



F  
O  
R  
S  
C  
H  
U  
N  
G  
A  
K  
T  
U  
E  
L  
L

HK  
KA  
A



# Liebe Leserinnen und Leser,

ich freue mich, Ihnen die „Forschung aktuell 2022“, den jährlichen Forschungsbericht der Hochschule Karlsruhe (Die HKA) vorzustellen. Wir leben in einer zunehmend fragilen Welt, in der vermeintliche Gewissheiten wie Freiheit, Sicherheit und Wohlstand in einer Weise bedroht werden wie seit dem Ende des Kalten Kriegs nicht mehr. Und wie immer sind die Ärmsten der Armen am meisten betroffen. In vielen afrikanischen Ländern herrscht seit Jahren eine schlimme Dürre und die Pandemie stellte ein ohnehin schwach entwickeltes Gesundheitswesen vor zusätzliche Herausforderungen. Mit Forschungs- und Umsetzungsprojekten wie z. B. SophiA (siehe Artikel ab Seite 28) leistet die HKA, eine der forschungsstärksten Hochschulen für Angewandte Wissenschaften in Deutschland, vor Ort direkte Hilfe zur Verbesserung und Stabilisierung der medizinischen Infrastruktur.

Die angewandte Forschung von heute stellt die Weichen für eine zukunftsfähige Gesellschaft. Gerade in diesen schweren Zeiten setzen wir damit ein Signal für Aufbruch und Optimismus. Viele Beiträge der fünf Rubriken dieser Ausgabe tragen auf ganz unterschiedliche Weise, direkt oder indirekt, dazu bei, eine Energieversorgung ohne den Verbrauch fossiler Energieträger zu ermöglichen.

Im Zentrum unserer angewandten Forschung stehen auch die unmittelbaren Bedürfnisse der Menschen, wie die Beiträge der abschließenden Rubrik „Assistenzsysteme“ aufzeigen. Weitere Beiträge aus erfolgreichen Forschungsprojekten befinden sich in den Rubriken „Neue Materialien“, „Ökologie und Ökonomie“, „Elektromobilität und Verkehrswesen“ sowie „Intelligente Systeme“.

Damit illustriert diese Ausgabe erneut die große Bandbreite unserer Forschungsaktivitäten. Diese Forschung zu stärken ist und bleibt eines der wichtigsten strategischen Ziele im Rahmen der Profilbildung der HKA.

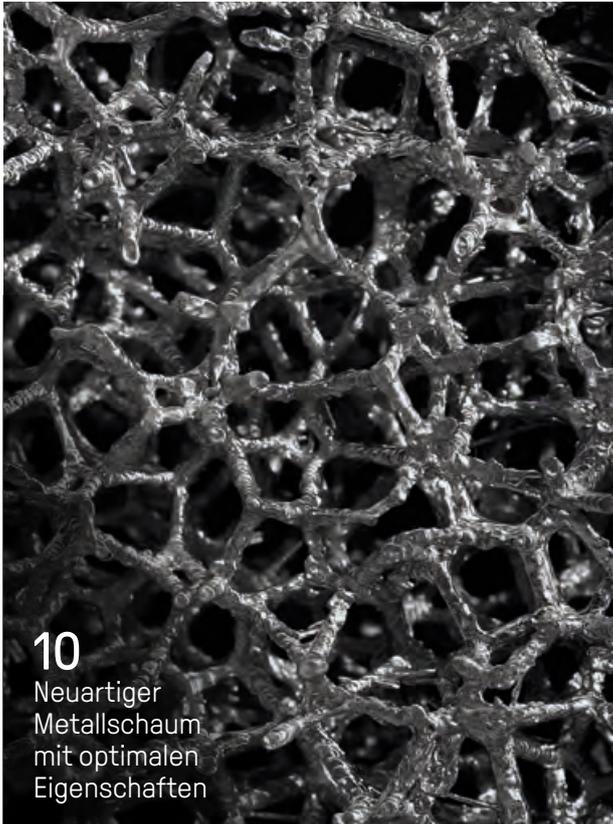
Was es mit dem faszinierenden Objekt auf dem Cover auf sich hat, erfahren sie, geschätzte Leserinnen und Leser, gleich im ersten Beitrag dieser Ausgabe.



Mein Dank gilt allen Kolleginnen und Kollegen, die Beiträge eingereicht und so die gute Qualität dieser Publikation ermöglicht haben. Ganz besonders bedanken möchte ich mich auch bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, die redaktionell, gestalterisch und organisatorisch an der Erstellung der „Forschung aktuell 2022“ mitgewirkt haben.

Ihnen, werte Leserinnen und Leser, wünsche ich bei der Lektüre interessante Einblicke in die Forschungsaktivitäten der HKA. Lassen Sie sich von den Beiträgen inspirieren und ermutigen.

**Prof. Dr.-Ing. Franz Quint**  
Prorektor für Forschung, Kooperationen  
und Qualitätsmanagement



**10**  
Neuartiger  
Metallschaum  
mit optimalen  
Eigenschaften



**26**  
Mit Sonnenlicht und  
Solarzellen grünen Strom  
für Kältemaschinen und  
zur Abwasseraufbereitung  
erzeugen

## Überblick über die Forschung an der Hochschule Karlsruhe

Franz Quint und Elena Stamm

### Neue Materialien

- 12** Der Natur abgeschaut  
Leonie Wallat und Frank Pöhler
- 16** Materialwissenschaft um Luftlöcher  
Jana Holland-Cunz, Anastasia August, Martin Reder  
und Britta Nestler
- 22** Fiber Reinforced Self-Compacting  
Lightweight Concrete for the  
Manufacture of Floating Blocks  
Danar Altalabani and Stefan Linsel

### Ökologie und Ökonomie

- 28** SophiA – Hilfe für Afrikas  
Gesundheitswesen  
Oliver Schmid und Michael Kauffeld
- 34** Solarbetriebene Abwasseraufbereitung  
für afrikanische Krankenhäuser  
Sneha De und Jan Hoinkis
- 36** **Interview:** Die Lebenszeit der Menschen  
wird immer länger, die der Maschinen  
immer kürzer  
Hagen Krämer
- 42** New Work – Arbeitswelt nach Covid-19  
Marcel Orth, Stefanie Regier und Ingo Stengel

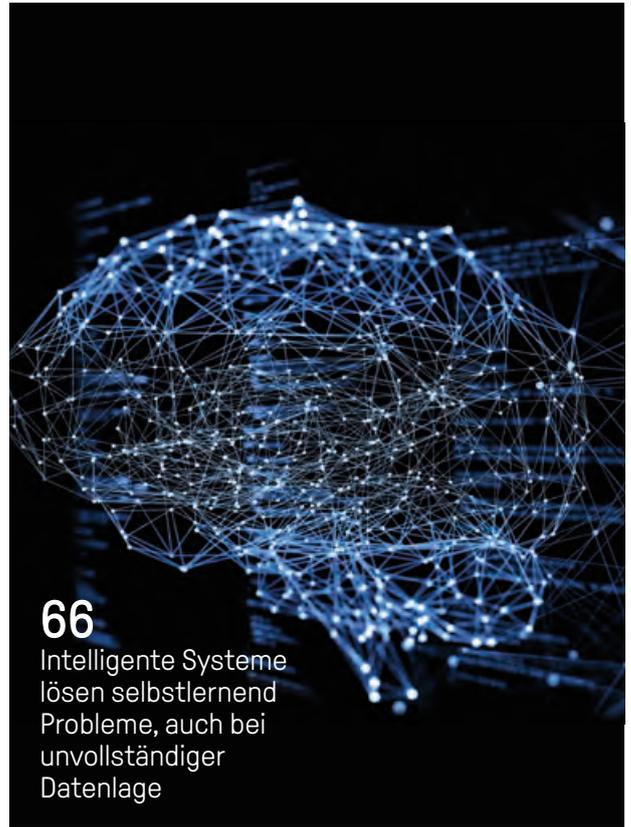
**46**

Elektromobilität und Verkehrswesen – Ist das E-Bike das Fahrzeug der Zukunft?



**66**

Intelligente Systeme lösen selbstlernend Probleme, auch bei unvollständiger Datenlage



## Elektromobilität und Verkehrswesen

- 48** Entwicklung innovativer und temperaturstabiler Batterien  
Florian Hauser und Olivier Schecker
- 54** Potenziale von E-Bikes im ländlichen Raum – Erfahrungen aus Baiersbronn  
Elke Häußler und Jan Riel
- 58** Die Treibhausgasbilanz von Fahrrad, Pedelec und Pkw im Vergleich  
Martin Temmen, Willy Dirnsteiner, Benedikt Prinzing und Jochen Eckart
- 62** BlueGreenStreets – klimaangepasste Straßenräume gestalten  
Jonas Fesser, Philip Zwernemann, Jochen Eckart und Markus Stöckner

## Intelligente Systeme

- 68** KI5GRob – Cloud-Computing und 5G als Befähiger für KI-Verfahren in der Robotik  
Gergely Sóti, Yongzhou Zhang, Christian Wurll und Björn Hein
- 74** Herausforderungen beim Monitoring von Machine-Learning-Systemen  
Patrick Baier und Stanimir Dragiev
- 78** Digitalisierung an Kältemittelverdichtern – Sensorik macht den Unterschied  
Franz Joseph Pal und Robin Langebach

## Assistenzsysteme

- 86** Prototyp eines Treppensteigers  
Gerhard Schäfer, Jan Schmitt, Bruno Kempf, Nick Pfitzenmaier und Christian Clouser
- 92** PeTRA – Autonomer Personentransport in Krankenhäusern  
Andreas Zachariae, Frederik Plahl, Christian Wurll und Björn Hein
- 96** Impressum



Our world is constantly changing  
The world needs solutions  
**We need you**

 **BASF**

We create chemistry

In Zeiten des stetigen Wandels setzen wir uns als führendes Chemieunternehmen ehrgeizige Ziele. Wir wollen aktiv zur Gestaltung einer besseren Welt beitragen und dabei spielt jede:r Einzelne eine Rolle. Mit dem besten Team entwickeln wir innovative, saubere und effiziente Lösungen. Dabei schaffen wir bei BASF eine vertrauensvolle Arbeitsumgebung, die inspiriert, unterstützt und verbindet. The world needs solutions. We need you.

**Are you up for the challenge?**  
[on.basf.com/graduates](https://on.basf.com/graduates)

# WEIL ZUKUNFT PLATZ BRAUCHT

→ Bei uns finden technologieorientierte Unternehmen moderne Gebäude, flexibel erweiterbaren Raum und erstklassige Serviceleistungen. Die nötige Ruhe für erfolgreiches Arbeiten gibt's gratis dazu – und das seit über 20 Jahren. Wir bauen weiter. Aus Liebe zum Park und für Sie. Willkommen im TPK – Ihr Standort für Wachstum und Entwicklung. Jetzt informieren unter [www.techpark.de](http://www.techpark.de)



**NEUBAU IN 2022**

# Überblick über die Forschung an der Hochschule Karlsruhe



## 11

qualitätsgesicherte und zentrale  
Forschungsinstitute

### **Institut für Angewandte Forschung**

Sprecher: Prof. Dr. Christian Wurll

### **Institut für Digitale Materialforschung**

Sprecherin: Prof. Dr. Britta Nestler

### **Institut für Energieeffiziente Mobilität**

Sprecher: Prof. Dr. Reiner Kriesten

### **Institut Intelligent Systems Research Group**

Sprecherin: Prof. Dr. Astrid Laubenheimer

### **Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik**

Sprecher: Prof. Dr. Michael Kauffeld

### **Institut für Lernen und Innovation in Netzwerken**

Sprecher: Prof. Dr. Steffen Kinkel

### **Institute of Materials and Processes**

Sprecher: Prof. Dr. Martin Kipfmüller

### **Institut für Sensor- und Informationssysteme**

Sprecher: Prof. Dr. Christian Karnutsch

### **Institut für Thermofluidynamik**

Sprecher: Prof. Dr. Matthias Stripf

### **Institut für Ubiquitäre Mobilitätssysteme**

Sprecher: Prof. Dr. Thomas Schlegel

### **Institut für Verkehr und Infrastruktur**

Sprecher: Prof. Dr. Jan Riel

Mit praxisnaher und anwendungsreifer Forschung und Entwicklung tragen wir als Hochschule zur Zukunftsfähigkeit unserer Gesellschaft bei. Dabei fokussieren wir uns auf Lösungen der drängenden Bedarfe: Ressourcen, Arbeit, Mobilität und Information. Unsere vier Forschungsschwerpunkte geben Ihnen einen weiteren Einblick. Durch die Praxisnähe unserer Forschung arbeiten wir verstärkt in Kooperation mit Unternehmen der freien Wirtschaft sowie mit Institutionen der öffentlichen Hand oder führen Forschungsaufträge für diese aus. Unsere Forschung und ihre Ergebnisse fließen in die Ausbildung unserer Studierenden ein und bereichern die Lehre an der Hochschule auf vielfältige Weise, z. B. mit Studienprojekten zu aktuellen Themen. Somit können die potenziellen zukünftigen Arbeitgeber unserer Absolventinnen und Absolventen indirekt von unseren Forschungsaktivitäten profitieren.

## Innovative Mobilitätskonzepte

Im Fokus steht die Erforschung und Gestaltung zukünftiger Mobilität und Mobilitätssysteme: Technische Neu- und Weiterentwicklung von Fahrzeugen, Erhaltung, Betrieb und zukunftsfähige Transformation der Infrastruktur, die integrierte Stadt- und Verkehrsplanung sowie das nachhaltige Mobilitätsmanagement.

## Ressourcen und Klima

Die Forschungsaktivitäten unserer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler drehen sich um den effizienten Einsatz von Ressourcen. Dies schließt u. a. die modell- und datenbasierte Entwicklung neuer Materialien, energieeffiziente Gestaltung von Wärme- und Kältesystemen sowie die Optimierung des Transports von Fluiden ein.

# Intelligente Systeme

Unsere Forscherinnen und Forscher fokussieren sich auf die Entwicklung und Anwendung von Sensoren, maschinellem Lernen, Kommunikationsnetzen und Informationssystemen zur Automatisierung, zur Verbesserung der Mensch-System-Interaktion und zur Entscheidungsfindung in allen Bereichen von Wirtschaft und Gesellschaft.

# Arbeit und Produktion

Der Fokus liegt auf der Transformation der Arbeitswelten hin zu automatisierten Fertigungsverfahren, zur Vernetzung von Industrieprozessen und zum Einsatz von kollaborativen und autonomen Robotersystemen. Dabei beachten unsere Forscherinnen und Forscher auch die neue Rolle des Menschen in den Produktionsprozessen.



**100**  
laufende kooperative Promotionsvorhaben

Unsere Professorinnen und Professoren betreuen Ende 2021 insgesamt 100 Doktorandinnen und Doktoranden kooperativ in Form einer Individual- oder einer strukturierten Promotion. Über unser Doktorandenkonvent vernetzen sich unsere Doktorandinnen und Doktoranden untereinander. Wir gratulieren unseren 12 Doktorandinnen und Doktoranden, die ihre Promotion 2021 erfolgreich abgeschlossen haben.



**396**

**Forscherinnen und Forscher**

Ohne das Engagement der Ende 2021 71 Professorinnen und Professoren und ihren insgesamt 325 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in den oben genannten Forschungsinstituten wäre unsere Forschung nicht möglich. Bei ihnen und unseren Kooperationspartnern möchten wir uns herzlich bedanken.



**€ 12,5 Mio.**

**Drittmittleinnahmen**

Unsere Forscherinnen und Forscher haben im Jahr 2021 in insgesamt 214 Projekten ca. 12,5 Mio. Euro forschungsbezogene Drittmittel eingenommen. Damit setzen wir die Entwicklung und Ausweitung unserer Forschungsaktivitäten weiter fort, siehe Abb. 1. Der Bund und das Land Baden-Württemberg sind dabei in den letzten drei Jahren unsere größten Mittelgeber gewesen, siehe Abb. 2. Bei all unseren Mittelgebern bedanken wir uns für deren Förderung und das damit entgegengebrachte Vertrauen in unsere Forschungsleistungen.

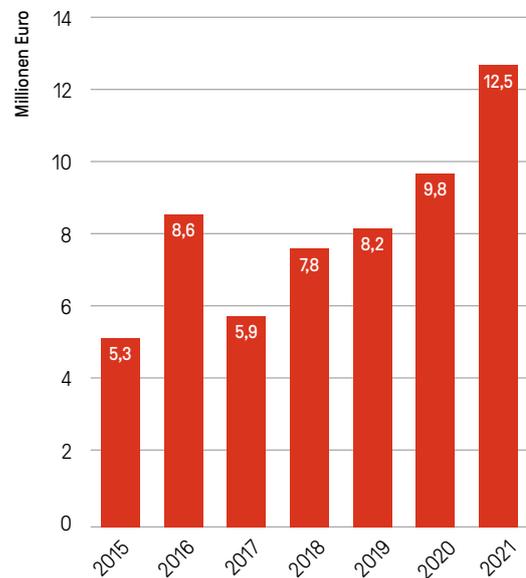


Abb. 1: Umsatzentwicklung Forschung 2015 bis 2021

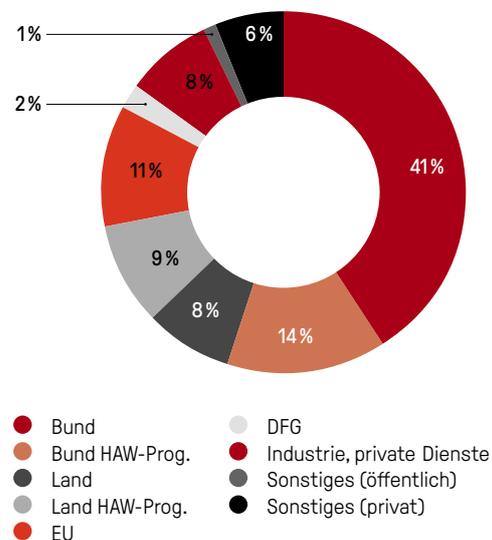


Abb. 2: Mittelgeberkategorie nach Höhe der Drittmittleinnahmen in den Jahren 2019 bis 2021

**Nachhaltigkeit, Innovationen  
und Sicherheit treiben dich an?**

**Dann ist Dow dein Partner  
auf dem Weg in die Zukunft!**

An unserem Standort in Wiesbaden bieten wir **Studenten** (m/w/d) und **Absolventen** (m/w/d) der Ingenieurwissenschaften interessante Entwicklungsmöglichkeiten in einem internationalen Umfeld.

**DOW**<sup>®</sup>

**Möchtest du mehr erfahren?**



<https://de.dow.com/de-de/karriere.html>



®™ Trademark of The Dow Chemical Company ("Dow") or an affiliated company of Dow

**Landeszentrum für Datenverarbeitung**

**LZfD.Zukunft.Steuern**

Folgen Sie unserem QR Code und informieren Sie sich jetzt über  
unsere Stellenangebote an unseren Standorten Karlsruhe, Stuttgart und Freiburg.



Oberfinanzdirektion Karlsruhe – Landeszentrum für Datenverarbeitung

# Work #LikeABosch

Zukunft am Standort Bühl



## **Darum geht es bei Bosch: Um dich, unser Business, unsere Umwelt.**

Bei Bosch gestalten wir Zukunft mit hochwertigen Technologien und Dienstleistungen, die Begeisterung wecken und das Leben der Menschen verbessern. Unser Versprechen an dich steht dabei felsenfest: Wir wachsen gemeinsam, haben Freude an unserer Arbeit und inspirieren uns gegenseitig. Werde ein Teil davon und erlebe mit uns einzigartige Bosch Momente.

## **Dein Start am Standort Bühl:**

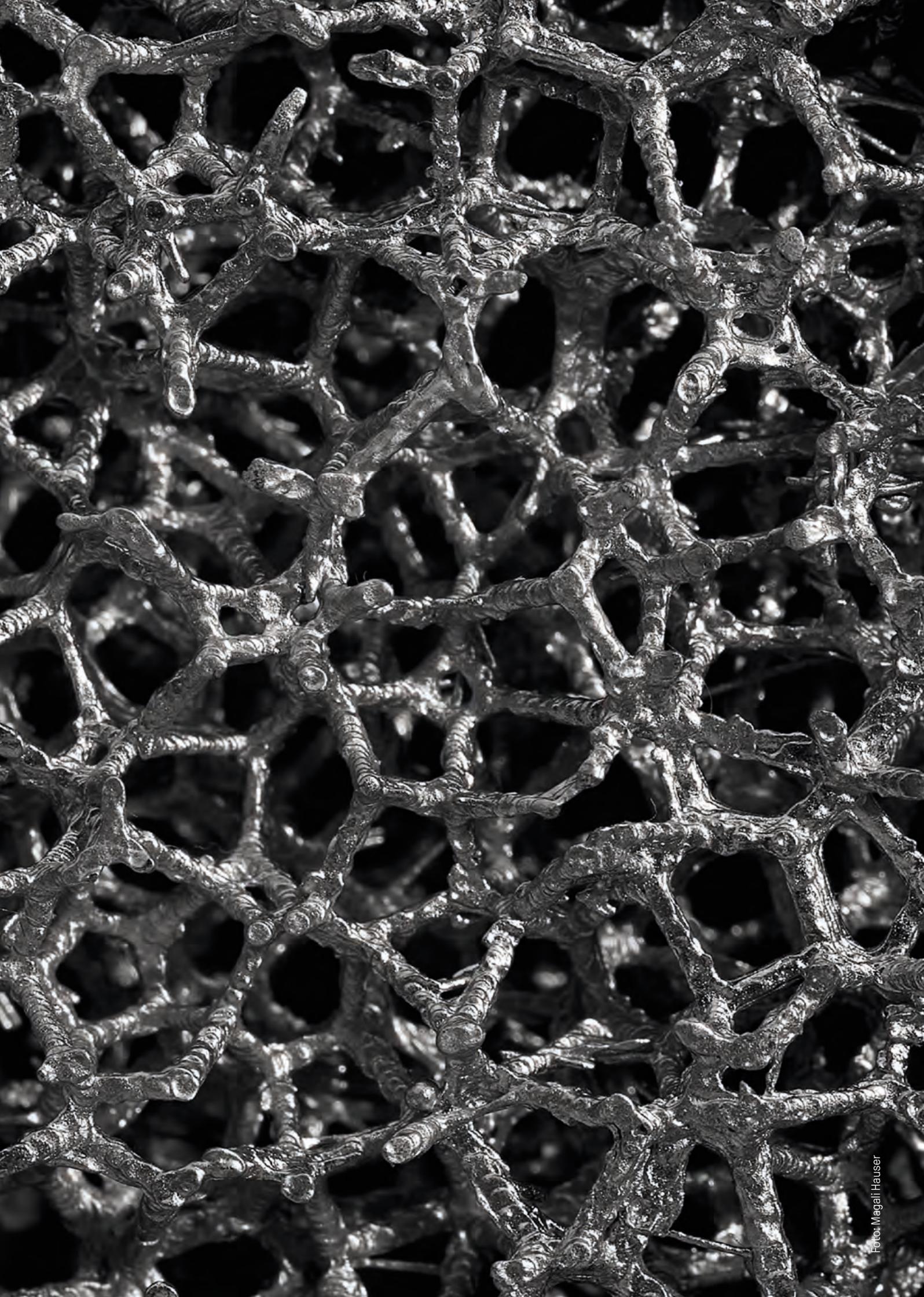
Kooperatives Studium, Praktikum, Werkstudententätigkeit, Abschlussarbeit, Ausbildung oder Direkteinstieg - Bewirb dich jetzt: [bosch.de/karriere](https://bosch.de/karriere)

**Sei ein Teil davon und erlebe mit uns einzigartige Bosch Momente.**



**BOSCH**

Technik fürs Leben



# Neue Materialien

# Der Natur abgeschaut

Leonie Wallat und Frank Pöhler

DE Additive Fertigungsverfahren bieten die Möglichkeit Materialien mit komplexen Geometrien zu erzeugen, die durch konventionelle Fertigungsverfahren bisher nicht herstellbar waren. Hierzu gehören Strukturen mit dreifach periodischen Minimalflächen: Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS). Sie entsprechen den in der Natur beobachteten Zellstrukturen, die durch mathematische Gleichungen beschrieben werden können. Der Einsatz von TPMS-Strukturen bietet neue Design- und Leichtbaumöglichkeiten in der Industrie und Medizintechnik. In diesem Beitrag wird das Leichtbaupotenzial auf Basis der Porosität betrachtet.

EN Additive manufacturing processes offer the possibility of creating materials with complex geometries that could not previously be produced using conventional manufacturing processes. These include structures with threefold periodic minimal surfaces: Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS). They correspond to cell structures observed in nature and can be described by mathematical equations. The use of TPMS structures offers new design and lightweight construction options in industry and medical technology. In this article, the lightweight construction potential is considered regarding the porosity.

Dreifach periodische Minimalstrukturen sind in der Natur beobachtete Zellformen, die z. B. auf Schmetterlingsflügeln auftauchen <sup>[1]</sup>. Der NASA-Wissenschaftler Alan H. Schoen entdeckte die gyroide Struktur im Jahr 1970 <sup>[2]</sup>. Die Struktur zeichnet sich neben der komplexen geometrischen Oberfläche durch eine geringe Dichte aus. Damit werden diese Strukturen interessant für neue potenzielle Leichtbautechnologien und deren Einsatz in den verschiedensten ingenieurtechnischen Bereichen, wie zum Beispiel in energieabsorbierenden Belastungsfällen (Crash-Anwendungen). Einige bekannte Strukturen sind die Schwarz P („Primitive“-Oberfläche, die Schwarz D („Diamond“)-Oberfläche und die Gyroid-Struktur.

Im weiteren Verlauf wird sich auf zwei Gyroid-Strukturarten konzentriert: die Gyroid-Struktur und die Double-Gyroid-Struktur (D-Gyroid). In der Literatur sind diese auch unter den Begriffen „strut-based“ und „sheet-based“ bekannt. Die einfache zelluläre Gyroid-Struktur stellt die sogenannte „strut-based“-Struktur dar und die Double-Gyroid-Struktur die „sheet-based“-Struktur. Durch verschiedene Parameter wie Porosität oder Zellgröße lassen sich die Strukturen möglichen Problemstellungen anpassen. Allgemein gilt, dass mit steigender Porosität das Volumen abnimmt und umgekehrt. Dementsprechend hat die Porosität auch einen wesentlichen Einfluss auf die Gewichtsreduktion. In Abbildung 1 ist die Veränderung der D-Gyroid-Struktur von einer Einheitszellgröße von 1 mm mit einer Porosität von 0,4 bis 0,8 dargestellt.

Beispielsweise eignet sich die D-Gyroid-Struktur für die Entwicklung einer neuen Wärmetauschergeneration (bei einem Wärmetauscher wird thermische Energie von einem Stoffstrom auf einen anderen übertragen), da die D-Gyroid-Struktur aus einem voneinander unabhängigen Zwei-Tunnel-System besteht, wie in Abbildung 2 dargestellt. Dadurch können zwei verschiedene Medien ohne Vermischung die kanalförmige Struktur durchlaufen. Zudem charakterisieren TPMS-Strukturen allgemein ein hohes Oberflächen/Volumen-Verhältnis ( $A/V$ ), was einen effizienten Wärmetausch begünstigt. Der Einfluss auf das Oberflächen/Volumen-Verhältnis ( $A/V$ ) wird im weiteren Verlauf näher betrachtet.



Der Gyroid ist eine Minimalfläche, also eine Fläche mit lokal kleinstmöglichem Inhalt. Seine Struktur findet sich in der Natur an vielen Stellen, beispielsweise in den Flügeln des Schmetterlings *Morpho didius*. (Foto: iStock/stuartpitkin)

## Oberflächen / Volumen-Verhältnis

Das A/V-Verhältnis spielt bei mehreren ingenieurtechnischen Auslegungen, wie z. B. bei thermodynamischen Anwendungen, eine wichtige Rolle.

In Abbildung 3 ist das A/V-Verhältnis in Abhängigkeit der Porosität und Zellgröße von Gyroiden und D-Gyroiden vergleichend gegenübergestellt. Hierbei fällt auf, dass beide Parameter einen wesentlichen Einfluss auf dieses Verhältnis haben. So nimmt das A/V-Verhältnis einer gyroiden Struktur mit abnehmender Zellgröße sprunghaft zu.

Allgemein besitzt die „sheet-based“-Struktur des D-Gyroids ein höheres A/V-Verhältnis als der Gyroid. Während eine Differenz vom A/V-Verhältnis bei einer Zellgröße von 5 mm kaum vorhanden ist, dieses entspricht ca. 1 [1/mm], wächst die Differenz mit abnehmender Zellgröße. So liegt das A/V-Verhältnis bei einer Porosität von 0,5 beim Gyroid bei 19,42 [1/mm] und beim D-Gyroiden bei 30,95 [1/mm].

Ebenso kann ein Einfluss der Porosität auf das A/V-Verhältnis erkannt werden. Es gilt, dass mit steigender Porosität das Volumenverhältnis zunimmt. Während beim Gyroid der Einfluss auf die Porosität quasi-linear ansteigt, steigt die Kurve beim D-Gyroiden mit steigender Porosität sprunghaft an. So liegt bei einer Porosität von 0,4 das A/V-Verhältnis des Gyroiden bei ca. 9 [1/mm] und das des D-Gyroiden bei ca. 3,8 [1/mm], was einer Differenz von 4,8 [1/mm] entspricht. Diese Differenz wird mit steigender Porosität größer, da die Porosität einen höheren Einfluss auf die D-Gyroid-Struktur hat. So liegt die Differenz des A/V-Verhältnisses bei einer Porosität von 0,8 bei 22 [1/mm]. Zudem wäre es für die Zukunft interessant, Strukturen mit unterschiedlichen Wandstärkenverläufen zu untersuchen. Dies hätte Einfluss sowohl auf die mechanischen Eigenschaften als auch auf das Gewicht.

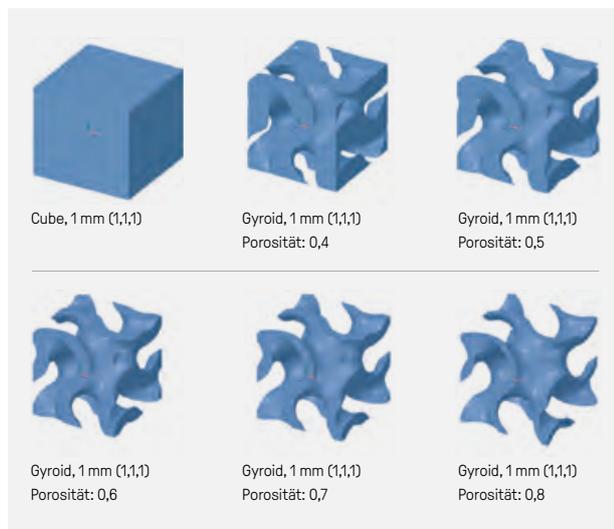


Abb. 1: oben: Double-Gyroid-Zelle, Porosität von 0,4 - 0,5; unten: Double-Gyroid-Zelle, Porosität von 0,6 - 0,8 (Grafik: Leonie Wallat)

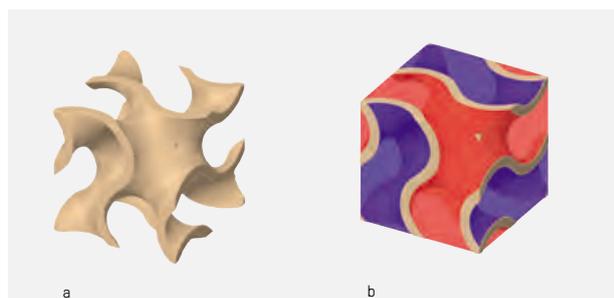


Abb. 2: a. Gyroid-Struktur; b. Gyroid-Struktur mit gekennzeichnetem Zwei-Tunnel-System (Grafik: Leonie Wallat)

[1] Gan, Zongsong & Turner, Mark & Gu, Min, (2016), Biomimetic gyroid nanostructures exceeding their natural origins, Science Advances, 2. e1600084-e1600084. 10.1126/sciadv.1600084.

[2] Schoen, A. H. (1970), Infinite periodic minimal surfaces without self-intersections, National Aeronautics and Space Administration.

[3] Peng, H., Gao, F., & Hu, W.J., (2019), Design, modeling and characterization of triply periodic minimal surface heat exchanger with additive manufacturing.

## Zusammenfassung und Anwendung in der Industrie

Bei der Untersuchung der gyroiden Zellstruktur wurde gezeigt, dass die Grundstruktur von diversen Parametern wie der Zellgröße und der Periodenlänge beeinflusst wird. Zudem ist das ingenieurtechnisch interessante Oberflächen/Volumen-Verhältnis ebenfalls von der Zellgröße und der Porosität abhängig.

Auf Basis dieser Ergebnisse wird ein hohes Oberflächen/Volumen-Verhältnis und gleichzeitig eine hohe Gewichtsersparnis bei kleinen Zellen und hoher Porosität erreicht. Diese Eigenschaften ermöglichen die Chance für die Entwicklung innovativer Leichtbautechnologien.

Eine Möglichkeit ist die Entwicklung eines minimalistischen Wärmetauschers, da mit sinkender Zellgröße und steigender Porosität ein hohes Oberflächen/Volumenverhältnis resultiert, was einen effizienten Wärmetausch begünstigt. Ein konkreter Anwendungsbereich könnte die CPU-Kühlung sein, da in den vergangenen Jahren durch die Leistungssteigerung bei den Prozessoren ein höherer Kühlbedarf notwendig geworden ist. Deshalb muss auf sehr kleiner Fläche eine höhere Kühlleistung zur Verfügung gestellt

werden. Weitere Untersuchungen müssen jedoch noch einen Kompromiss zwischen dem A/V-Verhältnis und der mechanischen Stabilität finden. So nimmt mit steigender Porosität zwar das A/V-Verhältnis zu, die mechanische Stabilität jedoch ab [3]. Weitere Untersuchungen werden sich neben den thermodynamischen parallel mit den struktur-mechanischen Aspekten beschäftigen. Ergänzend sind zudem für die Wärmetauscher die entstehenden Druckverluste beim Durchströmen interessant, die wiederum durch das A/V-Verhältnis bzw. die Porosität beeinflusst werden. Diese Abhängigkeiten gilt es in weiteren Schritten zu analysieren. Für die Untersuchung und Optimierung des Leichtbaupotenzials wäre eine weitere Analyse von Strukturausführungen interessant.

Die Forschungen und Ergebnisse dieses Artikels wurden im Rahmen des Projekts „InSeL – Innovative Schaumstrukturen für den effizienten Leichtbau“ aus Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und dem Land Baden-Württemberg gefördert. Wir danken dem EFRE und dem Land Baden-Württemberg für die Unterstützung des Vorhabens. ✕

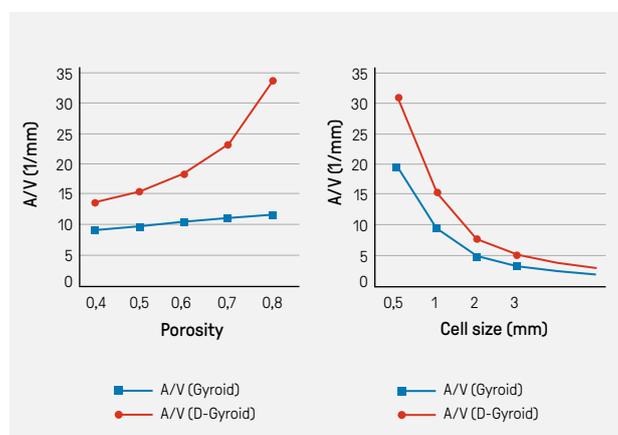


Abb. 3: Oberflächen / Volumen-Verhältnis in Abhängigkeit der Porosität und in Abhängigkeit der Zellgröße (Grafik: Leonie Wallat)

### Autor:in

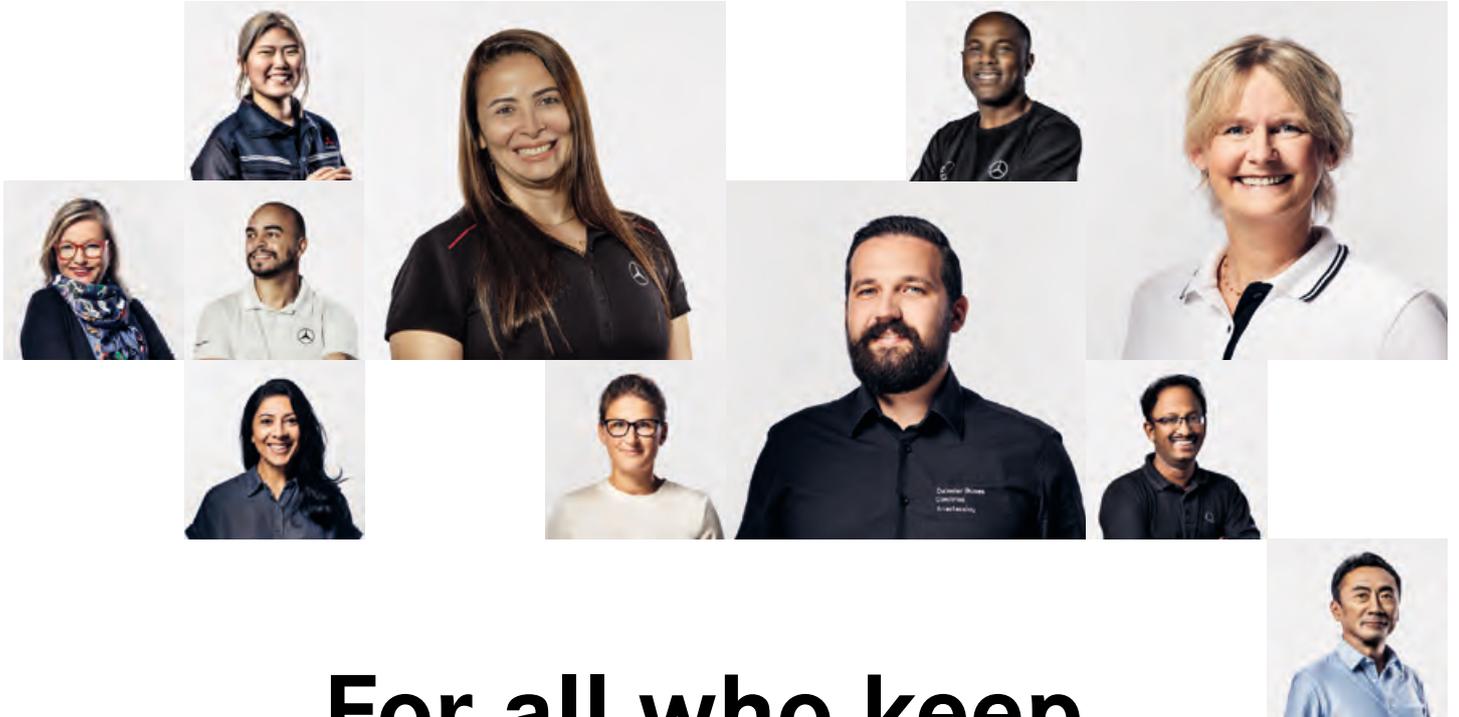
**Leonie Wallat**  
Akademische Mitarbeiterin am Institute of Materials and Processes (IMP) der HKA

**Prof. Dr.-Ing. Frank Pöhler**  
Professor an Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik der HKA

### Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Frank Pöhler  
Hochschule Karlsruhe  
Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik  
Moltkestraße 30  
76133 Karlsruhe  
E-Mail: frank.poehler@h-ka.de

# DAIMLER TRUCK



## For all who keep the world moving.

Everything we do contributes to a cleaner, safer, more efficient and more connected world: For goods, for people, for all of us.

At Daimler Truck, we start with listening. We build to solve. We lead with the long view and we progress together. These are our principles for our customers, our products and for our global team.

**Join us and become part of the Daimler Truck Team.**  
With various perspectives, we make a difference together!  
**#WeAreDaimlerTruck**

#for all who keep the world moving

**MAKE  
YOUR  
MOVE**

AND FOLLOW  
@DAIMLERTRUCKCAREER



Find out how to become  
part of the global team.

# Materialwissenschaft um Luftlöcher

Jana Holland-Cunz, Anastasia August, Martin Reder und Britta Nestler

DE Metallschäume mit optimalen Eigenschaften herzustellen ist eine große Herausforderung. Daher befasst sich das Forscher:in-enteam um Professorin Britta Nestler mit der simulativen Erforschung von Struktur-Eigenschafts-Beziehungen von flüssigen und festen Schäumen. Hierfür wurden numerische Methoden entwickelt, die die Mikrostruktur der Schäume und deren Eigenschaften in Computer-Modellen abbilden. Großskalige Simulationen erlauben sowohl die Vorhersage der Stabilität von flüssigen Schäumen als auch detaillierte Studien zu mechanischen Eigenschaften von festen Schaumstrukturen. Zusätzlich unterstützt eine Dateninfrastruktur die Optimierung der neuartigen Schäume hinsichtlich ihrer strukturellen und mechanischen Eigenschaften.

EN Producing metal foams with optimal properties is a major challenge. For this reason, the team of researchers led by Professor Britta Nestler is engaged in simulative research of the structure-property relationships of liquid and solid foams. Therefore, the team is developing numerical methods that map the microstructure of foams and their properties in computer models. Large-scale simulations allow both the prediction of the stability of liquid foams, as well as detailed studies of the mechanical properties of solid foam structures. In addition, a data infrastructure supports the optimisation of the novel foams with regard to their structural and mechanical properties.

Luftig leicht und super stabil – das zeichnet Metallschäume aus. Diese beiden Eigenschaften vereint nur selten ein Material. Deshalb eröffnen sich mit diesen neuartigen Schäumen Chancen für ganz neue Arten von Anwendungen. Die Forschungsinitiative InSeL (Innovative Schaumstrukturen für effizienten Leichtbau) <sup>1)</sup> widmet sich der Entwicklung eines innovativen Herstellungsverfahrens für offenporige Metallschäume. Bei diesem kommen neuartige flüssige Tensidschäume zum Einsatz, die als Polymervorformen für Metallschäume dienen (siehe Abbildung 1). Bauteile aus Metallschäumen werden in ganz unterschiedlichen Einsatzbereichen geschätzt. So zählen zu den großartigen Eigenschaften offenporiger metallischer Schäume eine außergewöhnlich große Oberfläche bei geringem Volumen. Gerade im Leichtbau und in der Medizintechnik schätzt man die geringe Dichte der Schäume bei gleichzeitig immenser Belastbarkeit. Als natürliches Vorbild kennen wir den porösen Aufbau von Knochen. Durch die hohe Porosität des Knochenmaterials sind sie leicht und halten doch sehr viel Druck- und Zugspannungen aus. Je nach Einsatz eines Bauteils ergeben sich sehr unterschiedliche Anforderungen an seine Eigenschaften. Für den jeweiligen spezifischen Einsatz gilt es, Materialien und Werkstoffe gezielt auszuwählen. Der strukturelle Aufbau des Materials bedingt die resultierenden physikalischen Eigenschaften des daraus geschaffenen Schaumbauteils. Neue Herstellungsverfahren über Polymervorformen oder 3D-Druck ermöglichen es, die Struktur der Schäume auf Mikrometerebene gezielt zu beeinflussen. Bisher gibt es mit experimentellen Trial-and-Error-Methoden nur vergleichsweise aufwendige Verfahren, um die Eigenschaften der Metallschäume zu optimieren. Deshalb stellt sich die Frage, wie Struktur und Eigenschaften präzise verknüpft werden können. Um dies zu beantworten, befasst sich das Forscher:innen-enteam vom Institut für Digitale Materialforschung (IDM) der HKA in Kooperation mit dem Institut für Angewandte Materialien – Mikrostruktur-Modellierung und Simulation (IAM-MMS) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) mit der simulativen Erforschung von Struktur-Eigenschafts-Beziehungen flüssiger und fester Schäume auf der Mikrostrukturskala. Ziel der Forschungstätigkeiten

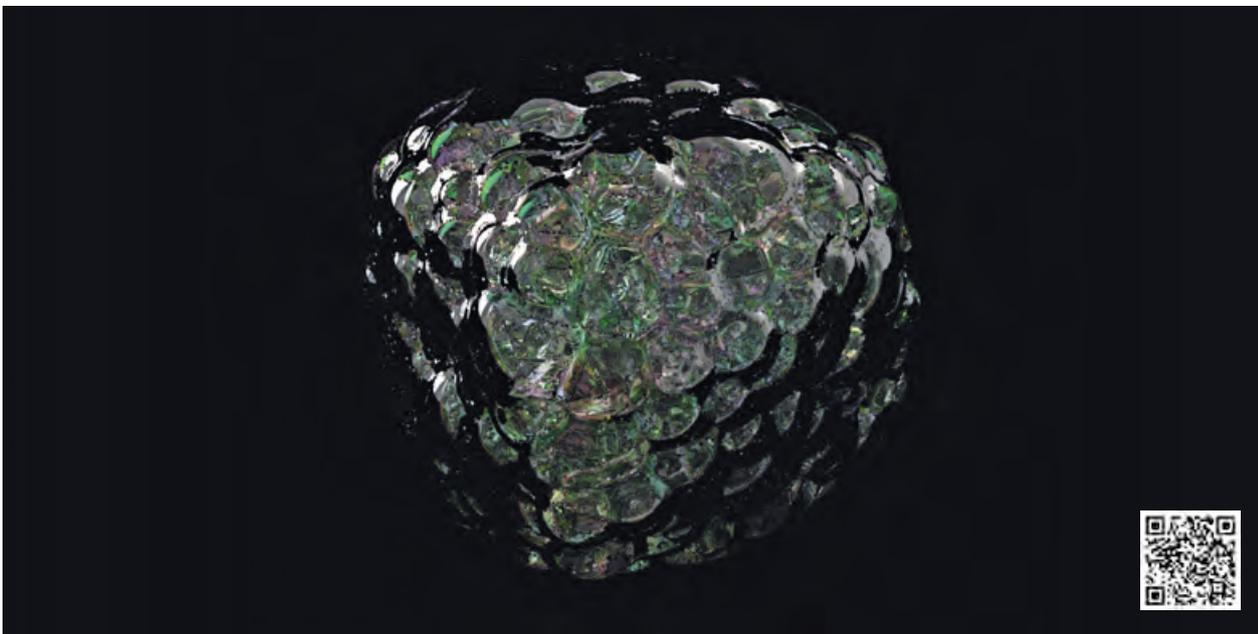


Abb. 2: Die Simulation der zeitlichen Entwicklung eines zerfallenden Schaumes ist als Video auf YouTube über den QR-Code abrufbar (Visualisierung: Jana Holland-Cunz)

ist es, auf Basis numerischer Methoden den Werkstoff mit den gewünschten Eigenschaften maßzuschneidern.

In diesem Artikel stellen wir eine Möglichkeit für die Charakterisierung neuartiger Schaumstrukturen vor und zeigen, wie die physikalischen Eigenschaften vorhergesagt werden. Eigens hierfür entwickelt das Team numerische Methoden, die die Mikrostruktur der Schäume und deren Eigenschaften in Computer-Modellen abbilden. Als zentrale Ergebnisse erhalten wir aus Simulationsstudien Kennwerte, beispielsweise für dynamische strukturelle und mechanische Eigenschaften.

Zur Modellierung wird das Phasenfeld-Modell genutzt, auf dessen Grundlage in Simulationen physikalische Eigenschaften numerisch berechnet werden. Die Methode zur Modellbildung ist in den Materialwissenschaften etabliert und fand bereits Anwendung in verschiedenen Themengebieten der Mikrostruktursimulation. Wir berichteten dazu ausführlich in der Forschung aktuell 2021 der HKA [2].

## Stabile flüssige Schäume

Für die flüssigen Tensidschäume, die als Template zur Formgebung der festen Metallschäume dienen, sind einstellbare Eigenschaften wichtig. Problematisch für den Herstellungsprozess ist, dass flüssiger Schaum metastabil ist. Das bedeutet, dass er zwar immer wieder zeitlich begrenzte Gleichgewichtszustände annimmt, letztlich jedoch zerfällt. Diese fatale Entwicklung kennen wir aus der Badewanne oder dem Bierglas.

Der Zerfallsprozess wird in großskaligen Mikrostruktursimulationen untersucht. Die numerischen Methoden erlauben es dabei, die Stabilität flüssiger Schäume vorherzusagen. Auf Hochleistungsrechnern werden Phasenfeldsimulationen durchgeführt, die die dynamische, zeitlich aufgelöste Entwicklung der Schäume abbilden und die multiplen Mechanismen des Zerfalls detailliert aufzeigen.

Was passiert also genau beim Zerfall von Schäumen? Der wesentliche Prozess ist das Reißen flüssiger Schaumfilme, die die einzelnen Gasblasen voneinander trennen. Das führt

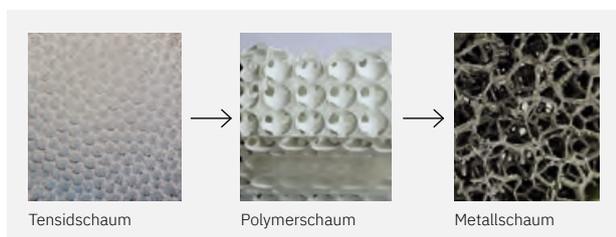


Abb. 1: Im innovativen Herstellungsverfahren kommen flüssige Tensidschäume (links) als Vorformen für feste Polymerschäume (Mitte) und schließlich Metallschäume (rechts) zum Einsatz (Fotos links/Mitte: Fabian Körte; Foto rechts: Jana Holland-Cunz)

dazu, dass sich zwei kleine Blasen zu einer größeren vereinigen. Dies bezeichnet man als Koaleszenz. Nach jedem Auftreten von Koaleszenz ordnet sich das Blasenensemble um: Der Schaum relaxiert in einen neuen, nun energetisch optimalen Zustand. In den Simulationen können wir durch die Methode, die diese Prozesse berücksichtigt, die zeitliche Entwicklung des Schaumes genau beobachten und analysieren (siehe Abbildung 2). Damit können Vorhersagen zur Schaumstabilität, zur Zerfallsrate und zu lokalen Verteilungen der Koaleszenzereignisse getroffen werden. Es wird möglich, präzise aufzuschlüsseln, welche Zusammensetzung eines Schaums zu welchen Eigenschaften führt und wie der zeitliche Verlauf ist – und mit dieser Kenntnis kann die gewünschte Stabilität über die Zusammensetzung genau eingestellt werden.

## Metallschäume mit optimalen Eigenschaften

Das Forscher:innenteam um Professorin Britta Nestler hat einen Weg gefunden, mithilfe von Simulationen die Eigenschaften von Metallschäumen bestmöglich hinsichtlich belastungsgerechter Strukturen gezielt zu optimieren und damit einen extrem stabilen und gleichzeitig leichten Werkstoff maßzuschneidern. Abhängig von der Anwendung und

# „Luftig leicht und super stabil – das zeichnet Metallschäume aus.“

der einwirkenden mechanischen Last kann durch computergestützte Topologieoptimierung eine auf die Anforderungen optimierte Porenstruktur entworfen werden. Die Simulationsergebnisse umfangreicher Parameterstudien mit Druck- und Zugbelastung verschiedener fester Schaumstrukturen ermöglichen es, Gesetzmäßigkeiten der mechanischen Eigenschaften abzuleiten. Dazu werden zunächst verschiedene Schaumstrukturen mit einem Algorithmus generiert, um nachfolgend an diesen digitalen Modellen deren mechanischen Eigenschaften zu berechnen.

Für die Optimierung gibt es eine Vielzahl möglicher Strukturen. Offenporige metallische Schäume bestehen aus einem festen Gerüst aus metallischen Stegen. Die Schäume unterscheiden sich nicht nur in Art und Zusammensetzung des Metalls; genauso entscheidend sind die „Luftlöcher“, also die Leerstellen, an denen kein Metall vorliegt. Wir sprechen hierbei vom Porenraum. Im Zusammenspiel von Zellstruktur, Porenraum und Stegbeschaffenheit ist also die gesamte Morphologie im Größenbereich von wenigen Mikrometern ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal der

Strukturen. In Simulationen können die Parameter gezielt eingestellt, beliebig kombiniert und systematisch variiert werden, wodurch eine Vielfalt an sehr verschiedenen komplexen Schaumgeometrien generiert wird. Ziel ist es, die Morphologieparameter so zu wählen, dass durch ihr Zusammenspiel eine Struktur eingestellt wird, durch die sich eine gewünschte physikalische Eigenschaft ergibt. So ist es möglich, die Schaumstruktur in Hinblick auf bestimmte physikalische Eigenschaften zu optimieren. Dies können zum Beispiel mechanische, strömungsmechanische oder thermische Eigenschaften sein. Für die komplexen Geometrien der Schäume ist die Bestimmung einer optimalen Morphologie eine Herausforderung.

Wie also werden die Daten zu den resultierenden physikalischen Eigenschaften gewonnen, beispielsweise zur Steifigkeit? Um die Eigenschaften vorherzusagen, führt das Team Vollfeldsimulationen von Schäumen durch, in denen Druck- und Zugbelastungen auf die jeweilige Schaumstruktur simuliert werden. Diese Art von Simulationen liefert Ergebnisse in Form von orts aufgelösten Daten, das heißt, die mechanischen Spannungen sind an jeder Stelle im Raum und in der Zeit bekannt. Damit zeigen die Ergebnisse auf, an welchen Orten Spannungsmaxima auftreten (siehe Abbildung 3). Aufgrund der heterogen verzweigten Struktur der Schäume können große lokale Unterschiede in der Spannungsverteilung auftreten. Dies führt meist dazu, dass lokal sehr viel höhere Spannungen vorliegen, als sie von außen aufgebracht werden. An solchen Spannungsspitzen kann die Struktur durch Geometrieanpassung gezielt optimiert werden, indem zum Beispiel spezifische Stege dicker gewählt oder zusätzliche Stege eingebracht werden. Hier liegt eine besondere Stärke der Topologieoptimierung am Computer. In experimentellen Druckversuchen erhält man diese detaillierten Morphologiedaten mit präziser Orts- und Zeitauflösung nicht. Für die Anwendung der Schaumstrukturen ist jedoch oftmals die räumlich aufgelöste Feldinformation nicht aussagekräftig. Stattdessen sind effektive Kenngrößen der entsprechenden Eigenschaft von Interesse, im Fall der Steifigkeit wäre diese Größe der effektive Elastizitätsmodul. Solche Effektivgrößen können aus orts aufgelösten Simulationsdaten durch Homogenisierungsverfahren gewonnen

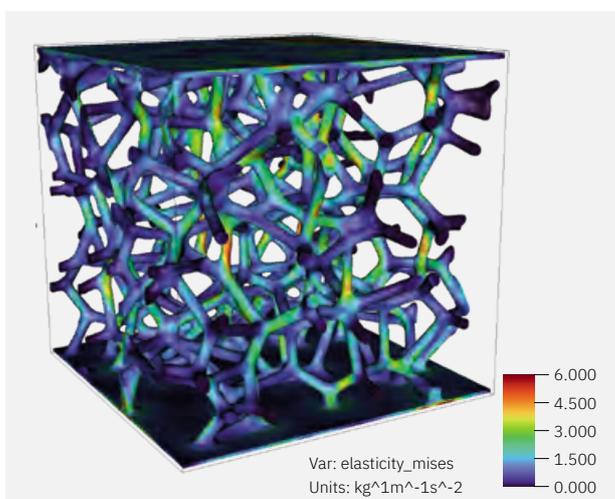


Abb. 3: Simulation eines Druckversuchs: berechnete Spannungsverteilung in einem offenkporigen Metallschaum (Visualisierung: Martin Reder)

[1] [https://www.hs-pforzheim.de/forschung/institute/institut\\_fuer\\_werkstoffe\\_und\\_werkstofftechnologien\\_prueflabor\\_fuer\\_materialuntersuchungen/aktuelle\\_projekte/metallische\\_werkstoffe/innovative\\_schaumstrukturen\\_fuer\\_effizienten\\_leichtbau\\_insel](https://www.hs-pforzheim.de/forschung/institute/institut_fuer_werkstoffe_und_werkstofftechnologien_prueflabor_fuer_materialuntersuchungen/aktuelle_projekte/metallische_werkstoffe/innovative_schaumstrukturen_fuer_effizienten_leichtbau_insel)

[2] Kneer, A.; August, A.; Wirtz, M.; Herrmann, C.; Schneider, D. und Nestler B., Kleine Bausteine mit großer Wirkung, Forschung aktuell (2021), 44–51.  
[3] <https://kadi4mat.iam-cms.kit.edu/>

werden. Dabei wird der Elastizitätsmodul eines imaginären Vollmaterials bestimmt, das sich unter makroskopischer Belastung gleich verhalten würde wie die poröse Schaumstruktur. Dadurch lässt sich der Werkstoff in seiner Gesamtheit charakterisieren. Im Rahmen der Topologieoptimierung ist das Ziel, solche effektiven Größen zu maximieren und gleichzeitig zusätzlichen Materialeinsatz und damit das Gewicht zu reduzieren.

Die Geometrieangepassung erlaubt ein Design der Porenstruktur zur Optimierung von Metallschäumen abhängig von der einwirkenden Belastung. So ist es möglich, Materialien mit hoher Porosität bei gleichzeitig optimaler Belastbarkeit zu finden. Aus der Fülle möglicher Konfigurationen und Zusammensetzungen eines Werkstoffs kann der für den jeweiligen Anwendungsfall am besten geeignete ausgewählt und von den experimentell arbeitenden Partner:innen an den Hochschulen Pforzheim und Reutlingen im Labor hergestellt und weiter getestet werden.

## Effizientes Forschungsdaten-Management

Die simulativen und experimentellen Forschungsarbeiten im InSel-Verbund generieren große Mengen an Forschungsdaten. Wie können diese Daten effizient zusammengeführt werden, sodass das gesamte Forschungsvorhaben vom gegenseitigen Austausch zwischen den Projektbeteiligten profitieren kann? Dazu unterstützt projektbegleitend eine Forschungsdateninfrastruktur die Zusammenführung und Bewertung der neuartigen Schäume hinsichtlich ihrer strukturellen und mechanischen Eigenschaften. Mitarbeiter:innen des IDM sind an der Entwicklung der Karlsruher Dateninfrastruktur für die Materialwissenschaften (Kadi4Mat <sup>[3]</sup>) beteiligt und nutzen die Plattform für das InSel-Zentrum. Bei der Ablage der Daten in einem spezifischen Repositorium wird der gesamte Lebenszyklus von Daten und Metadaten abgebildet: von der Planung der Experimente und Simulationen mit dem elektronischen Laborbuch, über die Durchführung und Datenakquise bis hin zur Dokumentation. Weitere wichtige Funktionen unterstützen kooperative Arbeit. So ermöglicht Kadi4Mat nicht nur den Transfer von Daten und

Forschungsergebnissen, sondern auch deren Archivierung, nachhaltige Nutzung und Wiederverwendung entsprechend der „findable, accessible, interoperable and reusable (FAIR)“ Prinzipien. Beim Thema der effizient aufgenommenen großen Datenmengen lässt sich hier ein Blick in die Zukunft wagen. Das effiziente Datenmanagement ermöglicht es, Methoden des Maschinellen Lernens zur beschleunigten Verbesserung von Prozessführungen und zur Entwicklung neuer Materialien anzuwenden. Künftig werden Resultate des Projekts verwendet, um mithilfe von Künstlicher Intelligenz neue Kandidaten für Schaumstrukturen vorzuschlagen. ✕

### Autor:innen

**Jana Holland-Cunz M.Sc.**

Akademische Mitarbeiterin am IAM-MMS des KIT

**Dr. rer. nat. Anastasia August**

Projektleiterin zweier Teilprojekte der Forschungsinitiative InSel

Akademische Mitarbeiterin am IDM der HKA und Gruppenleiterin am IAM-MMS des KIT

**Martin Reder M.Sc.**

Akademischer Mitarbeiter am Institut für Digitale Materialforschung (IDM) der HKA

**Prof. Dr. rer. nat. Britta Nestler**

Professorin an der Fakultät für Informatik und Wirtschaftsinformatik der HKA und Sprecherin des Instituts für Digitale Materialforschung (IDM) sowie Professorin für Mikrostruktursimulation in der Werkstofftechnik und Institutsleiterin des IAM-MMS des KIT

### Kontakt

Prof. Dr. rer. nat. Britta Nestler

Hochschule Karlsruhe

Fakultät für Informatik und Wirtschaftsinformatik

Moltkestraße 30

76133 Karlsruhe

E-Mail: [britta.nestler@h-ka.de](mailto:britta.nestler@h-ka.de)

**FORSCHEN UND GLEICHZEITIG  
INDUSTRIENAH ARBEITEN  
GEHT NICHT.**

**DOCH.**

Egal ob Studierende\*r, Absolvent\*in  
oder Berufserfahrene\*r –  
wir bieten den passenden Einstieg:

- Tätigkeiten als studentische/  
wissenschaftliche Hilfskraft
- Praktika und Abschlussarbeiten
- Direkteinstieg als Wissenschaftler\*in
- Möglichkeit zur Promotion

Am **Fraunhofer IOSB** forschen wir erfolgreich entlang  
der gesamten Prozess- und Wertschöpfungskette von  
der Physik der Signalentstehung in optischen  
Sensoren über die Bildauswertung bis hin zur Nutzung  
der extrahierten Informationen in autonomen  
Systemen und Assistenzsystemen.  
[www.iosb.fraunhofer.de/karriere](http://www.iosb.fraunhofer.de/karriere)

Am **Fraunhofer ISI** betreiben wir internationale und  
interdisziplinäre Spitzenforschung im Spannungsfeld  
von Technik, Wirtschaft und Gesellschaft.  
Eingebunden in die Wissenschaft unterstützen  
wir Politik und Unternehmen durch unsere  
Expertise in der Innovationsforschung.  
[www.isi.fraunhofer.de/de/karriere](http://www.isi.fraunhofer.de/de/karriere)



Bewirb Dich jetzt unter  
[www.buhlergroup.com/karriere](http://www.buhlergroup.com/karriere)

**Bühler Alzenau GmbH** ist einer der  
weltweit führenden Hersteller von  
**High-Tech Anlagen** für die **Vakuumbeschichtung**  
von Produkten wie **Linse**,  
**Sensoren**, **Architekturglas** und **optische  
Komponenten in Smartphones** und  
**Autos**.



Wir bieten

- Praktika
- Werkstudententätigkeiten
- Abschlussarbeiten
- Direkteinstieg

Bühler Alzenau GmbH  
Siemensstraße 88  
63755 Alzenau

[Careeralzenau@buhlergroup.com](mailto:Careeralzenau@buhlergroup.com)

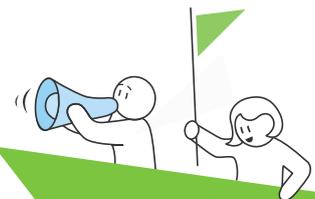
Innovations for a **better world.**



**andrena**  
OBJECTS

Professionell „sauberen“ Code programmieren, in spannenden  
Projekten arbeiten und abends wieder zu Hause sein? Geht.

**Bei andrena.**



Jetzt bewerben unter



[www.andrena.de/karriere](http://www.andrena.de/karriere)

Klimaschutzstrategie des  
Landkreises Karlsruhe

zeozweifrei<sup>®</sup> 2035

[www.zeozweifrei.de](http://www.zeozweifrei.de)



## Warum zeozweifrei2035?

Das 1,5 °C-Ziel kann nur erreicht werden, wenn die CO<sub>2</sub>-Emissionen weltweit stärker gesenkt werden. Auch der Landkreis Karlsruhe leistet die Verantwortung für einen fairen Beitrag zum Klimaschutz.

Die im Mai 2021 beschlossene Strategie **zeozweifrei2035** basiert auf kommunalen Klimaschutzmaßnahmen durch mehr Energieeffizienz, durch den stärkeren Ausbau der Erneuerbaren Energien und Maßnahmen für die Mobilitätswende.



Ein Beispiel für die gelungene Zusammenarbeit von Landkreis und der Hochschule Karlsruhe ist das On-Demand-Angebot **MyShuttle**, das im Juni 2019 startete.

Mach das, was Du so richtig gut kannst.  
Bei uns – mit Deiner Energie.



$$\text{💡} + \text{💡} \times \text{💡} = 20$$

$$\text{💡} \times \text{⚡} = 20$$

$$\text{⚡} + \text{🔗} = 8$$

$$\text{💡} \times \text{🔗} - \text{⚡} = ?$$

## Noch nicht genug gerätselt?

Wir suchen zum 1. Oktober Talente für unser Traineeprogramm, die mit ihrer Positivpower das Rätsel der Energiewende lösen. Jetzt Stellenportal checken und bewerben auf [suewag.com/karriere](http://suewag.com/karriere)



Meine Kraft vor Ort

[www.ingbw.de](http://www.ingbw.de)

ING  BW

Ingenieurkammer Baden-Württemberg  
voranbringen – vernetzen – versorgen



Profitiere schon  
im Studium von  
einem starken Partner  
an Deiner Seite.

# Fiber Reinforced Self-Compacting Lightweight Concrete for the Manufacture of Floating Blocks

Danar Altalabani and Stefan Linsel

**DE** In dieser Studie wurde faserverstärkter, selbstverdichtender Leichtbeton aus Polypropylenfasern, Kalksteinmehl und leichtem Blähtonzuschlagstoff LECA hergestellt. Die Bearbeitbarkeit von FRSCLC wurde unter Verwendung des Setzfließtests (mit und ohne J-Ring), der Fließzeit (T500) und des V-Trichtertests bewertet. Die Druckfestigkeit von kubischen Proben, wurde nach einer Alterung von 2, 7 und 28 Tagen gemessen. Dann wurde ein Betonblock mit einem Styroporblock EPS100 als Kernmaterial entworfen und hergestellt. Die Testergebnisse zeigen erfolgreich schwimmende Betonblöcke, die mit faserverstärktem und selbstverdichtendem Strukturleichtbeton hergestellt wurden.

**EN** In this study fiber reinforced self-compacting lightweight concrete prepared using polypropylene fiber, limestone dust, and lightweight expanded clay aggregate LECA. The workability of FRSCLC was evaluated using the slump flow test (with and without J-Ring), flow time (T500) with and V-funnel tests. The compressive strength of cubic specimens measured at ages of 2, 7, and 28 days. Then a concrete block was designed and manufactured with expanded polystyrene block EPS100 as a core material. The test results showed successful floating concrete blocks produced with fiber reinforced self-compacting lightweight structural concrete.

The present-day world is perceiving construction of ambitious and complex civil engineering structure. Researchers around the world managed to develop lightweight concrete by using different admixture and materials. This study investigates the possibility of manufacturing floating concrete blocks by using Fiber Reinforced Self-Compacting Lightweight Concrete FRSCLC made with Lightweight Expanded Clay Aggregate LECA.

Ghadge and Kamble <sup>[1]</sup> investigate the making of a floating type of concrete by using pumice stone aggregate and aluminum powder as an air entraining agent. The test results showed that aggregate size and proportion affected the unit weight and the compressive strength of the concrete. Also, it is possible to produce floating nonstructural concrete by using pumice as an aggregate. Thousif Khan et al. <sup>[2]</sup> studied the possibility to develop a floating concrete based on trials with a focus on overall density. Different mix proportions were adopted based on absolute volume method until successfully floating concrete was developed using fly ash with considerable compressive strength. Rayees Ganie <sup>[3]</sup> investigate the development of a floating type of concrete by using lightweight aggregate (Pumice stone) and foaming chemical (Thermocole) and their influences on the compressive strength of concrete. The results showed satisfied floating concrete, and it also showed that aggregate size and proportion could reduce the unit weight but decreases the compressive strength of concrete. Malik Manzoor et al. <sup>[4]</sup> studied the development of a floating type of concrete by using lightweight aggregate (Pumice stone) and Aluminium powder as an air entraining agent. The test results showed satisfied non-structural floating concrete.

This study aims to investigate the possibility and performance of producing Polypropylene Fiber Reinforced Self-Compacting Lightweight Concrete FRSCLC with Lightweight Expanded Clay Aggregate LECA for the manufacturing of floating structural concrete blocks.

## Materials

The cement used to produce the concrete blokes was Portland cement CEM I 52.5 N conforms to EN 197-1:2000<sup>[5]</sup>. Particle density was 3150 kg/m<sup>3</sup>, and has surface area

- [1] Mukesh D. Ghadge and Vaibhav D. Kamble (2015), Floating Concrete by using Light Weight Aggregate and Air Entraining Agent, Intl. J. of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 4, Issue 11, pp. 193–197.
- [2] Thousif Khan, Ibrahim Killedar, Sharu Malik H N, Muhathasheem R F, Jagannatha G M, Dr. Shivakumara B (2018), An Experimental Study on Floating Concrete Using Light Weight Materials, Intl. Research J. of Engineering & Technology (IRJET), Vol. 5, pp. 2325–2331.
- [3] Rayees Ahmed Ganie (2017), Floating Concrete by using Pumice Stone and Foaming Chemical (Thermocole), Intl. J. of Civil Engineering (IJCE), Vol. 4, Issue 2, pp. 24–28.
- [4] Malik Mehran Manzoor, Abhishek Gupta, Rukhsana Gani, Ankush Tanta (2018), Floating Concrete by using Light Weight Aggregates (Pumice Stone) and Air Entraining Agent, Intl. J. of Scientific Development and Research (JSDR), Vol. 3, Issue 6, pp. 99–104.
- [5] EN 197-1:2000 (2000), Cement – Part 1: Compositions and conformity criteria for common cement, Brussels.
- [6] EN 12620:2013 (2013), Aggregate for concrete, Brussels.
- [7] EFNARC, ERMCO, EFCA, bibm (2005), The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification, Production and Use, pp. 47-52.
- [8] EFNARC (2002), The Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, Norfolk UK, pp. 21-26.
- [9] EN 206:2013 (2013), Concrete – Specification, performance, production and conformity, Brussels.

4745 cm<sup>2</sup>/g. The initial and final setting time was 150 min and 275 min respectively. Crashed limestone powder was used with particle density 2700 kg/m<sup>3</sup>.

Lightweight Expanded Clay Aggregate LECA was Liapor 6.5 was used as coarse aggregate. The properties of the LECA listed in Table 1. The natural river sand 0-2 mm was used in this investigation meet the requirements of EN 12620:2013 [6], with a particle density of 2650 kg/m<sup>3</sup> and water absorption 0.5% of the mass. Expanded Polystyrene EPS100 with particle density 20 kg/m<sup>3</sup>, compressive strength 100 KPa, elasticity modulus 6000 kPa, and flexural strength 150 Kpa used as core materials of the floating block which is a lightweight cellular plastic material consisting of small hollow spherical balls.

The superplasticizer used to produce the concrete blocks was Master Glenium ACE 480 with density 1060 ± 20 kg/m<sup>3</sup>. It based on Polycarboxylate ethers PCE for the production of concretes with high robustness, stability and high early and final strength. The fiber used in the concrete mixture was polypropylene micro and macro fibers. The physical and

Aggregate size (mm)	2 – 10
Loose bulk density Kg/m <sup>3</sup>	650 ± 25
Particle Density Kg/m <sup>3</sup>	1190 ± 50
Water absorption W60 min (%)	9 ± 4
Water absorption W24h (%)	15 ± 4
Crushing resistance N/mm <sup>2</sup>	> 8

Table 1: Properties of LECA (Liapor 6.5) (Data from LIAPOR Company)

Name	Cement kg/m <sup>3</sup>	Water kg/m <sup>3</sup>	LECA kg/m <sup>3</sup>	Sand kg/m <sup>3</sup>	Limestone Dust kg/m <sup>3</sup>	SP L/m <sup>3</sup>	Micro Fiber kg/m <sup>3</sup>	Macro Fiber kg/m <sup>3</sup>
Mix A	430	172	470	650	216	22	3	0
Mix B	435	174	468	655	216	14	0	6
Mix C	440	176	472	655	219	10	1	2
Mix D	440	176	470	654	218	10	1	4.2

Table 3: Mix proportion of the FRSCCL

mechanical properties of the micro and macro polypropylene fiber are presented in Table 2.

## Mix Proportions

Four mixes designed for the production of the floating blocks, details of mix proportions of the Fiber Reinforced Self-Compacting Lightweight Concrete FRSCCL can be seen in Table 3.

The water/cement ratio and water/cementitious ratio were 0.4 and 0.27 respectively for all concrete. The SP dosage was between 1.49% and 3.3% by cementitious weight.

Property	Micro polypropylene	Macro polypropylene
Density	0.91 kg/m <sup>3</sup>	0.91 kg/m <sup>3</sup>
Diameter	32 µm	0.78 mm
Length	12 mm	39 mm
Aspect ratio	375	50
Tensile strength	272 MPa	470 MPa
Moisture content	2.5 %	–
Dosage	0.91 kg/m <sup>3</sup>	3 kg/m <sup>3</sup>
Number of fiber per Kg	113843350	–
Elastic Modulus	3500 MPa	3600 MPa

Table 2: Physical and mechanical properties of Micro and Macro polypropylene fiber (Data from FINISH BETONGROEP FBG Company)



Fig. 1: Examine the floating capacity of the floating concrete block (Photo: Danar Altalabani)

## Manufacturing Process

The manufacturing of floating concrete blocks is a difficult process that needs high precision. The difficulties increase as the size of the concrete blocks increases. There are no standard methods for the manufacturing of floating concrete blocks. The methods described in this study outcomes from years of experience with the Dutch company Struyk Verwo Infra.

First oil the mould and install all the screw sleeves and the reinforcement with the appropriate spacers. Then pour the FRSCLC into the bottom of the mould.

Place the polystyrene block and secure it with the wooden and steel spacers so that the block around gets the same concrete cover. Place the top tensioners to hold polystyrene the block in place.

Pour the concrete further, as soon as the concrete mixture is at the correct height remove the spacers. When the concrete has hardened sufficiently, remove the upper tensioners and screed the concrete to level and smooth surface. Use curling concrete curing seal on the pouring side. After 24 hours the concrete block can be demoulded.

## Results and Conclusions

After the demoulding, the floating capacity of the floating block was examined in the water to verify the validity of the design and the calculation. The test proved the validity of the calculations and the success of the floating block manufacturing and design (Fig. 1).

In this study, fiber reinforced self-compacting lightweight concrete developed with expanded clay aggregate LECA (Liapor 6.5) and polypropylene fiber. Then the workability and the compressive strength of the cubic specimens were tested. Next, a large size concrete block designed with expanded polystyrene block EPS100 as a core material. From this study, the following conclusions can be drawn.

1. The selected fiber reinforced self-compacting lightweight concrete FRSCLC was suitable by the manufacturing of the floating concrete blocks.
2. The thin concrete thickness of the floating block required SCC, because of their excellent flowability and passing ability. To obtain the best live load capacity the

weight of the concrete must be reduced. Therefore, the high flowability and passing ability of the self-compacting concrete and the lightweight of the used concrete mixes was the key to success by the manufacturing of the floating concrete blocks.

3. The excellent properties of the EPS100 and the precision work during the production were essential to producing balanced floating concrete blocks in water.
4. The concrete cover thickness can vary between 3 cm to 8 cm, and the floating height for the same block can range from 29 cm to 8.5 cm respectively. The live load capacity of each floating block of the same size depending on the concrete cover thickness can vary between 1750 kg to 400 kg respectively.

The floating concrete blocks have a wide variety of configurations like floating water bridges, floating islands, and floating water jetties. Through interconnecting the floating concrete blocks, this can be done both sides to side and end to end. The units are exceptionally stable, has high live load capacity, and a low maintenance requirement.

Acknowledgements: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors. ✕

### Autoren

**Danar Altalabani**  
Civil Engineering  
Salahaddin University-Erbil

### Prof. Dr.-Ing. Stefan Linsel

Professor at the Faculty of Architecture and Civil Engineering at Karlsruhe University of Applied Sciences

### Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Stefan Linsel  
Karlsruhe University of Applied Sciences  
Faculty of Architecture and Civil Engineering  
Moltkestraße 30  
76133 Karlsruhe  
E-mail: stefan.linsel@h-ka.de

Beratung  
Planung  
Steuerung

Wir bieten:  
Duale Studienmodelle  
Werkstudentenjobs  
Abschlussarbeiten  
Praxissemester  
Berufseinstieg  
Professionals



© Mailänder Consult 2022

[www.mic.de](http://www.mic.de)



TRELLEBORG SEALING SOLUTIONS



**Shaping industry  
from the inside**  
PUT YOURSELF AT THE CENTER OF THE ACTION

Make a  
difference

Drive global  
innovation

you

Have an  
impact

Where talents  
grow



View our career opportunities at  
[www.trelleborg.com/en/seals/careers!](http://www.trelleborg.com/en/seals/careers!)





# Ökologie und Ökonomie

# SophiA – Hilfe für Afrikas Gesundheitswesen

Oliver Schmid und Michael Kauffeld

**DE** Das EU-Projekt SophiA (Sustainable off-grid solution for Pharmacies and Hospitals in Africa; <https://sophia4africa.eu/>) soll den Menschen in Subsahara-Afrika Zugang zu netzunabhängiger und kohlenstoffneutraler Kühlung, sauberem Trinkwasser und Elektrizität ermöglichen. Das vierjährige EU-geförderte Projekt startete im Oktober 2021. In der Projektlaufzeit sollen innovative Containerlösungen an vier Standorten in den Ländern Burkina Faso, Kamerun, Malawi und Uganda getestet werden. Sie sollen neben Gesundheitseinrichtungen aufgebaut werden und so die medizinische Versorgung und die Genesung der Patienten verbessern. Neben der Verwendung soll ein Wissenstransfer stattfinden und ein Geschäftsmodell für nachhaltige Technologien im afrikanischen Raum etabliert werden.

**EN** The EU project SophiA (Sustainable off-grid solution for Pharmacies and Hospitals in Africa; <https://sophia4africa.eu/>) aims to give people in sub-Saharan Africa access to off-grid and carbon-neutral cooling, clean drinking water and electricity. The four-year EU-funded project started in October 2021. During the project, innovative container solutions are to be tested at four sites in the countries of Burkina Faso, Cameroon, Malawi and Uganda. They will be set up next to healthcare facilities to improve medical care and patient recovery. In addition to their use, knowledge transfer should take place and a business model of the sustainable technologies should be established in the mentioned African regions.

Aufgrund der steigenden Weltbevölkerung, eines höheren Lebensstandards und nicht zuletzt des Klimawandels wird der weltweite Bedarf an Kühlung und Klimatisierung in den kommenden Jahren weiter steigen. Besonders auf dem afrikanischen Kontinent wird die Nachfrage nach Klimageräten bis zum Jahr 2040 um das Vierfache wachsen <sup>[1]</sup>. Zudem sagen Prognosen voraus, dass auf dem afrikanischen Kontinent voraussichtlich mehr als die Hälfte des erwarteten weltweiten Bevölkerungswachstums zwischen 2015 und 2050 stattfinden wird. Dem entgegen wirkt die schlechte elektrische Infrastruktur und die Unzuverlässigkeit der Netze in vielen afrikanischen Ländern, besonders in Subsahara-Afrika. Von diesem Umstand sind insbesondere medizinische Einrichtungen betroffen. Allein im Subsahara-Raum sind etwa 26 % der über 100.000 Gesundheitseinrichtungen nicht elektrifiziert. Außerdem haben 28 % davon keine zuverlässige elektrische Stromversorgung <sup>[2]</sup>. Dabei sind Medizintechnik und eine saubere Trinkwasserversorgung Grundvoraussetzung für eine schnelle Genesung. Medikamente und Bluttransfusionen können aufgrund mangelnder Kühlung nicht lange gelagert werden. In trockenen Regionen müssen die Patienten ihr Trinkwasser selbst stellen, da das Krankenhaus nicht die Möglichkeit besitzt für sauberes Wasser zum Einnehmen der Arznei zu sorgen.

Im EU-Projekt SophiA (Sustainable off-grid solution for Pharmacies and Hospitals in Africa; <https://sophia4africa.eu/>) sollen diese Herausforderungen nachhaltig und mit afrikanischer Beteiligung angegangen werden. Dabei soll das enorme Potenzial an erneuerbaren Energien in diesen Regionen genutzt werden. In zwei 40-Fuß-Containern werden die Anlagen aufgebaut, was den Transport an entlegene Orte vereinfacht. Unter Leitung der Hochschule Karlsruhe und mithilfe der zwölf Partner soll in den nächsten vier Jahren die Technologie an mehreren afrikanischen Standorten aufgebaut und getestet werden. Dabei sollen die folgenden Ziele erreicht werden:

- + saubere und sichere Trinkwasserversorgung
- + Heißwasser und Dampf für die Sterilisation von medizinischem Equipment
- + Tieftemperaturkühlung proteinbasierter medizinischer Produkte (z. B. Blutplasma) bei -30 °C



Abb. 1: Dr. Sedogo Krankenhaus in Burkina Faso (Foto: Wolfgang Kurz)

- + Kühlung von Medizin und Nahrung bei +5 °C
- + Ultra-Tiefkühlung sensibler Güter (mRNA und Ebola-Impfstoffe) bei -70 °C
- + Notstromversorgung der Chirurgie, der Intensiv- und der Geburtsstation

Die Auslegung und Entwicklung der Anlagen erfolgt am Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik (IKKU) der HKA sowie dem Schweizer Institut für Solartechnik an der Ostschweizer Fachhochschule (OST). Unterstützung erhalten die Institute von den deutschen Firmen Raach Solar, Martin Systems und SimplySolar und durch die südafrikanischen Firmen Everflo und Kovco. Die Makerere Universität in Uganda untersucht die aktuelle Lage vor Ort, wo die SophiA-Technologie den größten Einfluss haben wird. Dabei stehen ihr das Kameruner Gesundheitsministerium und das Institut 2iE aus Burkina Faso zur Seite. Ebenfalls in Burkina Faso befindet sich das Krankenhaus der Nichtregierungsorganisation (NGO) „Operieren in Afrika e. V.“, wo der erste Prototyp getestet werden soll. Drei weitere Gesundheitseinrichtungen sind noch nicht bekannt, sollen aber jeweils in den Ländern Uganda, Kamerun und Malawi gefunden werden. Für die Kommunikation und Veröffentlichung der Ergebnisse des Projekts ist das Internationale Institut für Kältetechnik (IIR) zuständig. Das Steinbeis-Europa-Zentrum leitet das Projektmanagement und achtet darauf, dass die Vorgaben der EU eingehalten werden.

Die innovative Lösung der SophiA-Systeme besteht aus zwei solarbetriebenen und autarken Containersystemen zur

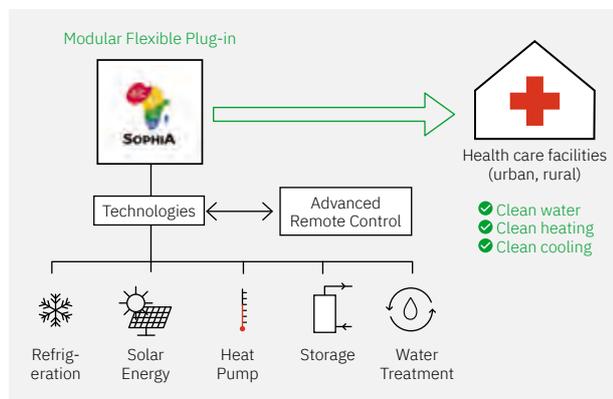


Abb. 2: Schaubild der SophiA-Technologien (Grafik: Mihaela Dudita)

zuverlässigen Wasseraufbereitung und Kälteversorgung für Gesundheitseinrichtungen in abgelegenen Gebieten in Afrika. Die Systeme sollen Gesundheitseinrichtungen einen besseren und zuverlässigeren Zugang zu gekühlten Medikamenten und Trinkwasser ermöglichen. Gleichzeitig soll neben der Technologie auch ein Wissenstransfer stattfinden. Neben der Wartung der Systeme soll es den afrikanischen Partnern ermöglicht werden, ein Geschäftsmodell auf Basis dieses Projekts aufzubauen und damit den wirtschaftlichen Wandel in Afrika zu beschleunigen. Die Produktion, Installation und Wartung wird von den lokalen Firmen übernommen und erfolgt mit deren Ressourcen. Außerdem basiert das Hauptkonzept der Systeme auf maximaler Energieeffizienz und Umweltfreundlichkeit durch erneuerbare Energien sowie einer Integration in die bestehende elektrische Infrastruktur.

# Der weltweite Bedarf an Klimatisierung wird weiter ansteigen.

## Kälte-Container

Einer der beiden Container wird die Kühlung von Medizin und Blutplasma sicherstellen. Für die meisten Arzneien ist eine Lagertemperatur von 2 bis 8 °C bereits ausreichend. Impfstoffe mit mRNA-Technologie (Covid-19) und einige Ebola-Impfstoffe hingegen benötigen deutlich niedrigere Lagertemperaturen von bis zu -70 °C. Für die Lagerung von Blutplasma und anderen proteinbasierten Medikamenten wird ein kleiner Teil im Container auf -30 °C gekühlt. Der größte Raum besitzt eine Temperatur von +5 °C und soll als Lagerraum für Medikamente und Lebensmittel genutzt werden. Dort sind zudem thermische Speicher (Eisspeicher) installiert.

Um die Temperaturniveaus zur Verfügung zu stellen, kommt eine dreistufige Kältemittelkaskade mit den oben erwähnten Eisspeichern zum Einsatz. Die -70 °C werden durch umgerüstete handelsübliche Tiefkühltruhen erreicht. Als natürliches Kältemittel kommt Ethan zum Einsatz. Die Ultra-Tiefkühltruhen sind im Tiefkühlraum aufgestellt und geben die Wärme an die Raumluft ab. Ein CO<sub>2</sub>-Kältemittelkreislauf führt den Wärmestrom aus dem Raum ab und sorgt für konstante -30 °C. Der Verdichter hebt das Druck-

niveau an, sodass sich eine Verflüssigungstemperatur um 0 °C einstellt. Dieses Temperaturniveau eignet sich für die Nutzung eines Eisspeichers, der den Phasenwechsel von Wasser zu Eis und umgekehrt (Kristallisationsenthalpie) gewährleistet. In diesem Phasenwechsel ist bei konstanter Temperatur pro Kilogramm Eis etwa so viel Energie gespeichert, wie notwendig ist, um ein Kilogramm Wasser von 0 °C auf knapp 80 °C aufzuwärmen. Eisspeicher lassen damit hohe Speicherdichten bei konstanter Temperatur zu und sind absolut unbedenklich einsetzbar. Die Eisspeicher stehen ungedämmt im Normalkühlraum. Durch Luftzirkulation strömt die Raumluft um den 0 °C kalten Speicher, wodurch sich die Raumtemperatur auf +5 °C regeln lässt. Die Propankälteanlage führt alle Wärmeströme aus dem Container an die tropische Umgebungsluft ab. Um Strom zu sparen, wird nachts die Propananlage abgeschaltet. Das tagsüber erzeugte Eis wird abgeschmolzen, um den Normalkühlraum abzukühlen und das CO<sub>2</sub> zu verflüssigen. Somit können teure und umweltschädliche Lithiumionen-Batterien eingespart werden. Zudem reduziert sich durch den intelligenten Aufbau die Füllmenge des brennbaren Kältemittels Propan auf ein Minimum.

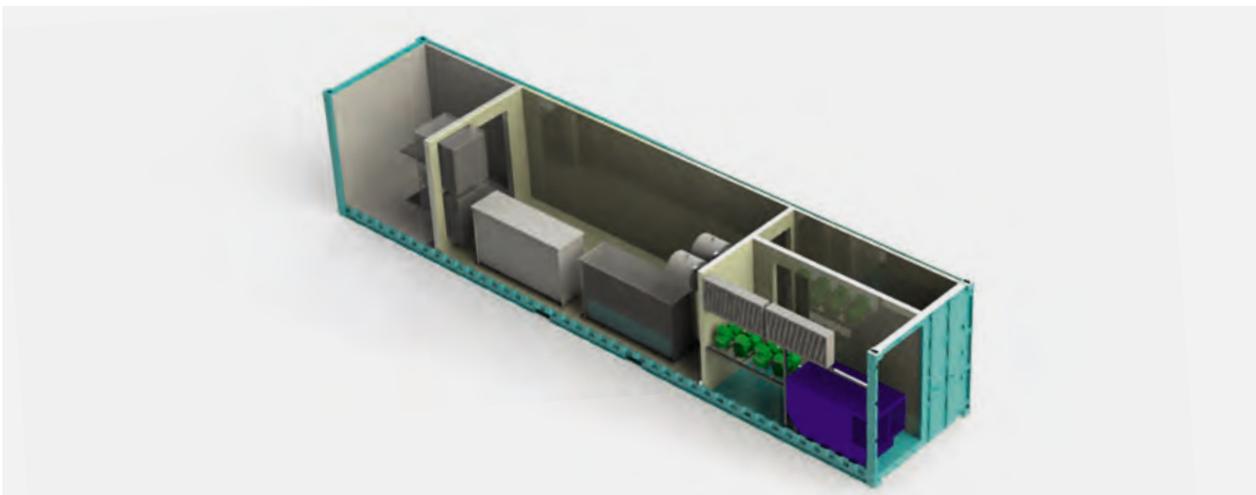


Abb. 3: Aufbau des Kühlcontainers (Grafik: Evert Potgieter)

[1] International Energy Agency IEA, 2019, Africa Energy Outlook 2019, Paris, <https://www.iea.org/reports/africa-energy-outlook-2019>

[2] Maina, J., Ouma, P. O., Macharia, P. M., Alegana, V. A., Mitto, B., Fall, I. S., Noor, A. M., Snow, R. W., & Okiro, 2019, A spatial database of health facilities managed by the public health sector in sub-Saharan Africa. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0142-2>

## Wasser-Container

Im zweiten Container ist eine Wasseraufbereitungsanlage installiert. Auch in diesem Container werden wartungsarme und niederenergetische Technologien verwendet. Durch einen erhöht angebrachten Wasserspeicher entsteht ein statischer Wasserdruck ohne Pumpenaufwand.

Dieser reicht aus, um die schädlichen Organismen durch Mikro- und Nanofiltersysteme aus dem Wasser zu entfernen. Zur Vermeidung von Ablagerungen werden die Filter permanent durch ein Gebläse belüftet. Anschließend wird das gefilterte Wasser durch eine UV-Lampe behandelt, wodurch das Nachwachsen der Mikroorganismen ohne Chemikalien unterdrückt wird. Das Wasser ist anschließend auf Trinkwasserqualität aufbereitet. Eine kleine Kälteanlage garantiert, dass das Wasser bei der Ausgabe eine Temperatur von 20 °C nicht überschreitet. Zur Sterilisation des Operationsbestecks wird des Weiteren eine Autoklave integriert. Das UV-behandelte Wasser wird mithilfe einer Pumpe durch eine kapazitive Deionisierungseinheit gefördert. In dieser relativ neuen elektrochemischen Entsalzungstechnologie werden dem Wasser sehr effizient Salzionen entzogen. Mittels eines neu entwickelten Hochtemperaturspeichers wird das sterile Wasser

anschließend zu überhitztem Dampf erwärmt. Pro Tag wird durch den Container 5 bis 10 m<sup>3</sup> Trinkwasser aufbereitet und maximal 1 m<sup>3</sup> demineralisiertes Wasser zur Dampfsterilisation erzeugt.

## Ausblick

Die innovativen SophiA-Container sollen während der vierjährigen Projektlaufzeit in Gesundheitseinrichtungen erprobt werden. Denkbar ist jedoch, dass die Container auch Anwendung in der Lebensmittelbranche oder der technischen Gebäudeausrüstung finden. Die vielfältige Einsatzmöglichkeit unterstreicht, wie relevant sauberes Wasser und Kühlung für die Entwicklung eines Landes sind. Durch die internationale Zusammenarbeit über die europäischen Grenzen hinaus entsteht ein Wissenstransfer und ein Netzwerk von renommierten Hochschulen und Firmen, die sich während und auch nach dem SophiA-Projekt für die Entwicklung Afrikas und eine nachhaltigere Zukunft weltweit einsetzen. ✘

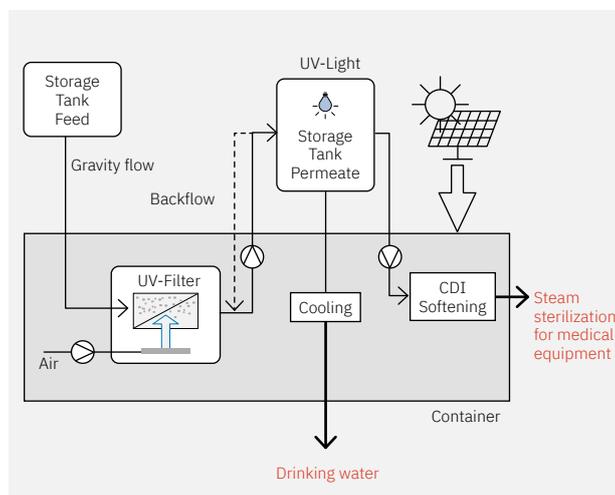


Abb. 4: Wasseraufbereitungsanlage (Grafik: Jan Hoinkis)

### Autoren

**Oliver Schmid M.Sc.**

Akademischer Mitarbeiter am Institut für Kälte, Klima- und Umwelttechnik (IKKU) der HKA

**Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kauffeld**

Professor an der Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik der HKA und Sprecher des Instituts für Kälte, Klima- und Umwelttechnik (IKKU) der HKA

### Kontakt

Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Kauffeld

Hochschule Karlsruhe

Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik

Moltkestraße 30

76133 Karlsruhe

E-Mail: michael.kauffeld@h-ka.de

# XERVON®

IM AUFTRAG DER ZUKUNFT

## ARBEITE MIT UNS IM AUFTRAG DER ZUKUNFT

### Weißt du schon, was du nach dem Studium machen möchtest?

Komm' zu uns ins Team der XERVON Instandhaltung GmbH!

Wir bieten dir verschiedenste Einstiegsmöglichkeiten:

Vom Traineeprogramm über Projektleitung oder in technischen Positionen...

Was liegt dir? Infos & direkte Bewerbung: Sarah Abt T 0173 2498006 (auch WhatsApp)

XERVON Instandhaltung GmbH  
karriere-rms@remondis.de // [xervon-instandhaltung.de/karriere](http://xervon-instandhaltung.de/karriere)  
Ein Unternehmen der REMONDIS-Gruppe

 XERVON Karriere

 xervon\_karriere

Jetzt bewerben!

Das ist  
meine Welt!



## SINN + GEWINN

**Ihr Beruf soll etwas bewegen. Prägen Sie mit 14.000 anderen die Industrie von morgen.**

Endress+Hauser ist ein international führender Anbieter von Messgeräten, Dienstleistungen und Lösungen für die industrielle Verfahrenstechnik. Auch mit weltweit über 14.000 Mitarbeitenden sind wir ein Familienunternehmen geblieben und stolz auf unser herzliches Arbeitsklima. So verbindet die Mitarbeit bei uns immer zwei Seiten: die technische plus die menschliche. Das Ergebnis: ein Mehr an Zufriedenheit. Jeden Tag.

Wir suchen regelmäßig Interessenten (m/w/d) für Praktika, Abschlussarbeiten sowie Direkteinstieg in folgenden Fachrichtungen:

**Elektrotechnik**

**Informatik**

**Wirtschaftsingenieurwesen**

**Maschinenbau**

**Automatisierungstechnik**

Informieren + Bewerben geht am einfachsten unter [www.endress.com/career](http://www.endress.com/career)

Endress+Hauser   
People for Process Automation

# KOPF VOLLER IDEEN

## Fehlst nur noch Du!

Wir mögen und suchen Menschen, die unsere Visionen und unsere Dynamik teilen. Lass uns die Zukunft gemeinsam gestalten! Weil Du für uns wertvoll bist.

**Bewirb Dich jetzt:**

**[www.ultraschallkarriere.com](http://www.ultraschallkarriere.com)**



**BONDING –  
MORE THAN  
MATERIALS**



# Solarbetriebene Abwasseraufbereitung für afrikanische Krankenhäuser

Sneha De und Jan Hoinkis

**DE** Ziel des Projekts „Solarbetriebene Abwasseraufbereitung und -wiederverwendung für Krankenhäuser in Afrika (Reuse4Hos)“ war die Entwicklung einer robusten und kosteneffizienten Technologie für eine dezentrale Behandlung und Wiederverwendung von Krankenhausabwässern durch den Einsatz einer Kombination aus Membranbioreaktor und Aktivkohle. Im Lubaga-Krankenhaus in Kampala, Uganda, wurde eine Pilotanlage für die Behandlung von etwa 10.000 Litern Krankenhausabwasser pro Tag gebaut und pilotiert. Sie soll im Rahmen dieses Pilotprojekts als Modell für eine Abwasserreinigung und -wiederverwendung in Uganda und anderen ostafrikanischen Ländern dienen.

**EN** The aim of the project “Solar-powered wastewater treatment and reuse for hospitals in Africa (Reuse4Hos)” was to develop a robust and cost-effective technology for the decentralized treatment and reuse of hospital wastewater by using a membrane bioreactor and activated carbon combination. A pilot plant for the treatment of about 10.000 liters per day of hospital wastewater was built and piloted at Lubaga Hospital in Kampala, Uganda. Within the framework of this pilot project, it is intended to serve as a model for wastewater treatment and reuse in Uganda and other East African countries.

Krankenhausabwässer sind als besonders problematisch zu betrachten, da diese im Vergleich zu kommunalen Abwässern deutlich höher mit Arzneimittlrückständen, d. h. Arzneistoffen und ihren Metaboliten sowie pathogenen Keimen belastet sind. Dies stellt insbesondere in afrikanischen Ländern ein besonderes Problem dar, da hier zum einen viele Abwässer unbehandelt in die Umgebung eingeleitet werden oder nur eine unzureichende Reinigung in den zentralen kommunalen Kläranlagen erfolgt. Beispielsweise werden in Kampala, der Hauptstadt von Uganda, derzeit nur etwa 7 % der Abwässer in einer kommunalen Behandlungsanlage aufbereitet.

Deshalb wurde in diesem Projekt eine robuste und kostengünstige Technologie entwickelt und eine Pilotanlage aufgebaut, die eine dezentrale Behandlung von Krankenhausabwässern mit einem hohen Anteil an regenerativer Energie ermöglicht (siehe Abbildung 1). Hierzu wird eine Kombination eines Membranbioreaktors (MBR) mit einer Aktivkohlebehandlung eingesetzt, die zu einem hohen Grad mittels photovoltaisch erzeugtem Strom betrieben wird (siehe Abbildung 2). In der MBR-Technologie werden anstatt Absetzbecken zur Abtrennung des Belebtschlammes Membranen mit feinen Poren (0,1 bis 0,01 µm Porendurchmesser) eingesetzt, die in den Belebungsstank eingetaucht sind. Hierdurch können auch feinste Partikel und Keime zurückgehalten werden und es resultiert eine hohe Wasserqualität. Die nachgeschaltete Aktivkohlebehandlung soll zusätzlich Spuren von gelösten Arzneirückständen etc. zurückhalten. Dabei liegt die besondere Herausforderung des Projekts darin, diese Technologien möglichst einfach und kostengünstig zu gestalten, wobei idealerweise die Anlagenteile vor Ort in Afrika erhältlich sein sollten. Die Anlagenkombination wurde beispielhaft im Lubaga Hospital in Kampala aufgebaut und auf ihre Funktionalität geprüft, sodass Anfang März 2022 die Pilotphase startete. Die Pilotanlage besteht aus einem Membranbioreaktor mit getauchten Ultrafiltrations-Flachmembranen mit einer Fläche von 25 m<sup>2</sup> und einem Porendurchmesser von etwa 0,04 µm und einem nachgeschalteten Tank mit granulierter Aktivkohle. Die Anlage wird aus dem bereits vorhandenen anaeroben Absetzbecken mit Biogasgewinnung gespeist. Die Kapazität des MBR beträgt ca. 10–12 m<sup>3</sup>/Tag.



Abb. 1: Photovoltaik-Anlage mit neuartigen stationären Energiespeichern aus sog. Superkondensatoren („Supercaps“) (Foto: Jan Hoinkis)

Das Lubaga Krankenhaus in Kampala ist eines der größten Krankenhäuser in Uganda. Es wurde auf einer Delegationsreise um Oberbürgermeister Dr. Frank Mentrup und dem Karlsruher EnergieForum sowie Professor Dr.-Ing. Jan Hoinkis von der Hochschule Karlsruhe bereits im Januar 2019 besucht. Ziel der Delegationsreise war es, Projekte zu gestalten und Unternehmen sowie Institutionen zusammenzubringen, die innovative, aber auch sozialgerechte und umweltverträgliche Lösungen anbieten. Aus dem Besuch des Krankenhauses im Rahmen der Reise hatte sich diese Projektidee entwickelt, da sich das Karlsruher Stadtoberrhaupt insbesondere im Gesundheitssektor gestärkte Verbindungen wünscht.

Das Projekt wird federführend von Professor Jan Hoinkis in Zusammenarbeit mit der Firma Equator Solar Systems Ltd. (EQS) und dem Centre for Research in Energy and Energy Conservation an der Makerere Universität in Kampala durchgeführt und von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) finanziell gefördert. EQS hat langjährige Erfahrungen und Kompetenzen im Bereich PV-Technologie vor Ort in Kampala, ist in der ganzen Region gut vernetzt und hat bereits eine PV-Anlage im Lubaga Hospital installiert, die seit mehreren Jahren erfolgreich betrieben wird. Ein innovativer Aspekt für dieses Projekt ist die Verwendung neuartiger, stationärer Energiespeicher aus sogenannten Superkondensatoren („Supercaps“), um die Probleme mit den derzeit üblichen Energiespeichern (Li-Ionen-Batterien, Bleiakkus) zu verbessern. Supercaps haben eine große Leistungsdichte und sind charakterisiert durch sehr schnelle Be- und Entladungskurven. Dadurch können diese Systeme sehr zuverlässig gegen schnelle und starke Lastspitzen und -senken abgepuffert werden. Die Technologie der Superkondensatoren hat sich im Laufe der letzten Jahre erheblich verbessert, sodass jetzt auch relativ große Kapazitäten zu akzeptablen Preisen auf dem Markt erhältlich sind.

Die Pilotierung der PV-betriebenen Abwasserreinigung wird begleitet bzw. ergänzt durch Trainingskurse für die zukünftigen Betreiber. Die Demonstration des Lösungswegs im Rahmen einer Pilotierung im Lubaga Krankenhaus dient als Modell zur Abwasseraufbereitung und Wiederverwendung nicht nur in Krankenhäusern in Uganda, sondern auch in anderen Ländern Ostafrikas wie z. B. Kenia und Tansania. ✘

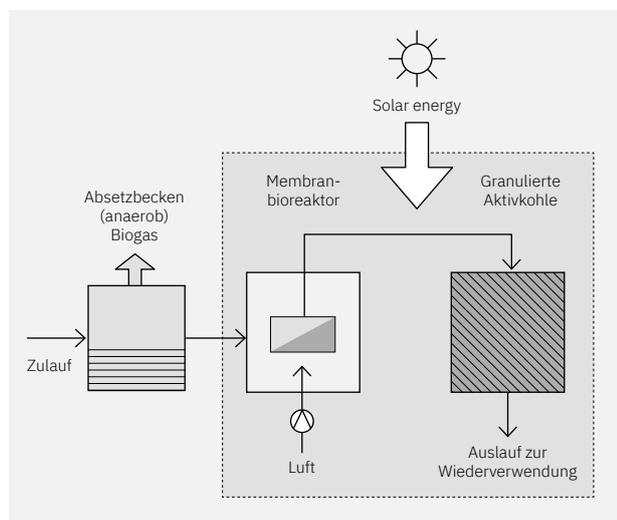


Abb. 2: Konzept der Anlage für solarbetriebene Abwasseraufbereitung (Grafik: Sneha De)

#### Autoren

**Sneha De**

Akademische Mitarbeiterin am Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik (IKKU) der HKA

**Prof. Dr.-Ing. Jan Hoinkis**

Professor an der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik der HKA und Projektleiter „Wassertechnologie“ am Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik (IKKU) der HKA

#### Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Jan Hoinkis  
Hochschule Karlsruhe  
Fakultät für Elektro- und Informationstechnik  
Projektleiter „Wassertechnologie“ am Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik (IKKU) der HKA  
Moltkestraße 30  
76133 Karlsruhe  
E-Mail: jan.hoinkis@h-ka.de

# Die Lebenszeit der Menschen wird immer länger, die der Maschinen immer kürzer

Interview mit Hagen Krämer



Hagen Krämer im Gespräch mit Hendrik Hunsinger, Redaktionsleiter der „Forschung aktuell“ der HKA (Fotos: Tobias Schwerdt)

## Dr. rer. pol. Hagen Krämer

ist seit 1999 Professor für Economics (Volkswirtschaftslehre) an der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der Hochschule Karlsruhe. Er studierte Wirtschaftswissenschaften an der Universität Bremen und der New School for Social Research in New York. Seine bevorzugten Forschungsgebiete sind Makroökonomie, Einkommensverteilung, Dienstleistungen und Digitalisierung sowie die Geschichte der ökonomischen Theorie. Gemeinsam mit Prof. Dr. Carl Christian von Weizsäcker (Senior Research Fellow am Max-Planck-Institut zur Erforschung von Gemeinschaftsgütern, Bonn) veröffentlichte er das Buch „Saving and Investment in the Twenty-First Century. The Great Divergence“. Es ist 2021 im Verlag Springer Nature erschienen und als E-Book und Open Access-Publikation frei zugänglich: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-75031-2>.

**Herr Professor Krämer, sind Sie nicht besorgt über die hohen Inflationsraten, die seit einiger Zeit in Deutschland, Europa und den USA auftreten?**

PROF. HAGEN KRÄMER: Natürlich sehe ich in der zunehmenden Geldentwertung ein großes Problem. Wie kommen Sie darauf, dass ich darüber nicht besorgt sein sollte?

**Weil Sie sich dafür aussprechen, dass Deutschland seine Staatsverschuldung noch weiter erhöhen sollte.**

Das steht ja nicht im Widerspruch zueinander. Wenn Sie damit andeuten wollen, dass die Kreditaufnahme des Staates die Inflation anheizt, so stimmt das in der Form nicht mehr. Das steht vielleicht noch in alten Lehrbüchern so. Diese stammen aber aus einer Zeit, in der das Kapital knapp war, und dies ist im 21. Jahrhundert nicht mehr der Fall.

**Das müssen Sie näher erläutern.**

Wenn der Staat auf dem Kapitalmarkt als Kreditnachfrager mit privaten Unternehmen in Konkurrenz um ein knappes Kapitalangebot steht, kann das dazu führen, dass die Kapitalmarktzinsen von einem bereits hohen Niveau noch weiter nach oben getrieben werden. Steigende Kosten der Kapitalbeschaffung werden auf die Güterpreise weitergewälzt. Dies kurbelt dann die Inflation an. Da heute aber Kapital im Überfluss da ist, hat die zusätzliche Kreditnachfrage des Staates den wünschenswerten Effekt, dass aus negativen Realzinsen positive Realzinsen werden können. So paradox das klingen mag: Erst die Staatsverschuldung verhindert heutzutage, dass es zu einer dauerhaften Inflation kommt.

**Sie sprechen von einem „negativen Realzins“. Was genau versteht man darunter?**

Ein Realzins ergibt sich – vereinfacht gesprochen – aus dem auf den Märkten zu beobachtenden Nominalzins abzüglich der erwarteten Inflationsrate. Nominalzinsen können aber nicht weit unter null Prozent fallen, weil sonst niemand mehr sein Geld zur Bank bringen, sondern zu Hause aufbewahren würde. Und weil der Nominalzins eine untere Schranke hat, kann der Realzins nur negativ werden, wenn es Inflation gibt.



**Aber es gibt doch Banken, die sogenannte „Strafzinsen“ verlangen, und dabei handelt es sich doch um negative Nominalzinsen, oder nicht?**

Ja, das ist korrekt. Vor allem manche Staatsanleihen haben negative Nominalzinsen. Zum Beispiel verdient der deutsche Staat daran, wenn er sich derzeit neu verschuldet. Durch die Neuausgabe von Staatsanleihen mit zehnjähriger Laufzeit hat der Bund im letzten Jahr fast sieben Milliarden Euro eingenommen. Sie sehen, da ist etwas fundamental nicht in Ordnung. Relevant sind am Ende aber vor allem die realen Zinsen, und diese sind seit längerem und auf breiter Front im negativen Bereich.

**Liegt das nicht vor allem an der ultra-lockereren Geldpolitik der Europäischen Zentralbank (EZB)? Die EZB könnte doch einfach die Zinsen erhöhen. Und das muss sie doch jetzt wegen der gestiegenen Inflation ohnehin, oder?**

Die EZB ist in einer Zwickmühle. Sie hat den vordringlichen Auftrag, für Preisstabilität in der Eurozone zu sorgen. Auf der anderen Seite ist die europäische Post-Corona-Wirtschaft noch fragil. Erfolgt der Ausstieg aus der expansiven Geldpolitik zu schnell und nicht mit ausreichend Augenmaß, könnte dies die europäische Wirtschaft wieder in die Rezession treiben. Die Lage in den USA ist übrigens anders. Dort hat die Zentralbank kürzlich die Zinsen erstmals seit 2018 wieder erhöht. Aber ein dauerhaftes Ende der Niedrigzinsphase ist auch dort erstmal nicht zu erwarten.

**In Ihrem Buch vertreten Sie die These, dass Kapital nicht länger knapp ist, weil die Ersparnisse im Verhältnis zum Einkommen gestiegen sind und dieses Verhältnis in Zukunft sogar noch weiter steigen wird. Warum ist dies der Fall?**

Der Hauptgrund ist der, dass die Menschen immer länger leben und die Maschinen immer kürzer. Ich will beides näher erläutern. Fangen wir mit den Menschen an. Wir sind in der glücklichen Lage, dass die menschliche Lebenserwartung

überall auf der Welt steigt. Heute beträgt die durchschnittliche Lebenserwartung global etwa 70 Jahre. Laut Prognose der UNO wird sie bis Ende des Jahrhunderts um 12 Jahre ansteigen. In den reichen OECD-Ländern, die mitsamt China in unserem Buch im Fokus stehen, stellt sich die Situation noch besser dar. In Deutschland zum Beispiel ist die Lebenserwartung in den letzten 50 Jahren um rund zehn Jahre angestiegen. Andererseits aber steigt die Lebensphase, in der die Menschen einer Erwerbstätigkeit nachgehen, nicht proportional zur wachsenden Lebenszeit. Dies bedeutet, dass die Ruhestandsphase nicht nur absolut, sondern auch

relativ immer größer wird. In der Ruhestandsphase müssen die Menschen aber von ihren Ersparnissen leben. In ihrer aktiven Zeit werden sie daher fürs Alter sparen, wir nennen es Vorsorgesparen. Die gesamtwirtschaftliche Sparquote ist also wegen der längeren Lebenserwartung gestiegen und wird noch zunehmen.

## **„Kapital ist nicht mehr knapp.“**

Hagen Krämer

**Fürs Sparen bieten die niedrigen Zinsen derzeit aber kaum Anreize. Und viele Menschen haben doch wenig bis nichts, das sie beiseitelegen können.**

Beides stimmt natürlich. Aber wir dürfen die gesetzliche Rentenversicherung nicht vergessen, in die jede und jeder Erwerbstätige monatlich seine Beiträge einahlt. Damit findet eine Form von Zwangssparen für das Alter statt. Die Beitragszahlerinnen und Beitragszahler erwerben dadurch Ansprüche gegen den Staat, die übrigens in Deutschland durch das in Karlsruhe ansässige Bundesverfassungsgericht abgesichert sind. Wir haben die Höhe des Kapitalwerts dieser Anwartschaften gegenüber der gesetzlichen Renten- und Krankenversicherung für alle OECD-Länder und China berechnet. Nehmen wir Deutschland: Hier betragen allein die Anwartschaften aus der gesetzlichen Rentenversicherung bei einem Realzins von null rund 15 Billionen Euro. Dieses stellt für die privaten Haushalte einen finanziellen Anspruch gegenüber dem Staat dar, man nennt so etwas auch eine Forderung. Wir bringen unseren Studierenden bereits im ersten Semester bei, dass jeder Forderung eine Verbindlichkeit



in der gleichen Größenordnung gegenübersteht. Hier liegt diese Verbindlichkeit offensichtlich beim Staat. Diese wird jedoch nicht in die offiziell ausgewiesene Staatsverschuldung hineingerechnet, wir bezeichnen sie daher als „implizite Staatsverschuldung“.

**Wenn das stimmt, was sie sagen, steigen die Ersparnisse der privaten Haushalte in der Tendenz immer weiter an. In einer modernen Wirtschaft werden die Ersparnisse ja nicht ins Sparschwein gesteckt oder unter das Kopfkissen gelegt, sondern zur Bank gebracht, wodurch sie letztlich auf dem Kapitalmarkt landen. Wer steht denn auf der anderen Seite des Kapitalmarkts und leiht sich diese Mittel?**

Wenn man in Aggregaten denkt, das heißt von Einzelfällen absieht, sind das die Sektoren Unternehmen und Staat. Im Allgemeinen reichen in beiden Sektoren die laufenden Einnahmen nicht aus, um alle Ausgaben zu decken, vor allem nicht die großen Investitionsprojekte. Wenn mittels einer Kreditaufnahme rentable Investitionen finanziert werden, ist diese Finanzierungsform nachhaltig und tragbar. Sie ist seit Jahrhunderten die zentrale Triebkraft einer wachsenden und prosperierenden kapitalistischen Ökonomie. Und nun kommt das Neue: die Kapitalnachfrage der privaten Unternehmen ist im Verhältnis zur Wirtschaftsleistung seit vielen Jahrzehnten zwar konstant geblieben, aber die Ersparnis, also das Kreditangebot, nimmt im Verhältnis zur Wirtschaftsleistung im Trend ständig zu. Dadurch ergibt sich ein Phänomen, das auf Englisch als „Savings glut“ und auf Deutsch als „Sparschwemme“ bezeichnet wird.

**War das schon immer so?**

Nicht in dieser Dimension. Erst mit dem Strukturwandel zur Dienstleistungsgesellschaft geht der relative Kapitalbedarf immer weiter zurück. Die Schwerindustrie ist nun mal kapitalintensiver als ein Internet-Start-up oder selbst ein grö-

ßeres Tech-Unternehmen der Informationsökonomie. Durch die schnell voranschreitende Digitalisierung wird sich diese Tendenz noch verstärken. Der technische Fortschritt ist hier sehr dynamisch, sodass die Produktionsmittel schneller veralten und abgeschrieben werden müssen. Das meinte ich vorhin, als ich sagte, die Maschinen leben immer kürzer. Diese Entwicklung verringert die Kapitalbindung und führt im Zusammenspiel mit den wachsenden Ersparnissen zur erwähnten Sparschwemme. Mit anderen Worten: Sparen und Investieren entwickeln sich im 21. Jahrhundert auseinander. Das ist die Große Divergenz!

## **„Wir benötigen eine völlig neue makro-ökonomische Perspektive.“**

Hagen Krämer

**In Ihrem Buch wird dies mithilfe eines Modells theoretisch näher analysiert. Wie sind Sie dabei vorgegangen?**

Carl Christian von Weizsäcker hat bereits vor rund zehn Jahren dargelegt, dass Kapital im 21. Jahrhundert nicht länger knapp und der sogenannte natürliche Zins negativ ist. Unter dem natürlichen Zins verstehen wir einen hypothetischen Realzins, also einen inflationsbereinigten Zins, der gelten würde, wenn Vollbeschäftigung herrschen und es annahmegemäß keine

Staatsschulden geben würde. Man kann sowohl in einem kapitaltheoretischen Modell als auch empirisch zeigen, dass es unter den Bedingungen des 21. Jahrhunderts einen wachsenden Überschuss des Kapitalangebots über die Kapitalnachfrage gibt. Ein Gleichgewicht auf dem Kapitalmarkt kommt dann nur zustande, wenn der natürliche Zins negativ ist.

**Gibt es Ihrer Ansicht nach einen Ausweg aus einer solchen Situation? Was genau schlagen Sie vor?**

Die Lösung ist tatsächlich relativ einfach, aber sie ist vielleicht im ersten Moment schwer zu verdauen, weil es im traditionellen Denken viele Vorbehalte dagegen gibt. Um es nochmal auf den Punkt zu bringen: Die Lücke zwischen Kapitalangebot und Kapitalnachfrage – oder was ungefähr das Gleiche bedeutet – zwischen Sparen und Investieren kann nur



geschlossen werden, wenn der Sparüberschuss von dem einzigen Akteur absorbiert wird, der so etwas konkret umsetzen kann. Und das ist der Staat. Deshalb ist die Einführung der Schuldenbremse in Deutschland aus makroökonomischer Sicht eine falsche Entscheidung gewesen. Wir fordern ihre Abschaffung, auch weil dies zur langfristigen Stabilisierung der Eurozone notwendig ist. Sie sollte durch ein internationales Zins-Leistungsbilanz-Abkommen ersetzt werden.

#### Und wie sollte ein solches Abkommen aussehen?

Das Bilanzabkommen hat gemäß der sogenannten Goldenen Regel das Ziel, den Zinssatz der Wachstumsrate der Wirtschaft anzugleichen. Dazu müssten sich die Länder zum einen zum Freihandel bekennen und zum anderen verpflichten, ihre Leistungsbilanzen auszugleichen. Konkret bedeutet dies: Wenn das Zinsniveau über der Wachstumsrate der Wirtschaft liegt, müssten Länder mit Leistungsbilanzdefiziten (wie die USA) ihre Staatsverschuldung zurückführen. Aber wenn umgekehrt die Zinsen unter der Wachstumsrate der Wirtschaft liegen, wie das momentan der Fall ist, dann müssen Länder mit Leistungsbilanzüberschüssen (wie z. B. Deutschland) ihre Staatsverschuldung erhöhen, sodass das Weltzinsniveau steigt. Die Kapitalexporte der Überschussländer würden dann sinken und die Sparüberschüsse stattdessen im Inland angelegt werden.

#### Das heißt also noch mehr Staatsverschuldung? Das kann doch nicht gut gehen.

Wenn wir zu dem Schluss kommen, dass der natürliche Zins negativ ist, so hat die Gesellschaft die Wahl zwischen einer Situation ohne Staatsschulden und einem durch Inflation negativen Realzins und einem Zustand der Preisstabilität mit positiven Staatsschulden. Ich denke, die zweite Option ist die bessere. Diese Erkenntnis erfordert sowohl ein andersartiges makroökonomisches Denken als auch andere wirtschaftspolitische Maßnahmen als bisher.

#### Wie wahrscheinlich ist es, dass die Regierungen das tun?

Viele Bürgerinnen und Bürger haben starke Vorbehalte gegen Verschuldung im Allgemeinen. Dennoch ist es für viele ganz selbstverständlich, dass sie sich verschulden, wenn sie z. B. ein Haus bauen. Und auch im Ländle gehen die kleinen Unternehmen zu ihrer Hausbank und die großen Konzerne auf den Kapitalmarkt, um Kredite aufzunehmen, wenn sie größere Investitionen tätigen wollen. Und das ist auch gut so, denn so funktioniert unsere Wirtschaft nun mal. Beim Staat sehen dies aber viele anders. Obwohl auch der Staat investiert, zum Beispiel in die Infrastruktur, in öffentliche Gebäude und Unternehmen, in die Energieversorgung und neuerdings wieder ins Militär. Angesichts des Klimawandels und der Herausforderungen der Digitalisierung hat der Staat in der Zukunft ohnehin mehr Investitionsaufgaben denn je.

## „Auf den Kapitalmärkten herrscht eine Art Anlage-notstand.“

Hagen Krämer

#### Können Sie denn nicht nachvollziehen, wenn sich die Bürgerinnen und Bürger angesichts einer hohen Staatsverschuldung Sorgen machen?

Ja, schon, aber wir haben jetzt eine andere Situation als in früheren geschichtlichen Epochen. Heute sind die Zinsen niedriger als die Wachstumsrate der Wirtschaft. Dies bedeutet, dass die auf dem Wirtschaftswachstum beru-

henden Steuereinnahmen des Staates schneller wachsen als die Zinslasten. Um das mit ein paar Zahlen zu verdeutlichen: Wir hatten schon Phasen in Deutschland, da gingen 25 Prozent der Steuereinnahmen in die Tilgung der Staatsschulden und in die Zinszahlungen. Seit 2012 ist die sogenannte Zinslastquote deutlich gefallen. Aktuell beträgt diese beim Bund nur ca. 4 %, und sie dürfte noch weiter sinken.

#### Das klingt ja fast wie im Schlaraffenland. Wollen Sie damit sagen, dass sich der Staat in unendlicher Höhe verschulden kann?

Nein, das heißt es natürlich nicht. Wir schreiben in unserem Buch an einer Stelle etwas salopp, dass man es mit den Staatsschulden auch nicht übertreiben dürfe. Aber solange die



## Mehr Miteinander mehr Offenheit – das Plus der HKA

# K A

Zinsen niedriger als die Wachstumsrate der Wirtschaft sind, kann sich der Staat relativ problemlos verschulden. Aber klar: Staatsschulden können nicht beliebig hoch sein. Wenn die Kreditgeber Zweifel an der Zahlungsfähigkeit eines Staates haben, werden sie keine Staatsanleihen mehr zeichnen. Und da die Staatsschuld revolvierend ist, also auslaufende Staatsanleihen durch Neu-Emissionen ersetzt werden, benötigt man Vertrauen. Die Kapitalbesitzer wissen derzeit aber ohnehin nicht recht, wohin mit ihrem Geld. Sie geben es dem deutschen Staat wegen seiner hohen Bonität gerne, selbst wenn sie dafür bezahlen müssen. Auf den Kapitalmärkten herrscht nämlich eine Art Anlagenotstand.

Anzeigen

**Fassen wir noch einmal zusammen. Sie konstatieren eine säkulare Sparschwemme und empfehlen, dass der Staat die anlagensuchenden Ersparnisse durch eine höhere Verschuldung aufnimmt, damit die Zinsen wieder steigen und Vollbeschäftigung und Preisstabilität herrschen. Dies hört man so in Deutschland eher selten. Befinden Sie sich unter ihren Kollegen damit nicht in einer Außenseiterposition?**

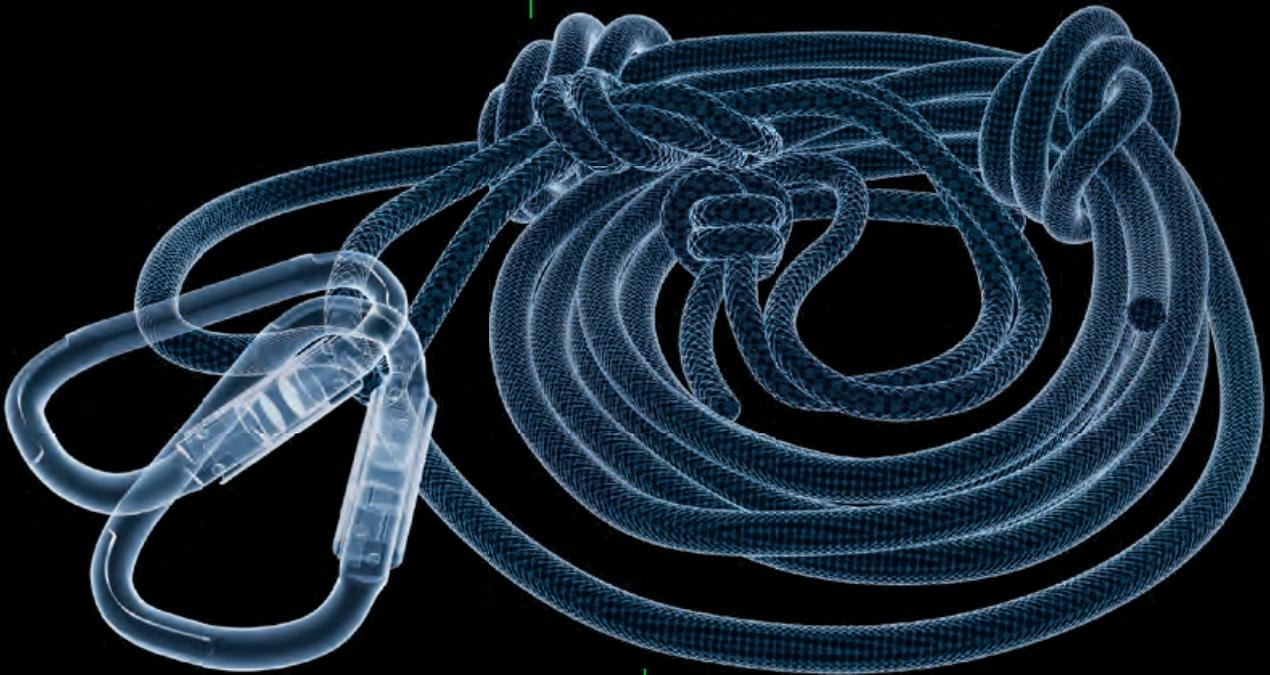
Wir haben auch hierzulande eine gute Resonanz erhalten, aber wir befinden uns vor allem international in guter Gesellschaft. Insbesondere in den USA sind wir – anders als in Deutschland – praktisch Mainstream. Wir freuen uns, dass unser Buch dort sehr gut aufgenommen wird. So hat George Akerlof, Nobelpreisträger für Wirtschaftswissenschaften, uns bescheinigt, dass unser Buch eine völlig neue makroökonomische Perspektive und eine einfache und praktische Lösung für das Problem der wirtschaftlichen Stagnation biete. Besonders erfreut war ich auch über den Kommentar von Olivier Blanchard, Professor am MIT und ehemaliger Chefökonom des Internationalen Währungsfonds, weil ich dessen Lehrbuch zur Makroökonomie seit vielen Jahren in meinen Lehrveranstaltungen einsetze. Blanchard hat unser Buch als beeindruckenden und überzeugenden theoretischen Wurf bezeichnet und bekräftigt, dass Staatsverschuldung erforderlich sein kann, um die gesellschaftliche Wohlfahrt zu verbessern. Wir hoffen mit diesem Rückenwind aus den USA auch hierzulande unseren Ansatz weiter verbreiten zu können.

**Vielen Dank für das Gespräch!**



[www.h-ka.de](http://www.h-ka.de)

**-4°C** erzeugen BITZER Verdichter  
in Produkttests, um sicherzustellen, dass  
Kletterhaken nicht brechen.



PERFEKT, UM WEITERZUKOMMEN:  
**DEINE ZUKUNFT BEI EINEM MARKTFÜHRER.**

Du bist Student und willst erste Erfahrungen als Praktikant sammeln, Deine Abschlussarbeit beim Marktführer schreiben oder nach dem Studium richtig durchstarten? Du lässt Dich von spannenden Aufgaben fesseln und möchtest schnell Verantwortung übernehmen? Dann hilf uns, mit unseren Produkten für die richtige Betriebstemperatur zu sorgen! In Kälte- und Klimaanlageanlagen auf der ganzen Welt leisten BITZER Verdichter einen entscheidenden Beitrag, zum Beispiel für die Sicherheit von Produkten. Als zukunftsorientiertes Unternehmen mit viel Herz bieten wir Dir nicht nur beste Einstiegs-möglichkeiten, sondern auch viele Aufstiegschancen. Mehr Informationen erhältst Du auf der Karriere-seite von [www.bitzer.de](http://www.bitzer.de)



DAS HERZ DER FRISCHE

# New Work – Arbeitswelt nach Covid-19

Marcel Orth, Stefanie Regier und Ingo Stengel

DE Bereits lange vor der Corona-Pandemie war ein struktureller Wandel in unserer Arbeitswelt erkennbar, einerseits bedingt durch die Digitalisierung und andererseits durch die veränderten Anforderungen und Bedürfnisse der Generation Y und Z. Um den Einfluss der Coronakrise auf die Arbeitswelt von Unternehmen zu untersuchen, wurde in Kooperation mit der 1&1 Mail & Media GmbH in Karlsruhe eine qualitative Studie in Form von Expertenbefragungen durchgeführt. Ziel der im Frühjahr 2021 durchgeführten Interviews war eine erste Einschätzung der Folgen von Covid-19 auf die Arbeitswelt nach der Pandemie.

EN Long before the Corona pandemic, a structural change in our working world was already apparent, due on the one hand to digitization and on the other to the changing requirements and needs of Generation Y and Z. In order to investigate the impact of the pandemic situation on the working environment of companies, a qualitative study in the form of expert interviews was conducted in cooperation with 1&1 Mail & Media GmbH in Karlsruhe. The aim of qualitative interviews with experts was to obtain an initial assessment of the consequences of Covid-19 on the working world after the pandemic situation.

Die Corona-Pandemie war in den letzten Monaten das vorherrschende Thema in den sozialen Medien, den Nachrichten und in unserem Alltag. Kein anderer Sachverhalt hat in den vergangenen Jahren so dominiert wie die Krise, ausgelöst durch das Virus SARS-CoV-2. Nachdem sich weltweit die Situation immer weiter verschärft hatte, traten kurze Zeit später auch die ersten Maßnahmen der Bundesregierung in Kraft, um die Ausbreitung des Virus einzudämmen. Dazu zählten vor allem das Tragen von Masken, Lockdowns sowie die Homeoffice-Pflicht. Das Homeoffice, eine orts- und zeitflexible Arbeitsform, wird häufig auch als mobiles Arbeiten oder Heimarbeit bezeichnet. Corona fungierte quasi als Katalysator für das Homeoffice: Viele Unternehmen machten es möglich, dass ihre Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter nun von zu Hause aus arbeiten konnten. Neben Vorteilen für die Beschäftigten, wie einer erhöhten Selbstbestimmung bei der Arbeit, der selbstständigen Gestaltung von Arbeitszeiten und dem Wegfall von Pendlerzeiten, birgt das mobile Arbeiten von zu Hause aus auch Gefahren, etwa durch psychische Überlastung, fehlende Work-Life-Balance oder Karriere Nachteile, denen nur mit klaren betrieblichen Regelungen und Rahmenbedingungen entgegengewirkt werden kann. Viele Beschäftigte beklagen die eingeschränkte Kommunikation mit den Kolleginnen und Kollegen und leiden unter der fehlenden Trennung zwischen dem Privat- und Erwerbsleben <sup>[1]</sup>.

Bereits lange vor der Corona-Pandemie war ein struktureller Wandel in unserer Arbeitswelt erkennbar, einerseits bedingt durch die Digitalisierung und andererseits durch die veränderten Anforderungen und Bedürfnisse der Generation Y und der nachfolgenden Generationen. Immer mehr Prozesse in den Unternehmen sind automatisiert, die Teams sind vernetzt, eine standortübergreifende Zusammenarbeit ist in vielen Fällen problemlos möglich. Der Ausdruck „New Work“ beschreibt diesen strukturellen Wandel in unserer Arbeitswelt, der durch die pandemische Lage zumindest kurzfristig erhebliche Schwungkraft erhalten hat.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage: Wie sieht die Zukunft der Arbeit aus und was hat sich durch die Pandemie nachhaltig verändert? Diese Fragen haben sich viele Arbeitgeber und Beschäftigte in den vergangenen Monaten

[1] Ahlers E., Mierich S., Zucco A.  
(2021): Homeoffice – Was wir aus der  
Zeit der Pandemie für die zukünftige  
Gestaltung von Homeoffice lernen  
können, in: WSI Report Nr. 65, April  
2021.



vermutlich häufiger gestellt. Um den Einfluss der Coronakrise auf die Arbeitswelt von Unternehmen zu untersuchen, wurde in Kooperation mit der 1&1 Mail & Media GmbH in Karlsruhe eine qualitative Studie in Form von Expertenbefragungen durchgeführt. Ziel der im Mai und Juni 2021 durchgeführten, semistrukturierten Interviews mit Experten war eine erste Einschätzung der Folgen von Covid-19 auf die Arbeitswelt nach Corona. Die Ergebnisse sind nicht repräsentativ, sondern sollen vielmehr eine erste Idee liefern, inwieweit sich die Arbeitswelt durch Covid-19 weiter verändern könnte.

Dabei wurde deutlich, dass die Pandemie insbesondere auf das Thema Flexibilität Einfluss genommen hat, weswegen die Experten vor allem in diesem Bereich zukünftig Veränderungen in Unternehmen erwarten. Dazu zählen unter anderem die dauerhafte Einführung von hybriden Arbeitsmodellen, bei denen die Beschäftigten im Büro und auch von zu Hause aus arbeiten können. Die meisten Beschäftigten ziehen hybride Formen dem reinen Homeoffice vor. Dies ist damit zu begründen, dass soziale Kontakte im Homeoffice deutlich schwieriger aufrechtzuerhalten sind als im Präsenzbetrieb. So fallen im Homeoffice gemeinsame Mittagspausen oder spontane Gespräche auf dem Büroflur weg.

Digitale Lösungen und neue Technologien werden nach Auffassung der Experten das mobile Arbeiten in Zukunft noch stärker unterstützen und Teamarbeit auch von verschiedenen Standorten aus effizienter, günstiger sowie nachhaltiger und klimafreundlicher gestalten. Durch die Erfahrungen während der Pandemie mit Videokonferenzen und verteilten Teams werden nach Einschätzung der Experten Dienstreisen, insbesondere die Notwendigkeit von Fernflügen, auf dem Prüfstand stehen. Bei der Umsetzung von hybriden Arbeitsmodellen müssen auch Büroflächen neu gedacht werden. Freistehende Flächen können neu konzipiert werden und somit neue Funktionen übernehmen, wie z. B. Räume für kreatives Zusammenarbeiten oder zur Entspannung. Das gesteigerte Wohlbefinden wiederum setzt auch Anreize, gerne ins Büro zu kommen und unterstützt produktives Arbeiten.

Im Bereich der Individualität hat die Coronakrise nach Meinung der Experten vor allem auf die Festlegung von Zielen der Beschäftigten Einfluss genommen. Harte Zielvorgaben wie Umsatz oder geleistete Stunden sollten durch

„weiche“ Zielvorgaben wie z. B. Mitarbeiterzufriedenheit ergänzt werden. Dies unterstützt demokratische Führungsstile und fördert New Work. Führungskräfte sollten vermehrt als Coaches und Personalentwickler ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern zur Seite stehen und diese bei komplexen Angelegenheiten mit konstruktiver Beratung unterstützen. Eine Herausforderung hybrider Modelle ist es, die Beschäftigten auch auf Distanz – sprich im Homeoffice – zu managen. Für die Umsetzung von New Work ist eine demokratische Führungsweise unabdinglich. In der Arbeitswelt der Zukunft müssen die Beschäftigten einbezogen werden und Unternehmen müssen lernen, dieses Vertrauen zu schenken. Interne Beobachtungen bei der 1&1 Mail & Media GmbH zeigen, dass die Produktivität in der Zeit, während der Großteil der Beschäftigten coronabedingt im Homeoffice war, nicht gefallen ist. Dies lässt vermuten, dass Unternehmen darauf vertrauen können, dass die meisten Beschäftigten auch in schwierigen Krisenzeiten zuverlässig ihrer Tätigkeit nachgehen. Auch im Kampf um Fachkräfte – gerade in der IT mit einem erheblichen Fachkräftemangel – kann diese Entwicklung ein Wettbewerbsvorsprung sein. ✘

#### Autoren

**Marcel Orth B.Sc.**

Masterstudent der Wirtschaftsinformatik an der HKA

**Prof. Dr. Stefanie Regier**

Professorin für Marketing und Marktforschung  
an der Fakultät für Informatik und  
Wirtschaftsinformatik der HKA

**Prof. Dr. Ingo Stengel**

Professor für eBusiness und IT-Sicherheit  
an der Fakultät für Informatik und  
Wirtschaftsinformatik der HKA

#### Kontakt

Prof. Dr. Stefanie Regier  
Hochschule Karlsruhe  
Fakultät für Informatik und Wirtschaftsinformatik  
Moltkestraße 30  
76133 Karlsruhe  
E-Mail: stefanie.regier@h-ka.de

Hochschule Karlsruhe  
University of  
Applied Sciences

Neuer  
Studiengang  
- Bachelor -

H  
K  
A

## Green Technology Management

Ingenieurwesen, Wirtschaft und Management kombiniert studieren



[www.h-ka.de/gtmb](http://www.h-ka.de/gtmb)



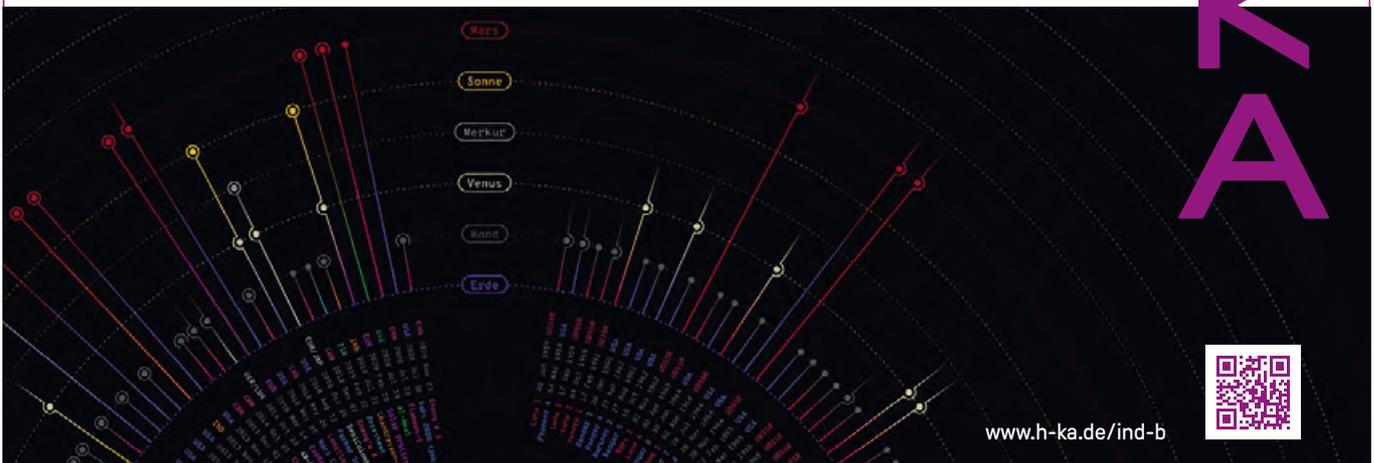
Hochschule Karlsruhe  
University of  
Applied Sciences  
Fakultät für  
Informationsmanagement  
und Medien

NEU!  
Bachelor-  
Studiengang

H  
I

## Informationsdesign

Daten und Fakten multimedial inszeniert:  
Wissenschaft und Gesellschaft im Rampenlicht



[www.h-ka.de/ind-b](http://www.h-ka.de/ind-b)



K  
A

# Bits & Bytes zum Anbeißen!

Jobs mit Yummie-Effekt gibt es bei dmTECH viele. Und das für jeden Geschmack: App- und Software-Entwickler, Data Engineers, KI-Experten, IT-Architekten, Systemadministratoren ... Wir alle kriegen von Bits & Bytes einfach nicht genug.

Du bekommst Lust auf mehr? Wir bieten Einstiegschancen in vielen Bereichen – schau doch mal vorbei: [dmTECH.de](https://dmTECH.de)



# Elektromobilität und Verkehrs- wesen

# Entwicklung innovativer und temperaturstabiler Batterien

Florian Hauser und Olivier Schecker

DE Die Integration von Batterien in kleinstbauende, energieautonome Sensorsysteme stellt eine große Herausforderung hinsichtlich deren Widerstandsfähigkeit gegen äußere Einflüsse – auch während der Fertigung – dar. Hohen Drücken und Temperaturen von über 200 °C, wie sie bei Kunststoffspritzguss oder Lötprozessen auftreten, sind die meisten Zellen nicht gewachsen. Zur Lösung dieses Problems werden im folgenden Beitrag zwei Lösungsansätze angesprochen, die aktuell Gegenstand der Forschung im Labor für Lithium-Ionen-Batterien an der Hochschule Karlsruhe sind.

EN The integration of batteries into miniature, energy-autonomous sensor systems poses a major challenge in terms of resistance to external influences – even during production. Most cells are not able to withstand high pressures and temperatures of more than 200 °C, such as occur during plastic injection molding or soldering processes. To solve this problem, the following article presents two approaches that are currently the subject of research in the laboratory for lithium-ion batteries at Karlsruhe University of Applied Sciences.

E-Scooter, E-Bikes, Elektroautos – mit Erstarren der Elektromobilität ist das Thema Batterien stärker in den Fokus öffentlicher Diskussionen gerückt. Neben großen Traktionsbatterien in Autos und Bussen steigt auch der Bedarf an kleinen Akkumulatoren, wie sie beispielsweise in mobilen Endgeräten, bei der Parkraumüberwachung oder in energieautonomen Sensorsystemen zur Erfassung von Umweltdaten zum Einsatz kommen.

Da die Kapazität, also die Menge der speicherbaren Energie einer Batterie, eine volumenabhängige Größe ist, nehmen Akkumulatoren gerade in kleinstbauenden Sensorsystemen einen Großteil des Bauraums ein. Die weitere Miniaturisierung dieser Systeme setzt die Integration der Batterien in bereits vorhandene Strukturen wie die Einhausungen voraus.

Mit dem Einbau beispielsweise in hermetisch verschlossene Kunststoffgehäuse oder der Nutzung von Batterien als Substrat für den Aufbau elektrischer Schaltungen ergeben sich neue Anforderungen hinsichtlich der Widerstandsfähigkeit gegen äußere Einflüsse. So müssen die Batterien einerseits ihre Einsatzfähigkeit bei Raumtemperatur bewahren, andererseits aber auch Temperaturen größer 200 °C sowie hohen Drücken während der Fertigung der Sensorsysteme standhalten.

Da Lithium-Ionen-Akkus neben der höchsten gravimetrischen Energiedichte auch die höchste volumetrische Energiedichte aller Akkumulatoren haben, sind sie besonders für den Einsatz in bauraumbeschränkten Systemen geeignet. Darüber hinaus weisen sie eine geringere Selbstentladung als beispielsweise Nickel-Cadmium- und Nickel-Metallhydrid-Batterien auf und können somit die in ihnen gespeicherte Energie über einen längeren Zeitraum abgeben.

Lithium-Cobaltdioxid-Akkumulatoren dominierten lange Zeit den Markt der Lithium-Ionen-Batterien, neigen aber bei Überladung, Kurzschluss und mechanischer Beschädigung zu stark exothermen Reaktionen, die zum thermischen Durchgehen führen. Die heute dominierende Zellchemie basiert auf Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt-Oxiden. Diese sind zwar sicherer als die  $\text{LiCoO}_2$ -Akkus, aufgrund der verwendeten Nickel- und Cobaltoxide aber nicht so umweltfreundlich wie beispielsweise Lithium-Eisen-Phosphat oder auch Lithium-Titanat, um nur zwei zu nennen.



Im Labor für Lithium-Ionen-Batterien an der HKA: Der Zellaufbau erfolgt in mit Argon gefüllten Gloveboxen (Foto: Tobias Schwerdt)

## Wie funktioniert eine Batterie?

Batterien speichern chemische Energie und können diese bei Bedarf in Form elektrischer Energie wieder abgeben. Lässt sich dieser Vorgang umkehren, die Batterie also wieder aufladen, spricht man auch von einer Sekundärbatterie, anderenfalls von einer Primärbatterie. Wie alle Batterien bestehen auch Lithium-Ionen-Batterien aus negativen und positiven Elektroden, in denen die Energie durch Einlagerung von  $\text{Li}^+$ -Ionen gespeichert wird. Wie in Abbildung 1 dargestellt, werden die beiden Elektroden zur Vermeidung eines internen Kurzschlusses mittels eines elektrisch isolierenden, porösen Separators voneinander getrennt. Der Transport der Lithium-Ionen zwischen Kathode und Anode erfolgt durch einen Elektrolyten, einerseits aufgrund des elektrischen Feldes (Migration) und andererseits durch Konzentrationsunterschiede (Diffusion). Dieser Elektrolyt muss eine gute Ionenleitfähigkeit aufweisen und hat einen direkten Einfluss auf den Innenwiderstand und das Kälteverhalten der Zelle.

Wird eine Zelle entladen, geben die Interkalationsverbindungen des Graphits Elektronen ab. Da der Elektrolyt nicht elektronisch leitend ist, müssen die Elektronen über den Stromsammler und den „externen“ Stromkreis zur Kathode wandern. Die eingelagerten Lithium-Ionen gleichen die Ladungsdifferenz aus, indem sie durch den Elektrolyten bzw. die Löcher der Separatormembran wandern und sich im Kathodenmaterial einlagern. In der Kathode rekombinieren die Lithium-Ionen nicht mit den Elektronen zu metallischem Lithium, sondern bleiben als Ionen eingelagert, wobei sich

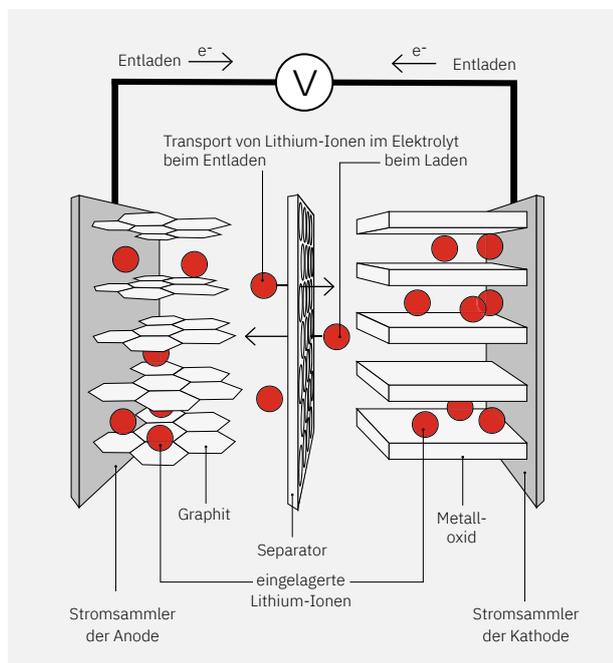


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Lithium-Ionen-Akkumulators mit schichtartigem Kathodenmaterial (Grafik: Florian Hauser)

die Elektronen in unmittelbarer Nähe aufhalten. Beim Laden der Batterie läuft dieser Prozess in umgekehrter Richtung ab.

Nach dem Zellaufbau wird im Rahmen des Formierungsprozesses, einem Prozess, bei dem ein Teil des Elektrolyten an der Elektrodenoberfläche zersetzt wird, eine

Schutzschicht auf den Elektroden gebildet. Diese Schicht wird auf Anodenseite als Solid Electrolyte Interface (SEI) bezeichnet.

## Warum keine hohen Temperaturen?

Standard-Lithium-Ionen-Batterien können Temperaturen bis etwa 60 °C ohne nennenswerte Schäden widerstehen. Einzelne auf dem Markt verfügbare Modelle lassen sich auch bis 85 °C zyklieren und überstehen Prozesse bis 135 °C. Für den Einsatz bei hohen Temperaturen von mehr als 200 °C stehen mit Thermalbatterien wie beispielsweise Natrium-Schwefel- oder Natrium-Nickelchlorid-Batterien Systeme zur Verfügung, die jedoch bei Raumtemperatur ihre Funktionsfähigkeit verlieren.

Werden Standard-Lithium-Ionen-Batterien erhitzt, so kommt es, wie in Abbildung 2 dargestellt, zunächst zu einer Zerstörung der SEI-Schicht, bevor anschließend der PE/PP-Separator zu schmelzen beginnt. Eine weitere Erhöhung der Temperatur führt zu Gasbildung und somit zu einem Druck-

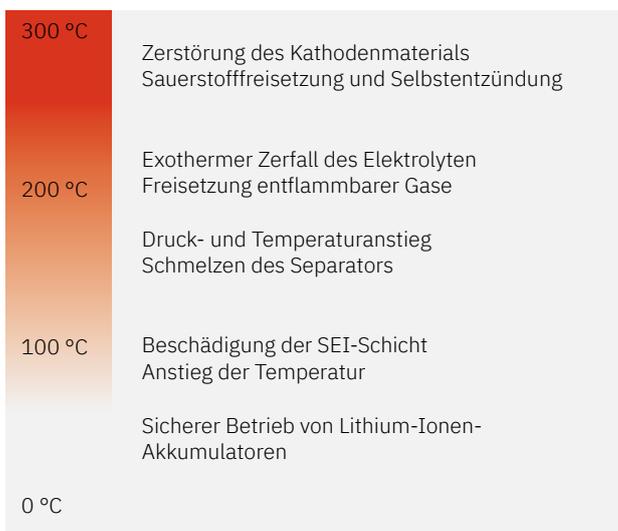


Abb. 2: Versagensmechanismen beim Anstieg der Temperatur in Lithium-Ionen-Batterien (Grafik: Florian Hauser)

aufbau innerhalb der Zelle. Im Fall von Pouchzellen führt dieser Druckaufbau zur Deformation der Zelle und kann die Elektroden durch mechanische Belastungen beschädigen. Den weitaus kritischsten Punkt stellt dann die Zersetzungsreaktion des Elektrolyten dar, welcher in der Selbstentzündung der Batterie enden kann.

## Alternative Batteriechemie

Der Aufbau von Zellen, die einerseits thermisch stabil sind, nicht zu thermischem Durchgehen neigen und andererseits aus Materialien bestehen, die nicht umweltschädlich sind, ist Gegenstand der aktuellen Forschung im Labor für Lithium-Ionen-Batterien an der HKA. Es werden im Folgenden verschiedene Veränderungen der Zellen angesprochen die diesen Zielen dienlich sind:

- + Die für den Aufbau der Zellen benötigten Elektroden werden durch Drücken der Elektrodenpasten auf die Stromsammler hergestellt. Die Hauptbestandteile dieser Pasten sind z. B. Graphit- oder Lithium-Eisen-

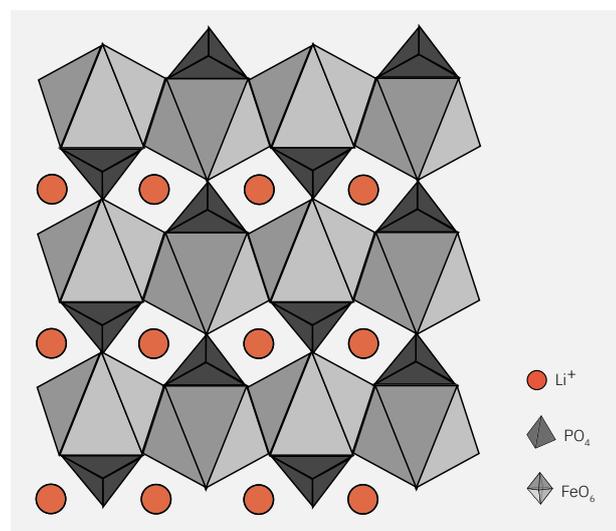


Abb. 3: Die Kristallstruktur von Lithium-Eisen-Phosphat besteht aus Phosphattetraedern und Eisenoxidoktaedern. In den entstehenden Kanälen lagern sich die Lithium-Ionen ab. (Grafik: Florian Hauser)

# „Wir wollen in Deutschland [...] die innovativsten, umweltschonendsten Batterien produzieren.“

Peter Altmaier (Bundesminister für Wirtschaft und Energie a.D.)

Phosphat-Pulver, wobei die Eigenschaften der späteren Schicht durch Verwendung weiterer Additive gezielt beeinflusst werden. Der Einsatz wasserlöslichen SBR-Binders lässt den Verzicht auf das gesundheitsschädliche Lösemittel NMP zu und vereinfacht zudem den Herstellungsprozess.

- + Die Verwendung von Lithium-Eisen-Phosphat als Kathodenmaterial wurde bewusst getroffen, da das Material einerseits eine hohe Stabilität aufweist und nicht toxisch ist. Aufgrund seiner in Abbildung 3 dargestellten Kristallstruktur (Olivin-Struktur) aus  $\text{FeO}_6$ - und  $\text{PO}_4$ -Schichten bilden sich Kanäle aus, in denen sich die Lithium-Ionen einlagern können. Werden die Lithium-Ionen beim Laden der Batterie aus dem  $\text{LiFePO}_4$ -Kristall ausgelagert, bleibt ein  $\text{FePO}_4$ -Kristall mit gleicher Anordnung übrig. Dementsprechend weist Lithium-Eisen-Phosphat auch bei vollständiger Entladung eine hohe Lebensdauer auf.
- + Neben dem Kathodenmaterial werden Alternativen zu dem in Batterien standardmäßig verwendeten und

temperaturinstabilen auf Lithiumhexafluorophosphat ( $\text{LiPF}_6$ ) basierenden Elektrolyt eingesetzt.

- + Um einer Zerstörung der SEI-Schicht während des Erhitzens vorzubeugen kann die Formierung der Zelle nach Abschluss des Fertigungsprozesses des integrierten Sensorsystems erfolgen. Allerdings werden hierzu angepasste elektrische Schaltungen mit externem Zugang benötigt, um eine gute SEI-Schicht aufzubauen.

Hier wird auch an einer Alternative in Form einer künstlichen SEI-Schicht geforscht, die thermisch stabil ist. Hierzu wird die Anode mit einer dünnen Schicht eines Lithiumkeramikoxides überzogen. In einem zweiten Schritt soll diese Schicht auch den Einsatz des Separators zwischen Anode und Kathode überflüssig machen und den Weg zu Festkörperbatterien ebnet.

Eine Batterie, die sich aufgrund hoher Temperaturstabilität und Langlebigkeit gut in kleinstbauende Sensorsysteme integrieren lässt und darüber hinaus aus umweltverträglichen Materialien besteht, stellt sowohl in der Herstellung als auch im Betrieb und Entsorgung eine geringere Umweltbelastung dar. Sie reiht sich somit gut in die Bestrebungen einer nachhaltigen Batterieentwicklung in Europa ein. ✘

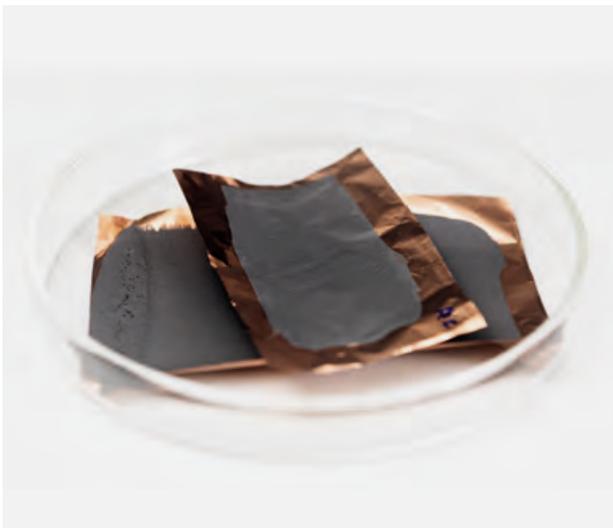


Abb. 4: Mit Graphit beschichtete Kupferstromsammler bilden die Grundlage für die Herstellung der Anoden einer Lithium-Ionen-Batterie. (Foto: Tobias Schwerdt)

#### Autoren

**Dipl.-Ing. (ENSMM) Florian Hauser M.Sc.**  
Akademischer Mitarbeiter an der Fakultät für  
Maschinenbau und Mechatronik der HKA

**Prof. Dr. rer. nat. Olivier Schecker**  
Professor für Mikrosystemtechnik an der Fakultät  
für Maschinenbau und Mechatronik der HKA

#### Kontakt

Prof. Dr. rer. nat. Olivier Schecker  
Hochschule Karlsruhe  
Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik  
Moltkestraße 30  
76133 Karlsruhe  
E-Mail: olivier.schecker@h-ka.de



# STARK IM SERVICE. SERVISCOPE!

Wir sind die Kraft dahinter für Banken in ganz Deutschland. Und Du bist die Kraft hinter SERVISCOPE. Gemeinsam machen wir Services für Banken. Flexible Arbeitszeiten, ein nettes Team und viel Spaß erwarten dich!



**STUDENTENJOBS  
AUSBILDUNG  
KARRIERESTART**



[www.serviscope.de/karriere](http://www.serviscope.de/karriere)

## High performance scientific instruments



**At Bruker BioSpin, we are specialized in following technologies:**

- Nuclear Magnetic Resonance (NMR)
- Electron Paramagnetic Resonance (EPR)
- Magnetic Resonance Imaging (MRI)
- Magnetic Particle Imaging (MPI)
- MicroCT
- PET/SPECT/CT

**We offer you:**

- An international and collegial work environment
- Innovative teams and entrepreneur mindset
- Agile ways of working and personal freedom



Innovation with integrity

HR People & Culture

As one of the world's leading analytical instrumentation companies, Bruker covers a broad spectrum of advanced solutions in all fields of research and development.

All our systems and instruments are designed to improve safety of products, accelerate time-to-market and support industries in successfully enhancing quality of life. We've been driving

innovation in analytical instrumentation for 60 years now. Today, worldwide more than 7,000 employees are working on this permanent challenge, at over 90 locations on all continents.

# KTE

Kerntechnische  
Entsorgung Karlsruhe



## Starte jetzt Deine spannende Karriere in der Nuklearbranche

### Gemeinsam mit uns die Zukunft gestalten!

Die KTE ist im Bereich Rückbau und Entsorgung kerntechnischer Anlagen tätig. Wir bieten Dir eine langfristige Zusammenarbeit mit guten Rahmenbedingungen - z. B. im Bereich Technik und Ingenieurwesen mit einzigartigen und anspruchsvollen Tätigkeiten oder im Rahmen eines Dualen Studiums.

Interesse?  
Jetzt bewerben!  
[www.kte-karlsruhe.de/karriere](http://www.kte-karlsruhe.de/karriere)

**Wir setzen Maßstäbe.  
Mit Sicherheit.**



# Potenziale von E-Bikes im ländlichen Raum – Erfahrungen aus Baiersbronn

Elke Häußler und Jan Riel

**DE** Im Rahmen der Aktion „Tausche Autoschlüssel gegen E-Bike“ hatten 120 Einwohner:innen aus Baiersbronn im Schwarzwald die Gelegenheit, kostenlos für zehn Tage ein E-Bike zu testen. Im Gegenzug sollten sie das Auto in dieser Zeit möglichst nicht nutzen. Dieser Test wurde vom Institut für Verkehr und Infrastruktur (IVI) der Hochschule Karlsruhe wissenschaftlich begleitet und ausgewertet. Hierbei wurde der Frage nachgegangen, wie sich die Mobilität der Tester:innen verändert hat und ob E-Bikes auch im ländlichen Raum eine sinnvolle Alternative zum Pkw im Alltag darstellen können.

**EN** As part of the “Exchange your car keys for an e-bike” campaign, 120 residents of Baiersbronn in the Black Forest had the opportunity to test an e-bike free of charge for ten days. In return, they were asked to use the car as rarely as possible during this time. This test was scientifically monitored and evaluated by the Institute for Transport and Infrastructure (IVI) at Karlsruhe University of Applied Sciences. The study investigated how the testers’ mobility has changed and whether e-bikes are an alternative to cars in everyday life in rural areas.

E-Bikes werden in Deutschland immer beliebter. Im alltäglichen Sprachgebrauch hat sich der Begriff „E-Bike“ seit geraumer Zeit durchgesetzt. Damit sind sowohl Pedelecs gemeint, für deren Antrieb Muskelkraft notwendig ist, als auch Fahrräder mit Elektromotor, die auch ohne Tretbewegung, d. h. rein elektrisch, fahren können. Bei 97 % der elektrischen Räder wirkt der Motor nur unterstützend. Im Jahr 2020, dem ersten Jahr der Corona-Pandemie, wurden laut Zweirad-Industrie-Verband (ZIV) knapp zwei Millionen E-Bikes verkauft – so viele wie noch nie. Durch die Zunahme im Rekordjahr belaufen sich die Schätzungen auf 7,1 Millionen E-Bikes, die auf deutschen Straßen unterwegs sind <sup>[1]</sup>. Damit stellen E-Bikes ca. 9 % der Gesamtheit aller Fahrräder. Es ist davon auszugehen, dass die Nachfrage nach E-Bikes weiter steigt. Die Gründe hierfür sind vielfältig: Durch die Unterstützung eines Elektromotors können weitere Strecken zurückgelegt werden. Ziele, für die bislang nur der Pkw in Frage kam, können nun auch mit dem E-Bike erreicht werden. Zudem lassen sich mit diesem natürliche Hindernisse wie Höhenunterschiede oder Gegenwind leichter bewältigen. Darüber hinaus sprechen auch Umweltgedanken für die Nutzung eines E-Bikes, insbesondere ein geringer Energieverbrauch und niedriger CO<sub>2</sub>-Ausstoß stehen dabei im Vordergrund <sup>[4]</sup>. Überdies wirkt sich das Fahren auch positiv auf die Gesundheit der Nutzer:innen selbst aus, da Menschen mit einem E-Bike dieses häufiger nutzen. Obwohl der durchschnittliche Neupreis eines E-Bikes im Jahr 2020 bei fast 3.000 € lag <sup>[1]</sup>, sind E-Bikes sowohl in der Anschaffung als auch im Unterhalt deutlich günstiger als ein Pkw, unabhängig von dessen Antriebsart.

## Einwohner:innen in Baiersbronn machten den Praxistest

Die Gemeinde Baiersbronn mit ihren 15.000 Einwohner:innen liegt im Nordschwarzwald in der Nähe von Freudenstadt. Die Gegend zeichnet sich durch eine bewegte Topographie aus und ist ein beliebtes Ziel sowohl für Outdoor-Touristen als auch für Besucher:innen der gehobenen Gastronomie. Aber auch Baiersbronn leidet unter zu viel Verkehr, der ca. zur Hälfte von den Bewohner:innen selbst verursacht wird <sup>[2]</sup>.

[1] <https://ebike-news.de/so-angesagt-ist-e-bike-fahren-die-offiziellen-zahlen-fuer-2020-sind-da/196728/>

[2] Ingenieurbüro Köhler+Leutwein, Verkehrsgutachten 2015.

[3] Webseite der Aktion mit FAQ und Erfahrungsberichten <https://ebike-baiersbronn.de/>

[4] Umweltbundesamt: E-Rad macht mobil. Potenziale von Pedelecs und deren Umweltwirkung. Hg.v. Umweltbundesamt (UBA). Dessau-

Roßlau. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/hgp\\_e-rad\\_macht\\_mobil\\_-\\_pedelecs-4.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/hgp_e-rad_macht_mobil_-_pedelecs-4.pdf); zuletzt geprüft am 07.07.2021.

Die Aktion „Tausche Autoschlüssel gegen E-Bike“ sollte als Reallabor vor Ort herausfinden, ob und wie viel Kfz-Verkehr sich im Alltag auf das E-Bike verlagern lässt<sup>[3]</sup>. Dabei unterzogen von Mai bis August 2021 insgesamt 120 Personen das E-Bike einem Praxistest. Zur Auswahl standen verschiedene E-Bike-Modelle, die zehn Tage kostenlos genutzt werden konnten. Gleichzeitig sollten so wenige Wege wie möglich mit dem Pkw zurückgelegt werden. Um einen Vergleich zwischen der „normalen“ Mobilität und der Testphase zu ermöglichen und um die Erfahrungen der Tester:innen mit den E-Bikes zu dokumentieren, wurde vor und während der Testphase eine Mobilitätsbefragung unter den Tester:innen durchgeführt. Dazu zeichneten die Teilnehmenden jeweils über zwei Tage jeden ihrer Wege in einem Wegetagebuch auf (Wegezzweck, genutztes Verkehrsmittel, Start und Ziel, Distanz in Kilometern und Dauer in Minuten). Vor der Testphase gaben sie zudem eine Einschätzung ab, für welche Wege und Distanzen sie das E-Bike nutzen wollten.

Die Aktion „Tausche Autoschlüssel gegen E-Bike“ wurde gemeinsam von verschiedenen Partnern initiiert. Mit an Bord waren die Fahrradhersteller Scott und Bergamont, ein örtlicher Fahrradladen, die Tourismusbehörde der Gemeinde Baiersbronn, Bosch ebike Systems und das Institut für Verkehr und Infrastruktur der Hochschule Karlsruhe.

## Ergebnis: E-Bikes wurden für die meisten Wege genutzt

Obwohl die Ergebnisse nicht repräsentativ für alle Einwohner:innen von Baiersbronn sind, geben sie einen guten Einblick in das Potenzial von E-Bikes im ländlichen Raum. Die Testpersonen waren während der Testphase genauso mobil wie sonst auch. Sie legten ähnlich viele Wege am Tag zurück wie zuvor, mit dem Unterschied, dass nun für die überwiegende Mehrheit der Wege das E-Bike genutzt wurde: Vor der Testphase legten die Baiersbronner:innen 72 % ihrer Wege mit dem Pkw zurück. Während des Tests dagegen dominierte das E-Bike mit über 67 % am Modal Split. Der Anteil der mit dem Pkw zurückgelegten Wege sank dagegen auf 18 % (siehe Abbildung 1). Somit konnte der Anteil der Wege mit dem Auto auf ein Viertel reduziert werden.

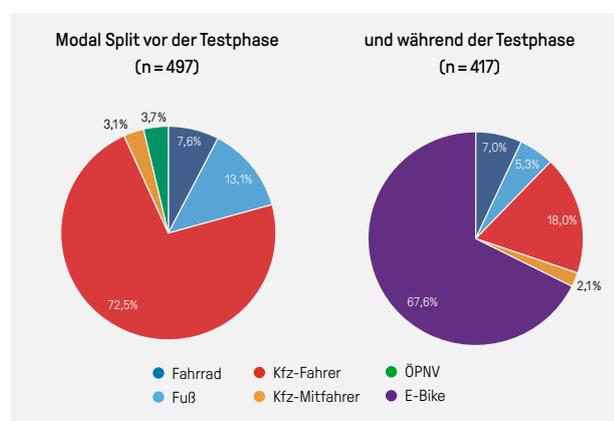


Abb. 1: Modal Split vor und während der E-Bike Testphase (Grafik: Elke Häußler)

Aus bundesweiten Mobilitätserhebungen ist bekannt, dass Wege ab 5 km vermehrt mit dem Pkw oder dem öffentlichen Nahverkehr zurückgelegt werden, Wege unter 5 km dagegen vor allem zu Fuß oder mit dem Fahrrad. Es zeigte sich am Beispiel Baiersbronn jedoch, dass während der Testphase auch vielfach Entfernungen von weit über 5 km mit dem E-Bike zurückgelegt wurden (siehe Abbildung 2).

Vor der Testphase waren 73 % der mit dem Pkw zurückgelegten Wege nicht länger als 10 km und 83 % nicht länger als 20 km. Solche Entfernungen sind für ein E-Bike kein Problem und die Ergebnisse des Tests zeigen, dass Pkw-Fahrten dieser Länge auch im Alltag durch E-Bike-Fahrten ersetzt werden können. Zudem zeigte sich noch ein weiterer Effekt: Die vor der Testphase geschätzten Wegelängen für die zukünftigen E-Bike-Fahrten lagen deutlich unter den in der Testphase tatsächlich zurückgelegten Wegelängen. Je nach Wegezzweck waren die tatsächlich gefahrenen Wege teils doppelt so weit wie vorab vermutet. Damit eignen sich E-Bikes für den ländlichen Raum, da hier die Wege zum Einkaufen und anderen Zielen meist länger sind als im urbanen Kontext. Die Ergebnisse verdeutlichen somit, dass das Testen mit E-Bikes Sinn macht, da Entfernungen oftmals nur vom herkömmlichen Fahrrad bekannt sind und als zu weit eingeschätzt werden.

# Die Nutzung von E-Bikes gewinnt deutlich an Zuspruch

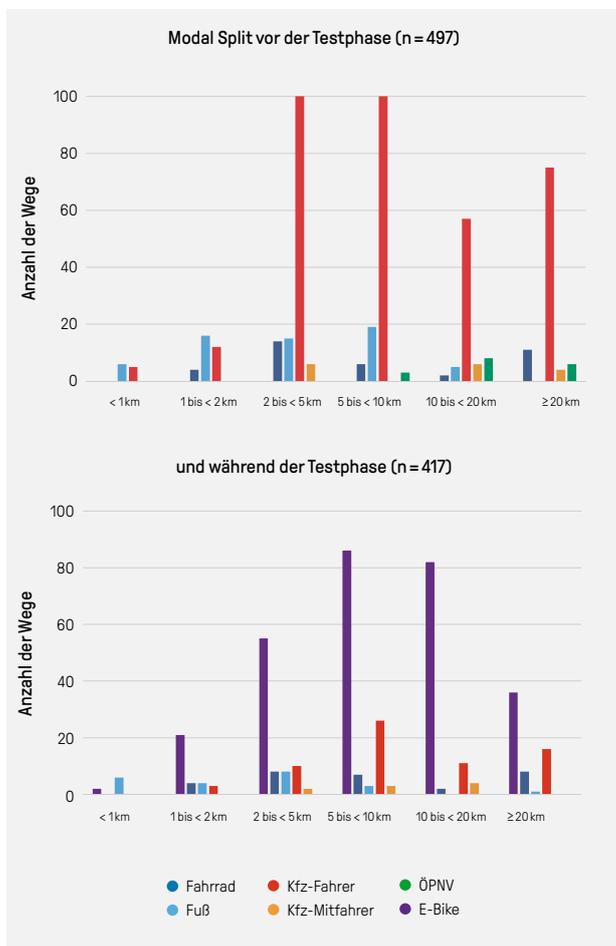


Abb. 2: Modal Split nach Entfernungsklassen vor und während der Testphase (Grafik: Elke Häußler)

Der Erfolg der Aktion „Tausche Autoschlüssel gegen E-Bike“ lässt sich auch daran ablesen, dass 86 % der Tester:innen sich aufgrund des Tests vorstellen können, ein eigenes E-Bike anzuschaffen und im Alltag zu nutzen.

Einige Einschränkungen sollen vollständigshalber nicht unerwähnt bleiben: Bei starkem Niederschlag wurde das E-Bike deutlich weniger genutzt: In der „nassen“

Jahreszeit ist der Verlagerungseffekt vom Auto auf das E-Bike also vermutlich geringer. Außerdem wurden in der Testphase anteilig mehr Freizeitwege zurückgelegt als vorher. Das E-Bike dient also sowohl als Verkehrsmittel, um im Alltag von A nach B zu kommen als auch als Sportgerät.

Weitere Aktionen, in denen Menschen den Gebrauch von E-Bikes im Alltag testen können, sollen folgen. Es besteht darüber hinaus auch weiterer Forschungsbedarf zu den Nutzer:innen und dem Einsatz von E-Bikes. Während E-Bikes in den vergangenen Jahren eher als Verkehrsmittel für ältere Radfahrer:innen gesehen wurden, steigen nun vermehrt auch junge Menschen um. Zudem gibt es mittlerweile ein breit gefächertes Angebot an unterschiedlichen E-Bikes. So können Cargo-Bikes nicht nur von Privatpersonen genutzt werden, sondern auch von Handwerkern oder Lieferdiensten. Das hat enormes Potenzial für Kommunen: Wenn der Pkw-Verkehr sinkt, gewinnen Städte und Gemeinden Platz, die Luftverschmutzung und die Lärmbelastung sinken und die Lebensqualität steigt. Worauf warten wir? ✘

## Autor:in

**Elke Häußler M. A.**

Akademische Mitarbeiterin am Institut für Verkehr und Infrastruktur (IVI) der HKA

## Prof. Dr.-Ing. Jan Riel

Professor für Verkehrsplanung und Verkehrstechnik an der Fakultät für Architektur und Bauwesen und Sprecher des Instituts für Verkehr und Infrastruktur (IVI) der HKA

## Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Jan Riel  
 Hochschule Karlsruhe  
 Fakultät für Architektur und Bauwesen  
 Moltkestraße 30  
 76133 Karlsruhe  
 E-Mail: jan.riel@h-ka.de



**„INNOVATIVE TECHNIK, GROSSE KRÄFTE,  
SCHWERE TEILE – DAS FASZINIERT MICH  
BIS HEUTE.“**

**Johannes Tröndle, Projektleiter Forschung und Entwicklung**

Der Hauptgrund für meine Bewerbung bei Herrenknecht war die Begeisterung für den Sondermaschinenbau. Unsere Aufgabe ist es innovativ zu sein, Produkte weiterzuentwickeln und kontinuierlich besser zu werden. In diesem Nischenmarkt ist kein Tag wie der andere.

Willst auch du die Welt des Tunnelbaus hautnah erleben?  
Dann bewirb dich!

[herrenknecht.com/karriere](https://herrenknecht.com/karriere)



# SCHLEITH BAUT ERFOLGSSTORYS ■

Als Familienunternehmen sind wir mit über 750 Mitarbeitern an sieben Standorten tätig. Unser umfangreiches Leistungsspektrum erstreckt sich vom Tief-, Erd- und Straßenbau über den Ingenieur- und Spezialtiefbau bis zum Hoch- und Schlüsselfertigbau.

**STARTE DEINE STORY BEI UNS ALS:**

- WERKSTUDENT (m/w/d)
- PRAKTIKANT (m/w/d)
- BACHELORAND (m/w/d)
- MASTERAND (m/w/d)

**ODER DIREKT NACH DEINEM STUDIUM ALS:**

- JUNIOR-BAULEITER (m/w/d)
- TRAINEE (m/w/d) KALKULATION

Alle weiteren Infos findest du unter: [schleith.de/karriere](https://schleith.de/karriere)



Wir freuen uns über deine  
Bewerbung@schleith.de!

# Die Treibhausgasbilanz von Fahrrad, Pedelec und Pkw im Vergleich

Martin Temmen, Willy Dirnsteiner, Benedikt Prinzing und Jochen Eckart

DE Alternative Antriebskonzepte werden als Beitrag des Verkehrssektors zum Klimaschutz diskutiert. Beim Automobil ist erst in den letzten Jahren eine Entwicklung vom fossilbetriebenen Otto-Motor hin zum Elektroantrieb zu beobachten. Im Fahrradbereich hingegen boomen bereits seit einigen Jahren Pedelecs, die ihre Nutzer:innen mithilfe eines Elektromotors unterstützen und so den Einsatzbereich des Fahrrads deutlich vergrößern. Studierende des Studiengangs Verkehrssystemmanagement sind im Sommersemester 2021 der Frage nachgegangen, wie klimafreundlich Pedelecs im Vergleich zu anderen Fahrzeugen sind.

EN Alternative drive concepts are being discussed as the transport sector's contribution to climate protection. In recent years, a shift from fossil-fueled petrol engines to electric drives could be observed among the automotive sector, whereas in the bicycle sector, pedelecs have been booming for several years. Pedelecs are bicycles supporting their users through an electric auxiliary motor and by that, widening the range of applications. During the summer term of 2021, students of the Transportation Management program made research on how climate-friendly pedelecs are compared to other vehicles.

Um die Klimafreundlichkeit von Pedelecs in Relation zu anderen Verkehrsmitteln setzen zu können, muss zunächst eine Vergleichbarkeit geschaffen werden. Hierzu werden Treibhausgasbilanzen (THG-Bilanzen) für Pedelecs, herkömmliche Fahrräder sowie Pkw mit Otto-Motor und Elektromotor erstellt und miteinander verglichen. Bei der Erstellung der THG-Bilanzen werden verschiedene Phasen des Lebenszyklus unterschieden:

1. Materialgewinnung (Emissionen bei Herstellung der Basismaterialien)
2. Bau des Verkehrsmittels (Emissionen und Energieverbrauch bei der Produktion)
3. Verpackungen (Emissionen bei der Herstellung von Verpackungsmaterial)
4. Transport (Emissionen aller Transportwege)
5. Betrieb (Emissionen im Betrieb: Laden des Akkus, Kraftstoffverbrauch)
6. Verschleiß (Emissionen durch Erneuerungsbedarf der Fahrzeugkomponenten) sowie
7. Recycling (Emissionsminderung durch Wiedernutzung von Rohstoffen).

Zur Erhebung der THG-Emissionen der einzelnen Phasen werden unterschiedliche Methoden genutzt. So werden die Emissionen, die während des Betriebs der Fahrzeuge entstehen (Phase 5), mithilfe einer empirischen Erhebung in Karlsruhe erfasst. Die restlichen sechs Phasen werden als „materielle Bereitstellung“ zusammengefasst und deren THG-Emissionen auf Basis von Recherchen zu Materialien und Fertigungsprozessen ermittelt. Im Folgenden werden zunächst die im Betrieb entstehenden THG-Emissionen erläutert. Im Anschluss werden die bei der materiellen Bereitstellung entstehenden Emissionen betrachtet. Im Fazit werden die THG-Emissionen von Fahrrad, Pedelec, Pkw mit Otto-Motor und Elektromotor verglichen.

## THG-Emissionen Betrieb der Fahrzeuge

Die THG-Emissionen des Betriebs wurden empirisch erhoben. Durch Fahrten mit dem – als SensorBike genutzten<sup>[9]</sup> – Pedelec der HKA und zwei Stadtautos (Kleinwagen), eines

[1] Agora Verkehrswende 2019. Klimabilanz von Elektroautos. Einflussfaktoren und Verbesserungspotenzial.  
 [2] DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2006. Umweltmanagement. Ökobilanz. Anforderungen und Anleitungen.

Deutsche und Englische Fassung. Beuth Verlag GmbH, Berlin, DIN EN ISO 14044:2006-10.  
 [3] Eckart, J. and Merk, J. 2020. Die Vermessung der Radfahrenden. Analyse des Radverkehrs mit einem SensorBike mit ubiquitären Sensoren. In Lecture Notes in Informatics, Bonn.

[4] Riese & Müller GmbH. 2020. Wir sind unterwegs. Verantwortungsbericht 01.  
 [5] Riese & Müller GmbH. 2021. Das Charger3 Mixte. Die Leichtigkeit des Fahrens. <https://www.r-m.de/de/bikes/charger3-mixte/>

[6] Sternberg, A., Hank, C., and Hebling, C. 2019. Treibhausgas-Emissionen für Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge mit Reichweiten über 300 km, Freiburg.  
 [7] Weimann, J. 2020. Elektroautos und das Klima: die große Verwirrung. Wirtschaftsdienst 100, 11, 890–895.

davon mit Otto-Motor und eines mit Elektroantrieb, wurde der Energiebedarf gemessen. An fünf Messtagen wurden typische Arbeitswege im Karlsruher Stadtverkehr mit einer Gesamtlänge von 984 km erfasst. Der Energieverbrauch von Pedelec und E-Auto wurde beim Ladevorgang ermittelt. Beim konventionellen Pkw wurde der Benzinverbrauch durch Auswertung der Angaben des Bordcomputers sowie den getankten Mengen ermittelt. Im Ergebnis wurde für die untersuchten Fahrzeuge der Energiebedarf pro Personenkilometer bestimmt (siehe Tabelle 1). Hierbei wurde eine durchschnittliche Besetzung mit 1,2 Personen für die Pkw und einer Person für die Fahrräder zugrunde gelegt.

Verkehrsmittel	Durchschnittlicher Energiebedarf
Fahrrad	0,0 MJ/Pkm
Pedelec	0,027 MJ/Pkm
Pkw Elektromotor	0,43 MJ/Pkm
Pkw Otto-Motor	1,36 MJ/Pkm

Tabelle 1: Energiebedarf Betrieb je Verkehrsmittel im Karlsruher Stadtverkehr pro Personenkilometer

Die THG-Emissionen für das Benzinfahrzeug lassen sich aus dem chemischen Verbrennungsprozess bestimmen und liegen bei 115,61 g CO<sub>2</sub>-Äq/Pkm. Zur Ermittlung der THG-Emissionen des Elektrofahrzeugs muss der Energiemix bei der Stromerzeugung berücksichtigt werden. Dabei wurden neben dem deutschlandweiten Durchschnitts-Strommix des Jahres 2018 abweichende Szenarien auf Grundlage der Angebote unterschiedlicher Stromanbieter berücksichtigt. Die durch die Stromgewinnung entstandenen THG-Emissionen eines Pedelecs liegen, abhängig vom Strommix, zwischen 0,02 und 3,38 g CO<sub>2</sub>-Äq/Pkm. Bei gleichem Strommix verursacht das Elektrofahrzeug die 16-fache Menge an THG-Emissionen (0,33 bis 53,86 g CO<sub>2</sub>-Äq/Pkm). Das Verhältnis zum Benzinfahrzeug variiert stark. So beträgt das Verhältnis der verursachten Emissionen zwischen Elektro- und Benzinfahrzeug zwischen 2 bei einem Strommix mit großen Kohleanteil

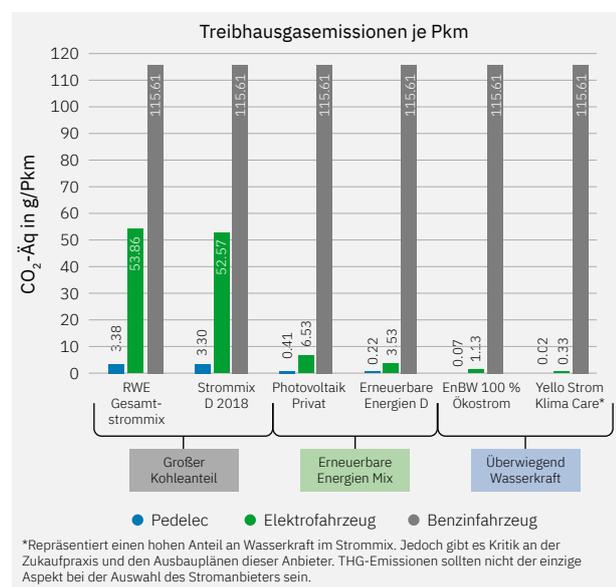


Abb. 1: THG-Emissionen Betrieb je Verkehrsmittel für verschiedene Strommix-Szenarien (Grafik: Benedikt Prinzing)

und 353 bei einem Strommix überwiegend aus Wasserkraft. Für das Verhältnis der THG-Emissionen zwischen Pedelec und Benzinfahrzeug ergeben sich entsprechend Faktoren zwischen 34 und 5823 (siehe Abbildung 1).

## THG-Emissionen materielle Bereitstellung Fahrzeuge

Die THG-Emissionen der materiellen Bereitstellung der Fahrzeuge umfasst alle Phasen des Lebenszyklus mit Ausnahme des Betriebs. Dabei werden ausschließlich THG-Emissionen berücksichtigt, die unmittelbar bei der Herstellung, Wartung und Entsorgung der Fahrzeuge entstehen. Mittelbare Folgen (Infrastruktur, Unfälle etc.) werden nicht berücksichtigt.

Für Pkw mit Otto-Motor und Elektromotor liegen bereits umfassende Zahlen vor [1, 6, 7]. Die Erhebung konzentriert sich daher auf die THG-Emissionen der materiellen Bereitstellung von Pedelecs. Als Rechengrundlage diente das „Riese & Müller Charger3 Mixte“. Dank der umfassenden

Herstellerangaben konnten die benötigten Informationen zu Materialien und Herstellung recherchiert werden [5]. Die Bilanzierung lehnt sich überwiegend an die Norm DIN EN ISO 14044 für Ökobilanzen [2] an. Die Daten zur materiellen Bereitstellung von konventionellen und elektrischen Pkw werden der Studie „Klimabilanz von Elektroautos“ [4] entnommen.

Die erforderlichen Daten zur THG-Bilanzierung des Pedelecs wurden Ökobilanz-Datenbanken, Fachliteratur, Kund:innenberichten, Herstellerangaben sowie Expert:innengesprächen entnommen. Für das zugrundegelegte Pedelec-Modell werden 196 kg CO<sub>2</sub>-Äq für die Bereitstellung des Pedelecs inkl. Ersatzteile und Recycling errechnet (siehe Tabelle 2). Das Ergebnis deckt sich – trotz im Detail unterschiedlicher Annahmen und Detaillierungsgraden – mit anderen Studien, die eine Spannweite von 134 bis 265 kg CO<sub>2</sub>-Äq für die Bereitstellung von Pedelecs angeben. Die einzige Ausnahme bildet hier eine Untersuchung der Firma Riese & Müller, die mit 899 kg CO<sub>2</sub>-Äq für die Bereitstellung eines Lastenrads mit E-Motor auf einen vielfach höheren Wert kommt. Allerdings ist die hier genutzte Methodik unklar [4]. Die größten Unsicherheiten bei der Bilanzierung bestehen bei der eigentlichen Herstellung der Pedelecs sowie der Verpackung.

	Pedelec	Fahrrad
Material	355	277
Bau	33	10
Verpackung	7	7
Transport	29	28
Recycling*	-229	-209
Summe	196	113

Tabelle 2: Bei der materiellen Bereitstellung von Pedelecs und herkömmlichen Fahrrädern verursachte THG-Emissionen in kg CO<sub>2</sub>-Äq (Willy Dirnsteiner)

\*Recycling des Materials; bei der Verpackung ist es inbegriffen

Um den Einfluss eines großen Spektrums unterschiedlicher Faktoren auf die im Laufe des Lebenszyklus eines Pedelecs entstehenden THG-Emissionen abzudecken, wurden unterschiedliche Szenarien betrachtet. Diese berücksichtigten unterschiedliche Produktionsländer und Transportwege sowie verschiedene Ausstattung (z. B. Rahmenmaterial, Komponenten) hinsichtlich Material und Lebensdauer. Die Ergebnisse der verschiedenen Varianten sind in Abbildung 2 dargestellt. Wesentliche Einflussfaktoren sind:

- + Das Recycling des Materials der Pedelecs am Lebensende, wie in der Basisvariante berücksichtigt, reduziert die THG-Emissionen um 38 %.
- + Die in der luxuriösen Ausstattung berücksichtigten aufwendigen Materialien für Rahmen und Bauteile, wie

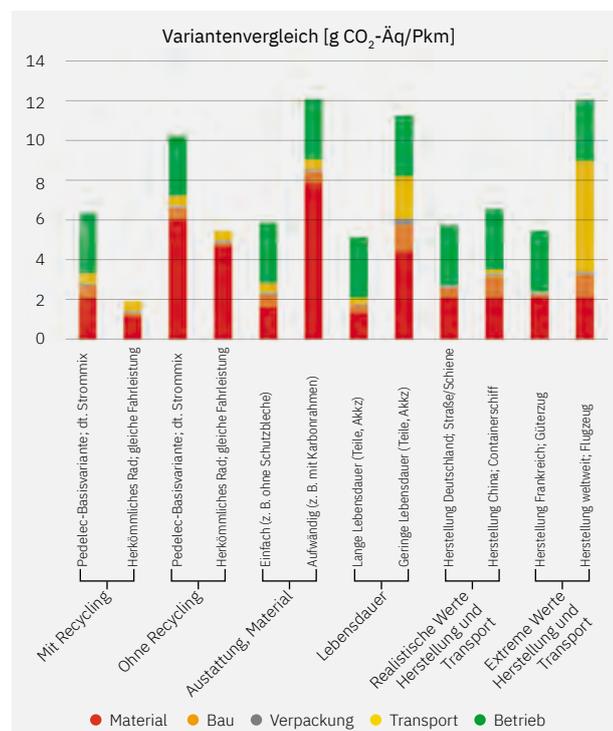


Abb. 2: THG-Emissionen für verschiedenen Varianten der Einflussfaktoren (Grafik: Willy Dirnsteiner)

# Das Pedelec ist im Vergleich zum Elektro- bzw. Otto- Pkw 13- bzw. 17-mal klimaschonender.

Karbon oder Magnesium, führen im Vergleich zur Basisvariante zu einer Verdoppelung der THG-Emissionen. Der Verzicht auf Alu-Rahmen, Schutzbleche sowie Verkehrstüchtigkeit in der spartanischen Ausstattung reduziert die THG-Emissionen jedoch nur geringfügig.

- + Besonders bei der Produktion des Akkus entstehen hohe THG-Emissionen. Eine geringe Akkukapazität reduziert damit die Bilanz. Akkus sollten in einem Land mit einem THG-armen Strommix hergestellt werden.
- + Lange Haltbarkeit der Verbrauchsteile halbiert die THG-Emissionen im Vergleich zu Pedelecs mit einer kurzen Haltbarkeit.
- + Besonders klimaschädlich sind weltweite Transportketten und der Transport von Bauteilen per Flugzeug.
- + Die Einsparmöglichkeiten der THG-Emissionen bei der Verpackung sind gering. Jedoch bestehen größere Unsicherheiten in der Datenbasis.

## Gesamtbetrachtung

Werden alle THG-Emissionen, die im Lebenszyklus der untersuchten Fahrzeuge entstehen, zusammengeführt, so ergeben sich für das Pedelec 196 kg CO<sub>2</sub>-Äq für die materielle Bereitstellung zuzüglich 3 g CO<sub>2</sub>-Äq je gefahrenem Kilometer

Fahrzeug	Emissionen je Pkm (exkl. Recycling) [g CO <sub>2</sub> -Äq/Pkm]	Emissionen je Pkm (einschl. Recycling) [g CO <sub>2</sub> -Äq/Pkm]
Pedelec	10,3	6,4
herkömmliches Fahrrad	5,4	1,9
Stadt-E-Pkw	130	*
Stadt-Otto-Pkw	173	*

Tabelle 3: Emissionen der untersuchten Fahrzeuge je Personenkilometer, bezogen auf den gesamten Lebenszyklus.

\*Zuverlässige Werte für das Recycling von Pkw lagen nicht vor bzw. konnten nicht ermittelt werden.

(deutscher Durchschnitts-Strommix). Für die Gesamtemissionen wird eine Distanz von 60.000 km für Zweiräder und 100.000 km für Pkw zugrunde gelegt, die mit den Fahrzeugen im Laufe ihres Lebens im Durchschnitt zurückgelegt werden.

Der Abstand zwischen Pedelec und Pkw ist – unabhängig von dessen Antrieb – sehr groß. Lässt man das Einsparungspotenzial durch Recycling außen vor, werden durch den mit Elektromotor betriebenen Pkw im Laufe seines Lebenszyklus je Personenkilometer rund 13-mal so viele THG-Emissionen verursacht als durch das Pedelec. Beim Antrieb durch den Otto-Motor steigt dieser Faktor auf 17. Beim Pedelec ist die materielle Bereitstellung der wesentliche Faktor der THG-Emissionen. Selbst nach 60.000 km macht der Betrieb nur 42 % der Gesamtemissionen aus. Beim Pkw mit Otto-Motor macht der Betrieb hingegen einen Anteil von 64 % aus. Nahezu unschlagbar sparsam ist das herkömmliche Fahrrad. Dieses verursacht rund die Hälfte der THG-Emissionen des Pedelecs und nur 3 % der THG-Emissionen eines Pkw mit Otto-Motor. ✘

### Autoren

**Dr. phil. Martin Temmen**  
Akademischer Mitarbeiter an der BMDV-Stiftungsprofessur Radverkehr der HKA

**Willy Dirnstener B.Sc.**  
**Benedikt Prinzing B.Sc.**  
Studierende im Masterstudiengang Verkehrssystemmanagement der HKA

**Prof. Dr. Jochen Eckart**  
Professor für Verkehrsökologie an der Fakultät für Informationsmanagement und Medien der HKA

### Kontakt

Prof. Dr. Jochen Eckart  
Hochschule Karlsruhe  
Fakultät für Informationsmanagement und Medien  
Moltkestraße 30  
76133 Karlsruhe  
E-Mail: jochen.eckart@h-ka.de

# BlueGreenStreets – klimaangepasste Straßenräume gestalten

Jonas Fesser, Philip Zwernemann, Jochen Eckart und Markus Stöckner

**DE** Im Rahmen des Projekts BlueGreenStreets wurden Strategien und Planungsinstrumente zur Gestaltung ‚blaugrüner‘ Straßen untersucht, evaluiert und weiterentwickelt. Die Erkenntnisse aus den einzelnen Fachmodulen werden in einer Toolbox zusammengeführt, die als praxisorientierter Leitfaden für Kommunen konzipiert ist. Im Sinne einer anwendungsbezogenen Forschung soll somit die Transformation hin zu ‚blaugrünen‘ Straßen gefördert werden.

**EN** As part of the BlueGreenStreets project, strategies and planning instruments for the design of blue-green streets were examined, evaluated and further developed. The findings from the individual specialist modules are compiled in a toolbox that is designed as a practice-oriented guide for municipalities. In terms of application-related research, the transformation towards blue-green roads should be promoted.

Städte leiden zunehmend unter den Folgen des Klimawandels. Im Forschungsprojekt BlueGreenStreets werden Anpassungskonzepte entwickelt, wie durch die Anpassung von Straßenräumen die Resilienz der Städte erhöht und die Belastungen für deren Bewohner:innen reduziert werden können. Dafür wird die Wirksamkeit von Planungsinstrumenten und Regelwerken für grüne städtische Infrastrukturen, urbaner Wasserwirtschaft, dem Sanierungsmanagement von Straßen und Kanälen sowie der Verkehrs- und Freiraumplanung untersucht, weiterentwickelt und anhand von Pilotprojekten erprobt. Der Beitrag der Hochschule Karlsruhe umfasst zwei Themenfelder: Zum einem wird die Nutzung des Straßenraums für die temporäre Rückhaltung und Notableitung von Starkniederschlägen erforscht. Ziel ist es, unter Berücksichtigung der Anforderungen an die Verkehrssicherheit, die Kanalisation im Starkregenfall zu entlasten und Schäden an Gebäuden zu verhindern. Zum anderen wurde ein GIS-Tool zur transdisziplinären Standortfindung für Erhaltungsmaßnahmen entwickelt, das Anforderungen der Verkehrsinfrastruktur sowie der Entwässerungsinfrastruktur integriert betrachtet und Potenziale für die Schaffung blaugrüner Straßen aufzeigt.

## Temporärere Rückhaltung und Notableitung von Starknieder- schlägen im Straßenraum

Als Folge des Klimawandels wird künftig der Bemessungsfall der Entwässerungssysteme durch Starkregenereignisse vermehrt überschritten. Das Niederschlagswasser fließt dann der Topografie folgend auf der Oberfläche ab und kann dabei Schäden an schutzwürdigen Nutzungen verursachen. Eine Strategie, um Überflutungsschäden in städtischen Gebieten mit hohen baulichen Dichten zu reduzieren, sind Notwasserwege, die eine geplante Mitbenutzung von Verkehrsflächen für eine kontrollierte temporäre Notableitung und Rückhaltung von Starkniederschlägen ermöglichen.

Bei der temporären Rückhaltung und Notableitung von Starkniederschlägen auf Straßen ist die Verkehrssicherungspflicht zu beachten <sup>[1]</sup>. Zudem sollten die Kosten durch

[1] Benden, J. (2014) Möglichkeiten und Grenzen einer Mitbenutzung von Verkehrsflächen zum Überflutungsschutz bei Starkregenereignissen, Bericht 57, Bericht des Instituts für Stadtbauwesen und Stadtverkehr der RWTH Aachen.

[2] Kramer, M., Terheiden, K., Wieprecht, S. (2015), Safety criteria for the traffic ability of inundated roads in urban floodings, International Journal of Disaster Risk Reduction.  
 [3] Kyte, M., Khatib, Z., Shannon, P., & Kitchener, F. (2000). Effect of environmental factors on free-flow speed, In Fourth International Symposium on Highway Capacity, pp. 108–119.

[4] Meerwarth, W. (1994), Koordinierte Planung der Erneuerung städtischer Infrastrukturnetze, Schriftenreihe des Instituts für Städtebau und Landesplanung, Universität Fridericiana zu Karlsruhe, Heft 26, Institut für Städtebau und Landesplanung, Karlsruhe.

[5] Reed, J. R., Kibler, D. F., Huebner, R. S. & Marks, G. W. (1984), Hydrop user's manual: program for predicting hydroplaning potential on road surfaces due to rainfall runoff depths.

eventuelle Umwege oder Unfälle geringer sein als der Nutzen in Form von vermiedenen Schadenskosten von Überflutungen. Durch eine Analyse von Unfällen bei Starkregenereignissen in den Städten Bretten, Karlsruhe, Solingen und Hamburg sowie videobasierte Verkehrskonfliktanalysen wurden im Forschungsvorhaben BlueGreenStreets die Rahmenbedingungen für die sichere Gestaltung von Notwasserwegen erforscht.

- + Wenn die Wassertiefe eines Pkw von im Regelfall 30 cm <sup>[2]</sup> überschritten wird, werden die Pkw durch das Eindringen von Wasser in den Motor fahruntüchtig. Die videobasierte Verkehrskonfliktanalyse überschwemmter Fahrbahnen zeigt, dass es ab Wassertiefen von über 20 cm (zuzüglich des Wellenschlags der Fahrzeuge) zu einem deutlichen Anstieg solcher Alleinunfälle kommt. Ein sicheres Befahren überfluteter Fahrbahnen ist daher nur bei Wasserständen von 15 bis 20 cm möglich. Bei darüberhinausgehenden Wasserständen sind die Fahrbahnen zu sperren.
- + Abhängig vom Wasserstand und Reifenprofil kann es ab einer Fahrgeschwindigkeit von über 60 km/h zu Aquaplaning <sup>[5]</sup> kommen. Um diese Gefahren auszuschließen, ist von der temporären Rückhaltung und Notableitung von Niederschlägen in Straßen mit einer zulässigen Höchstgeschwindigkeit von über 50 km/h abzusehen. Die Analyse der gefahrenen Geschwindigkeit auf überfluteten Straßenabschnitten zeigt zudem, dass die meisten Verkehrsteilnehmer ihre Geschwindigkeit auf maximal 30 km/h reduzieren. Sie kompensieren damit die widrigen Fahrbahnbedingungen durch eine für die Situation angemessene Senkung der Geschwindigkeit <sup>[3]</sup>.
- + Damit die Fahrzeugführenden auf die überflutete Fahrbahn reagieren können, ist ausreichend Sicht zum Halten und Platz für eventuelle Rangiermanöver erforderlich. Der Straßenabschnitt sollte zudem keine Hindernisse aufweisen, die bei einem Einstau von Wasser auf der Fahrbahn überdeckt werden und für die Verkehrsteilnehmer nicht sichtbar sind.

Unter Berücksichtigung dieser Hinweise zur Verkehrssicherheit können Konzepte zur Gestaltung von Notwasserwegen entwickelt werden (siehe Abbildung 1). Dafür reichen meist einfache bautechnische Anpassungen des Straßenprofils

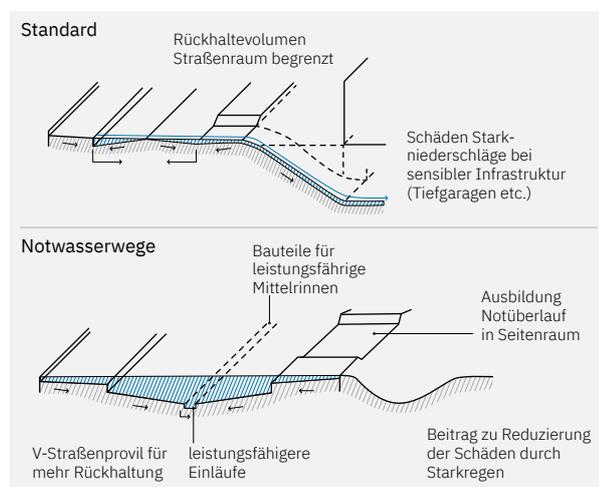


Abb. 1: Prinzipskizze Gestaltungselement von Notwasserwegen (Grafik: Jochen Eckart)

aus. Hochborde, großzügig dimensionierte Rinnensysteme oder Schwellen eignen sich, um das oberflächige Niederschlagswasser zu lenken und von schutzwürdigen Nutzungen fernzuhalten. Der Fließquerschnitt und das Rückhaltevolumen eines Notwasserwegs wird durch die Höhe der niedrigsten Gehweghinterkante definiert. Das Rückhaltevolumen des Straßenraums kann durch den Einsatz von Mittelrinnen (V-Profil der Fahrbahn) und die Erhöhung der Querneigung vergrößert werden. Zudem ist ein Notüberlauf auf Flächen vorzusehen, wo das Niederschlagswasser keine Schäden verursacht.

Im Vorhaben BlueGreenStreets wurde die Möglichkeit von Notwasserwegen im Rahmen eines Pilotvorhabens in Solingen untersucht (siehe Abbildung 2). Die Reduktion der zulässigen Höchstgeschwindigkeit von 50 km/h auf 30 km/h ermöglichte am Pilotstandort eine Verringerung der Fahrbahnbreite, und die großen Radien in den Knotenpunktbereichen können zurückgebaut werden. Zusammen mit einer Neuorganisation des ruhenden Verkehrs kann so Platz für die Anlage eines bewachsenen Mulden-Rigolen-Systems geschaffen werden. Zusätzlich wird das Profil der Fahrbahn so gestaltet, dass auf dieser bei Starkniederschlägen Wasser

zurückgehalten werden kann. Im Ergebnis kann die Überflutungsgefahr für die benachbarten Gebäude bei Starkregenereignissen deutlich reduziert werden.

## Interdisziplinäres Sanierungsmanagement zur Transformation hin zu BlueGreenStreets

In Städten ist der Straßenraum, der in innerstädtischen Quartieren ca. 25 % der Fläche ausmacht, eine bedeutende Flächenreserve für die Qualifizierung der Lebensqualität der Bewohner:innen. Das Vorhaben BlueGreenStreets konzentriert sich daher auf die Umgestaltung von städtischen Bestandsstraßen. Um die Potenziale bestehender Straßen für die Schaffung blaugrüner Infrastruktur flächendeckend identifizieren zu können, werden Instrumente für ein integriertes Sanierungsmanagement entwickelt. Durch das integrierte Sanierungsmanagement für die Straße und das Entwässerungssystem können Bauabschnitte identifiziert werden, die sich für die Umsetzung von Maßnahmen blau-

grüner Straßenraumgestaltung eignen. Die Transformation hin zu BlueGreenStreets wird durch das Sanierungsmanagement koordiniert und die Kosten werden reduziert.

Bei der Erhaltung von Verkehrsflächen wie auch bei der Erhaltung des Entwässerungssystems wird die Dringlichkeit der Erhaltung einzelner Abschnitte mit Zustandsklassen bewertet. Auf diese Weise kann eine gemeinsame Matrix zur Priorisierung von Sanierungsmaßnahmen aufgestellt werden. Anhand der Matrix lässt sich entscheiden, welche Abschnitte innerhalb eines Bauvorhabens saniert werden sollten. Im Projekt BlueGreenStreets wird ein GIS-Tool zur interdisziplinären Standortfindung für Sanierungsmaßnahmen entwickelt. Die methodische Grundlage für das integrierte Sanierungsmanagement bildet eine Nutzwertanalyse. Hierzu werden sämtliche Parameter als räumliche Geodaten im Sinne des integrierten Sanierungsmanagements bewertet, also neben dem Zustand der Straße sowie des Kanals als Grundlage werden weitere Parameter wie Niederschlagsmanagement, Schadstoffgehalt, Versiegelungen, Verkehr, Grünflächen und Verdunstungsflächen herangezogen. Durch die

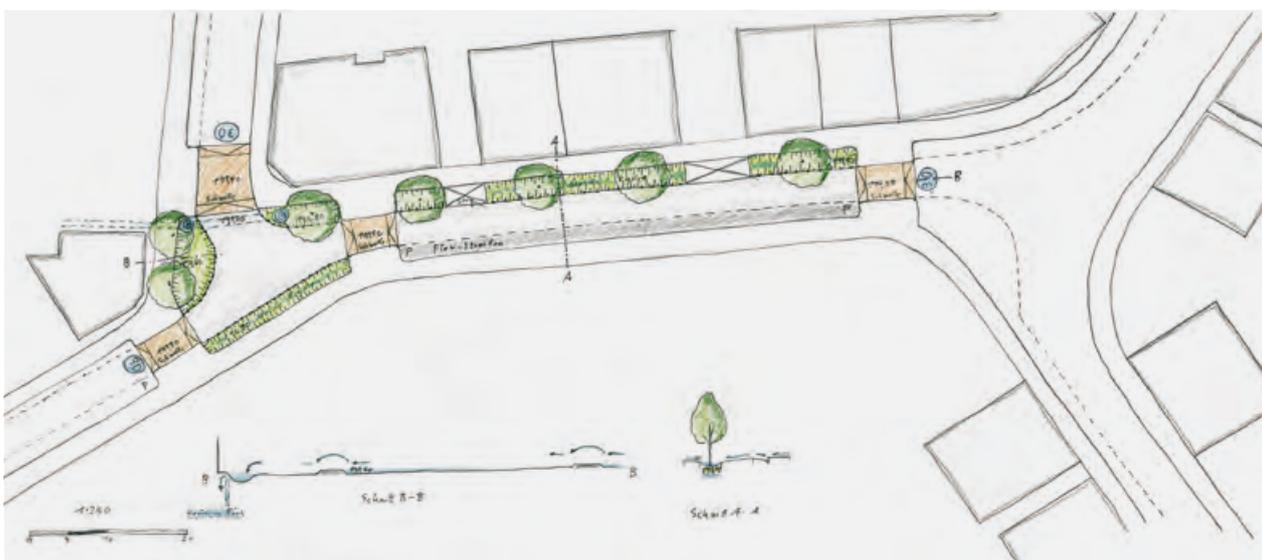


Abb. 2: Konzept Notwasserwege für Pilotstandort in Solingen (Zeichnung: Jochen Eckart)

# Konzepte entwickeln, wie durch blau-grüne Infrastruktur in Straßen die Resilienz von Städten erhöht werden kann.

räumliche Überlagerung der verschiedenen Parameter kann ein Gesamtnutzwert bestimmt und Empfehlungen können ausgesprochen werden, welche Straßenabschnitte in der Erhaltungsplanung für die Umgestaltung zu priorisieren sind, um die blaugrüne Straßenraumgestaltung zu fördern.

Durch die koordinierte Erhaltungsplanung von Straßen und Entwässerungssystem werden sowohl Kosten als auch nicht monetäre Aufwendungen eingespart. Der finanzielle Hauptfaktor im Kanalbau sind die Kosten der Grabung und die Wiederherstellung der Verkehrsflächen. Diese Arbeitsschritte können genutzt werden, um die Verkehrsflächen zu erhalten <sup>[4]</sup>. Durch die Bündelung der beiden Sanierungsmaßnahmen können die Gesamtkosten deutlich verringert werden. Zudem werden so die Belastungen für Anwohner:innen und Nutzer:innen der Straßen minimiert, da nur einmal ein Baufeld auf der betroffenen Fläche eingerichtet wird. Damit ist zum einen eine gezielte Potenzialabschätzung für die Schaffung blaugrüner Straßen sowie zum anderen eine wirtschaftlich sinnvolle Reihung dieser Maßnahmen möglich. Im Zuge der kosteneffizienten Erhaltung können so mehrere Probleme im Straßenraum gleichzeitig gelöst werden.

Um als Kommune das integrierte Sanierungsmanagement effektiv anwenden zu können, müssen verschiedene Voraussetzungen erfüllt sein. Zum einen sollte die Kommune über eine gute Datengrundlage verfügen, die eine netzweite Betrachtung der gewünschten Parameter ermöglicht. Zum anderen ist ein hohes Maß an Zusammenarbeit und Kommunikation erforderlich. In den verschiedenen Zuständigkeiten sollten vor dem Aufbau eines integrierten Sanierungsmanagements alle Ebenen für die gemeinsame Betrachtung von Straße, Kanal und den oben beschriebenen weiteren Parametern sensibilisiert werden. Insbesondere der Mehrwert dieses Verfahrens muss für alle Beteiligten erkennbar sein. Im Projekt BlueGreenStreets wurde dazu ein Prozessmodell entwickelt, durch welches die Datenverarbeitung und -auswertung zur Sanierungspriorisierung beschrieben wird. Die Vorgehensweise für ein integriertes Sanierungsmanagement wurde in einem Pilotprojekt zusammen mit Hamburg getestet.

Die Forschung im Verbundvorhaben BlueGreenStreets mit den Partnern HafenCity Universität Hamburg, Universität Hamburg, Institut für Bodenkunde, bgmr Landschaftsarchitekten GmbH, Ingenieurgesellschaft Prof. Dr. Sieker, Institut für Verkehr und Infrastruktur der Hochschule Karlsruhe, IÖW – Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung, GEO-NET Umweltconsulting GmbH und Technische Universität Berlin, ARGE Ökohydrologie und Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft wurde gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Fördermaßnahme „RES:Z – Ressourceneffiziente Stadtquartiere für die Zukunft“. ✕

## Autoren

### Jonas Fesser

Akademischer Mitarbeiter am Institut für Verkehr und Infrastruktur (IVI) der HKA

### Philip Zwernemann

Akademischer Mitarbeiter am Institut für Verkehr und Infrastruktur (IVI) der HKA

### Prof. Dr. Jochen Eckart

Professor für Verkehrsökologie an der Fakultät für Informationsmanagement und Medien der HKA

### Prof. Dr.-Ing. Markus Stöckner

Professor für Verkehrsanlagen und Logistik an der Fakultät für Architektur und Bauwesen der HKA  
Institut für Verkehr und Infrastruktur (IVI) der HKA  
Stellv. Sprecher des BW Instituts für Nachhaltige Mobilität

## Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Markus Stöckner  
Hochschule Karlsruhe  
Fakultät für Architektur und Bauwesen  
Moltkestraße 30  
76133 Karlsruhe  
E-Mail: markus.stoekner@h-ka.de



# Intelligente Systeme

# KI5GRob – Cloud-Computing und 5G als Befähiger für KI-Verfahren in der Robotik

Gergely Sóti, Yongzhou Zhang, Christian Wurll und Björn Hein

DE KI5GRob adressiert die Entwicklung, die Inbetriebnahme, den Betrieb und die Wartung von Roboterapplikationen in einer neuen Art und Weise durch die Verknüpfung von Cloud-Technologien und maschinellen Lernverfahren mit der Robotik der Produktions- und Logistikwelt. Mittels geeigneter Soft- und Hardwarearchitektur bzw. Kommunikationsinfrastruktur in Verbindung mit der 5G Technologie können Cloud und vor Ort agierende Robotersysteme engmaschig und in Echtzeit verzahnt werden. Dies ermöglicht das echtzeitfähige Bereitstellen und Einsetzen von rechenintensiven Plan- und KI-Verfahren. Als Demonstrator werden KI-Verfahren entwickelt und in der Cloud bereitgestellt, welche roboterbasierte Handhabungsaufgaben robust lösen können.

EN KI5GRob addresses the development, commissioning, operation and maintenance of robotic applications in a new way by linking cloud technologies and machine learning methods with robotics from the production and logistics world. Through appropriate software and hardware architecture or communication infrastructure combined with 5G technology, cloud and on-site robotic systems can be tightly coupled in real time. This enables real-time availability and deployment of computationally intensive planning and AI methods. As a demonstrator, AI methods are developed and deployed in the cloud to solve robust robot-based object handling tasks.

Für die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft werden intelligente und autonome roboter-basierte Produktions- und Logistiksysteme eine zentrale Rolle spielen. Einmal programmierte und sich stetig wiederholende Ablaufprogramme für Roboter werden künftigen Anforderungen nicht mehr genügen. Es müssen Konzepte und Verfahren zur Lösung komplexer Aufgabenstellungen in zunehmend unstrukturierten und dynamischen Umgebungen gefunden werden <sup>[1]</sup>. Die Fusion von Cloudtechnologien und KI mit der Robotik der Produktions- und Logistikwelt gilt als eines der Schlüsselkonzepte für die Umsetzung solcher autonomer Systeme. Die Kombination aus Cloud, 5G und vor Ort agierender Robotersysteme verspricht eine hohe Anpassungsfähigkeit an sich ändernde Produktionsanforderungen und ebnet den Weg für eine flexible Produktion variantenreicher, kundenspezifischer Produkte.

Im Bereich der maschinellen Lernverfahren gab es in den letzten Jahren einige wesentliche Durchbrüche, die sich im erheblichen Maße auch auf die Robotik ausgewirkt haben. Gerade die schwierige und komplexe Fragestellung der autonomen roboter-basierten Objektmanipulation <sup>[2]</sup> hat hiervon stark profitiert. Mit dem Einsatz von KI-Methoden erhöhen sich auch die Anforderungen an die Ressourcen, insbesondere die Rechenleistung. Mit zunehmender Skalierung der Systeme und steigender Komplexität der Aufgaben führt der Einsatz von maschinellen Lernverfahren in roboter-basierten Produktionsanlagen zu besonderen Herausforderungen in Bezug auf Skalierbarkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit. In KI5GRob wird daher ein durchgängiger Ansatz zur Entwicklung und zum Betrieb von Roboteranwendungen vorgeschlagen, der Cloud Computing und KI kombiniert.

Als Beispielanwendung für den vorgeschlagenen Cloud-Ansatz erforscht KI5GRob Methoden des maschinellen Lernens für multimodale Sensordatenverarbeitung und Transferlernen bei der Objektmanipulation mit Industrierobotern. Dabei wird ein besonderer Fokus auf das präzise Ablegen von Objekten gelegt. Ein Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer auf Microservices basierenden Software-Architektur, die den bedarfsgerechten Einsatz solcher lernbasierten Methoden sowie eine Cloud-basierte Bewegungsplanung und Robotersteuerung ermöglicht.



Abb. 1: Cloud-Robotik-Konzept (Grafik: Simon Kuntze, Yongzhou Zhang)

anwendungen je nach Anforderungen schnell und zuverlässig zusammengestellt werden.

## Flexible und skalierbare Hardwaresysteme

In einer klassischen industriellen Roboteranwendung werden der Roboter und das Zubehör wie Greifer, Kamera oder Sicherheitssysteme entweder von der Robotersteuerung oder, falls mehr Rechenleistung für die Aufgabenstellung notwendig sein sollte, von einem separaten Rechner gesteuert. Nach Inbetriebnahme ist eine Erweiterung oder eine Anpassung an andere Anwendungen technisch schwierig und teuer. Eine Art Plug-and-Work auf Soft- und Hardwareebene wäre hier wünschenswert.

In KI5GRob wird versucht, die Soft- und Hardwarearchitektur neu zu denken und dabei zu berücksichtigen, wie diese für die nächste Generation von Robotersystemen aussehen könnte. Ziel ist es, insbesondere die Entwicklung und die Inbetriebnahme sowie die Erweiterung von bestehenden Applikationen deutlich zu vereinfachen. In einer ersten Konzeption wird das Konzept „Entkopplung der Hardware“ verfolgt, wie in Abb. 1 dargestellt. Beispielsweise werden der Greifer, die Schwenk-Neige-Einheit und die Kamera nicht wie üblich an der Robotersteuerung angeschlossen, sondern als eigenständige Komponenten über Netzwerk bekannt gegeben. Jede Komponente ist somit einzeln steuerbar und frei konfigurierbar. Die Kommunikation zwischen Komponenten findet entweder über kabelgebundene oder drahtlose Netzwerke (wie z. B. WiFi-6, 5G) statt. Mit diesem Konzept wird das klassische monolithische Soft- und Hardwaresystem in leichtgewichtige, funktionsorientierte, eigenständige Subsysteme zerlegt, die individuell entwickelt und gewartet werden können. Somit kann die Hardware für neue Roboter-

## Microservice-orientierte Softwarearchitektur

Um die Vorteile des vorgeschlagenen entkoppelten Soft- und Hardwaresystems effektiv nutzen zu können, muss auch eine in der Robotik neuartige Softwarearchitektur definiert werden. Typischerweise wird die Software für industrielle Roboterapplikationen nach dem Konzept „Top-down-Design mit schrittweiser Verfeinerung“ entwickelt und entsprechend als ein monolithisches System eingesetzt. Allein die Verwendung von ROS (Robot Operation System) und die Modularisierung der Softwarepakete verbessert die Wiederverwendbarkeit und Zuverlässigkeit wesentlich. Mit steigender Komplexität der Aufgaben und der zunehmenden Verwendung von KI-basierten Algorithmen müssen allerdings bei der Entwicklung von Software für Roboterapplikationen auch Aspekte wie Bereitstellung und Verwaltbarkeit bzw. Handhabbarkeit mitberücksichtigt werden.

In KI5GRob werden die Softwaremodule in einem Microservice-orientierten Entwurfsmuster erstellt, um die Skalierbarkeit von Roboter-Applikation leicht gewährleisten zu können. Die Softwaremodule können in einer modernen hybriden Computing-Infrastruktur, die aus Onboard-Geräten, Edge und Cloud besteht, flexibel eingesetzt werden. In diesem Konzept wird die gesamte Software in kleine Komponenten, sogenannte Services, aufgeteilt, die individuell entwickelt und in einer isolierten Umgebung bereitgestellt werden können. Die neue Architektur zeigt umfangreiche Vorteile hinsichtlich der Produktivität, Flexibilität und Erweiterbarkeit, insbesondere können auch neue Applikationen schnell und zuverlässig umgesetzt werden.

## KI für Handhabungsaufgaben in der Robotik

Selbst für einen Menschen leichte Handhabungsaufgaben wie der Aufbau von Bausätzen oder das Einräumen von Objekten in einen Karton sind in der Robotik hoch anspruchsvolle, noch ungelöste Aufgabenstellungen. Menschen können mit greiferähnlichen Werkzeugen, wie z. B. Zangen, präzise und gewandt umgehen und oftmals Aufgaben, die mit einem autonom agierenden Roboter nicht machbar erscheinen, durch Teleoperation desselben Roboters leicht lösen [3]. Wo kommt diese Überlegenheit des Menschen her? Betrachtet man, wie Menschen Objekten handhaben, ist das Sehvermögen sicher eine sehr wichtige Informationsquelle. Doch während der Manipulation sind Kräfte und Haptik mindestens ebenso wichtig [4]. Prinzipiell können die-

se Sensorinformationen auch Robotern verfügbar gemacht werden. Sicherlich unterscheiden sich die Beschaffenheit und Messprinzipien technischer Sensoren etwas von denen in einem biologischen Körper. Aus Sicht der Auswertung sollten dem Roboter jedoch sehr ähnliche Informationen, wenn nicht sogar mehr bzw. präzisere Informationen, zur Verfügung stehen. Diese deuten darauf hin, dass die Lösung von Manipulationsaufgaben in der Robotik hauptsächlich von der geeigneten Interpretation der Sensorsignale und ihrer Kopplung mit der Robotersteuerung abhängt und hier noch viel Potenzial für Verbesserung liegt.

Deep-Learning-Techniken haben die Wahrnehmung von Robotern wie Lokalisierung und allgemeine Objekterkennung erheblich verbessert. Zudem verbessern datengetriebene Greifmethoden die Fähigkeit von Robotern, mit unbekannten oder verformbaren Objekten umzugehen, selbst

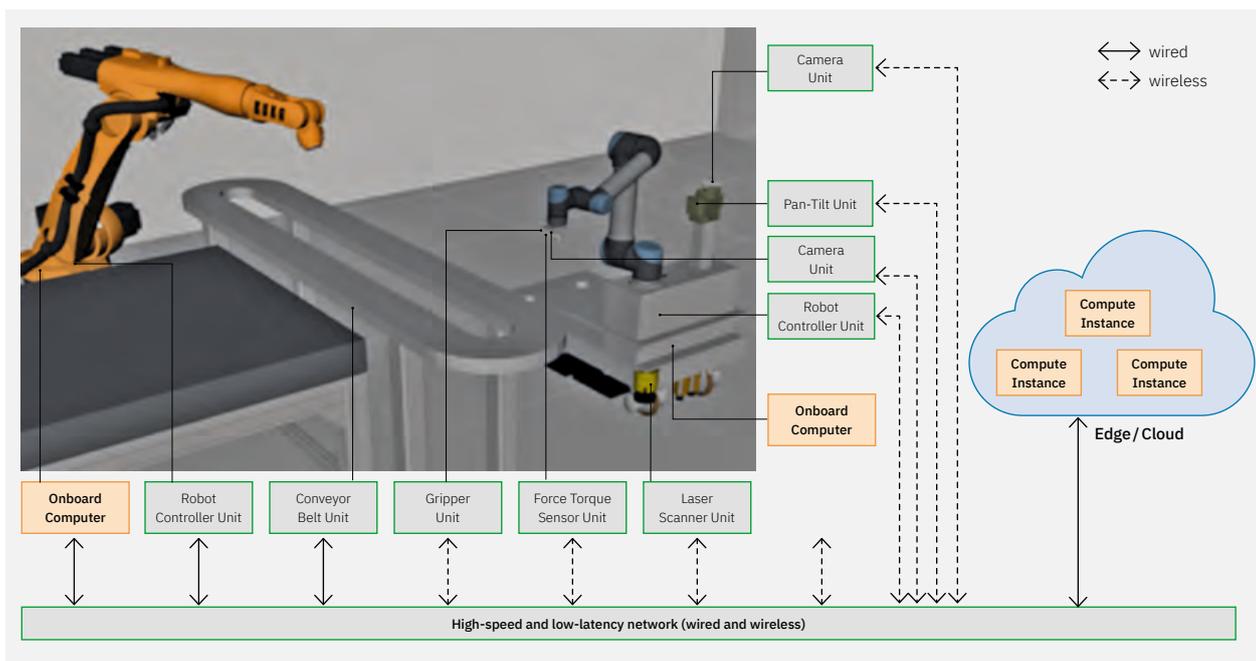


Abb. 2: Entkopplung des Hardwaresystems: Jede Komponente kann eigenständig mit dem Netzwerk verbunden und gesteuert werden (Grafik: Yongzhou Zhang)

# „I think one of the most interesting things about automation is [...] creating magic and wonder and moments of splendor.“

Genevieve Bell

wenn diese verdeckt sind <sup>[5]</sup>. Allerdings gibt es bei der roboterbasierten Handhabung noch viele offene Fragen und Herausforderungen. Aufgrund der Komplexität stellen das Greifen und insbesondere das gezielte Ablegen von stark variierenden und unbekanntem Objekten immer noch ein ungelöstes Problem dar.

Die in KI5GRob verwendeten Methoden zur Planung von Greif- und Ablegeposen können in zwei Kategorien eingeteilt werden: objektzentriert und aufgabenzentriert. Die erste Kategorie umfasst klassische und auf maschinellen Lernverfahren basierende Ansätze, setzt aber voraus, dass die Objekte bekannt sind. Sie betrachtet insbesondere Objekterkennung und Posenschätzung, die dann zur Bestimmung der Greifpose weiterverarbeitet werden. Methoden der zweiten Kategorie sind überwiegend datengetrieben, da sie wahrgenommene Sensordaten auf aufgabenspezifische Greiferposen abbilden. Diese können auch auf unbekannte Objekte verallgemeinert werden. Bei beiden Kategorien wird die Greifpose bei der Bestimmung der Ablegepose berücksichtigt.

Deep-Learning-Verfahren benötigen typischerweise sehr viele Trainingsdaten. Um die Menge an benötigten annotierten Trainingsdaten zu minimieren und Wissenstransfer aus simulierten Umgebungen bzw. von schon trainierten Modellen zu ermöglichen, werden Ansätze des Transferlernens angewendet. Deep-Learning-Modelle und realistische Simulationen erfordern große Mengen an Rechen- und Speicherressourcen. Aus diesem Grund profitieren diese Ansätze stark von Cloud Computing. Ein zusätzlicher Vorteil ist, dass Cloud-Technologien die gemeinsame Nutzung und das Sammeln von Erfahrungen durch verschiedene Roboterzellen (sogar an unterschiedlichen Standorten) für roboterbasierte Objektmanipulationsaufgaben ermöglichen. Die Verbindung von Cloud und KI für Robotik, wie in KI5GRob verfolgt, scheint daher ein sehr sinnvoller Ansatz zu sein. Eine große Herausforderung besteht jedoch darin, wie die Auswertung der Sensorinformationen geeignet und in Echtzeit in die Regelung während der Manipulation eingebunden werden können.

Anwendungsschwerpunkt in KI5GRob liegt in der flexiblen Handhabung von Objekten und hier insbesondere im Greifen und Ablegen von Objekten. Dabei soll bereits beim

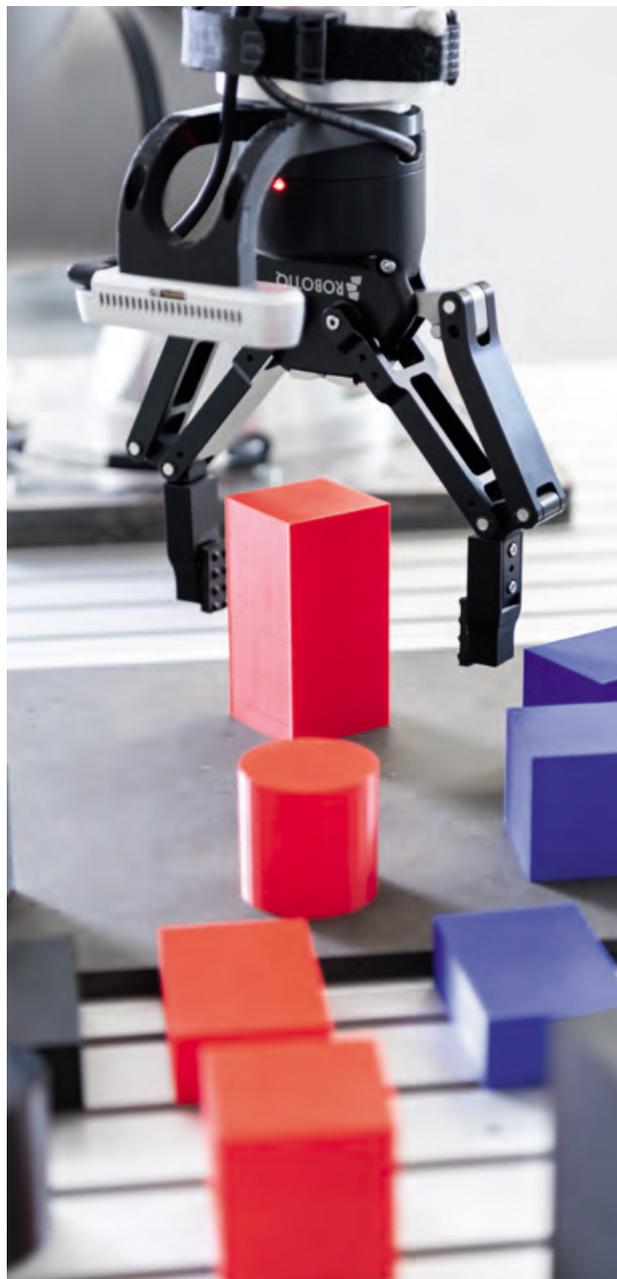


Abb. 3: Pick-and-Place-Beispielanwendung (Foto: Tobias Schwerdt)

[1] Christensen, H., Amato, N., Yanco, H., Mataric, M., Choset, H., Drobnis, A., ... & Sukhatme, G. (2021). A roadmap for us robotics—from internet to robotics 2020 edition. *Foundations and Trends® in Robotics*, 8(4), 307-424.

[2] Andrychowicz, O. M., Baker, B., Chociej, M., Jozefowicz, R., McGrew, B., Pachocki, J., ... & Zaremba, W. (2020). Learning dexterous in-hand

manipulation. *The International Journal of Robotics Research*, 39(1), 3-20.

[3] Wyrobek, K. A., Berger, E. H., Van der Loos, H. M., & Salisbury, J. K. (2008, May). Towards a personal robotics development platform: Rationale and design of an intrinsically safe personal robot. In 2008 IEEE International

Conference on Robotics and Automation (pp. 2165-2170). IEEE.

[4] Postma, A., Zuidhoek, S., Noordzij, M. L., & Kappers, A. M. (2007). Differences between early-blind, late-blind, and blindfolded-sighted people in haptic spatial-configuration learning and resulting memory traces. *Perception*, 36(8), 1253-1265.

[5] Levine, S., Pastor, P., Krizhevsky, A., Ibarz, J., & Quillen, D. (2018). Learning hand-eye coordination for robotic grasping with deep learning and large-scale data collection. *The International journal of robotics research*, 37(4-5), 421-436.

Greifen darauf geachtet werden, wie Objekte im nachfolgenden Schritt geeignet abgelegt werden können. Hauptaugenmerk liegt auf der multimodalen Sensordatenverarbeitung in Kombination mit Transferlernen sowohl auf Aufgabenebene als auch beim Lernen in Simulation und der Übertragung auf die Realität. Hieraus ergibt sich als weitere Fragestellung in diesem Projekt die Evaluierung klassischer und lernbasierter Ansätze im Hinblick auf ihre Effektivität und Handhabbarkeit.

## Fazit

Das vom BMBF geförderte Forschungsprojekt KI5GRob adressiert in neuer Art und Weise, wie maschinelle Lernverfahren durch Verknüpfung mit Cloud-Technologien in der Robotik effizient und vorteilhaft eingesetzt werden und

wie die Programmierung, der Betrieb und die Wartung von Robotersystemen durch das verfolgte Konzept grundlegend vereinfacht werden können. Das Projektkonsortium besteht neben der Hochschule Karlsruhe aus den Partnern AAT Automation, KUKA, Roboception und Schmalz. Die Forschungsarbeiten am Cloud-basierten Softwareframework und an der KI-gestützten roboterbasierten Handhabung werden von der Forschungsgruppe Robotik und Autonome Systeme (iRAS) am neuen Campus HKA 2030+ der Hochschule Karlsruhe vorangetrieben. Künftige Arbeiten werden sich verstärkt auf industrielle Roboteranwendungen in unstrukturierten Umgebungen konzentrieren, zu deren Realisierung der Einsatz von autonomen Robotersystemen erforderlich sein wird. ✘



Im Roboterlabor an der HKA (Foto: Tobias Schwerdt)

### Autoren

#### Gergely Sóti M.Sc.

Akademischer Mitarbeiter in der Forschungsgruppe „Robotik und autonome Systeme“ am Institut für Angewandte Forschung (IAF) der HKA

#### Yongzhou Zhang M.Sc.

Akademischer Mitarbeiter in der Forschungsgruppe „Robotik und autonome Systeme“ am Institut für Angewandte Forschung (IAF) der HKA

#### Prof. Dr.-Ing. Christian Wurl

Professor an der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der HKA

#### Prof. Dr.-Ing. habil. Björn Hein

Professor an der Fakultät für Wirtschaftswissenschaften der HKA

### Kontakt

Prof. Dr.-Ing. habil. Björn Hein  
Hochschule Karlsruhe  
Fakultät für Wirtschaftswissenschaften  
Forschungsgruppe „Robotik und Autonome Systeme“ (iRAS) am Institut für Angewandte Forschung  
Wilhelm-Schickard-Straße 9, Gebäude F  
76131 Karlsruhe  
E-Mail: bjoern.hein@h-ka.de



# Teamplayer gesucht!

## #TEAMSWORK

Weil Erfolg nur miteinander entstehen kann.

Jetzt durchstarten mit einem **Praktikum, Traineeprogramm** oder auch mit einem **Direkteinstieg**. Wir freuen uns auf Dich!

  
[www.karriere.zueblin.de](http://www.karriere.zueblin.de)



**Ed. Züblin AG, Direktion Karlsruhe**, Human Resources,  
An der Tagweide 18, 76139 Karlsruhe/Deutschland

**VÖSSING**  
INGENIEURE



## INFRASTRUKTUR UND ZUKUNFT GESTALTEN

Mit über 600 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern an 20 Standorten – in Deutschland, China, Katar und Polen – und mehr als 40 Jahren Erfahrung entwickelt die Vössing Ingenieurgesellschaft innovative Lösungen für Infrastrukturprojekte jeder Größenordnung.

Sie freuen sich darauf, von der Theorie in die Praxis zu starten? Dann stehen Ihnen bei uns alle Türen offen für den Direkteinstieg als

**Nachwuchs-Bauingenieur** (m/w/d)

**Bachelorand/Masterand** (m/w/d)

**Werkstudent/Praktikant** (m/w/d)

Es erwarten Sie eine intensive Einarbeitung durch erfahrene Kolleginnen und Kollegen, betriebliche Weiterbildungsprogramme, neueste Technologien und ein Netz von Experten, die Sie bei Ihrem Berufseinstieg kontinuierlich begleiten. Stellen Sie die Weichen für Ihre Zukunft und werden Sie Teil unseres Teams!

**Jetzt bewerben auf [karriere@voessing.de](mailto:karriere@voessing.de).**

BERATUNG · PLANUNG · PROJEKTMANAGEMENT · BAUÜBERWACHUNG **voessing.de**

 **KENBUN**

**EXPERTEN FÜR  
DIGITALE  
SPRACHSYSTEME  
UND KÜNSTLICHE  
INTELLIGENZ**

**NLP AI Engineer  
Rust Engineer  
AI Engineer  
DevOps Engineer**

**Bewirb Dich jetzt:  
[karriere@kenbun.de](mailto:karriere@kenbun.de)**



Sprachgesteuert in die Zukunft!  
Mit KENBUN digitalen intelligenten Sprachassistenten. Passgenau auf Ihr Businessmodell zugeschnitten.

**Jetzt Whitepaper anfordern:**  
[office@kenbun.de](mailto:office@kenbun.de)

**Für mehr Infos:**  
 +49 721 781 503 02  
 [www.KENBUN.de](http://www.KENBUN.de)

# Herausforderungen beim Monitoring von Machine-Learning-Systemen

Patrick Baier und Stanimir Dragiev

DE Algorithmen, die auf Basis von maschinellem Lernen (engl. machine learning) Entscheidungen treffen, werden zukünftig die Entscheidungsfindung in Geschäftsprozessen grundlegend ändern. Anstelle von heuristischen Entscheidungsregeln basiert ihre Logik auf Mustern, die in historischen Daten beobachtet wurden und übertreffen dadurch oft die Genauigkeit bisheriger Systeme bei weitem. Eine Schwierigkeit dieser neuen Systeme ist es sicherzustellen, dass diese zuverlässig arbeiten. In diesem Artikel beleuchten wir den dafür nötigen Monitoring-Prozess und diskutieren daraus entstehende Herausforderungen anhand eines Beispiels aus der Zahlungsbranche (payments industry).

EN Machine learning (ML) systems are on the rise to profoundly change the way business decisions are made. In contrast to traditional systems which typically rely on manually crafted decision logic, ML systems decide solely on patterns extracted from past data and often outperform existing systems by far. One difficulty, however, is the monitoring process which ensures that these systems work reliably. In this article we highlight the challenges of monitoring ML systems along an use case from the payments sector.

Ein wichtiger Bestandteil der fortschreitenden Digitalisierung von Wirtschaft und Industrie ist das Versprechen mit Hilfe von Künstlicher Intelligenz (KI) Entscheidungen rein datenbasiert zu treffen, sodass diese im Ergebnis qualitativ besser und schneller verfügbar sind. Hinter dem Begriff KI befinden sich historisch gesehen eine Reihe unterschiedlicher Methoden, wobei in den letzten Jahren ausschließlich der Teilbereich des Maschinellen Lernens (ML) (engl. Machine Learning) von Bedeutung ist. Kurz gefasst analysiert ein ML-System historische Daten einer gegebenen Domäne und erkennt Zusammenhänge zwischen einer Menge von Eingabedaten und einer Zielvariable. Dieses Wissen kann das System nutzen, um Vorhersagen über neue, unbekannte Datenpunkte zu machen. Klassische Beispiele sind die Klassifizierung von Spam-E-Mails, die Erkennung von Kreditkartenbetrug oder das Markieren von Objekten auf Bildern.

In jüngster Zeit finden ML-Systeme zunehmend Einsatz in Geschäftsprozessen und ersetzen dort konventionelle Entscheidungssysteme, die in der Regel auf Expertenwissen oder historisch gewachsenen Heuristiken basieren. So wird z. B. das Erkennen von Kreditkartenbetrug heutzutage überwiegend durch ML-Systeme durchgeführt.

Aufgrund der Mächtigkeit moderner ML-Systeme sind die getroffenen Entscheidungen oftmals qualitativ konventionellen Systemen überlegen.

Eine besondere Herausforderung, die beim Einsatz solcher ML-Systeme entsteht, ist die Wahrung ihrer Zuverlässigkeit, d. h. sicherzustellen, dass das ML-System fortwährend qualitativ hochwertige Entscheidungen trifft. Verringert sich die Entscheidungsgenauigkeit des Systems, kann dies unter Umständen erst nach Tagen oder Wochen sichtbar werden. Der in dieser Zeit unbemerkt entstandene finanzielle Schaden kann gegebenenfalls zur gesamtbetriebswirtschaftlichen Katastrophe führen.

Bei klassischen Software-Systemen wird durch sogenanntes Monitoring sichergestellt, dass das System zuverlässig operiert. Dies beinhaltet das dauerhafte Überwachen von Metriken wie z. B. CPU-Auslastung, Speicherbedarf oder Antwortlatenz der Anwendung. Liegt einer dieser Werte außerhalb des definierten Toleranzbereichs, wird automatisch eine Benachrichtigung an die Systemverantwortlichen versendet.

Um die Zuverlässigkeit von ML-Systemen zu garantieren, muss neben diesem klassischen Monitoring der zusätzlichen Datendimension Rechnung getragen werden.

So ist bekannt, dass ML-Systeme nur dann zuverlässige Entscheidungen treffen, wenn die Eingabedaten im Produktivsystem ähnlich zu den Daten sind, auf welchen das ML-System trainiert wurde [1]. Ändert sich hingegen die Verteilung der Daten, so ist die Entscheidungsgenauigkeit des ML-Systems nicht mehr garantiert. Ein vollständiges ML-Monitoring umfasst daher nicht nur die Überwachung der Hardware- und Softwaredimension, sondern auch die Überwachung der Eingabedaten im Produktivsystem.

Um die dargelegten Punkte zu veranschaulichen, betrachten wir im Folgenden beispielhaft einen Geschäftsprozess der Payments-Industrie. Ein typischer Online-Payment-Provider wickelt das Zahlungsgeschäft für Onlineshops ab, indem er Kunden im Checkout-Prozess Zahlungsmöglichkeiten anbietet, den Zahlungsvorgang technisch umsetzt und die erhaltene Zahlung (unter Abzug von Provision) an den Betreiber des Onlineshops weiterleitet. Hierbei unterliegen unterschiedliche Zahlungsarten unterschiedlichen Risiken. So besteht beispielsweise beim „Kauf auf Rechnung“ das Risiko, dass die Zahlung des Kunden teilweise oder komplett ausbleibt.

Um Zahlungsausfälle zu verhindern, nutzen Payment-Provider in der Regel ML-Systeme um für jeden Kunden individuell zu entscheiden, welche Zahlart für das Risikoprofil des Kunden infrage kommt. Als Datengrundlage für das Training des ML-Modells dienen historische Transaktionen, bei denen bekannt ist, ob die Zahlung ausfiel oder nicht. Erzielt das trainierte Modell eine hohe Genauigkeit auf einem speziell ausgewählten Testdatensatz, wird es typischerweise im Rahmen eines Deployments in einen Softwareservice (sog. Microservice) gekapselt und auf einem Server im Produktivsystem des Online-Shops gestartet. Von dort nimmt es Anfragen bezüglich des Zahlartenangebots einzelner Kunden entgegen.

An dieser Stelle sei kurz der zuvor diskutierte Fall betrachtet: Das ML-Modell trifft nach dem Deployment schlagartig schlechtere Entscheidungen als dies auf den Testdaten der Fall war. Dies würde dazu führen, dass das Modell potenziell

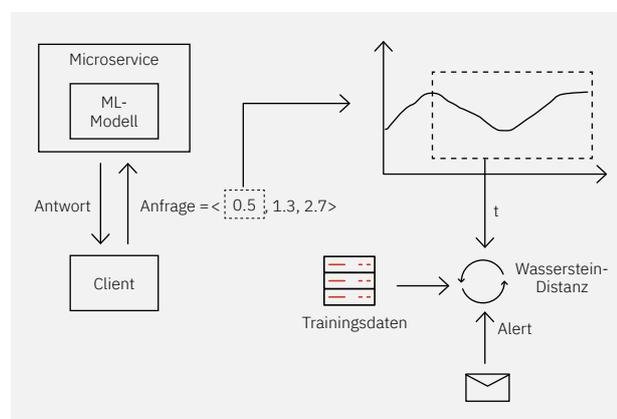


Abb. 1: Systemübersicht ML-Monitoring

nicht vertrauenswürdigen Kunden trotzdem risikobehaftete Zahlarten anbietet, was in Summe zu insgesamt mehr Zahlungsausfällen führt. Da die Zahlung eines Kunden bei Rechnungskauf erst nach einem Zeitraum von mehreren Wochen eingehen kann, würde dies bedeuten, dass wir erst nach dieser Zeitspanne bemerken, dass das Modell nicht mehr zuverlässig arbeitet. Da in dieser Zeit jedoch weitere Entscheidungen getroffen werden, wäre der finanzielle Schaden unter Umständen immens.

Grund für eine solche Verschlechterung des ML-Modells ist in der Regel eine Veränderung in den zu verarbeitenden Eingabedaten. Typische Ursachen dafür sind Umwelteinflüsse, welche beim Training nicht beobachtbar waren (z. B. Inflation, Pandemie, etc.) oder Veränderungen in Systemen, welche die Eingabedaten für das ML-System in der Produktivumgebung bereitstellen. Ein klassisches Beispiel ist, dass Geldbeträge vom ML-System in Euro erwartet werden, diese aber durch eine nicht ausreichend kommunizierte Software-Anpassung in einem zuliefernden Datensystem plötzlich in Cents erhalten werden. Alle Eingabedaten, welche auf Geldbeträgen beruhen, wären um den Faktor 100 höher und die Vorhersagen des ML-Systems schlagartig unbrauchbar.

Um dieser Problematik entgegenzuwirken, schlagen wir ein ML-Monitoring vor, welches dauerhaft die Verteilung der Eingabedaten mit der Verteilung der Trainingsdaten-

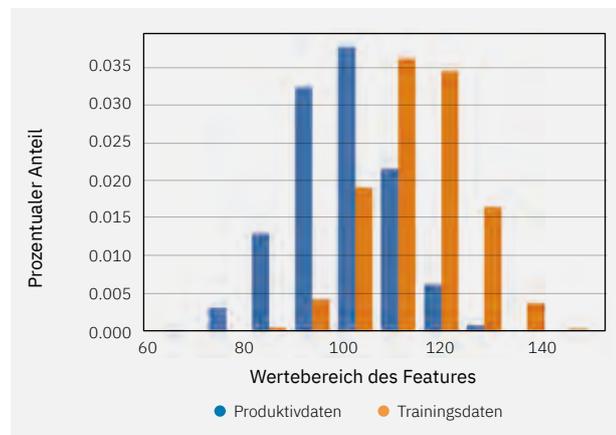
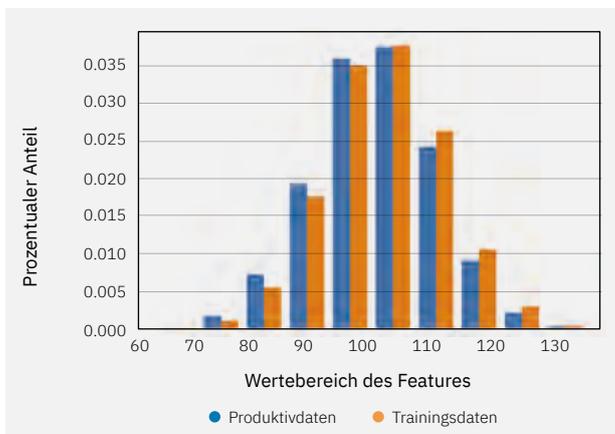


Abb. 2 und 3: Empirische Datenverteilung eines Features zwischen Trainings- und Produktivdaten; links: ähnliche Verteilung, rechts: sehr unterschiedliche Verteilung

vergleicht und bei starken Abweichungen einen Alarm ausgibt (siehe Abbildung 1).

Das vorgeschlagene System extrahiert aus jeder Anfrage an das ML-System die enthaltenen Datenattribute (sog. Features) und speichert diese in einer fortlaufenden Zeitreihe. In regelmäßigen Abständen werden die zuletzt erfassten Werte eines Features zu einer empirischen Datenverteilung aggregiert und mit der Datenverteilung der Trainingsdaten verglichen. Erwartungsgemäß sollten sich die Verteilungen stark ähneln (siehe Abbildung 2). Ist dies jedoch nicht der Fall (siehe Abbildung 3), wird eine entsprechende Alarmnachricht an die Systemverantwortlichen verschickt. Zur automatischen Messung der Ähnlichkeit der Datenverteilungen wird dabei die Wasserstein-Distanz [2] genutzt.

Als Tatsache vorausgesetzt, dass von einem ML-System eine ähnliche Genauigkeit wie auf den Testdaten zu erwarten ist, wenn die beiden Datenverteilungen ähnlich sind, schützt ein solches Monitoring vor unbemerkten Veränderungen der Eingabedaten. Bei der praktischen Umsetzung dieses Systems entstehen nun verschiedenste Herausforderungen, die nachfolgend kurz beleuchtet werden.

Ein entscheidender Parameter ist die Größe des Aggregationsfensters, d. h. wie viele der zuletzt verarbeiteten Datenpunkte werden für die Erstellung der empirischen

Verteilung der Produktivdaten genutzt. Während die Verteilung der Trainingsdaten auf allen im Training verfügbaren Daten erstellt werden kann (typischerweise mehrere Millionen Datenpunkte), soll die Verteilung der Produktivdaten in der Regel auf wenige aktuelle Datenpunkte beschränkt werden, da ansonsten Veränderungen in der Datenverteilung zu spät bemerkt werden können.

Um dies zu veranschaulichen, wurde folgendes Experiment durchgeführt: Wir bilden auf einem gegebenen Datensatz für ein Feature die empirische Verteilung der Trainingsdaten und simulieren ein Produktivsystem, in dem jede Sekunde eine neue Anfrage an das ML-System gesendet wird. Das Monitoring-System speichert diese Daten und vergleicht alle 50 Sekunden die Verteilung der Trainingsdaten mit den letzten  $n$  Datenpunkten aus dem Produktivsystem über die Wasserstein-Distanz. Abbildung 4 zeigt den zeitlichen Verlauf dieses Vergleichs für verschiedene Werte von  $n$ , wobei die Werte im Produktivsystem in diesem Fall aus der gleichen Verteilung stammen wie die Trainingsdaten. Wir sehen, dass die Wasserstein-Distanz für kleine  $n$  aufgrund der kleinen Datenmenge relativ hoch und volatil ist. Einen geeigneten Alarm-Schwellenwert zu finden scheint unmöglich. Beim Experiment in Abbildung 6 haben wir zum Zeitpunkt  $t = 2000$  die Verteilung der Produktivdaten absichtlich geändert. Wir

# Monitoring von ML-Systemen ist eine bisher wenig beachtete Disziplin.

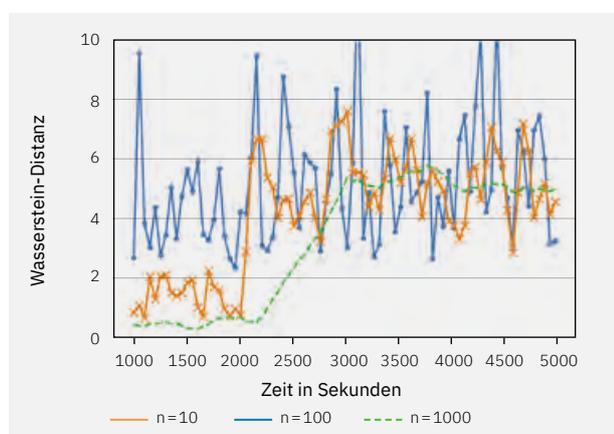
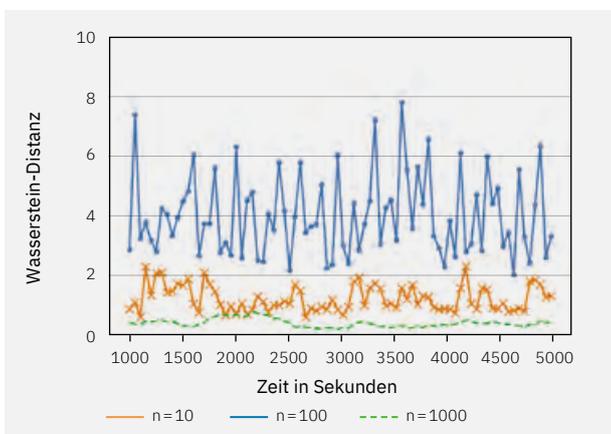


Abb. 4 und 5: Wasserstein-Distanz eines Features für unterschiedliche Aggregationsfenster; links: Daten stammen aus gleicher Verteilung, rechts: Verteilungen ändern sich bei Zeitpunkt  $t=2000$

sehen, dass zu große Werte für  $n$  die Verteilungsänderung nur sehr langsam erkennen, da sich zu viele alte Werte im Aggregationsfenster befinden. Dies verzögert die Erkennung und stellt daher ein Risiko dar. Ein zufriedenstellender Wert wie  $n=100$  ist im obigen Beispiel nur empirisch zu bestimmen.

Neben der kritischen Parameterwahl für das Aggregationsfenster kommen in der Praxis noch weitere Herausforderungen hinzu: (1) Saisonalität oder Trends in den Eingabedaten erschweren den Vergleich der Verteilungen zusätzlich, (2) der Berechnungsaufwand für die Erstellung der empirischen Datenverteilung kann bei hohem Datenaufkommen enorm kostspielig sein, (3) die Wahl eines guten Alarm-Schwellenwerts ist oft ein schwieriger Balanceakt zwischen Falschalarmen und nicht alarmierten Datenveränderungen.

Trotz oder gerade wegen dieser Komplexität ist das Monitoring von ML-Systemen eine bisher wenig beachtete Disziplin, welche jedoch enorme Wichtigkeit für die Zuverlässigkeit eines ML-Systems haben kann. Mit der zunehmenden Verbreitung von ML-Systemen wird diese Fragestellung jedoch vermehrt in den Fokus rücken, da wichtige finanzielle Fragen an deren Zuverlässigkeit geknüpft sind. Wichtig ist im ersten Schritt, sich dieser Dimension beim Produktiveinsatz von ML-Systemen bewusst zu sein. ✘

## Autoren

**Prof. Dr. rer. nat. Patrick Baier**  
Professor für Maschinelles Lernen  
an der Fakultät für Informatik und  
Wirtschaftsinformatik der HKA

**Dr. rer. nat. Stanimir Dragiev**  
Applied Scientist, Zalando SE

## Kontakt

Prof. Dr. rer. nat. Patrick Baier  
Hochschule Karlsruhe  
Fakultät für Informatik und Wirtschaftsinformatik  
Moltkestraße 30  
76133 Karlsruhe  
E-Mail: [patrick.baier@h-ka.de](mailto:patrick.baier@h-ka.de)

# Digitalisierung an Kältemittelverdichtern – Sensorik macht den Unterschied

Franz Joseph Pal und Robin Langebach

**DE** Derzeit verfügbare Überwachungsmodule für Kältemittelverdichter verarbeiten im Wesentlichen Ölstand, elektrische Parameter sowie Druck und Temperatur in der Maschine in Verbindung mit dem Kältekreislauf. Damit lassen sich erste Informationen über den Betrieb und Störungen der Maschine gewinnen und verarbeiten - bei kleinen und mittleren Verdichtern aufgrund der vergleichsweise hohen Zusatzkosten bisher nur in sehr begrenztem Umfang. Mit Hilfe kostengünstiger Sensorik können zusätzliche, bisher ungenutzte Messgrößen in die Überwachung von Kompressor und Anlage einbezogen werden. In diesem Beitrag werden Ansätze zur Messung der Beschleunigung und des flüssigen Kältemiteleintrags in den Verdichter diskutiert.

**EN** Currently available monitoring modules for refrigerant compressors essentially process oil level, electrical parameters as well as pressure and temperature in the machine in combination with the refrigeration cycle. This makes it possible to obtain and process some initial information on machine operation and failures – up to now only to a very limited extent for small and medium size compressors due to comparatively high additional costs. With the help of low-cost sensor technology, additional, previously unused measured variables can be included for the monitoring of compressor and system. This paper discusses approaches for measuring acceleration and liquid refrigerant transport into the compressor.

Nach Schätzung des International Institute of Refrigeration (IIR) werden aktuell weltweit fünf Milliarden Kälte- und Klimaanlage sowie Wärmepumpen betrieben. All diese Anlagen sind für ca. 20 % des weltweiten Stromverbrauchs verantwortlich <sup>[1]</sup>. In nahezu allen Kälte- und Klimaanlage sowie Wärmepumpen leistet mindestens ein Kältemittelverdichter – häufig unauffällig und über Jahre hinweg – seinen Dienst. Nach Branchenhochrechnungen wurden im Jahr 2021 nicht weniger als 486 Millionen Verdichter in den stationären Markt eingeführt <sup>[2]</sup>, Marktwert ca. 42,4 Milliarden Dollar. Damit wird einmal mehr eindrucksvoll bestätigt, dass die Kälte-, Klima- und Wärmepumpentechnik mit Fug und Recht als „Hidden Champion“ bezeichnet werden kann. Energieeffiziente Kälte- und Klimaanlage sind ein Schlüssel zur Lösung der Klimakrise und werden einen wesentlichen Beitrag zur weltweiten Energieeinsparung leisten.

Die eingesetzten Verdichter überspannen dabei große Leistungsbereiche, beginnend von wenigen Watt Kälteleistung für kleine hermetische Maschinen, z. B. für Haushaltskühlschränke, bis in den Megawatt-Bereich mit großen halbhermetischen bzw. offenen Maschinen, z. B. für die Gebäudeklimatisierung oder für Logistikzentren. Die Verkaufspreise von Verdichtern gerade im kleinen Leistungsbereich liegen üblicherweise im zweistelligen bis niederen dreistelligen Eurobereich. Die Anzahl der Verdichter im Markt ist jedoch gerade im Niedrigpreissegment besonders hoch. Die Digitalisierung der Masse der Kältemittelverdichter ist durch den Kostendruck fortwährend gehemmt, nimmt jedoch spürbar an Fahrt auf. Im Zielfokus stehen dabei die Überwachung der Maschine sowie die Integration der gewonnenen Daten zur weiteren Optimierung der Energieeffizienz der übergeordneten Systeme.

Nach dem Stand der Technik werden – soweit es der Kunde wünscht – in Kältemittelverdichtern üblicherweise der Ölstand, Temperaturen, Drücke und elektrische Kenngrößen aufgenommen. In Kombination mit weiteren Messdaten aus der Anlage sind hierbei bereits umfangreiche Aussagen zum Zustand der Maschine möglich. Maschinenausfälle können vielerlei Ursachen haben. Interessanterweise sind nicht immer die Verdichter selbst Aus-

[1] Dupont, J.-L., Domanski, P., Lebrun, P., und Ziegler, F., The Role of Refrigeration in the Global Economy – 38<sup>th</sup> Informatory Note on Refrigeration Technologies, Juni 2019, <https://iifir.org/en/fridoc/the-role-of-refrigeration-in-the-global-economy-2019-142028>, Zugriff am 31.03.2022.

[2] Building Services Research and Information Association (BSRIA), veröffentlicht in Branchenticker Cooling Post, <https://www.coolingpost.com/world-news/global-compressor-sales-rebound/>, Zugriff am 31.03.2022.

[3] Pal, F.J., Langebach, R., Andjelkovic M., Ahrend, U., Hesse, U., Ellwein, C.: MEMS Beschleunigungssensoren für die Überwachung von Kältemittelverdichtern. In: Tagungsband Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein – DKV (2021).

gangspunkt für die kurz- oder langfristige Beschädigung. Anlagengestaltung sowie der Betrieb haben wesentlichen Einfluss auf die „Gesundheit“ des Verdichters.

Ein möglicher, häufig völlig unerkant auf tretender Zustand ist der Eintrag von flüssigem Kältemittel in den Verdichter während des Betriebs. Dies ist zum einen der Fall, wenn sich kurzzeitig große Mengen von flüssigem Kältemittel durch den Verdichter bewegen, die bis in den Arbeitsraum vordringen können. Dies zieht Schädigungen an den Ventilen und Dichtungen nach sich, welche häufig kurzfristig zum Ausfall des Verdichters führen. Zum anderen kann es vorkommen, dass immer wieder kurzzeitig kleinere Mengen an flüssigem Kältemittel in den Verdichter vordringen können – etwa in transienten Betriebszuständen beim Anfahren der Maschine oder bei Wechsel der Betriebsbedingungen. Dies hat nicht sofort einen Ausfall der Maschine zur Folge, vielmehr kann es durch unerwünschte Nebeneffekte – etwa durch Auswaschungen des Kältemaschinenöls aus Lagerstellen – zu einer längerfristigen, schleichenden Schädigung führen. Dies kann durch die bisherigen, zur Überwachung verwendeten Messgrößen nicht in gewünschter Form detektiert werden. In der Konsequenz müssen zusätzliche Messgrößen erforscht werden, um den Flüssigkeitseintrag in die Maschine hinreichend zu detektieren und darüber hinaus noch weitere Erkenntnisse über die Maschinengesundheit gewinnen zu können.

An der Hochschule Karlsruhe werden in diesem Zusammenhang zwei zusätzliche Methoden in die Betrachtungen einbezogen. Dies ist zum einen die Überwachung der Beschleunigung der Maschine. Zum anderen ist es die Detektion von Flüssigkeitsdurchtritt in der Saugleitung zum Verdichter.

Für beide Ansätze sind am Markt bereits kommerzielle, jedoch sehr teure Sensoren verfügbar. Für große Verdichter ergibt sich für die Anlagenbetreiber ein gewisser finanzieller Spielraum prozentual zum Einkaufspreis, um solche Zusatzausstattung zu integrieren. Für kleinere Maschinen ergibt sich die Forderung, den Herstellungspreis solcher Zusatzausstattung um zwei Größenordnungen abzusenken. Effiziente Verdichter müssen nicht nur im Labor

funktionieren, sondern ihr Einsparpotenzial langfristig im Feld ausüben. Für eine sinnvolle Überwachung macht die Sensorik also den Unterschied!

Im Forschungsprojekt VERPUSA, finanziert durch die Friedrich-Kriwan-Stiftung und den Verbund der Stifter der Hochschule Karlsruhe, erfolgt aktuell im Rahmen einer Doktorarbeit die Evaluation von MEMS-Beschleunigungssensoren (Micro-Electro-Mechanical Systems) zum Einsatz an Kältemittelverdichtern<sup>[3]</sup>. Diese Sensoren bieten ein breites Anwendungsspektrum und werden großflächig und in enormer Stückzahl bereits eingesetzt – z. B. im Mobiltelefon. Im Vergleich zu piezoelektrischen, analogen Beschleunigungsaufnehmern, welche im Allgemeinen im industriellen Umfeld für die Schwingungsanalyse verwendet werden, bieten MEMS-Beschleunigungssensoren Vorteile hinsichtlich des Preises, der integrierten Funktionalitäten und der einfachen Integration, da es sich in der Regel um digitale Beschleunigungsaufnehmer handelt. Sie sind damit auch für den Einsatz an Verdichtern im Niedrigpreissegment hoch attraktiv. Jedoch ergeben sich hinsichtlich



Abb. 1: Untersuchungen der Gehäusevibrationen mit einem MEMS-Beschleunigungssensor und vergleichend mit einem industriellen piezoelektrischen Beschleunigungssensor auf einem hermetischen Verdichter kleinerer Kälteleistung (Foto: Franz Joseph Pal)

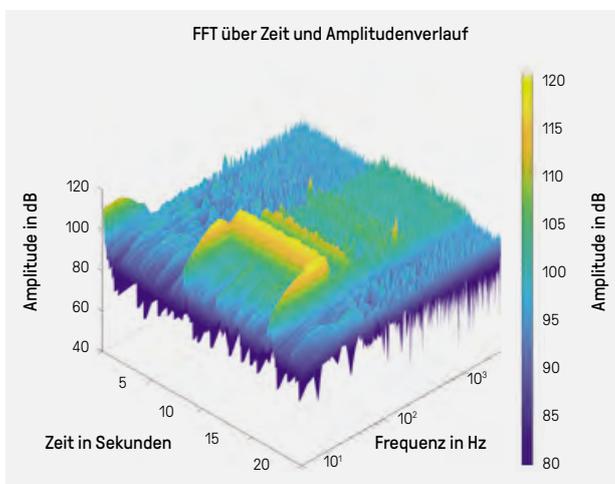


Abb. 2: FFT-Analyse des MEMS-Beschleunigungssensors über Zeit und Amplitude während eines Ein-/Ausschaltzyklus für einen hermetischen Kälteverdichter kleinerer Kälteleistung



Abb. 3: Messaufbau zur Detektion von flüssigem Kältemittel in der Saugleitung eines Kältemittelverdichters mittels MEMS-Beschleunigungssensor, angebracht auf einem Miniatur-Biegebalken in der Strömung

der Nutzbandbreite, der maximalen Beschleunigungen sowie Auflösung und Abtastrate einige Einschränkungen im Vergleich zu den deutlich teureren analogen Beschleunigungsaufnehmern. Die ersten Untersuchungen im Labor zeigen, dass für eine Analyse der Maschinengrundschrwingungen eine vergleichsweise geringe Nutzbandbreite bis zu 5 kHz ausreichend erscheint, um auftretende Phänomene in diesem Zusammenhang hinreichend zu detektieren (siehe Abbildung 1 und 2).

Für höherfrequente Phänomene, die sich im Zusammenhang mit stochastischen, aperiodischen Strömungsgeräuschen einstellen und häufig im Frequenzbereich deutlich oberhalb von 5 kHz anzutreffen sind, liefern die MEMS-Beschleunigungssensoren nur eine begrenzte Aussagekraft.

Im Zuge der Verwendung eines günstigen Beschleunigungssensors in Verbindung mit einem Mikrocontroller zur Auswertung auf der Maschine kommt schnell die Frage auf, ob Auswertungsroutinen auch durch Verlagerung in die Cloud sichergestellt und gegebenenfalls mit Algorithmen der Künstlichen Intelligenz kombiniert werden könnten. Dieser Ansatz wird zukünftig sicherlich eine gewisse Rolle auch im Bereich der Kältemittelverdichter spielen. Aktuell stellt sich jedoch gerade im Niedrigpreissegment von Verdichtern und Anlagen die Situation so dar, dass praktisch keine permanente Internetanbindung gegeben ist. Kurz und mittelfristig wird voraussichtlich die effiziente, lokale Datenverarbeitung und Interpretation (Edge-Computing) die Attraktivität solcher Systeme steigern.

Mit Bezug zur Detektion des Eintrags von flüssigem Kältemittel in den Verdichter erscheint der MEMS-Beschleunigungssensor – angebracht am Verdichtergehäuse – eine Perspektive zu bieten, massive Flüssigkeitsschläge zu detektieren, die sich als besonders ausgeprägte Beschleunigungen im Bereich der Maschinengrundordnung zeigen.

Es bleibt die Frage offen, wie geringfügige Einträge von flüssigem Kältemittel in den Verdichter ebenfalls hinreichend genau detektiert werden können. Ein weiterer, dazu an der Hochschule Karlsruhe verfolgter Ansatz nutzt die Eigenschaften eines frei schwingenden, in der Strömung befindlichen Miniatur-Biegebalkens, dessen Eigenfrequenz wiederum durch die Platzierung eines MEMS-Beschleuni-

# Kostengünstige Sensoren sind der ‚Enabler‘ für die breite Maschinenüberwachung.

gungssensors permanent überwacht werden kann (siehe Abbildung 3). Trifft nun im Betrieb flüssiges Kältemittel auf diesen Biegebalken, so ändert sich geringfügig die Eigenfrequenz sowie in erheblichen Maßen die Amplitude. Auch auf diese Weise ist es möglich, in der nachgeschalteten Auswertung zuverlässig einen Event-bezogenen Flüssigkeitsdurchtritt in Richtung Verdichter in der Saugleitung zu detektieren. Hierbei liegt der Anschaffungspreis inklusive Auswertung nur bei wenigen Euro.

Über die MEMS- Beschleunigungssensoren hinaus bieten auch Fotodioden in Verbindung mit einem LED-Array eine äußerst preisgünstige Art und Weise, den Flüssigkeitseintrag in ein Schauglas in der Saugleitung sicher zu detektieren. Hierzu wurde ebenfalls an der Hochschule Karlsruhe ein Verfahren entwickelt, bei dem der Kältemittelstrom quasi „durchleuchtet“ wird. Durch die Brechung des Lichts an einer Phasengrenze zwischen Gas und Flüssigkeit ändert sich die Spannungsverteilung über das Photodioden-Array (siehe Abbildung 4). Daraus kann wieder Event-bezogen durch die Wahl eines entsprechenden Schwellenwertes der Flüssigkeitseintrag erfasst werden. Besonders interessant ist an diesem Verfahren, dass eine gewisse Aussage

zur Quantität des flüssigen Kältemittels im Massenstrom getroffen werden kann.

In der Konsequenz zeigt sich, dass neben den bisher gemessenen Kenngrößen auch andere, vergleichsweise kostengünstig zu ermittelnde Größen zur Zustandsbewertung eines Kältemittelverdichters herangezogen werden können. Die wissenschaftlichen Tätigkeiten der Zukunft müssen sich darauf konzentrieren, alle zur Verfügung stehenden Messgrößen miteinander zu verbinden, um daraus neue Erkenntnisse hinsichtlich unerwünschter Maschinenzustände zu erlangen. An der Hochschule Karlsruhe wird dazu gerade eine Versuchsumgebung aufgebaut, die gezielt Fehlerzustände an einem Kältemittelverdichter provozieren kann. Damit können die vorgestellten Verfahren zum Verdichterschutz und zur Vorhersage möglicher Ausfallszenarien umfassend getestet und verifiziert werden. ✘

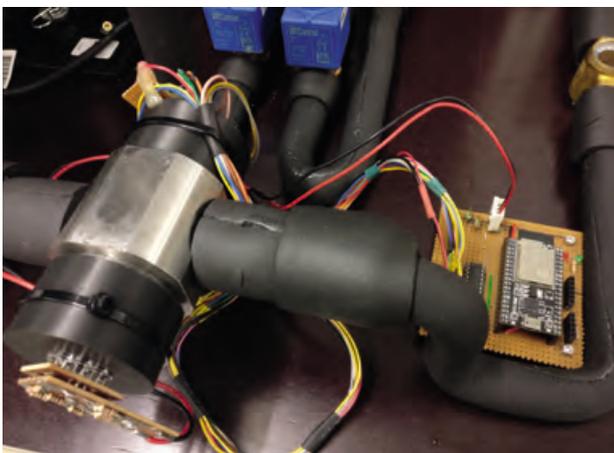


Abb. 4: Messaufbau zur optischen Detektion von flüssigem Kältemittel in der Saugleitung eines Kältemittelverdichters mittels LED-Lichtquelle und zugehörigen Fotodioden (Foto: Franz Joseph Pal)

## Autoren

**Franz Joseph Pal M.Sc.**

Akademischer Mitarbeiter, Doktorand

Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik der HKA

**Prof. Dr.-Ing. Robin Langebach**

Stiftungsprofessur für Verdichtertechnologie

Institut für Kälte-, Klima- und Umwelttechnik der HKA

## Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Robin Langebach

Hochschule Karlsruhe

Fakultät für Maschinenbau und Mechatronik

Moltkestraße 30

76133 Karlsruhe

E-Mail: robin.langebach@h-ka.de

Vermessung  
Geotechnik  
Geoinformatik  
Entwicklung



## DEINE MASTERARBEIT im Themenbereich Geomonitoring

Informiere dich: [intermetric.de/karriere/stellenanzeigen/](http://intermetric.de/karriere/stellenanzeigen/)  
 Folge uns: [facebook.com/intermetricGmbH](https://www.facebook.com/intermetricGmbH)  
[instagram.com/intermetric](https://www.instagram.com/intermetric)

intermetric GmbH | Industriestr. 24 | 70565 Stuttgart | T +49 (711) 780039-2 | [www.intermetric.de](http://www.intermetric.de)



Kromberg & Schubert ist ein international aufgestellter Technologiekonzern mit mittelständischem Hintergrund und über 110-jähriger Firmengeschichte. Mehr als 50.000 Mitarbeiter an über 40 Standorten weltweit sorgen mit viel Engagement, Flexibilität und ständigen Innovationen dafür, dass wir zu den führenden Anbietern von Bordnetzen, Kabeln und Kunststofftechnik in der Automobilindustrie gehören.



### Wusstest Du, dass das Bordnetz eines Mittelklassewagens...

- ... aus bis zu 6.000 Einzelteilen besteht?... bis zu 35 kg wiegen kann?
- ... aus bis zu 3.000 m Leitungen besteht?
- ... bis zu 95 % manuell gefertigt wird?
- ... für jedes einzelne Fahrzeug, abhängig von dessen bestellter Ausstattung, individuell angefertigt wird?



Möchtest Du dich mit uns den Herausforderungen der kundenspezifischen Kabelsatzfertigung stellen?  
 Dann freuen wir uns auf Deine Online-Bewerbung!

[www.karriere-ist-lila.de](http://www.karriere-ist-lila.de) / [www.Kromberg-Schubert.de](http://www.Kromberg-Schubert.de)

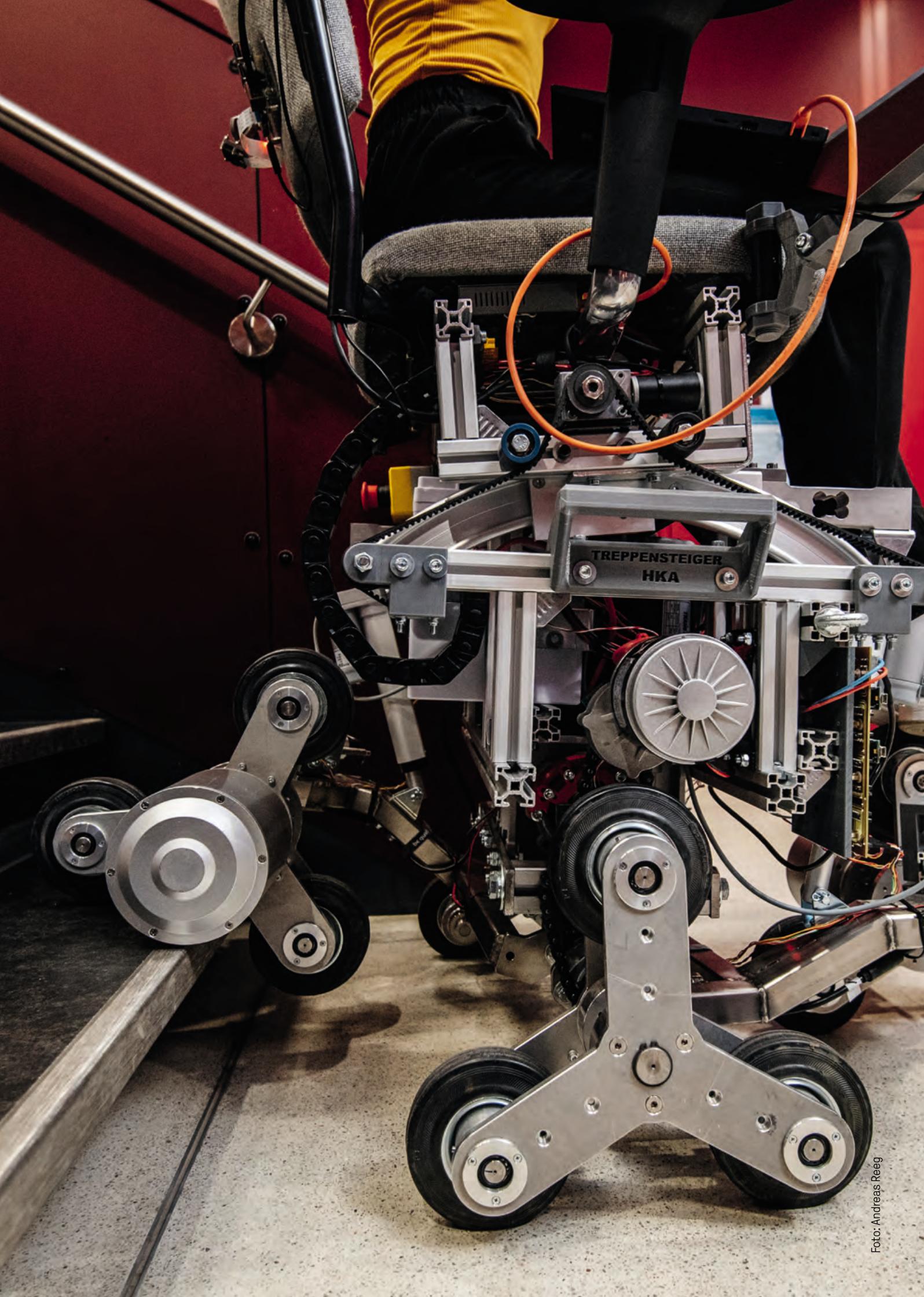


**Abenteurer & Bürohelden für neue Wege und Präzision.**



Mehr zu VMT und unsere aktuellen Stellenangebote findest du hier.





# Assistenz- systeme

# Prototyp eines Treppensteigers

Gerhard Schäfer, Jan Schmitt, Bruno Kempf, Nick Pfitzenmaier und Christian Clouser

DE Treppen werden verwendet, um steile Wegabschnitte einfacher überwinden zu können. Motorisch eingeschränkte Personen sind dabei jedoch auf menschliche oder maschinelle Hilfe angewiesen, die meist nur speziell für eine bestimmte Umgebung entworfen wurden. Der entwickelte Rollstuhl kann in bekannter Weise auf der Ebene verwendet werden, ist aber auch zum Einsatz auf Treppen mit geradem und/oder kurvigem Verlauf geeignet. Die verwendete Technik zum Treppensteigen erfordert eine Vielzahl mechanischer Aktoren und unterschiedlicher Sensoren zur Überwachung des Systems. Die Steuerung des Rollstuhls kann dabei manuell, aber auch bei der Befahrung einer Treppe unabdingbar, automatisch erfolgen.

EN Stairs are used as auxiliary constructions in order to follow paths with steep incline. Physically challenged people might have to rely on personal or mechanical assistance. Conventional mechanical stair lifters are normally designed for specific environments. The presented prototype of a stair climber combines several application concepts. The stair climber can be used as a conventional wheel chair and on straight or curved stairs. The realized technical concepts require a large number of actors and different sensors for system behavior supervision. The stair climber can be either controlled manually or automatic if operated on stairs.

Die Bewältigung von Treppen ist für motorisch eingeschränkte Personen immer noch ein großes Problem. Im öffentlichen Bereich kann gegebenenfalls auf Rampen, Aufzüge oder speziell eingebaute Transportsysteme<sup>[1]</sup> zurückgegriffen werden.

Jedoch sind Gehwege grundsätzlich nicht barrierefrei und im häuslichen Bereich stellen Treppen unüberwindbare Hindernisse für Rollstuhlfahrer dar. Ansätze wie Steighilfen<sup>[2]</sup> oder speziell mit Ketten ausgerüstete Fahrhilfen<sup>[3]</sup> benötigen entweder eine unterstützende Person oder haben eine zusätzliche Platzforderung auf dem zu befahrenden Weg. Treppen mit Teilkreissegmenten (auch Wendeltreppen) sind bei starrer Konstruktion kaum zu überwinden.

Im Projekt Treppensteiger der Hochschule Karlsruhe wurde ein Konzept zur Bewältigung dieser Probleme erarbeitet und durch eine praxistaugliche Realisierung in seiner Funktionalität überprüft. Der entstandene Treppensteiger ist in der Lage neben Personen auch Lasten bis zu 100 kg eine Treppe hinauf zu befördern.

## Konzepterarbeitung

Bei der Konzepterarbeitung wurden zunächst vorhandene Lösungen der Antriebseinheiten und deren Anordnung (siehe Abbildung 1) untersucht und gegeneinander gewichtet. Grundsätzlich können hierbei herkömmliche Räder, Kettenantriebe, Sternräder oder Beinkonstruktion betrachtet werden. Als wesentliche Auswahlkriterien wurden die Anwendbarkeit auf den angestrebten Untergründen, die Handhabung im Sinne einer einfachen Steuerung und der Konstruktionsaufwand herangezogen.

Nach Abwägung der Vor- und Nachteile wurde die Entscheidung zugunsten der Sternräder getroffen und für die weiteren Betrachtungen hinsichtlich der Basisform als Grundlage genommen.

Bei der Anordnung wurden klassische Wagenformen mit vier oder drei Antriebseinheiten in ihrer Funktionstauglichkeit und ihrem Platzbedarf sowohl auf geraden Treppen, als auch auf Treppen mit Teilkreissegmenten untersucht. Für die Abstände der Antriebseinheiten wurden die Normtreppe Maße für notwendige Treppen nach DIN 18065 verwendet. Damit ergeben sich die Abstände der Antriebseinheiten zu



Inbetriebnahme eines für gerade Treppen und Wendeltreppen praxistauglichen Treppensteiger-Prototyps (Foto: Andreas Reeg)

etwa 30 cm und die Auflagelänge bei Wendeltreppen zu etwa 5 cm. Werden Konstruktionen betrachtet, bei denen Antriebseinheiten nur im Abstand von 30 cm installiert werden, ergeben sich daraus relativ instabile Systeme, die wegen der Kippgefahr für die Personenbeförderung ungeeignet sind. Zur Vermeidung einer extremen Kippgefahr wurden nur Systeme betrachtet, deren Anordnung der Antriebseinheiten eine Überdeckung von 60 cm zuließen.

Unter der Vielzahl der Möglichkeiten sollen hier zunächst die Wagenform mit vier oder drei Rädern betrachtet werden. Bei geraden Treppen sind solche Systeme gut realisierbar. Beim Befahren von Wendeltreppen sind diese Systeme sperrig und nur bedingt einsetzbar. Die Überlegungen resultierten daher in einer Rautenform, bestehend aus einem vorderen und einem hinteren Dreieck, jeweils mit lenkbaren Antriebseinheiten ausgestattet.

Auf Basis dieser Grundform war es noch notwendig, eine einstellbare Lastenplattform (ggf. Stuhl) so zu montieren, dass ein Ausgleich gegen die Neigung des Fahrgestells möglich war. Die Plattform wird dazu schwenkbar auf der mittleren Achse angebracht und mit einer in ihrer Länge verstellbaren Stütze (Stellglieder) auf den vorderen und hinteren Dreiecken abgestützt, was eine Kippneigung nochmals verringert. Der Treppensteiger soll ebenfalls in der Lage sein, die Treppe autonom zu befahren.

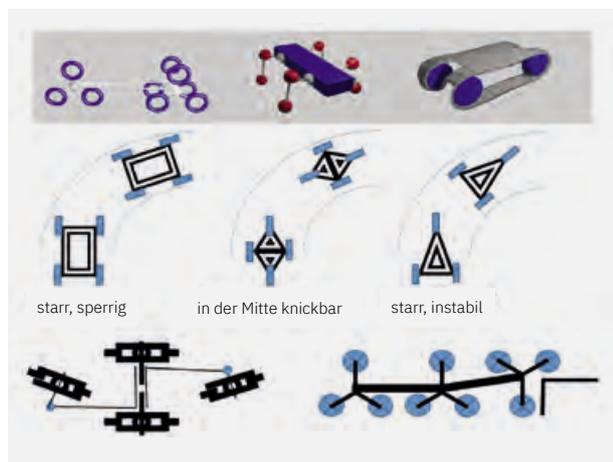


Abb. 1: Grundprinzipien und Grundformen eines Treppensteigers

## Steuerung

Grundsätzlich steht damit ein System zur Verfügung, das mechanisch in der Lage ist, eine Treppe zu befahren. Neben der mechanischen Dimensionierung müssen jedoch noch elektrische Leistungsdaten der Motoren und die Art der Synchronisierung der verschiedenen, mechanisch nicht gekoppelten Antriebseinheiten bestimmt werden. Das System

# Befahren von geraden Treppen und Wendeltreppen durch Rautenform und Sternrädern.

benötigt außerdem eine Vielzahl von Sensoren, welche die Position der Komponenten zueinander und auch die Position zum Umfeld messen und an ein Steuersystem melden können. Die Sensorsignale werden regelungstechnisch ausgewertet und in Steuersignale für die Leistungselektronikmodule verarbeitet. Wegen der hohen Anforderung an die Signalerfassung und -verarbeitung wurde ein Mehrrechner-system zur Lösung der Steuerungsproblematik konzipiert. Wesentliche Funktionseinheiten sind hierbei:

- + Sensorverarbeitung für 65 Sensoren
- + 10 PWM-Module zur Steuerung der Motoren
- + Synchronisierungseinheit zur Bewertung der Sensorsignale und Ausgabe der Steuersignale
- + Benutzerkonsole zur Steuerung und Darstellung der Vorder- und Rückansicht
- + Stuhlsteuerung
- + Überwachung von Sicherheitsabständen und Notfallabschaltung

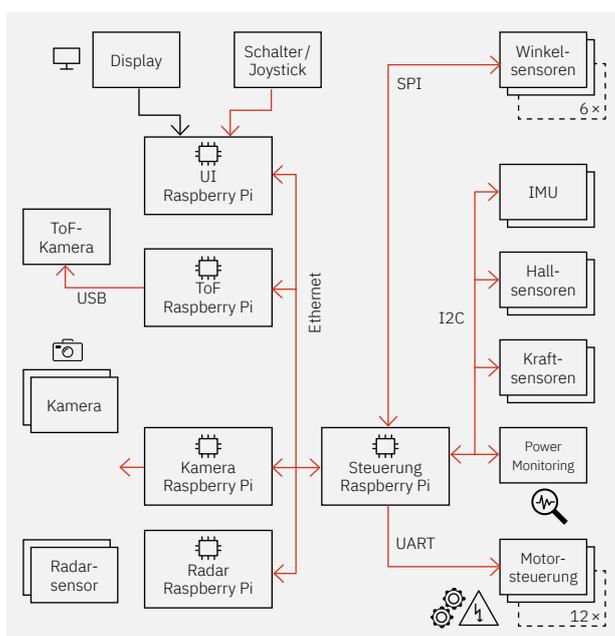


Abb.2: Mehrrechnersystem zur Steuerung des Treppensteigers

Das Steuerungssystem wurde auf der Grundlage von Raspberry Pi 3 B+ mit diversen Bus-Systemen aufgebaut z. B. Ethernet, I2C-Bus, SPI-Bus, RS232. Zur Erreichung einer gewissen Echtzeitfähigkeit bei den Raspberry-Rechnern wurde der PREEMPT\_RT Patch (Fully Preemptible Kernel) eingespielt. Damit wurde eine maximale Antwortzeit von 80  $\mu$ s sichergestellt. Für die Kommunikation über die Ethernet-Schnittstelle wird das User Datagram Protocol (UDP) verwendet. Dies ist ein verbindungsloses Protokoll, wodurch keine Verzögerungen durch erneutes Senden von verlorenen Datenpaketen entstehen. Dies ermöglicht eine vorhersehbare Antwortzeit und somit eine Echtzeit-Übertragung der Daten.

## Aufbau und Realisierung

Die Überprüfung des Antriebkonzepts wurde anhand eines Prototypvorläufers durchgeführt, der eine Dreiecksform besaß und sich auf zwei Stufen im Abstand von 60 cm abstützt.

Es konnte nachgewiesen werden, dass die Antriebs-einheiten auf einer geraden Treppe funktionsfähig sind und eine Treppe erklimmen können. Parallel dazu wurde das gleiche Ergebnis mit einer ADAMS-Simulation (ADAM 2017) für den Treppensteiger in Rautenform erzielt. Hier konnte nachgewiesen werden, dass auch Wendeltreppen für die Rautenform mechanisch kein Hindernis darstellen. Steuerungstechnisch stellen Wendeltreppen allerdings eine größere Herausforderung dar. Die Konstruktions-da-ten wurden mit Creo 6 erstellt.

Zum Aufbau des aktuellen Prototyps wurde die Rauten-form verwendet und die Lastenplattform einstellbar montiert. Für den Bug- und den Heckmotor wurden Motoren mit 250 W und einem Drehmoment von 80 Nm eingesetzt. Die Translationsmotoren in der Mitte wurden mit 250 W und 8 Nm dimensioniert.

Die Konstruktion wurde ebenfalls in Creo durchge-führt und kritische Situationen in MATLAB und ADAMS überprüft. Zum Betrieb des Gesamtsystems wurde eine Blockstruktur entwickelt, die es erlaubt, das System auch in Teilfunktionen in Betrieb zu nehmen. Die Teilfunktio-nen enthalten z. B. die Steuerung der Antriebseinheiten

[1] Ascendor, Plattformtreppenlift: <https://www.ascendor.at/>, 09.03.2020.

[2] Alber, Scalamobil: <https://www.alber.de/>, 09.03.2020.

[3] Scewo: <https://scewo.ch/bro/>, 09.03.2020.

[4] C. Clouser, Steueralgorithmus eines treppensteigenden Rollstuhls, Projektarbeit, Hochschule Karlsruhe, 2017.

[5] Pfitzenmaier, N., Schiff, L., Elektronik- und Steuerungsentwicklung für die Inbetriebnahme eines Treppensteigers, Projektarbeit, Hochschule Karlsruhe, 2019.

[6] Pfitzenmaier, N., Entwicklung und Realisierung eines Steuerungssystems zum automatisierten Betrieb eines Treppensteigers, Bachelorthesis, Hochschule Karlsruhe, 2020.



Abb. 3: Treppensteiger-Prototyp mit vier rautenförmig angeordneten Sternrädern (Foto: Andreas Reeg)

aufgrund der lokalen Sensordaten. Hierbei wurde darauf geachtet, möglichst viele abgeschlossene Einheiten zu bilden, um die Handhabbarkeit des Gesamtsystems zu gewährleisten.

## Stromversorgung

Zur Versorgung der Motoren und der gesamten Steuereinheit steht ein Lithium-Ionen-Akkumulator mit einer Kapazität von 50 Ah und einer Nennspannung von 25,2 V zur Verfügung. Zur Entkopplung von Antriebseinheiten und Steuerungstechnik und zur Bereitstellung verschiedener Versorgungsspannungen wurden spezielle Stromverteilungsplatinen erstellt und in Betrieb genommen. Ebenso wichtig war die Leitungsführung von Steuer- und Hochstromleitungen um EMV-Probleme zu vermeiden. Im Steigbetrieb benötigt der Treppensteiger etwa 300 W.

## Fazit und Ausblick

In dem Projekt Treppensteiger konnte die Funktionalität des gewählten Konstruktionsprinzips gezeigt werden. Es wurde eine Maschine entwickelt, die in der Lage ist, sowohl Lasten als auch Personen eine Treppe hoch und herunter zu befördern. Basierend auf der Rautenform und den Antriebseinheiten in Sternform konnten Eigenschaften erreicht werden, die das Ziel sowohl gerade Treppen als auch Wendeltreppen befahren zu können, erfüllen. Dies gilt auch für die Anforderung einen Menschen mit etwa 100 kg befördern zu können. Eine Vielzahl von Ansätzen zum autonomen Befahren einer Treppe konnten realisiert werden, aber bislang noch nicht zu einem perfekten System weiterentwickelt werden. ✘

### Autoren

**Prof. Dr.-Ing. Gerhard Schäfer**  
Professor an der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik der HKA

### Jan Schmitt M.Sc.

Akademischer Mitarbeiter an der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik der HKA

### Bruno Kempf B.Eng.

Akademischer Mitarbeiter an der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik der HKA

### Nick Pfitzenmaier

### Christian Clouser

Projektbeteiligte Studierende an der Fakultät für Elektro- und Informationstechnik der HKA

### Kontakt

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Schäfer  
Hochschule Karlsruhe  
Fakultät für Elektro- und Informationstechnik  
Moltkestraße 30  
76133 Karlsruhe  
E-Mail: [gerhard.schaefer@h-ka.de](mailto:gerhard.schaefer@h-ka.de)



Unser  
Erfolg  
hat viele  
Gesichter

Als Sondermaschinenbauer sind wir Impulsgeber und Technologieführer bei individuellen Verpackungslösungen und bauen unsere Marktposition mit neuen Angeboten aus. Dafür brauchen wir Sie! Ihr topaktuelles Fachwissen, Ihre systematische Vorgehensweise, Ihre hohe Motivation. Gestalten Sie gemeinsam mit über 450 Mitarbeitern an neun Standorten weltweit unseren Erfolg!



[www.koch-pac-systeme.com](http://www.koch-pac-systeme.com)

 **KOCH**  
UHLMANN GROUP

Unsere Zukunft – mit Ihnen!  
Wir suchen (m/w/d):

#### Absolventen

- Maschinenbau
- Elektrotechnik
- Wirtschaftsingenieurwesen
- Wirtschaftsinformatik

#### Bacheloranden Praktikanten

Mehr zu Berufsbildern und Bewerbung:  
[www.koch-pac-systeme.com/karriere](http://www.koch-pac-systeme.com/karriere)

 **Steinbeis**

## STEINBEIS – TRANSFERPARTNER DER HOCHSCHULE KARLSRUHE

Eine **Unternehmensgründung** ist Vertrauenssache. Steinbeis ist ein starker Partner für junge Gründer wie auch Professoren und Hochschulangehörige, die neben der eigentlichen Lehre ihre Expertise gemeinsam mit Partnern in Wirtschaft und Industrie in die **Praxis** bringen wollen: Davon profitieren Hochschule und Wirtschaft gleichermaßen – die Praxisnähe sichert die Aktualität der Lehre, der wissenschaftliche Fortschritt der Hochschule fördert direkt den Marktvorsprung der Unternehmen. Mit diesem Konzept hat sich Steinbeis seit Beginn der 1980er-Jahre zu einer der größten **Start up-Plattformen** in Europa entwickelt.

Die **Hochschule Karlsruhe** und **Steinbeis** verbindet eine Jahre lange sehr erfolgreiche Zusammenarbeit im unternehmerischen Wissens- und Technologietransfer, die 2008 zum Kooperationsunternehmen Steinbeis Transferzentren GmbH an der Hochschule Karlsruhe geführt hat: Verlässlich und unbürokratisch finden hier vor allem kleine und mittlere Unternehmen Ansprechpartner für Forschung, Entwicklung und Beratungsprojekte.



**GRÜNDEN mit Steinbeis**



**STEINBEIS in der Region Karlsruhe**

# Mit den richtigen Instrumenten gelingt allen ein Meisterwerk.



Heidelberg ist seit vielen Jahren ein wichtiger Anbieter und Partner für die globale Druckindustrie. Das Unternehmen betreut seine Kunden weltweit und bietet den gesamten Workflow für gewerbliche und industrielle Anwender. Dank unseres umfassenden technologischen Knowhows adressieren wir auch neue Märkte im Bereich Lade- und Automatisierungstechnik.



Steigen Sie ein in Robotics & Automation by HEIDELBERG mit Praktikum, Abschlussarbeit oder Direkteinstieg.  
**Jetzt bewerben unter: [heidelberg.com/karriere](https://www.heidelberg.com/karriere)**

# PeTRA – Autonomer Personentransport in Krankenhäusern

Andreas Zachariae, Frederik Plahl, Christian Wurll und Björn Hein

**DE** Das Pflegepersonal in Krankenhäusern ist durch zeitaufwändige Transportaufgaben stark gefordert. Um im Kontext des Pflegenotstands weiterhin „gute Pflege“ leisten zu können, ist eine Entlastung notwendig. Das durch das BMBF geförderte Projekt „PeTRA“ hat das Ziel, den Personentransport in Krankenhäusern zu automatisieren. Dieser Beitrag zeigt die Forschungsansätze der Hochschule Karlsruhe im Bereich des autonomen Personentransports. Neben einer modularen Softwarearchitektur und intuitiven Benutzerschnittstellen wurde an einer Überwachung des Gesundheitszustands beim Personentransport geforscht. Zusätzlich integriert die Hochschule Karlsruhe alle Ergebnisse der Projektpartner in einem Demonstrator.

**EN** Nursing staff in hospitals are under great strain due to time-consuming transport tasks. To be able to continue to provide “good care” in the context of the nursing shortage, relief is necessary. The BMBF-funded project “PeTRA” aims to automate the transport of patients. This article shows the research approaches of the Karlsruhe University of Applied Sciences in the field of autonomous person transport. In addition to a modular software architecture and intuitive user interfaces, research was conducted on monitoring the health status during the transport. In addition, Karlsruhe University of Applied Sciences integrates all results of the project partners in a demonstrator.

Der Transport von Patienten von Stationen zu Untersuchungen gehört zum alltäglichen Prozess in einem Krankenhaus. Ein solcher Personentransport wird aktuell auch von ausgebildeten Pflegekräften durchgeführt, die in dieser Zeit auf der Station fehlen und keine Pflgetätigkeiten ausführen können. Es fallen zudem viele Laufwege ohne eigentlichen Transport an:

1. Weg zum Abholort des Patienten (leer)
2. Transport zum Zielort
3. Rückweg der Pflegekraft (leer)
4. Weg zum Abholen des Patienten nach der Untersuchung (leer)
5. Rücktransport des Patienten

Um dabei effizient Zeit zu sparen, werden die Patienten hauptsächlich in Betten durch das Krankenhaus geschoben, obwohl einige durchaus selbstständig gehen können. Durch die aktuell angewendete Transfermethode wird weder die Mobilität der Patienten gefördert noch können sie selbst entscheiden, ob und wie sie gehen möchten.

## PeTRA

Über das vom BMBF geförderte Forschungsprojekt wird ein Personen-Transfer-Roboter-Assistent (PeTRA) entwickelt, um diese Probleme zu lösen. Das Ziel des PeTRA-Projekts ist, die Pflegekräfte vom zeit- und personalaufwändigen Personentransport zu entlasten um mehr Zeit für „gute Pflege“ zu haben <sup>[1]</sup>. Dazu wird in enger Zusammenarbeit mit Praxis-

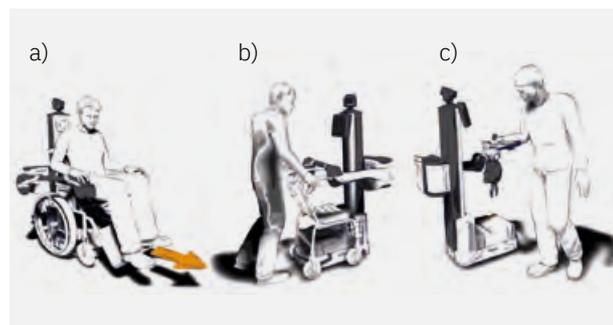


Abb. 1: Multi-Mobilitäts-Methoden von PeTRA (Quelle: <sup>[1]</sup>)

[1] PeTRA Konsortium (2020). Personen-Transfer Roboter-Assistent (PeTRA): Projekt im Rahmen der BMBF-Bekanntmachung „Robotische Systeme für die Pflege“. <http://patiententransportassistent.de/#content-3> (besucht am 28.03.2022).

[2] Faconti, D. (2020). BehaviorTree.CPP. <https://behaviortree.github.io/BehaviorTree.CPP/> (besucht am 28.03.2022).

[3] Ren, L., & Peng, Y. (2019). Research of Fall Detection and Fall Prevention Technologies: A Systematic Review. IEEE Access, 7, 77702–77722. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2922708>

[4] Cao, Z., Hidalgo Martinez, G., Simon, T., Wei, S. & Sheikh, Y. A. (2019). OpenPose: Realtime Multi-Person 2D Pose Estimation using Part Affinity Fields. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.

partnern aus drei verschiedenen Krankenhäusern ein autonomer, mobiler Roboter entwickelt. Das Projektkonsortium besteht zudem aus den technischen Partnern KUKA, RWTH Aachen, Hochschule Karlsruhe und dem IREM der Hochschule Würzburg-Schweinfurt als pflegewissenschaftliche Schnittstelle.

Mit durchgängiger Projektbegleitung nach ELSI+ und durch Berücksichtigung des EPT-Kriterien-Sets (Economical, Practical and Technological) wurde in Workshops gewährleistet, dass sich die Lösungsansätze an den Bedürfnissen der Pflege-Praxis und den Pflegenden ausrichten.

PeTRA bietet verschiedene Transfermodi, die jeder Patient individuell nach Bedarf nutzen kann, siehe Abbildung 1. Der autonome Personentransport wird umgesetzt mit einem Griff zum geführten Gehen (c), sensorischer Kopplung für Rollatoren (b) und einer modularen Plattform für Rollstühle (a). Diese Plattform dient zum sicheren Rollstuhltransport und kann autonom gekoppelt werden. Außerdem können mit einem integrierten Roboterarm Serviceaufgaben umgesetzt werden. Dazu zählt zum Beispiel der Materialtransport von Medikamenten oder Blutproben zwischen den Stationen.

## Forschung an der Hochschule Karlsruhe

Die Hochschule Karlsruhe ist im Projekt PeTRA hauptsächlich für die Softwareentwicklung verantwortlich und beschäftigt sich mit folgenden Bereichen:

- + Softwarearchitektur mit ROS 2
- + Behavior Trees und Missionsplanung
- + Mensch-Maschine-Interaktion
- + Patientenmonitoring
- + Navigation mit Anhänger
- + Autonome Kopplung

## Softwarearchitektur

Die Ablaufsteuerung des Personentransports beruht auf dem Konzept der Behavior Trees und wurde mit dem Framework BehaviorTree.CPP<sup>[2]</sup> und dem Robot Operating System (ROS2) implementiert. Diese bieten eine flexible Erstellung und intuitive Darstellung der komplexen Verhaltensmuster des mobilen

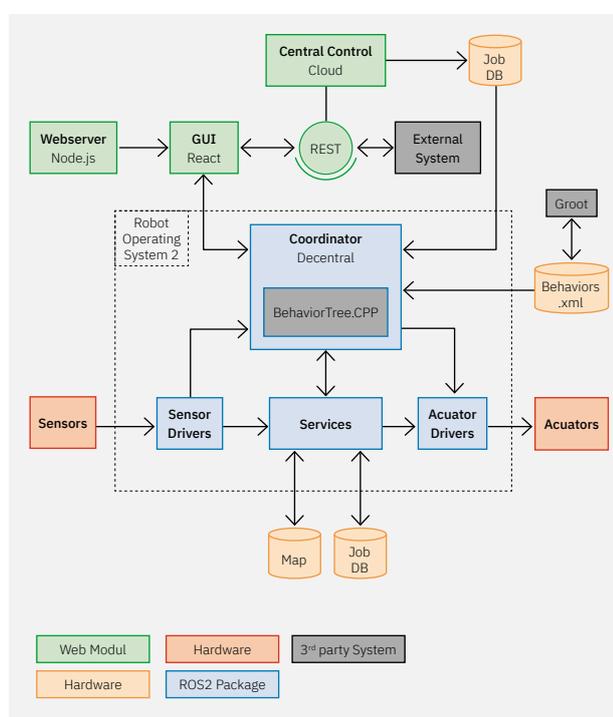


Abb. 2: Softwarearchitektur von PeTRA

Roboters. In Abbildung 2 ist die entsprechende Architektur schematisch dargestellt. Die ROS2-Module (blau) verarbeiten Sensordaten und steuern die Aktoren (rot). Die zentrale Steuerung zur Auftragsverwaltung bietet eine REST-Schnittstelle, mit der die graphische Benutzeroberfläche des Tablets (grün) sowie externe Systeme kommunizieren können (grau).

## Benutzerschnittstellen

Die Mensch-Maschine-Interaktion wird über verschiedene Schnittstellen realisiert. Einerseits kann der Roboter per Sprachbefehl gesteuert werden. Die Sprachausgabe und Übersetzungsfunktion ermöglichen hierbei eine Kommunikation über Sprachbarrieren hinweg. Andererseits können über ein Tablet mit zielgruppenoptimierter Bedienung Informationen ausgetauscht und Befehle gegeben werden, siehe Abbildung 3.



Abb. 3: Benutzerschnittstelle am Tablet

## Patientenmonitoring

Zur Sicherstellung der Gesundheit der Patienten während der Fahrt wird mit einer 3D-Tiefenkamera und einem neuronalen Netz zur Posenerkennung der Zustand der Patienten überwacht. Bei Stürzen, Quetschgefahr oder Ohnmacht kann somit unmittelbar Hilfe angefordert werden. Während eines Transports können viele unvorhergesehene Situationen eintreten, nicht alle davon sind gefährlich und erfordern einen Notruf. Manche Tätigkeiten gehören zu normalen alltäglichen

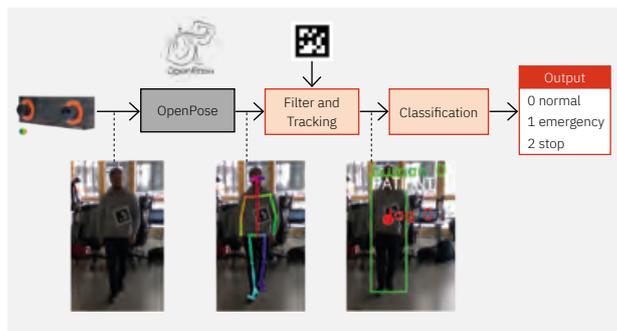


Abb. 4: Pipeline zur Verarbeitung der Kameradaten

Handlungen, sind aber sehr schwer von kritischen Situationen zu unterscheiden wie zum Beispiel das Hinknien zum Schuhebinden oder Bücken nach einem Gegenstand. Zusätzlich zum normalen Laufen erfordern die Transportmodi mit Rollator und Rollstuhl eine zuverlässige Erkennung auch bei sitzenden oder halb verdeckten Personen. In der Forschung wurden bisher vor allem statische Szenen für die Sturzerkennung in Altersheimen betrachtet. Dabei wird mit Kameras an der Decke oder tragbaren Beschleunigungssensoren mittels klassischer Algorithmen ein Sturz erkannt [9]. Im Projekt PeTRA werden im Gegensatz dazu verschiedene Transportmodi in einer stark dynamischen Umgebung mit mehreren Personen betrachtet. Dies macht den Anwendungsfall zunehmend komplex. Für den realen Transport im Krankenhaus sind nur drei Zustände relevant:

1. Normal: Gehen, Rollator schieben, Sitzen im Rollstuhl, alltägliche Situationen  
→ Transport wie geplant
2. Notfall: Sturz, mit Rollator stolpern, ohnmächtig im Rollstuhl  
→ Transportstopp und Notruf an Pflegepersonal
3. Anhalten: Person zu weit weg, Aufstehen aus Rollstuhl, Quetschgefahr  
→ Transportstopp

Um diese Zustände zuverlässig zu klassifizieren, werden für maschinelle Lernverfahren viele Beispielszenen benötigt. Der hier gesammelte, möglichst realitätsnahe Datensatz enthält 168 Videos mit insgesamt über 10.000 Einzelbildern von vier verschiedenen Personen. In Abbildung 4 ist die Datenverarbeitungspipeline von der Kamera bis zur Ausgabe der Klasse dargestellt.

Die gesamte Pipeline wurde mit ROS2 implementiert. Angefangen bei der Aufnahme der Bilder mit einer Roboception-Tiefenkamera werden diese an OpenPose gesendet. OpenPose ist ein CNN zur echtzeitfähigen Erkennung mehrerer menschlicher Posen in einem 2D-Bild [4]. Es wurde entwickelt vom Perceptual Computing Lab der Carnegie Mellon University und öffentlich zur Verfügung gestellt. Die extrahierten Keypoints, die die Positionen von Gelenken und markanten Körperteilen aller erkannten Personen angeben, werden anschließend nach dem relevanten, zu

# PeTRA ermöglicht den autonomen und sicheren Personentransport bei gleichzeitiger Entlastung der Pflegekräfte.

transportierenden Patienten gefiltert. Dazu wird die entsprechende Person über jeden Frame getrackt und alle anderen Keypoints verworfen. Um die Genauigkeit zu erhöhen, kann der Patient hierfür einen AprilTag tragen. Die Keypoints des Patienten werden mit dem Tiefenbild „gematched“, um auch die Abstände der Körperteile zur Kamera zu erhalten. Mit diesen Daten ermittelt der Klassifikator einen der drei Zustände. Der Klassifikator verfügt über verschiedene Komponenten. Hauptsächlich wird ein Neuronales Netz (MLP) verwendet, das mit dem Trainingsdatensatz trainiert wurde und dafür zuständig ist, die Notfallsituationen zu erkennen. Auf den Testdaten kommt dieses auf eine Genauigkeit von 98,9 % richtig klassifizierter Einzelbilder. Andere untersuchte Verfahren waren Support-Vector-Machines (SVC) und Random Forests, welche 2 bis 4 Prozentpunkte schlechter „performed“ haben. Zusätzlich wurden logische Bedingungen aufgestellt, um einen Transportstopp auszulösen. Dafür wird zum Beispiel beim Rollstuhltransport eine sichere Zone definiert, in der sich die Hand befinden darf. Ist die Hand außerhalb des Bereichs besteht Quetschgefahr und der Transport wird angehalten, bis der Patient die Arme wieder eingezogen hat. Zuletzt wird das Ergebnis des Klassifikators über die Zeit betrachtet, um sicherzustellen, dass es zu keiner zufälligen Fehlklassifikation kommt. Aus dem Trainingsdatensatz hat sich ergeben, dass der Klassifikator nach 0,5 Sekunden konsistent richtig entscheidet. Erst danach wird die Klasse als Output verarbeitet und löst die hardwareseitige Reaktion aus. Der Output „Anhalten“ führt zu einem Pausieren der Navigation. Der „Notfall“ löst einen visuellen und auditiven Alarm aus, alarmiert Pflegepersonal und kann nur nach Bestätigung aufgelöst werden.

## **Aufbau des Demonstrators**

Aktuell wird an der Hochschule Karlsruhe der Demonstrator des PeTRA-Systems aufgebaut. Basis ist hier eine KMP-600-S-Plattform vom Projektpartner KUKA. Darauf wurde ein Aufbau mit SPS, IO-Board, GPU-Einheit und zusätzlichem Computer verbaut, um die Berechnungen für die autonome Navigation und das Patientenmonitoring live durchführen zu können. Zudem ist die Plattform mit einer drehbaren Koppelseinheit und einer Linearachse für einen Roboterarm

ausgestattet. Der Arm soll zukünftig die Interaktion mit dem Patienten unterstützen und auch verschiedene Objekte manipulieren können. Somit könnte eine fertige Plattform zusätzlich auch Aufgaben wie den Transport von Laborproben im Krankenhaus übernehmen.

## **Fazit**

PeTRA ermöglicht den autonomen und sicheren Personentransport bei gleichzeitiger Entlastung der Pflegekräfte. Zusätzlich werden die Mobilität und Autonomie der Patienten gefördert und durch multilinguale Schnittstellen die Kommunikation erleichtert. Die Forschung am autonomen Transport wird von der Forschungsgruppe Robotik und Autonome Systeme (iRAS) am neuen HKA2030+ Campus vorangetrieben. In diesem Artikel wird deutlich, wie eine Lösung der aktuell angespannten Lage der Krankenhäuser in Bezug auf den Pflegenotstand aussehen kann. Bis zum Projektende 2023 wird weiter intensiv an der Navigation mit einem Anhänger und der autonomen Kopplung geforscht. ✕

### **Autoren**

**Andreas Zachariae B.Sc.**

**Frederik Plahl B.Sc.**

Akademischer Mitarbeiter in der Forschungsgruppe „Robotik und autonome Systeme“ am IAF der HKA

**Prof. Dr.-Ing. Christian Wurl**

Professor an der Fakultät für

Wirtschaftswissenschaften der HKA

**Prof. Dr.-Ing. habil. Björn Hein**

Professor an der Fakultät für

Wirtschaftswissenschaften der HKA

### **Kontakt**

Prof. Dr.-Ing. Christian Wurl

Hochschule Karlsruhe

Fakultät für Wirtschaftswissenschaften

Forschungsgruppe „Robotik und Autonome Systeme“ (iRAS) am Institut für Angewandte Forschung

Wilhelm-Schickard-Straße 9, Gebäude F

76131 Karlsruhe

E-Mail: christian.wurl@h-ka.de



## Career → ← Contacts

Firmenkontaktmesse der Hochschule Karlsruhe

[www.h-ka.de/careercontacts](http://www.h-ka.de/careercontacts)



24.-28.10.  
Campus  
10-16 Uhr

Save the  
date!

### Impressum

Forschung aktuell 2022  
Hochschule Karlsruhe

Herausgeber  
Rektorat der Hochschule Karlsruhe

Redaktion und  
Wissenschaftslektorat  
Leitung: Hendrik Hunsinger  
Presse und Kommunikation – HKA

Design  
Capitale Wien & Berlin  
[www.capitale.wien](http://www.capitale.wien),  
[www.capitale.berlin](http://www.capitale.berlin)

Satz, Artdirection und Grafiken  
Swetka Bär  
Presse und Kommunikation – HKA

Redaktionsanschrift  
Hochschule Karlsruhe  
University of Applied Sciences  
Presse und Kommunikation  
Moltkestraße 30, 76133 Karlsruhe  
E-Mail: [forschung-aktuell@h-ka.de](mailto:forschung-aktuell@h-ka.de)  
[www.h-ka.de/forschung-aktuell](http://www.h-ka.de/forschung-aktuell)

Anzeigen und Verlag  
ALPHA Informationsgesellschaft mbH  
[www.alphapublic.de](http://www.alphapublic.de)

Druck  
Kössinger AG & Co. KG  
[www.koessinger.de](http://www.koessinger.de)

Auflage  
3.000 Exemplare  
Juni 2022

ISSN 1613-4958

Bildquellen  
Titel Gyroid: Leonie Wallat;  
Titelbild-Collage: Swetka Bär  
S. 2.1 Magali Hauser; S. 2.2 iStock/  
Cavan Images; S. 3.1 plainpicture/  
Willing-Holtz; S. 3.2 iStock/MF3d

Inhaltliche Verantwortung  
Für den Inhalt der Beiträge sind die  
Autoren verantwortlich.

Anzeigen

## Willkommen beim Technologieführer



Inspired by  
temperature

huber

Sie suchen Freiräume für Ihre Ideen und gute Karrierechancen?  
Dann heißen wir Sie herzlich willkommen in der Tangofabrik in  
Offenburg – dem kältesten Punkt der Ortenau. Hier entwickeln  
und produzieren wir seit über 50 Jahren hochgenaue  
Temperierlösungen für Forschung und Industrie.

[www.huber-online.com/jobs](http://www.huber-online.com/jobs)



# Forschen, wo sonst niemand forscht. Präzision neu definieren.



Seeing beyond



Über 700  
offene  
Stellen!

## Forschung und Entwicklung in der Halbleiterfertigungstechnik

Es hat nicht viel gefehlt – beinahe wäre Kathrin Kamerafrau geworden. „Nach dem Abi musste ich mich entscheiden: Dokumentarfilm oder Physikstudium? Wissen vermitteln oder Wissen schaffen?“ Sie entschied sich für den Einstieg in die Wissenschaft – und forscht heute an der Halbleiterfertigungstechnologie von morgen. Mit ihrer Arbeit gehen sie und ihr Team immer wieder neue Wege. „Da wo wir hinwollen, geht kein anderer hin. Ich mag diese Herausforderung!“ Kathrin ist Gruppenleiterin für Optikechnologie in der Halbleiterfertigungssparte von ZEISS. Gemeinsam mit ihrem Team forscht sie an der Optimierung von Politurprozessen und leitet Entwicklungsteams. „Ich manage kluge Köpfe. Gemeinsam treiben wir die Präzision der Halbleiter-Lithographie voran – auf Sub-Nanometer-Ebene.“

Erfahre mehr über Kathrin und Jobs in der Halbleiterfertigungstechnik: [zeiss.de/arbeitenbeizeiss](https://zeiss.de/arbeitenbeizeiss)

# Warum wir sagen, dass wir die Welt bewegen?



Klingt interessant?  
Praktikum, Werkstudierendentätigkeit,  
Abschlussarbeit oder Direkteinstieg.  
Jetzt bewerben!  
[www.sew-eurodrive.de/studenten](http://www.sew-eurodrive.de/studenten)

**ANTRIEB  
BEWEGT  
ZUKUNFT**  
BEWEG  
MIT