGER / Ein weiterer Punkt ist die Integration in bestehende Antriebskonzepte. Methanol lässt sich mit überschaubarem Aufwand in modifizierten Dieselmotoren verwenden. Auch Ammoniak ist für Großmotoren nutzbar, wenn bestimmte technische Anpassungen vorgenommen werden. Wasserstoff sehen wir hingegen vorrangig in stationären Anwendungen.

/ PINKERNELL / Nicht zu vergessen sind die energetischen Verluste entlang der Kette: Die Verflüssigung von Wasserstoff ist extrem energieintensiv und kann bis zu einem Drittel des ursprünglichen Energiegehalts kosten. Wenn man aus grünem Wasserstoff hingegen Methanol oder Ammoniak herstellt, lassen sich diese Energieträger deutlich effizienter speichern und transportieren.

| futur | **Sicherheit ist ein Schlüsselfaktor beim Einsatz von Ammoniak als Treibstoff. Welche Maßnahmen und**

Technologien sind notwendig, um den sicheren Betrieb von Ammoniakmotoren an Bord von Schiffen zu gewährleisten?

/ RAUCHENBERGER / Ammoniak ist giftig, stark flüchtig und wirkt korrosiv. Er erfordert ein durchdachtes Sicherheitskonzept, denn der Schutz von Crew, Schiff und Umwelt muss oberste Priorität haben. Schon bei der Lagerung und Handhabung beginnt die Herausforderung. Ammoniak kann entweder unter Druck oder bei niedrigen Temperaturen flüssig gehalten werden – beides erfordert speziell ausgelegte Tanks und Leitungssysteme. Um im Störfall ein Austreten zu verhindern, kommen doppelwandige Strukturen mit integrierten Leckage-Warnsystemen zum Einsatz. Und statt Kupfer- oder Zinklegierungen kommen speziell beschichtete oder hochresistente Werkstoffe als Dichtungsmaterialien zum Einsatz.

Ein zentrales Element ist die permanente Gasüberwachung. In Maschinenräumen, Lagertanks und allen sicherheitsrelevanten Bereichen sind hochempfindliche Sensoren verbaut, die schon kleinste Mengen Ammoniak zuverlässig erkennen und automatische Sicherheitsmechanismen auslösen: Kraftstoffzufuhr wird unterbrochen, Abluftsysteme schalten sich ein, gefährdete Zonen werden belüftet oder abgeschottet. So kann im Ernstfall schnell und effektiv reagiert werden.

/ PINKERNELL / Auch die Kraftstoffversorgung selbst muss auf ein Höchstmaß an Sicherheit ausgelegt sein. Einspritzsysteme sind mit mehrfachen Sicherheitsventilen ausgestattet, um eine unkontrollierte Ammoniakzufuhr zu verhindern. Nach jedem Betrieb wird das System automatisch gespült – meist mit Inertgas wie Stickstoff – um Rückstände zu entfernen. Da Ammoniak zudem schwer zündbar ist, wird großes Augenmerk auf das Brennverfahren und dessen Regelung gelegt, um eine sta-

bile und kontrollierte Verbrennung zu gewährleisten. Natürlich steht auch der Schutz der Besatzung im Fokus. Die Crew muss speziell geschult sein, nicht nur im Umgang mit dem Kraftstoff, sondern auch im Notfallmanagement. Persönliche Schutzausrüstung, Atemschutzmasken mit Ammoniakfiltern, Schutzanzüge und mobile Augenduschen gehören zur Grundausstattung. Jeder Tankvorgang, jede Wartung erfolgt nach festgelegten Sicherheitsprotokollen – begleitet von Notfallplänen und regelmäßigen Übungen an Bord.

Abgerundet wird das Ganze durch internationale Sicherheitsstandards. Der IGF-Code der IMO, der die sichere Nutzung gasförmiger oder niedrigentflammbarer Kraftstoffe regelt, bildet hier den rechtlichen Rahmen. Auch Richtlinien aus SOLAS und MARPOL werden auf die spezifischen Eigenschaften von Ammoniak angepasst, um ein einheitliches Sicherheitsniveau weltweit zu gewährleisten.

| futur | **Neben der technischen Entwicklung ist auch die Infrastruktur entscheidend. Wie schätzen Sie die zukünftige Verfügbarkeit und Wirtschaftlichkeit von grünem Ammoniak und Methanol als maritimen Kraftstoffen ein?**

/ RAUCHENBERGER / Da spielen viele Faktoren ineinander. Was sich jedoch klar abzeichnet: Beide Kraftstoffe haben das Potenzial, eine tragende Rolle in der Dekarbonisierung der Schifffahrt zu übernehmen. Der Unterschied liegt vor allem im Zeitrahmen und in den infrastrukturellen Voraussetzungen.

/ PINKERNELL / Grünes Methanol hat aktuell die Nase vorn, was Verfügbarkeit und Skalierbarkeit angeht. Es kann auf zwei Wegen erzeugt werden – entweder aus Biomasse oder durch die Kombination von grünem Wasserstoff mit CO₂ aus industriellen Prozessen. Der große Vorteil:



Viele bestehende Produktionsanlagen lassen sich auf diese neuen Quellen umstellen. Das bedeutet, dass Methanol vergleichsweise schnell und in größeren Mengen verfügbar gemacht werden kann – gerade, wenn es politische Unterstützung und klare Nachfrage aus dem Markt gibt.

Ammoniak ist da ein Stück weit komplexer. Die Produktion basiert auf der Synthese von Wasserstoff und Stickstoff – ein etabliertes Verfahren, allerdings mit einem hohen Energiebedarf, insbesondere wenn der Wasserstoff durch Elektrolyse aus erneuerbaren Quellen gewonnen werden soll. Hier wird der Ausbau der Wind- und Solarenergie zum entscheidenden Engpass. Noch fehlen großindustrielle Anlagen für die grüne Variante, aber weltweit entstehen derzeit zahlreiche Projekte, die in wenigen Jahren erste Mengen liefern könnten.

/ RAUCHENBERGER / Methanol ist außerdem bereits heute ein global gehandelter Rohstoff, wird in großen Mengen transportiert und kann mit überschaubarem Auf-

wand über bestehende Lager- und Bunkersysteme abgewickelt werden. Flüssig bei Umgebungstemperatur, nicht übermäßig toxisch – das macht es zu einem Kraftstoff, der sich ohne grundlegenden Umbau der Hafensysteme einsetzen lässt. Ammoniak hingegen verlangt mehr: geschlossene Systeme, spezielle Sensorik, hohe Sicherheitsstandards. Es wird zwar auch heute schon global bewegt, vor allem in der Düngemittelindustrie, aber für den Einsatz an Bord und in Häfen sind gezielte Investitionen notwendig.

Was die Wirtschaftlichkeit betrifft, sind beide Kraftstoffe derzeit noch teurer als konventionelle Treibstoffe. Doch das wird sich ändern. Je mehr Produktionskapazitäten entstehen, desto stärker greifen Skaleneffekte. Parallel dazu steigen die politischen und regulatorischen Kosten für fossile Brennstoffe – etwa durch das EU-Emissionshandelssystem oder CO₂-Steuern. Das verschiebt das Preisgefüge und macht grüne Alternativen zunehmend wettbewerbsfähig.

Bild:
Dual-Fuel-Motor von MAN, der sowohl mit LNG, Diesel und HFO als auch mit nachhaltigeren Kraftstoffen wie Biokraftstoffmischungen und synthetischem Erdgas betrieben werden kann.
© MAN Energy Solutions

Methanol wird also kurzfristig schneller zur Verfügung stehen, Ammoniak bringt langfristig große Vorteile mit – etwa durch das Potenzial zur CO₂-freien Verbrennung – braucht dafür aber mehr Zeit und Investitionen. Dazu kommen Unterschiede im Anwendungsbereich: In der Personenschifffahrt könnte Methan aufgrund seiner geringeren Toxizität bevorzugt werden. Ammoniak wird hingegen ein großes Potenzial im Gütertransport prophezeit. Bleibt die Erkenntnis: Alternative Kraftstoffe ergänzen sich – und gemeinsam könnten sie den Wandel zu einer emissionsfreien Schifffahrt entscheidend prägen. ♦

Batteriegehäuse aus Stahl: Alu-Alternative?

Stahl als nachhaltiger Leichtbauwerkstoff? Was auf den ersten Blick einen Widerspruch darstellt, könnte die Bauweise von Batteriegehäusen für Elektrofahrzeuge revolutionieren und damit E-Mobilität noch umweltfreundlicher machen.

Die Elektromobilität gilt als eine der Schlüsseltechnologien für eine umweltfreundliche Mobilität und Zukunft. Dabei müssen nicht nur effiziente Antriebssysteme entwickelt werden, auch die Fahrzeugkomponenten müssen nachhaltig gestaltet und produziert werden. Denn ein erheblicher Anteil der CO₂-Emissionen entlang des Lebenszyklus von Elektroautos fällt in der Herstellungsphase an. Während die Produktion eines herkömmlichen Benziners etwa 10 Tonnen Treibhausgase freisetzt, beläuft sich diese Zahl bei batteriebetriebenen Elektrofahrzeugen auf 17,4 Tonnen. Allein auf die Herstellung der Batterie entfallen dabei rund 6,2 Tonnen. Ein wichtiger Aspekt hierbei ist das Batteriegehäuse, auf das laut Angaben von Agora Verkehrswende rund zehn Prozent der herstellungsbedingten Emissionen zurückgehen.

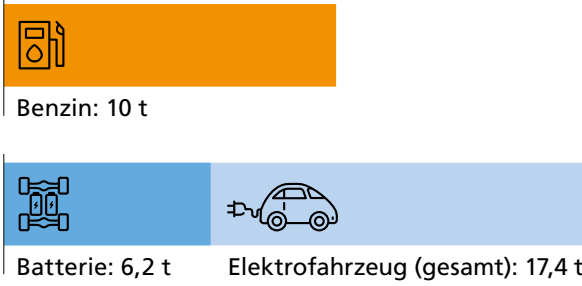
Forschende am Fraunhofer IPK wollen nun ergründen, wie sich durch den geschickten Austausch von Materialien entlang des Lebenszyklus von Batteriegehäusen CO₂-Emissionen einsparen lassen. Die jüngsten Ergebnisse eines Forschungsprojekts zum effizienten Laserstrahlschweißen und -löten für Gasdichtigkeit und Maßhaltigkeit bei Stahlbatteriegehäusen zeigen, dass Batteriegehäuse aus Stahl eine vielversprechende Alternative zur herkömmlichen Aluminiumbauweise darstellen können. Denn Stahl hat in der Herstellung eine deutlich bessere Ökobilanz und lässt sich besser recyceln.



DIE HERAUSFORDERUNG: DICHTHE VERBINDUNGEN
Nicht nur der ökologische Fußabdruck spricht für Stahl. Auch seine höhere Festigkeit macht den Werkstoff bei der Fertigung von Batteriegehäusen für Elektroautos zu einer vielversprechenden Alternative zu Aluminium. Denn je fester das Material, desto dünner können die Wände des Gehäuses sein. Allerdings ist der im Automobilbereich eingesetzte Stahl mit einer Zink-Beschichtung versehen, der das Material langfristig vor Korrosion schützt. Beim Verschweißen der Bleche kommt es zu einem Verdampfen dieser Beschichtung, was zu Porosität in den Schweißnähten führt. Das verschlechtert nicht nur die mechanisch-technologischen Eigenschaften, sondern beeinträchtigt auch die für Batteriegehäuse essenzielle Gasdichtigkeit. Die Herausforderung bei der Fertigung von Stahlbatteriegehäusen besteht also darin, gasdichte Schweißverbindungen zu erzielen. Innovative Fügeverfahren aus dem Bereich des Laserschweißens, Laserlötens und dem Widerstandspunktschweißen, unterstützt durch Schweißstruktursimulationen, sollen hier Abhilfe schaffen.

SIMULIERT + EXPERIMENTELL VALIDIERT = INTEGRIERT
Das Projektteam kombiniert moderne Schweißstruktursimulationen mit experimentellen Untersuchungen. Diese Simulationen erlauben es, die Temperaturverläufe und mechanischen Spannungen während des Schweißens präzise zu modellieren. Durch den Abgleich mit realen

Emissionen bei der Herstellung



Laut dem österreichischen Umweltbundesamt entfallen allein 6,2 Tonnen der bei der Herstellung von Elektrofahrzeugen entstehenden Treibhausgase auf die Batterie. Einsparungen hier haben daher großes Potenzial für die Zukunft der E-Mobilität.

Experimenten wie Temperaturmessungen und Schliffbildern können die Forschenden Prozessparameter optimieren, um die Dichtheit und Maßhaltigkeit der Verbindungen zu gewährleisten.

MIT KLEINEREM FUSSABDRUCK AUF DIE STRASSE
Um die untersuchten Fertigungsprozesse zu vergleichen, erfassen und bewerten die Forschenden in einem Cradle-To-Gate-Ansatz die Umweltauswirkungen der unterschiedlichen Schweißverfahren. Dabei schneidet das Fügen mittels Widerstandspunktschweißen in Verbindung mit einem Klebstoff mit Emissionen von 0,11 kg CO₂-Äquivalent pro Meter Schweißnaht am besten ab. Unter den Strahlverfahren verursacht das Laser-Remote-Schweißen ohne Zusatzwerkstoff mit 0,14 kg CO₂-Äquivalent pro Meter die geringsten Emissionen. Alle Verfahren haben einen zentralen Vorteil: Sie ermöglichen die Produktion von Stahlbatteriegehäusen, bei der laut Angaben von thyssenkrupp Steel im Vergleich zur Aluminiumreferenz bis zu zwei Drittel weniger Treibhausgasemissionen anfallen.

DER BLICK NACH VORNE
Der Automobilindustrie eröffnet das Forschungsteam mit seinen entwickelten Technologien neue Möglichkeiten bei der Herstellung von Batteriegehäusen – und das im Einklang mit den hohen Anforderungen sowohl an Sicherheit als auch Nachhaltigkeit. Überzeugend ist das

VERBUNDPROJEKT STAHLBATTERIE-GEHÄUSE
Im interdisziplinären Verbundprojekt arbeiteten die Forschungspartner LWF / Universität Paderborn, Fraunhofer IPK, ika / RWTH Aachen und Fraunhofer IPA eng zusammen, um den Anwendungsfall Stahlbatteriegehäuse mit Fügeverfahren, Prüfverfahren und Korrosionsschutzkonzepten zu erarbeiten und zu validieren.

für die Hersteller nur, wenn die Kombination von Fügeverfahren mit optimierten Prozessparametern wirklich gasdichte Verbindungen sicherstellen kann, denn das Verhalten der Batterie bei Crash oder Brand ist entscheidend für den Einsatz in der Praxis.

Die Forschenden wollen die gewonnenen Erkenntnisse daher nun auch auf weitere Anwendungen in der Automobilindustrie übertragen, in Zusammenarbeit mit Partnern aus der Industrie. Wenn es gelingt, Batteriegehäuse aus Stahl weiterzuentwickeln, die innovative Technologie zu verfeinern und in die Automobilproduktion zu integrieren, rückt das Ziel der Projekt- und Industriepartner ein Stück näher: eine nachhaltige Mobilität der Zukunft, die im wahrsten Sinne des Wortes zusammenschweißt. ♦

IHRE ANSPRECHPERSON
Vinzenz Müller | +49 30 39006-372
vinzenz.mueller@ipk.fraunhofer.de

Gefördert durch:
 Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages
Die vorgestellten Forschungsergebnisse stammen aus den IGF-Forschungsprojekten 40 LN, 41 LN und 43 LN der Forschungsvereinigung Stahlanwendung (FOSTA), die von der Allianz für Industrie und Forschung (AiF) im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsförderung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) auf der Grundlage eines Beschlusses des Deutschen Bundestages finanziert wurden.



Mit Systemen digital durchstarten

Ein Passagierflug im Jahr 2050: emissionsarm, leise, sicher, bezahlbar? Die Luftfahrt steht vor enormen Herausforderungen auf dem Weg zu einer neuen Generation von Antrieben.

Mit einem Anteil von etwa 3,5 bis fünf Prozent an der anthropogenen Erwärmung gehört die Luftfahrt zu den größten Klimasündern. Unter dieser Voraussetzung ist es schwer vorstellbar, dass Fliegen in der aktuellen Form auch in der Zukunft noch zu unserem Alltag gehört. Um das Fliegen nachhaltiger zu gestalten, sind daher statt schrittweisen Verbesserungen alternative Konzepte gefragt. Neben der Verwendung nachhaltiger Kraftstoffe rücken hybrid-elektrische Antriebe zunehmend in den Fokus der Forschung und Entwicklung. Diese Technologien kombinieren erneuerbare Energiequellen mit herkömmlichen Antrieben und könnten so einen entscheidenden Beitrag zur Reduzierung der Umweltbelastung leisten.

Bild:
Innovative Konzepte für Flugzeuge, Drohnen und Flugtaxis wie dieses erfordern grundlegendes Umdenken in der Entwicklung statt inkrementeller Schritte.

Die Integration hybrid-elektrischer Antriebe in Flugzeuge, Drohnen oder zukünftig auch Flugtaxis ist jedoch komplex. Neue Produktarchitekturen entstehen durch die Beteiligung vieler verschiedener Hersteller an der Realisierung der Produkte. Dazu kommen lange Entwicklungszeiten, insbesondere bei Flugzeugherstellern: Zwischen 5 und 15 Jahren können Entwicklung, Komponenten- und Simulator-Tests, Flugversuche, Zertifizierung und weitere Schritte in Anspruch nehmen. Während dieser Zeitspanne müssen Hersteller, Entwickler, Zulieferer und Behörden durchgängig miteinander in Kontakt bleiben. Um diese Komplexität beherrschbar zu machen, nutzen Forschende am Fraunhofer IPK das Konzept der Systemorientierung. Das Flugzeug und sei-

ne Bestandteile, wie etwa der Antrieb, werden nicht mehr als alleinstehende Elemente, sondern als sich beeinflussende Teile eines größeren Systems betrachtet. Dabei ist es entscheidend, die Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen Systemen zu definieren und eine Systemarchitektur zu entwickeln, die eine nahtlose Integration ermöglicht. Diese Architektur ist jedoch nur der erste Schritt – um wirklich effektiv zu sein, muss sie in die gesamte Entwicklung, Fertigung und Prüfung der Systeme integriert werden.

Ein weiterer Schlüssel zu einer erfolgreichen Realisierung neuer Antriebskonzepte ist der Einsatz von Digitalen Zwillingen. Diese virtuellen Modelle bilden das physische System ab und ermöglichen es, Subsysteme zu verknüpfen, Sollparameter zu identifizieren und das Verhalten des gesamten Systems zu analysieren. Beim Entwickeln und Testen neuer hybrid-elektrischer Triebwerke kann das erhebliche Vorteile bringen, denn das Zusammenspiel aus konventioneller Verbrennung in einer Gasturbine, elektrischem Antrieb und Batterie ist hochkomplex. Während des Fluges müssen die Parameter aller dieser Systeme nämlich laufend angepasst werden. Mit den im Projekt »DIREKT« entwickelten Konzepten für Digitale Zwillinge lassen sich Antriebssysteme entwerfen, die diese Aufgabe bewältigen können: Sowohl der elektrische und konventionelle Verbrauch des Antriebsstrangs als auch der aktuelle Ladestand des elektrischen Speichers können kontinuierlich erfasst und die Einstellung der Antriebsparameter in Kombination mit der verbleibenden Flugstrecke optimiert werden. Darüber hinaus können bei der Entwicklung der Folgegeneration eines Antriebssystems die aus dem Digitalen Zwilling gewonnenen Erkenntnisse direkt in die Systemarchitektur einfließen und Entwicklungsentscheidungen unterstützen. Das verkürzt Entwicklungszeiten und ermöglicht einen kontinuierlichen Verbesserungsprozess.

Bis es zum Einsatz eines neuen Triebwerks in der Luft kommen kann, müssen Hersteller einen Zertifizierungsprozess mit höchsten Anforderungen an Dokumentation sowie Umfang und Qualität der dafür erforderlichen Daten durchlaufen. Geht es um die Zertifizierung

komplett neuer Antriebssysteme, ist das besonders aufwendig, denn für hybrid-elektrische Antriebssysteme gibt es bislang nicht genug belastbare Erfahrungswerte, um Sicherheitsgrenzwerte zu definieren. Der Einsatz von Digitalen Zwillingen kann hier einen entscheidenden Unterschied machen – denn neue Antriebe erfordern auch passende Methoden, um die Auswirkungen grundlegender Änderungen zu untersuchen. Durch die Integration von Daten verschiedener Lieferanten und Hersteller können die Akteure eng mit den Zertifizierungsbehörden zusammenarbeiten und erfasste Daten austauschen. Das ermöglicht eine schnellere und sicherere Entwicklung der erforderlichen Sicherheitsstandards. Auch die Untersuchung dieses Potenzials ist Teil des Projekts DIREKT. Die Herausforderungen dabei liegen nicht nur in der komplexen Datenintegration, sondern auch in der Definition konsistenter Geschäftsmodelle, die die verschiedenen Partner motivieren, die notwendigen Daten bereitzustellen. Das Zusammenspiel aus datendurchgängiger Systemorientierung und dem Einsatz Digitaler Zwillinge könnte eine Grundlage für die nächste Generation des Fliegens schaffen: effizienter, nachhaltiger und bereit für die Herausforderungen der Zukunft. ♦

IHRE ANSPRECHPERSON
Thomas Zimmermann | +49 30 39006-473
thomas.zimmermann@ipk.fraunhofer.de

Um das Fliegen nachhaltiger zu gestalten, sind alternative Konzepte gefragt: Hybrid-elektrische Antriebe rücken in den Fokus von Forschung und Entwicklung.

Gefördert durch:



Das DIREKT Projekt und diese Veröffentlichung wurden gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages (Förderkennzeichen: 20L2108B).

Vom Ende gedacht

Pflichtaufgabe oder Chance für mehr Nachhaltigkeit? Ein Plädoyer für Batteriepässe als wertschöpfende Anwendung eines Datenökosystems

Ab Februar 2027 wird der Batteriepass ein verpflichtender Begleiter jeder Traktions-, Zweirad- oder Industriebatterie über 2 kWh Kapazität. Als Pilot wird er eine Vorreiterrolle im Bereich digitaler Produktpässe (DPP) in der Europäischen Union einnehmen – Pässe für weitere Erzeugnisse wie Möbel, Spielwaren und anderes werden Schritt für Schritt folgen.

Hinter der Initiative steckt eine ganze Reihe ehrenhafter Ziele: Der Batteriepass soll Transparenz in der Batterieindustrie schaffen, den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft unterstützen und nachhaltige sowie verantwortungsbewusste Lieferketten fördern. Dazu erfasst und verwaltet der Pass umfassende Informationen über eine Batterie. Das EU-weite Projekt »Battery Pass«, das unter Beteiligung des Fraunhofer IPK inhaltliche und technische Rahmenwerke und Empfehlungen für die Umsetzung des EU-Batteriepasses erarbeitet hat, hat eine Reihe von Kategorien an Informationen identifiziert, die ein Batteriepass umfassen sollte (vgl. Infokasten). Im Interesse der Datensouveränität werden diese Informationen im Batteriepass dezentral über Systeme bereitgestellt, die der Wirtschaftsakteur betreibt, der die Batterie in Verkehr bringt.

EIN BATTERIEPASS SOLLTE FOLGENDE INFORMATIONEN UMFASSEN:

Materialien und Zusammensetzung: dokumentiert gefährliche Stoffe, die chemische Zusammensetzung und kritische Rohstoffe

CO₂-Fußabdruck: dokumentiert die Umweltbilanz der Batterie anhand von CO₂-Metriken, Studienverweisen und Leistungsklassen

Leistung und Haltbarkeit: erfasst statische Parameter zur Kapazität, Leistung und erwarteten Lebensdauer sowie dynamische Daten aus der Nutzung, um den Zustand der Batterie zu bewerten

Zirkularität und Ressourceneffizienz: enthält Informationen zum Anteil recycelter Materialien, Handbücher zur Demontage, Ersatzteilnummern und Sicherheitsmaßnahmen sowie Informationen zu Möglichkeiten der Rückgabe an autorisierte Stellen

DIE VORTEILE WARTEN AM LEBENSENDE

Seine Stärken spielt der Batteriepass nach Untersuchungen des Battery-Pass-Konsortiums insbesondere am Ende der Nutzungsdauer einer Batterie aus – in den Bereichen Sammlung, Wiederverwertung und Recycling von Batterien. So können Behörden durch detaillierte Informationen illegale Exporte und Entsorgungsmethoden besser verhindern, wodurch das sogenannte »Battery Leakage« – der Verlust von Batterien aus dem legalen Recyclingkreislauf – reduziert wird.

Auch die Bestimmung des Restwerts von Batterien wird durch den Pass vereinfacht. Dank umfassender Daten zu Leistung und Haltbarkeit können Unternehmen und private Nutzer den Wert einer Batterie genauer einschätzen. Dies reduziert nicht nur technische Testkosten, sondern erhöht auch die Wahrscheinlichkeit, dass Batterien für Second-Life-Anwendungen weiterverwendet, anstatt direkt recycelt oder entsorgt werden.

Wo eine Weiternutzung nicht mehr möglich oder sinnvoll ist, unterstützt der Batteriepass ein effizienteres Recycling, da transparente Informationen über die Zusammensetzung und Anleitungen zur Demontage bereitgestellt werden. Dies senkt Kosten, zum Beispiel für Probenahmen, was zu einer insgesamt nachhaltigeren Verwertung führt.

FIRMENENTSCHEIDUNG: PFLICHT ODER KÜR

Ob der Pass einer spezifischen Batterie so ausgelegt wird, dass er seine Stärken voll ausspielen kann, hängt von Entscheidungen ab, die beim Inverkehrbringer getroffen werden. Die Implementierung ist zwar verpflichtend, doch bei der Ausgestaltung gibt es Spielräume, die Unternehmen vor strategische Entscheidungen stellen. Diese wirken sich maßgeblich darauf aus, ob es bei einer Pflichtumsetzung bleibt oder der Inverkehrbringer die wirtschaftlichen Vorteile, die ein digitaler Produktpass mit sich bringt, effektiv nutzen kann.

Um sich optimal auf die Einführung vorzubereiten, empfiehlt das Battery-Pass-Konsortium, vier zentrale Fragen zu berücksichtigen:

1. Warten oder handeln?

Unternehmen müssen abwägen, ob sie frühzeitig handeln oder erst auf eine spätere Umsetzung setzen. Ein verzögerter Einstieg kann dazu führen, dass Kundenverträge oder Marktzugänge verloren gehen und durch eine verspätete Implementierung zusätzliche Kosten entstehen. Andererseits können unklare regulatorische Anforderungen oder unzureichende Lieferantendaten eine vorschnelle Umsetzung erschweren. Ein gezielter Kosten-Nutzen-Vergleich ist entscheidend, um den besten Zeitpunkt für die Einführung des Batteriepasses zu bestimmen.

2. Compliance oder geschäftlicher Mehrwert?

Unternehmen müssen entscheiden, ob der Batteriepass lediglich als gesetzliche Verpflichtung betrachtet wird oder ob er eine strategische Chance darstellt. Eine minimalistische Umsetzung reicht aus, um grundlegende Compliance-Anforderungen zu erfüllen, etwa durch die Erfassung von Daten zu Gesundheitszustand und Haltbarkeit. Wer jedoch auf detaillierte Daten setzt, beispielsweise zur Überwachung der Lieferketten, Produktionsprozesse und Zirkularität, kann durch eine verbesserte Transparenz die Effizienz steigern und neue Geschäftsmodelle erschließen.

3. Selbst entwickeln oder externe Lösung nutzen?

Unternehmen stehen vor der Wahl, ob sie den Batteriepass intern entwickeln oder externe Anbieter nutzen. DPP-Dienstleister und Konsortien wie Catena-X bieten bereits standardisierte Lösungen an. Große Unternehmen mit ausreichenden Kapazitäten können eigene Inhouse-Lösungen entwickeln, um maßgeschneiderte Mehrwerte zu generieren. Kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) hingegen könnten davon profitieren, die Umsetzung an externe Anbieter auszulagern, um Kosten und Komplexität zu reduzieren. Zudem bieten Datenökosysteme Möglichkeiten, den notwendigen Datenaustausch entlang der vorgelagerten Wertschöpfungskette zu realisieren.

4. Bestehende Infrastruktur oder Neustart?

Die bestehende IT- und Dateninfrastruktur ist für die Einführung des Batteriepasses von entscheidender Bedeutung. Einige Unternehmen verfügen bereits über Systeme, die eine Vielzahl relevanter Daten erfassen und verwalten, was den Übergang erleichtert. Wer ohne eine solche Basis startet, sieht sich häufig mit hohem Investitions- und Implementierungsaufwand konfrontiert. Bleibt man jedoch bei älteren Systemen, besteht das Risiko, dass diese nicht auf zukünftige Anforderungen ausgelegt sind. Die Einführung eines Batteriepasses bietet die Chance, gewachsene IT-Strukturen neu zu denken und mit einem umfassenden Digitalisierungsansatz zukunftsfähige Lösungen zu etablieren.

DATENÖKOSYSTEME FÜR UNTERNEHMENSÜBERGREIFENDEN DATENAUSTAUSCH

Soll das volle Potenzial von digitalen Produktpässen ausgeschöpft werden, bietet es sich an, das ganzheitliche Konzept der Datenökosysteme als Basis für die Ausgestaltung zu wählen – immerhin ist ein DPP im Kern ein Datenhub. Datenökosysteme sind komplexe Netzwerke, in denen Daten als wertvolle Ressource betrachtet werden, die von verschiedenen Akteuren erzeugt, geteilt und verarbeitet werden. Zu den Akteuren gehören Datenproduzenten, -verarbeiter und -konsumenten, die in einem dynamischen Austausch stehen.

Die Besonderheit und Stärke von Datenökosystemen ist der sogenannte Föderationsansatz: Daten werden in verteilten Systemen gespeichert und verarbeitet, anstatt in zentralisierten Datenbanken. Dieser Ansatz ermöglicht es, Daten aus verschiedenen Quellen zu integrieren, während die Datenhoheit der einzelnen Akteure gewahrt bleibt und sie die Kontrolle darüber behalten, wer wann wie auf welche ihrer Daten zugreift. Durch die Nutzung von Schnittstellen und standardisierten Protokollen können verschiedene Organi-

sationen und Systeme miteinander kommunizieren und Daten austauschen, ohne dass die Datenbestände zentralisiert werden müssen. Das fördert nicht nur die Zusammenarbeit und den Datenzugriff, sondern stärkt auch das Vertrauen zwischen den Beteiligten, da sie die Kontrolle über ihre eigenen Daten behalten.

INITIATIVEN LEISTEN GRUNDLAGENARBEIT

Eine ganze Reihe von Projekten arbeitet mittlerweile daran, Lösungen für Datenökosysteme bereitzustellen. Das Fraunhofer IPK ist bei einigen federführend beteiligt. GAIA-X ist ein zentrales Element in der Entwicklung von Datenökosystemen in Europa. Es schafft eine vertrauenswürdige und interoperable Infrastruktur, die es Unternehmen ermöglicht, ihre Daten sicher zu teilen und zu nutzen. Mit GAIA-X wird eine Plattform geschaffen, die den Austausch von Daten und Services zwischen verschiedenen Sektoren erleichtert und gleichzeitig die Einhaltung europäischer Datenschutzstandards gewährleistet. Durch die Förderung von Offenheit und Zusammenarbeit zielt GAIA-X darauf ab, eine nachhaltige digitale Wirtschaft zu unterstützen und die digitale Souveränität Europas zu stärken.

Datenökosysteme sind komplexe Netzwerke, in denen Daten als wertvolle Ressource betrachtet werden.

Seine Stärken spielt der Batteriepass am Ende der Nutzungsdauer einer Batterie aus – bei Sammlung, Wiederverwertung und Recycling.

Catena-X stellt eine erste Umsetzung eines Datenökosystems für die Automobilindustrie dar, das auf der Grundlage von GAIA-X entwickelt wurde. Dieses Datenökosystem kann als Basis für den datensouveränen Austausch von Informationen dienen, einschließlich solcher, die sich auf Batterien beziehen. Um den Austausch von Batterieinformationen zu ermöglichen, existieren im Datenökosystem standardisierte Datenmodelle, die einen interoperablen Austausch zwischen den Unternehmen sicherstellen. Darüber hinaus werden in dem Datenökosystem Grundlagen geschaffen, um den Austausch der Daten auf bestimmte Parteien und bestimmte Anwendungsfälle zu beschränken.

Die Projektfamilie Manufacturing-X hat das Ziel, Lösungen aus Catena-X auf andere Branchen zu übertragen. Ein spezifisches Projekt innerhalb dieser Familie ist Aerospace-X, das sich mit der Luftfahrtindustrie beschäftigt. Im Rahmen dieses Projekts werden neben der allgemeinen technischen Infrastruktur und den Services zur Umsetzung des Datenökosystems vier Anwendungsfälle betrachtet: Kapazitätsmanagement, Ökobilanzierung und Product Carbon Footprint (PCF), Kreislaufwirtschaft sowie End-to-End-Qua-

litätsmanagement. Für die Umsetzung dieser Anwendungsfälle sind Informationen aus der Lieferkette erforderlich. Insbesondere für die Ökobilanzierung (LCA) werden Daten wie Energieverbräuche aus der Produktion oder dem Transport sowie die Einflüsse bei der Bearbeitung von Materialien herangezogen, die von Partnern in der frühen Lieferkette stammen. Zudem können die Materialinformationen auch zur Auswahl passender Entscheidungen im Bereich der Kreislaufwirtschaft verwendet werden.

All diese Initiativen machen eine nachhaltige Datenzukunft möglich, die Daten als das wertschätzt, was sie sind: ein Rohstoff für Unternehmenserfolg. In diesem Kontext werden digitale Produktpässe künftig einen maßgeblichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen leisten. ♦

IHRE ANSPRECHPERSONEN
Pascal Lünemann | +49 30 39006-188
pascal.luenemann@ipk.fraunhofer.de
Prof. Dr.-Ing. Thomas Knothe | +49 30 39006-195
thomas.knothe@ipk.fraunhofer.de

Weitere Informationen

www.ipk.fraunhofer.de/battery-pass



www.ipk.fraunhofer.de/futur-24-datenraeume



https://thebatterypass.eu



Auf eigene Faust

In einem Auto sind Tausende Teile mit verschiedensten Geometrien verbaut. Die filigrane Montage können bald auch Roboter übernehmen, und das flexibel und autonom.

Die vollautomatische Montage ganzer Baugruppen ist im Fahrzeugbau längst Realität. Allerdings sind die eingesetzten Anlagen oft nur auf wenige oder sogar einzelne Aufgaben spezialisiert. Die Folge sind statische Fertigungsstraßen, die so gar nicht zu den aktuellen Anforderungen an Montagesysteme passen. In immer schnellerer Abfolge verändern sich nämlich Produkte und Märkte. Flexible Systeme müssen her, mit hoher Mobilität, Anpassungsfähigkeit und Modularität. Dieser Paradigmenwechsel ist nicht nur eine große Herausforderung für Automobilhersteller, sondern auch ein spannendes Entwicklungsfeld mit hohem Innovationspotenzial. Zusammen mit Volkswagen Nutzfahrzeuge haben Forschende am Fraunhofer IPK eine Konzeptanlage zur Erprobung von Flexibilitätsansätzen in der Montage entwickelt. Die Montage von Innenverkleidungsteilen eines Fahrzeugs, bislang ein vollständig manueller Prozess, soll in Zukunft automatisiert ablaufen und als Beleg für das Potenzial autonomer Montagetechnologien dienen.

STATISCHE LÖSUNGEN SIND PASSÉ

Ein Flexibilitätsaspekt, der dem Industriepartner besonders wichtig war, ist die Ortsungebundenheit der Lösungen. Das Robotersystem »Tend-O-Bot« wurde bereits für verschiedenste Anwendungen von Maschinenbeladung bis Mensch-Roboter-Kollaborationen eingesetzt. Es besteht aus einer mobilen Plattform mit integriertem Roboterarm und ist dank modernen Kartierungs- und Lokalisierungsalgorithmen in der Lage, selbstständig durch die Produktionsstätte zu navigieren. Zusätzliche Sensoren an Bord gewährleisten, dass das Roboterfahrzeug flexibel auf auftauchende Hindernisse reagieren und Kollisionen vermeiden kann. Aufbauend auf dieser Technik kann es zudem montagerelevante Ziele, in diesem Fall die Fahrzeugkarosserie, zuverlässig erkennen und lokalisieren. Auf Basis der optischen Bewertung der Montagesituation kann das System sogar ermitteln, welche Montageschritte bereits durchgeführt wurden und welche noch zu erledigen sind.

Nachdem er die Karosserie detektiert hat und an die richtige Position gefahren ist, muss der Tend-O-Bot die Montageumgebung genau erfassen. In einem mehrstufigen Positionierungsverfahren – von grob nach fein – schätzt das System die Lage seines Ziels zunächst auf Basis von KI-Modellen und verfeinert diese durch herkömmliche Sensorverarbeitung im Nahbereich für ein genaues Ergebnis. So kann der mobile Manipulator die notwendigen Montagepositionen später millimetergenau eigenständig und flexibel anfahren.

FINGERSPITZENGEFÜHL MIT ROBOTERHAND

Nun kann der eigentliche Montageprozess beginnen. Die Aufgabe für den Roboter besteht darin, eine feine Spange an der Rückseite des zu montierenden Bauteils in einen Montagepunkt zu klippen – bisher ein manueller Prozess, der ein hohes Maß an taktiler Feinfühligkeit erfordert. Aus den Anforderungen des Industriepartners folgt aber, dass die eingesetzte Greiftechnik auch über diese Beispielaufgabe hinaus eine Vielzahl von Bauteilen mit unterschiedlicher Geometrie handhaben können muss. Das Entwicklerteam setzt daher auf den Einsatz eines unterdruckbasierten und formflexiblen Greifers, dessen Systeme in die Steuerung der Plattform integriert sind, um das zu montierende Bauteil anzuheben. Der weiche Greifer passt seine Form an unterschiedliche Geometrien an und ermöglicht so die Montage verschiedenster Komponenten.

Kritisch beim Klipsprozess: Bereits kleinste räumliche Abweichungen führen zwangsläufig zu einem Misserfolg der Montage und potenziell zu Schäden an der Karosserie. Dieser Umstand sorgt für höchste Anforderungen an Messgenauigkeit und Überwachung des Montageprozesses. Menschliche Werkerinnen und Werker können sich dabei auf ihre Sinne stützen, insbesondere auf haptische Empfindungen und akustische Signale. Was beim Menschen funktioniert, nimmt sich das Projektteam als Vorbild und bewertet in einem innovativen Verfahren den Klipsprozess basierend auf sensorischem Feedback.

KOMPLEXES ZUSAMMENSPIEL MODERNER TECHNIK

Wenn viele verschiedene Hardwarekomponenten zusammenkommen, ist das Potenzial für Fehler und Schnittstellenschwierigkeiten hoch. Die kabellose Kommunikation über 5G sowie die Energieversorgung an Bord des Tend-O-Bot stellen zusätzliche Herausforderungen für die mobile Lösung dar. Um den hohen Anforderungen gerecht zu werden, ist die eingesetzte Software skalierbar und modular aufgebaut. Einzelne Module können zwischen dem Onboardcomputer des Roboters und externen Cloudcomputern verschoben werden: ideal für die Abstimmung zwischen Signallaufzeiten, Energiebedarf und Ausnutzung der verfügbaren Rechenressourcen. Die verteilte Entwicklung lässt außerdem großen Spielraum, um die Lösung in Zukunft funktionell zu erweitern.



1

Bilder:

1

Die Montage der zahlreichen Bauteile moderner Fahrzeuge erfordert Fingerspitzengefühl. Mit innovativer Sensorik und Aktorik sind künftig auch Roboter dazu in der Lage.

2

Karosserie und Montagepunkte werden zunächst millimetergenau erfasst, damit anschließend auch die zu montierenden Bauteile exakt positioniert werden können.



2

Robotik, Netzwerktechnik, Bildverarbeitung und KI eng zu integrieren hat sich im Projekt mit Volkswagen Nutzfahrzeuge als Schlüssel zum Erfolg erwiesen. An diesem realen Beispiel können Automobilhersteller ableiten, wie zukünftig auch komplexe Montageaufgaben automatisiert und autonom ablaufen könnten. ♦

IHRE ANSPRECHPERSON

Oliver Heimann | +49 30 39006-327
oliver.heimann@ipk.fraunhofer.de

Fahren und Bauen – zwischen Anspruch und Machbarem

Die Schiene gilt als einer der klimafreundlichsten Verkehrsträger. Trotzdem steht sie in Deutschland häufig in der Kritik. Ein Gastbeitrag von Dr. Sascha Reinkober, Leiter Großmaschineneinsatz bei der DB InfraGO AG.

Verspätungen, Zugausfälle, unzufriedene Reisende – unsere Eisenbahninfrastruktur verlangt unseren Kunden bezogen auf Qualität und Kapazität einiges ab. Seit der Bahnreform 1994 ist die Betriebsleistung um beeindruckende 27 Prozent gestiegen, das Netz gleichzeitig um 15 Prozent geschrumpft. Trotz dieser Entwicklung betreibt die DB InfraGO AG heute das größte Schienennetz Europas – im sogenannten Mischverkehr. Das heißt, Güterverkehr, Personennahverkehr und Personenfernverkehr teilen sich dieselbe Infrastruktur. Auf mehr als 33 000 Gleiskilometern sind in Deutschland täglich im Schnitt 50 000 Züge von mehr als 450 Eisenbahnverkehrsunternehmen unterwegs. Diese hohe Fahrdichte sowie die zum Teil sehr langen Verbindungen – die längste Bahnstrecke zwischen Hamburg und München über Frankfurt Flughafen misst 1301 Kilometer – stellen höchste Anforderungen an die Betriebsstabilität. Der Bahnverkehr funktioniert wie eine Perlenkette: Wenn ein Glied ins Stocken gerät, beeinflusst das den gesamten Ablauf.

Unsere Aufgabe bei der DB InfraGO AG ist es, dieses komplexe Schienennetz leistungs-

fähig zu gestalten und dauerhaft zu erhalten. Dazu gehört die Erstellung von Fahrplänen, die Betriebsführung, das Baumanagement, die Instandhaltung und die kontinuierliche Weiterentwicklung der Schieneninfrastruktur. Dabei folgen wir der Prämisse »Fahren und Bauen« und realisieren mit dem Deutschlandtakt einen landesweit optimal synchronisierten Fahrplan für den Personen- und Güterverkehr. Unser Ziel: Fernverkehrszüge sollen in den größten deutschen Städten künftig im 30-Minuten-Takt und stets zur gleichen Zeit ankommen. Die Anschlüsse im Regionalverkehr werden daran ausgerichtet. Damit schaffen wir bessere Verbindungen, kürzere Umsteigezeiten und mehr Verlässlichkeit – auch in ländlichen Regionen. Darüber hinaus hilft uns der Taktfahrplan, Engpässe im Schienennetz frühzeitig zu identifizieren, Züge zu priorisieren sowie benötigte Infrastrukturmaßnahmen gezielt umzusetzen.

Zu letzteren gehören nicht nur Neu- und Ausbauvorhaben, sondern vor allem auch die Instandhaltung des hochbelasteten Schienennetzes. Darunter fallen die regelmäßige Inspektion, Wartung und Reparatur von

Gleisen, Weichen und Signalen. Auch hier arbeiten wir im Takt: Ein Großteil unserer Instandhaltungsarbeiten in der Großmaschinentechnik findet in regelmäßig getakteten und eingeplanten Zeiträumen statt. Hauptsächlich nachts in den sogenannten Sperrpausen zwischen 22 und 5 Uhr. Mit hochspezialisierten Schienenschleif- und Fräszügen beheben wir proaktiv und reaktiv Verschleißerscheinungen, inspizieren Brücken und Tunnel oder stabilisieren mit Stopf- und Sanierungsarbeiten die Fahrbahn. Diese kontinuierlichen Maßnahmen erhöhen die Betriebssicherheit, vermeiden Langsamfahrstellen oder Zugausfälle und sorgen dafür, dass der Verkehr tagsüber möglichst reibungslos läuft.

Mobilität ist aber mehr als nur Transport. Die DB InfraGO AG ist zugleich für die Gestaltung und den Betrieb von rund 5400 Bahnhöfen in ganz Deutschland verantwortlich. Um die Aufenthaltsqualität für die Reisenden zu verbessern und auszubauen, arbeiten wir mit Ländern und Kommunen, Aufgabenträgern und Eisenbahnverkehrsunternehmen zusammen und entwickeln attraktive Bahnhöfe, die nicht nur zweckgebundene Halte-

Dr.-Ing. Sascha Reinkober

war wissenschaftlicher Mitarbeiter und zuletzt Abteilungsleiter Fertigungstechnologien am Fraunhofer IPK. Nach seiner Promotion wechselte er 2020 zur Deutschen Bahn und leitet seit August 2024 den Großmaschineneinsatz bei der DB InfraGO AG. Sein Team aus mehr als 200 Mitarbeitenden ist zum großen Teil deutschlandweit an wechselnden Einsatzorten und zu 95 Prozent in Nachtarbeit tätig. Privat und dienstlich fährt Reinkober natürlich mit der Bahn. »Ich habe es schätzen gelernt, auch mal einen Kaffee trinken zu gehen, sich die Beine vertreten zu können oder auch im Zug zu arbeiten«, sagt er, gibt aber auch zu, seine Reisen an die Verlässlichkeit der Zugverbindungen anzupassen. Sein Tipp: »Ich reise meist sehr früh am Morgen oder sehr spät am Abend, weil die Züge dann pünktlicher sind. Und ich versuche, Umstiege zu vermeiden. Dafür nehme ich auch eine längere Fahrzeit in Kauf.«



stationen sind, sondern auch kunden- und serviceorientierte Orte, die Reisende zum Verweilen einladen. Ein gutes Beispiel ist der Leipziger Hauptbahnhof, der als größter Kopfbahnhof Europas auch ein architektonisches Highlight ist und über 140 Geschäfte und Restaurants beherbergt.

Bei all unseren Bemühungen, sowohl die Qualität des Schienennetzes als auch der Bahnhöfe zu verbessern, steht die Gemein-

wohlorientierung der Eisenbahninfrastruktur seit dem Jahr 2024 mehr denn je im Fokus. Das bedeutet: Wir richten die Bewirtschaftung und den Ausbau der Infrastruktur konsequent an den Bedürfnissen der Bürgerinnen und Bürger, der Wirtschaft und der Umwelt aus. Dabei ist für uns das Zusammenspiel mit dem Bund als Eigentümer der Deutschen Bahn zentral: Der Bund formuliert politische, am Gemeinwohl orientierte Ziele für die Infrastruktur und stellt die Finan-

zierung sicher. Die DB InfraGO AG setzt diese Ziele effizient und transparent um. Für die nächsten Jahre ist unser Fahrplan gesetzt: Wir wollen die Verkehrsleistung im Personenverkehr verdoppeln, den Marktanteil im Schienengüterverkehr von 19 auf 25 Prozent ausbauen und den Deutschlandtakt umsetzen – und letztendlich dafür sorgen, dass noch mehr Verkehr auf die umweltfreundliche Schiene verlagert wird. ♦

PTK 2025

XVIII. INTERNATIONALES
PRODUKTIONSTECHNISCHES
KOLLOQUIUM

MARKTFÜHRERSCHAFT DURCH SYSTEMINTEGRATION

SAVE THE DATE 13.–14.11.2025
BERLIN

In der heutigen globalisierten Wirtschaft hängt unternehmerischer Erfolg zunehmend von vernetzten und integrierten Wertschöpfungsketten ab. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, alle an der Produktentwicklung, -herstellung und -nutzung beteiligten Ökosysteme nahtlos miteinander zu verbinden. Eine effektive Systemintegration wird damit zum Schlüssel für Hersteller, um reale Technologien und Prozesse mit digitalen Daten und Informationen zu verknüpfen und ihre Produktion effizienter, flexibler und nachhaltiger zu gestalten. Unternehmen, die diese Integration beherrschen, sichern sich nicht nur Wettbewerbsvorteile, sondern langfristig auch ihre Innovationsfähigkeit und Marktführerschaft.

Auf unserer Konferenz erhalten Sie exklusive Einblicke in die neuesten Entwicklungen, Strategien und Lösungen, mit denen eine Systemintegration auf verschiedenen Ebenen und über Unternehmensgrenzen hinweg gelingt. Führende Expertinnen und Experten aus Industrie und Wissenschaft stellen Ansätze und konkrete Praxisbeispiele aus den Bereichen IIoT, Künstliche Intelligenz und Maschinelles Lernen, Mensch-Maschine-Interaktion sowie Kreislaufwirtschaft vor. Mit unseren technologieorientierten Transferpfaden durch die Versuchsfelder und Labore von Fraunhofer IPK und IWF der TU Berlin bieten wir Ihnen außerdem wieder praxisnahe Einblicke in unsere aktuellen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

Nutzen Sie die Gelegenheit, sich auf dem PTK 2025 mit Fach- und Führungskräften aus dem In- und Ausland auszutauschen und wertvolle Impulse für Ihr Unternehmen zu sammeln! Wir freuen uns, wenn Sie mit dabei sind und gemeinsam mit uns die Zukunft der Wertschöpfung aktiv gestalten.

Informationen
zur Konferenz auf
www.ptk.berlin



EINE VERANSTALTUNG VON

Fraunhofer
IPK
INSTITUT
PRODUKTIONSANLAGEN UND
KONSTRUKTIONSTECHNIK

IN KOOPERATION MIT

IWF
INSTITUT
WERKZEUGMASCHINEN UND FABRIKBETRIEB
TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

IWF
e.V.

PARTNER



DATAIDERS

formnext



Systems



MEHR KÖNNEN

In unserem MEHR KÖNNEN-Programm tragen wir technologiebasiertes Know-how direkt in die unternehmerische Praxis. Mit der Teilnahme an einer unserer Weiterbildungsveranstaltungen investieren Sie in Ihre berufliche Entwicklung und fördern gleichzeitig den wirtschaftlichen Erfolg Ihres Unternehmens. Nutzen Sie die Gelegenheit, sich wissenschaftlich fundiert und umsetzungsorientiert fortzubilden. Knüpfen Sie Netzwerke zu anderen Expertinnen und Experten, auch über die eigenen Branchengrenzen hinweg.

Nächste
Veranstaltungen:



© ipopba / Adobe Stock

Skalierbare Energieeffizienz in der industriellen Praxis

18.09.2025



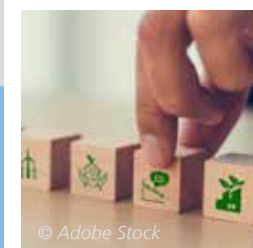
Weitere Informationen
zu unserem Programm
finden Sie unter
[www.ipk.fraunhofer.de/
weiterbildung](http://www.ipk.fraunhofer.de/weiterbildung)



© Adobe Stock

**Zertifikatsprogramm
PLM Professional**

22.–26.09.2025 /
24.–28.11.2025



© Adobe Stock

Klimaschutzmanagement

Workshopreihe / Termin
nach Vereinbarung

Neue Herausforderung gesucht?

Stellenangebote für Berufserfahrene, Berufseinsteigende und Studierende in Wissenschaft, Verwaltung, Technik und IT finden Sie hier:



[www.ipk.fraunhofer.de/de/
jobs-karriere.html](http://www.ipk.fraunhofer.de/de/jobs-karriere.html)



IMPRESSUM

FUTUR 1 / 2025
27. Jahrgang
ISSN 1438-1125

HERAUSGEBER
Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann

MITHERAUSGEBER
Prof. Dr.-Ing. Holger Kohl
Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger
Dr.-Ing. Kai Lindow
Prof. Dr.-Ing. Michael Rethmeier

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen
und Konstruktionstechnik IPK
Institut für Werkzeugmaschinen und
Fabrikbetrieb IWF der TU Berlin

KONTAKT
Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen
und Konstruktionstechnik IPK
Claudia Engel
Pascalstraße 8–9
10587 Berlin
Telefon: +49 30 39006-140
Fax: +49 30 39006-392
pr@ipk.fraunhofer.de
www.ipk.fraunhofer.de

REDAKTION
Claudia Engel (V. i. S. d. P.):
S. 22–27, 46/47
Ruth Asan (Chefredaktion):
S. 10–15, 28/29, 30–35
Benjamin Javitz:
S. 36/37, 38/39, 44/45
Katharina Strohmeier:
S. 16–21, 40–43

GESTALTUNG
Larissa Klassen (Artdirektion)

FONT-GESTALTUNG FUTUR-LOGO
Elias Hanzer

FOTOGRAFIE N UND GRAFIKEN
Soweit nicht am Bild anders vermerkt:
© Fraunhofer IPK/Larissa Klassen:
S. 1, 6/7, 9, 18, 20, 22–27, 29, 45
© moofushi – stock.adobe.com:
S. 3, 30/31
© Martí Rosselló, Marvin, guteksk7,
The Pixel Store – stock.adobe.com:
S. 13 (v. l. n. r.)
© iStock.com/leonello; xiaoliangge,
moonrise – stock.adobe.com:
S. 14 (obere Darstellung v. l. n. r.)
© yanik88, Václav Romanov, scharfsinn86,
Smoky, moonrise – stock.adobe.com:
S. 14 (untere Darstellung v. l. n. r.)
© gerenme/E+ via Getty Images:
S. 17
© Fraunhofer IPK/Emil Klima:
S. 21
© IM Imagery – stock.adobe.com:
S. 36
© Celt Studio – stock.adobe.com (KI-generiert):
S. 38
© Tierney – stock.adobe.com:
S. 48
© Fraunhofer-Gesellschaft:
S. 49 (unten)

BILDBEARBEITUNG
Larissa Klassen

HERSTELLUNG
Druckstudio GmbH

**Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen
und Konstruktionstechnik IPK**

Pascalstraße 8–9 | 10587 Berlin | Telefon: +49 30 39006-140
pr@ipk.fraunhofer.de | www.ipk.fraunhofer.de



[instagram.com/fraunhofer_ipk](https://www.instagram.com/fraunhofer_ipk)
[linkedin.com/company/fraunhofer-ipk](https://www.linkedin.com/company/fraunhofer-ipk)
[youtube.com/FraunhoferIPK](https://www.youtube.com/FraunhoferIPK)