

Uwe Großmann/Ingo Kunold (Hrsg.)

Smart Energy and Systems 2019

Digitalisierung –
Anwendungen in Technik und Industriegesellschaft

■ E-Business

vwh

Großmann/Kunold (Hrsg.) · Smart Energy and Systems 2019

Uwe Großmann / Ingo Kunold (Hrsg.)

Smart Energy and Systems 2019

**Digitalisierung – Anwendungen
in Technik und Industriegesellschaft**

vwh
Verlag Werner Hülsbusch
Fachverlag für Medientechnik und -wirtschaft

U. Großmann / I. Kunold (Hrsg.): Smart Energy and Systems 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet unter <http://d-nb.de> abrufbar.

© Verlag Werner Hülsbusch, Glückstadt, 2019

vwh Verlag Werner Hülsbusch
Fachverlag für Medientechnik und -wirtschaft

www.vwh-verlag.de

Einfache Nutzungsrechte liegen beim Verlag Werner Hülsbusch, Glückstadt.
Eine weitere Verwertung im Sinne des Urheberrechtsgesetzes ist nur mit
Zustimmung der Herausgeber möglich.

Markenerklärung: Die in diesem Werk wiedergegebenen Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenzeichen usw. können auch ohne besondere Kennzeichnung geschützte Marken sein und als solche den gesetzlichen Bestimmungen unterliegen.

Korrektur und Satz: Werner Hülsbusch

Umschlag: design of media, Lüchow

Druck und Bindung: Schaltungsdienst Lange oHG, Berlin

Printed in Germany

ISBN: 978-3-86488-159-6

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	9
<i>Ingo Kunold</i>	
1 Digitalisierung und autonome Systeme	11
Hardware-Architekturen für maschinelles Lernen in eingebetteten und verteilten Systemen	12
Ein kurzer Überblick	
<i>Hendrik Wöhrle, Michael Karagounis</i>	
Das Ende des Blindflugs	21
Wie Big Data und KI den Verteilnetzbetrieb revolutionieren werden	
<i>Fabian Karl, Nikolai Hopfer, Markus Zdrallek</i>	
Konzeptionierung eines auf Semantic-Web-Technologien basierenden Digitalen Zwillinges im Smart-Home-Kontext	32
<i>Markus Kuller, Fabian Kohlmorgen, Nursi Karaođlan, Marco Niemeyer, Ingo Kunold</i>	
Prognose des Strompreises in Deutschland mithilfe neuronaler Netze	50
<i>Felix Wentzel, Alexander Stuckenholz</i>	
2 Intelligente Energiesysteme	55
Autarke Stromversorgung in lokalen Netzen mit speichergestützten Kleinwindanlagen	56
<i>Matthias Wendel</i>	
Virtuelles Kraftwerk Neckar-Alb: eine Demonstrations- und Versuchsanlage	65
<i>Florian Heimgärtner, Bernhard Nold, Frank Truckenmüller, Michael Menth</i>	

Integration eines multifunktionalen Wärmepumpensystems als Hardware-in-the-Loop in ein Niederspannungsnetzmodell	70
<i>Maximilian Rödder, Thomas Spiegel, Lena Frank, Matthias Neef, Mario Adam</i>	
Möglichkeiten und Anwendungen zellularer Energienetze	78
<i>Reiner Johannes Schütt, Carina Balke</i>	
Erschließung neuer Einsatzoptionen für Batteriegroßspeicher zur Realisierung einer kombinierten Vermarktungsstrategie	90
<i>Robert Schmidt, Evgeny Schnittmann, Benedikt Dahlmann, Markus Zdrallek, Thomas Arnoneit</i>	
Elektrische Verbindungstechnik für smarte und autonome Systeme	96
<i>Kevin Krüger, Haomiao Yuan, Jian Song</i>	
3 Connected, Safe and Green Mobility	109
Die Zukunft der Brennstoffzelle als Ersatz für die Batterie	110
Konzeptstudie mit Computersimulation – exemplarisch am Fahrzeug Tesla Model S dargestellt	110
<i>Marius Geller, Norbert Kluck, Marc Steffens</i>	
Erfolgsfaktoren für die Wasserstoffmobilität in Deutschland	126
<i>Matthias Schlegel, Peter Brucksch2</i>	
Die Zukunft der Automobil-Antriebe ist nicht nur elektrisch	135
Die speichergespeiste Wärmekraftmaschine „Thermo-Hybrid Heat Engine Carnot 2.0“ als eine mögliche Alternative	
<i>Martin Doster</i>	
Towards a Simple Decision Criterion	153
Selection of Application Server Runtime Environment Based on End-to-End Latency	
<i>Jithin Reju, Rolf Schuster, Wolfgang Theimer</i>	

Inhaltsverzeichnis	7
76–79 GHz Automotive Radar Test System Based on Radar Target Simulator <i>Aybars Kizilay, Andreas Becker</i>	176
4 Energie und Umwelt	183
Das Potenzial von systemrelevanten Verbrauchern <i>Christian Schweitzer, Jens-Martin Walther, Sten Wranik</i>	184
Gebäudeintegrierte Solarthermie <i>Helmut Hachul, Daniela Ridder, Thiemo Ebbert</i>	196
Self-Learning Predictions for Optimizing Power Plant Operation and Energy Trading <i>Britta Hilt</i>	203
Die Referenten / Autoren	213
Die Herausgeber	219
Programmbeirat der Konferenz „Smart Energy and Systems“ 2019	221

Vorwort

In diesem Jahr findet die 10. Fachtagung *Smart Energy and Systems* in Dortmund statt. Das diesjährige Motto der Konferenz lautet *Digitalisierung – Anwendungen in Technik und Industriegesellschaft*. Veranstaltet wird die Tagung auch in diesem Jahr unter der Federführung des Instituts für Kommunikationstechnik durch die Ruhr Master School (FH Dortmund, Hochschule Bochum und Westfälische Hochschule) in Zusammenarbeit mit der Alcatel-Lucent-Stiftung und der VDI-Fachgesellschaft Energie und Umwelt.

Der vorliegende Tagungsband fasst die Vorträge der Tagung in vier thematischen Blöcken zusammen.

Im *ersten Teil* stehen Themen der Digitalisierung und autonomer Systeme im Mittelpunkt. Die Autoren beschäftigen sich mit smarten IoT-Netzwerken und Systemen sowie mit Anwendungen der künstliche Intelligenz in diesem Umfeld. IoT-Systeme im Smart Home sowie Aspekte der semantischen Interoperabilität stehen in Relation zu aktuellen Projekten und Aktivitäten des ZVEI.

Im *zweiten Abschnitt* werden intelligente Energiesysteme diskutiert. Es werden IT-Aspekte des Smart Grid, der Einsatz von Data-Analytics-Methoden bei der Netzausbauplanung und Speicherkonzepte in Verbindung mit regenerativen Erzeugern und systemrelevanten Verbrauchern behandelt. IoT-Systeme in urbanen Strom- und Wärmenetzen stehen in Relation zu aktuellen Projekten des Forschungsverbundes RuhrValley.

Im *dritten Abschnitt* werden Einblicke in aktuelle Forschungsprojekte im Bereich Connected, Safe and Green Mobility gegeben. Die Beiträge umfassen die Themen Assisted Driving, Smart Mobility und V2X Communication. Referenten aus Industrie und Hochschulen berichten hier über ihre aktuellen Arbeiten.

Der *vierte Abschnitt* fokussiert Digitalisierungsaspekte im Bereich Energie und Umwelt. Im Vordergrund stehen hier in diesem Jahr Aufgaben in den Bereichen Predictive Maintenance, Anlagenmanagement sowie alternative Kraft-/Treibstoffe. Die Arbeiten stehen im Zusammenhang mit den Aktivitäten der VDI-Fachgesellschaft Energie und Umwelt. Die Autoren aus Wirtschaft und Wissenschaft berichten jeweils über aktuelle Projekte, Trends und Normungsaktivitäten.

Wie in den zurückliegenden neun Jahren wird die Tagung durch die Alcatel-Lucent-Stiftung für Kommunikationsforschung (Stuttgart) unterstützt. Im Rahmen der Förderung der Ruhr Master School unterstützt die Stiftung MERCATOR auch in diesem Jahr die Tagung und ermöglicht so die Diskussion im technisch-gesellschaftlichen Kontext.

Ein besonderer Dank gilt auch den Beiratsmitgliedern der Konferenz für ihre Unterstützung bei der Planung der Tagung und Ansprache der Referenten. Für die Erstellung des Tagungsbandes und die Organisation der Internet-Präsenz haben sich besonders Frau Rebecca Hegemann-Rockel (M.A.), Herr Thorsten Ruben und Herr Dieter Schuller eingesetzt. Auch ihnen gebührt Dank für ihren unermüdlichen Einsatz. Gleiches gilt für die Mitarbeiter und wissenschaftlichen Hilfskräfte des IKT, die die Vorbereitung und reibungslose Durchführung der Tagung ermöglicht haben.

Insbesondere sei dem Rektor der Fachhochschule Dortmund, Herrn Prof. Dr. Schwick, für die stetige Begleitung und Förderung der Tagung gedankt. Auch der Deutschen Arbeitsschutzausstellung (DASA) gilt aufrichtiger Dank für die sehr gute Zusammenarbeit und die seit nunmehr zehn Jahren bewährte Unterstützung.

Dortmund, im November 2019

Ingo Kunold

1 Digitalisierung und autonome Systeme

Hardware-Architekturen für maschinelles Lernen in eingebetteten und verteilten Systemen

Ein kurzer Überblick

Hendrik Wöhrle¹, Michael Karagounis²

¹ Institut für Kommunikationstechnik, Fachhochschule Dortmund
hendrik.woehrle@fh-dortmund.de

² Fachhochschule Dortmund
michael.karagounis@fh-dortmund.de

Die Entwicklung spezialisierter Hardware-Beschleuniger für das maschinelle Lernen stellt insbesondere für die Entwicklung intelligenter mobiler Systeme eine wichtige Schlüsseltechnologie dar. Dieser Beitrag vergleicht verschiedene Hardware-Architekturen hinsichtlich ihrer Eigenschaften für das maschinelle Lernen und gibt einen Ausblick auf eine auf Open-Source-Technologien basierende Entwicklung eines besonders auf Energieeffizienz optimierten heterogenen ASICs aus RISC-V-CPU und anwendungsspezifischem IP-Core für das maschinelle Lernen.

1 Einleitung

Eine wesentliche Entwicklung im Zuge der Digitalisierung ist die zunehmende Verbreitung eingebetteter und cyberphysischer Systeme. In der Regel sind diese Systeme durch Sensoren unmittelbar in der Lage, verschiedene Eigenschaften ihrer Umwelt „wahrzunehmen“ und durch Aktoren auf sie einzuwirken. Damit die Aktionen jedoch situationsadäquat sind, müssen die Systeme die Daten der Umgebung geeignet interpretieren. Bei der Implementierung von „intelligenten“ technischen Systemen – wie zum Beispiel Robo-

tern, Smart Devices oder aber neuartigen biomedizintechnischen Systemen – ist die Verwendung von Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) daher unerlässlich. Zwar sind diese Systeme häufig mithilfe verschiedenster Kommunikationstechnologien zum sog. Internet der Dinge (engl. *Internet of Things*, IoT) und darüber hinaus auch mit leistungsfähigen Cloud-Systemen verbunden – dennoch stellt der Transfer großer Datenmengen, wie sie durch hochauflösende Sensoren erzeugt werden, ein großes Problem dar. Da die Systeme jedoch häufig Entscheidungen über die „richtige“ oder „beste“ Handlung vor Ort und in Echtzeit treffen müssen und die Zeitverzögerung durch einen Datentransfer in entfernte Rechenzentren nicht tolerieren können, werden KI-Systeme benötigt, welche die Datenanalyse lokal in den Systemen selbst durchführen (sog. *Edge Computing*) [1].

Um dennoch die notwendige Rechenleistung für die KI-Anwendungen zu liefern, werden spezielle Hardware-Architekturen und Technologien benötigt. Durch den Einsatz von Hardware-Beschleunigern bzw. anwendungsspezifischen Coprozessoren kann in bestimmten Fällen die notwendige Leistung bereitgestellt werden. Designziele aus Sicht der Hardwareentwicklung sind neben der (a) Leistungsfähigkeit jedoch auch (b) die Miniaturisierung der Systeme (d.h. sie sollen so geringe Abmessungen wie möglich aufweisen) und (c) deren Energieeffizienz. Ziel dieses Beitrages ist es, einen Einstieg und Überblick über Herausforderungen und Möglichkeiten bei der Nutzung von ML-Methoden in eingebetteten Systemen zu geben. In dem Beitrag werden dazu die zurzeit verfügbaren wichtigsten Hardware-Architekturen für maschinelles Lernen in eingebetteten Systemen und deren Eigenschaften vorgestellt und verglichen.

2 Tiefe neuronale Netze: Eigenschaften und Herausforderungen

Insbesondere eine Unterkategorie des maschinellen Lernens, die sogenannten tiefen neuronalen Netze (engl. *Deep Neural Networks*, DNNs), haben in den letzten Jahren zu wesentlichen Fortschritten in vielen Anwendungen der KI geführt, z.B. der Erkennung von Objekten in Bildern, dem Verstehen von gesprochener Sprache oder aber auch intelligentem, autonomem Verhalten von Agenten durch das Deep Reinforcement Learning [2, 3].

Im Folgenden werden die Eigenschaften von DNNs anhand des Beispiels der sog. Faltungsnetze (engl. *Convolutional Neural Networks*, CNNs) dargestellt. Diese wurden initial vor allem für die Bildverarbeitung genutzt, finden aber auch in anderen Bereichen zunehmend weitere Verbreitung.

CNNs bestehen aus unterschiedlichen Typen von Schichten. In Faltungsschichten (engl. *Convolutional Layers*) werden die Eingabedaten (die Originaldaten oder die Daten aus der vorherigen Schicht) mittels einer zweidimensionalen diskreten Filterung gefaltet. In Pooling-Schichten werden Daten zusammengefasst. Z.B. werden aus einem Bereich, der 2 mal 2 Merkmale enthält, nur der Mittelwert oder das Maximum beibehalten. Die Ausgabe wird mittels einer vollverbundenen Schicht (engl. *Fully Connected Layer*) berechnet.

Die Parameter des DNNs, d.h. die Gewichte der Filter-Kernel in den Faltungsschichten und die Gewichte der vollverbundenen Schicht, werden anhand eines gegebenen Datensatzes mit bekannten Ausgaben in einer sog. Trainingsphase zunächst gelernt. Anschließend kann das DNN produktiv eingesetzt werden, d.h. unbekannte Daten während der Inferenzphase klassifizieren.

3 Hardware-Architekturen für das maschinelle Lernen

Aus der Funktionsweise der DNNs wird deutlich, dass wesentliche zugrundeliegende arithmetische Kernprozeduren durch Matrix-Operationen darstellbar sind [4]. Matrizenoperationen sind durch ihre gleichmäßige Struktur sehr leicht parallelisierbar. Dementsprechend ist es sinnvoll, Hardware-Architekturen zu nutzen, welche einen hohen Grad an Parallelisierung bieten.

3.1 „Klassische“ Architekturen

CPUs an sich zeichnen sich zunächst durch eine strikt serielle Arbeitsweise aus. Um ein gewisses Maß an Parallelität zu bieten, wurden jedoch spezielle Erweiterungen wie *Pipelining* und sog. *Single Instruction Multiple Data* (SIMD-)Einheiten geschaffen [5]. Letztere sollten jedoch vorwiegend der

Beschleunigung der Verarbeitung von Mediendaten dienen [6]. Eine weitere Alternative sind Multicore-CPUs, die mehrere Rechenkerne bzw. Verarbeitungseinheiten (engl. *Processing Elements*, PEs). Typischerweise haben Multicore-CPUs jedoch nur eine geringe Anzahl an PEs, typisch sind vier bis acht für Desktop-Rechner oder wenige Dutzend für Server-CPUs. Ein Großteil der Chip-Fläche von heutigen Prozessoren ist für die Ausführung von Software optimiert, sodass nur ein geringer Teil der Transistoren für Berechnungen zur Verfügung steht. Klassische Desktop- und Server-Prozessoren sind auf hohe Geschwindigkeit bei einem breiten Spektrum von Programmen optimiert. Insbesondere für mobile Systeme (wie z. B. Smartphones) wurden jedoch vermehrt auch hinsichtlich Energieeffizienz optimierte Prozessoren entwickelt. Eine neue Entwicklung ist die Anwendung der Open-Source-Idee auf die Entwicklung von Prozessoren, die in der Konstruktion des RISC-V-Prozessors gipfelte [7].

Grafikprozessoren (engl. *Graphics Processing Units*, GPUs) sind auf die Verarbeitung von Grafiken spezialisierte Prozessoren. Aufgrund der Tatsache, dass Grafikberechnungen sich sehr gut parallelisieren lassen, waren GPUs von Beginn an auf massiv parallele Verarbeitung ausgelegt und bieten gegenüber CPUs eine wesentlich höhere Rechenleistung, was sie auch für die Implementierung von neuronalen Netzen interessant macht. Ein typisches, klassisches Anwendungsprogramm lässt sich aufgrund dieser Spezialisierung nicht auf einer GPU ausführen. Daher werden diese meist in Form eines Coprozessors in Verbindung mit einer CPU eingesetzt (Abb. 1).

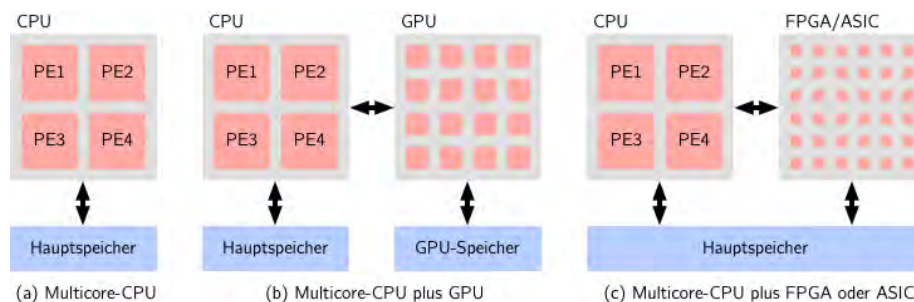


Abb. 1 Schematische Darstellung verschiedener heterogener Architekturen aus CPU und anwendungsspezifischem Hardware-Beschleuniger. Jedes rote Quadrat stellt einen Rechenkern bzw. Verarbeitungseinheit (engl. *Processing Element*, PE) dar.

Rekonfigurierbare Logik und speziell *Field Programmable Gate Arrays* (FPGAs) bieten einem Benutzer die Möglichkeit, anwendungsspezifische,

hochspezialisierte Schaltkreise zu *designen*. Dazu bestehen FPGAs aus verschiedenartigen Logikelementen sowie Speicher- und DSP-Einheiten, die flexibel miteinander verknüpft werden können. Alle Logikelemente arbeiten gleichzeitig, sodass sie ein hohes Maß an Parallelität bieten können. Die freie Programmierbarkeit der Logikelemente macht sie flexibler als CPUs, da z. B. beliebige Hardware-Schnittstellen zu unterschiedlichster Peripherie implementiert werden können. Durch die Parallelität bieten sie darüber hinaus im Allgemeinen eine höhere Leistungsfähigkeit als CPUs. Die Spezialisierung der implementierten Schaltkreise ermöglicht es außerdem, energieeffizienter als CPUs zu sein. Nachteilig ist, dass die Entwicklung eines *FPGA-Designs* die Kenntnis sogenannter Hardware-Beschreibungssprachen voraussetzt. Durch neue Trends wie sog. *High-Level-Synthese* [8] lassen sich jedoch auch in einer Hochsprache wie C/C++ entwickelte Funktionen zunehmend besser direkt in eine Hardware-Implementierung übersetzen. Aufgrund des hohen Maßes an Parallelität bieten FPGAs gute Voraussetzungen, Matrizenoperationen und Faltungsoperationen parallel zu implementieren. Aus diesem Grund stellen FPGAs eine vielversprechende Alternative zu GPUs im Bereich des maschinellen Lernens dar [9].

Eine Alternative zu der Verwendung einer generischen CPU, der „Zweckentfremdung“ (GPU) bzw. „Anpassung“ (FPGA) einer Hardwarearchitektur stellt die Nutzung einer hochspezialisierten Architektur in Form eines **anwendungsspezifischen integrierten Schaltkreises** (engl. *Application Specific Integrated Circuit*, ASIC) dar. Insbesondere ASICs haben in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen, da sie sehr leistungsfähig und effizient für eine Aufgabe sein können. Der bekannteste Vertreter dieser Architektur sind wohl Googles *Tensor Processing Units* (TPUs), die speziell für die Verwendung mit Tensorflow entworfen wurden [10], die IPU von Graphcore [11] oder Inferentia von Amazon [12]. Aktuell gibt es weltweit mehr als 100 Firmen, die mit der Entwicklung spezieller ML-ASICs befasst sind [13]. Diese können entweder für das Training, die Inferenz oder aber beides ausgelegt sein. Von entscheidender Bedeutung für die Anwendung im IoT-Bereich ist die Inferenz unter höchstmöglicher Energieeffizienz. Das bedeutet, dass die eigentliche Trainingsphase zum Bestimmen der Gewichte des neuronalen Netzes auf einem anderen Rechnersystem, z. B. einem Hochleistungsrechner, stattfinden kann. Die trainierten Gewichte werden dann auf das Zielsystem übertragen und können dann in einer Anwendung genutzt werden.

3.2 Vergleich der Hardwarearchitekturen

Abb. 2 stellt die verschiedenen Hardware-Architekturen in einem qualitativen (subjektiven) Vergleich hinsichtlich verschiedener Eigenschaften dar. Hierbei wird ersichtlich, dass CPUs zwar sehr flexibel sind, aber nicht die beste Option hinsichtlich Leistungsfähigkeit und Energieeffizienz darstellen. Das andere Extrem stellen ASICs dar, die im Allgemeinen die höchste Leistungsfähigkeit bieten, jedoch hinsichtlich Flexibilität und Programmierbarkeit sehr beschränkt sind, da ihre Struktur und die Anwendung zum Zeitpunkt der Anwendung feststehen. GPUs und FPGAs stellen Kompromisslösungen dar: Sie sind z.B. flexibler als ASICs, aber i.d.R. nicht so leistungsfähig und energieeffizient wie diese. Sinnvoll erscheinen insbesondere Kombinationen von einer generischen CPU mit einer Spezial-Hardware.

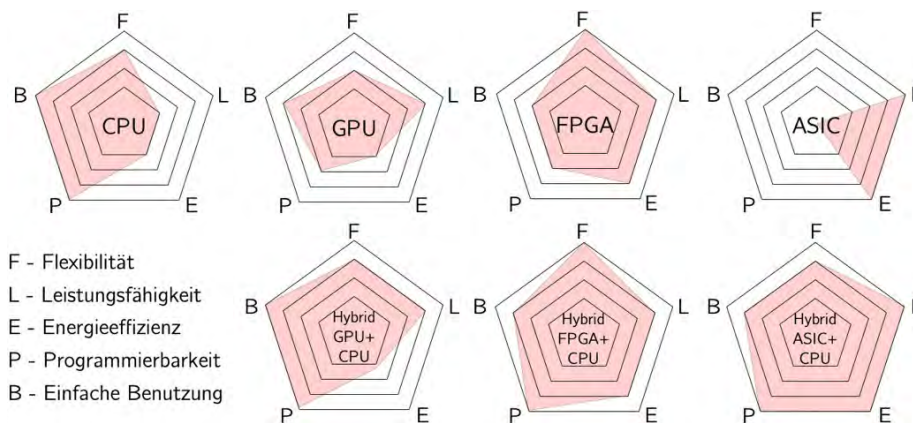


Abb. 2 Qualitativer Vergleich der Eigenschaften unterschiedlicher Hardware-Architekturen für das Maschinelle Lernen/Deep Learning

4 Ziel und Ausblick: ein hybrider ML-ASIC

Aus diesem Vergleich wird ersichtlich, dass insbesondere die Kombination eines ASICs mit einer CPU einen vielversprechenden Ansatz für intelligente mobile Systeme darstellt. Hierbei ergeben sich jedoch eine Reihe von Fragen zu den optimalen Designentscheidungen für die höchstmögliche Leistungsfähigkeit und Energieeffizienz. Aufgrund der offen verfügbaren RISC-V-

Architektur scheint es sinnvoll, einen **hybriden ASIC** – bestehend aus einem RISC-V-Prozessorkern für die Unterstützung von Software-Komponenten und einem applikationsspezifischem Machine-Learning-IP-Core (ML-IP), welcher für die rechenintensiven Teile des Systems, insbesondere für Verfahren basierend auf tiefen neuronalen Netzen/Deep Learning genutzt wird – zu entwickeln. Beim Entwurf des Prozessorkerns ist auf eine ausgeglichene Wahl des Parallelisierungsgrades bei gleichzeitiger Betrachtung der Leistungsaufnahme zu achten. So erhöhen superskalare bzw. mehrstufige Befehls-Pipelines den Durchsatz, haben gleichzeitig aber auch eine höhere Stromaufnahme zur Folge. Eine zweistufige Befehls-Pipeline erscheint in dieser Hinsicht als guter Kompromiss.

Eine Frage stellt die zugrunde liegende CMOS-Technologie dar. Hier erscheint die **22FDX/FDSOI-Technologie** aufgrund ihrer Flexibilität in Bezug auf die Transistorschwellenspannung als vorteilhaft. Transistoren mit niedriger Schwellenspannung besitzen eine hohe Treiberstärke und hohe Leckströme. Transistoren mit hohen Schwellenspannungen verhalten sich genau entgegengesetzt. Eine Optimierungsmöglichkeit ist dementsprechend Body-Biasing, was die dynamische Skalierung der Schwellenspannung in Abhängigkeit von der geforderten Rechenleistung ermöglicht. In konventionellen Bulk-CMOS-Technologien ist die Schwellenspannung der Transistoren jedoch nur in geringem Maße variabel. Insbesondere eine Verkleinerung der Schwellenspannung ist nur durch eine Vorspannung der Bulk-Diode in Vorwärtsrichtung möglich, was zu einer Erhöhung der statischen Leistungsaufnahme führt. Die Isolierung des Transistorskanals bei FDSOI-Technologien erlaubt hingegen eine viel flexiblere Wahl der Transistorschwellenspannung. Das zugrundeliegende ASIC-Design kann dann mittels der Merkmale der FDSOI-Technologie auf maximale Energieeffizienz ausgelegt werden.

Eine Besonderheit des verfolgten Ansatzes ist das **modulare, generische und skalierbare Design des ML-IP**. Dieser soll auf dem CAEMO [14] basieren und dadurch ermöglichen, die Genauigkeit jeder einzelnen Rechenoperation zu spezifizieren und den Grad der Parallelisierung und Taktung sowie Arbeitsspannung des zugrundeliegenden ASIC-Designs anzugeben. Hierfür sind spezialisierte Analog- bzw. Mixed-Signal-Schaltungen wie PLL (*Phase-Lock Loop*) und Capless LDO (*Low Drop-Out*), Regulatoren und Ladungspumpen in das ASIC als Makros zu integrieren, welche mit der Digitallogik einen Regelkreis nach dem DFVS (*Dynamic Frequency and Voltage Scaling*) bilden.

Dies erlaubt wiederum den Einsatz von **ML-gestützten Optimierungsverfahren**, um für Hardware-Design und Architektur der neuronalen Netze (*Neural Networks*, NNs) eine Co-Optimierung durchzuführen. Hierbei wird eine multikriterielle Optimierung des Gesamtsystems hinsichtlich Energieeffizienz bei gegebener Klassifikationsgenauigkeit und Geschwindigkeit durchgeführt. Resultat dieser Optimierung ist ein System, welches für eine gegebene Problemstellung hinsichtlich NN-Architektur und ASIC-Design die energieeffizienteste Lösung darstellt. Um dieses zu erhalten, werden zwei Optimierungsschleifen durchgeführt. Die erste Schleife generiert, basierend auf automatisierten Deep-Learning-Ansätzen, eine Vielzahl von performanten tiefen neuronalen Architekturen für die gegebene Problemstellung mit minimaler Größe. Im Anschluss werden die besten Architekturen genutzt, um die zu implementierende, grundlegende Hardware in der zweiten Optimierungsschleife weiter zu verbessern.

Referenzen

- [1] C. Zhang, P. Patras, H. Haddadi: Deep learning in mobile and wireless networking: A survey. In: *IEEE Commun. Surv. Tutor.*, 2019.
- [2] Y. Bengio: Learning Deep Architectures for AI. In: *Found. Trends Mach. Learn.*, vol. 2, no. 1, pp. 1–127, 2009.
- [3] J. Schmidhuber: Deep Learning in Neural Networks: An Overview. In: *Neural Netw.*, vol. 61, pp. 85–117, 2015.
- [4] V. Sze, Y.-H. Chen, T.-J. Yang, J. S. Emer: Efficient processing of deep neural networks: A tutorial and survey. In: *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 12, pp. 2295–2329, 2017.
- [5] Intel Corporation: Intel[®] 64 and IA-32 Architectures Software Developer’s Manual Combined Volumes: 1, 2A, 2B, 2C, 3A, 3B, 3C and 3D. 2015.
- [6] E. Hernandez: Improving the Compute Performance of Video Processing Software Using Intel[®] Advanced Vector Extensions (Intel[®] AVX) Instructions. <https://tinyurl.com/y4hxz8h5> [Accessed: 02-Oct-2019].
- [7] A. Waterman, Y. Lee, D. A. Patterson, K. Asanovic: The risc-v instruction set manual, volume i: Base user-level isa. In: *EECS Dep. UC Berkeley Tech Rep UCBECS-2011-62*, vol. 116, 2011.

- [8] R. Nane et al.: A survey and evaluation of FPGA high-level synthesis tools. In: *IEEE Trans. Comput.-Aided Des. Integr. Circuits Syst.*, vol. 35, no. 10, pp. 1591 bis 1604, 2015.
- [9] N. Hemsoth: FPGA Based Deep Learning Accelerators Take on ASICs. In: *The Next Platform*, 23-Aug-2016. <https://tinyurl.com/zmak4zr> [Accessed: 02-Oct-2019].
- [10] M. Abadi et al.: TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Systems. 2015.
- [11] Graphcore: Graphcore’s technology for accelerating machine learning and AI, Oct-2019. <https://www.graphcore.ai/technology> [Accessed: 03-Oct-2019].
- [12] AWS Inferentia – Amazon Web Services (AWS). <https://aws.amazon.com/machine-learning/inferentia/> [Accessed: 03-Oct-2019].
- [13] M. Suryavansh: How to make your own deep learning accelerator chip! In: *Medium*, 18-Sept-2019.
- [14] H. Woehrle, F. Kirchner: CAEMO-A Flexible and scalable high performance matrix algebra coprocessor for embedded reconfigurable computing systems. In: *Microprocess. Microsyst.*, vol. 56, pp. 47–63, 2018.

Das Ende des Blindflugs

Wie Big Data und KI den Verteilnetzbetrieb revolutionieren werden

Fabian Karl¹, Nikolai Hopfer², Markus Zdrallek²

¹ Power Plus Communications AG

f.karl@ppc-ag.de

² Bergische Universität Wuppertal

[nikolai.hopfer](mailto:nikolai.hopfer@uni-wuppertal.de), [zdrallek](mailto:zdrallek@uni-wuppertal.de)@uni-wuppertal.de

Im Grundlagenforschungsprojekt „Fühler im Netz“ konnte im Labor wie im Feld nachgewiesen werden, dass eine systematische Auswertung der BPL-Signalparameter Rückschlüsse auf Netztopologieänderungen und auf kritische Kabelzustände zulässt. Zusätzlich werden in jedem BPL-Modem kontinuierlich Spannungsdaten aller drei Phasen gemessen, was erstmalig einen flächendeckenden und aktuellen Einblick in das Niederspannungsnetz bietet.

Im aktuellen Nachfolgeprojekt „Fühler im Netz 2.0“ werden diese Erkenntnisse mithilfe von Big Data und künstlicher Intelligenz auf ein neues Niveau gehoben. Die Signalparameter und Spannungsmesswerte, welche von tausenden Endpunkten im Niederspannungsnetz erhoben werden, können damit in Echtzeit ausgewertet werden.

1 Einleitung

Der fortschreitende Erfolg der erneuerbaren Energien stellt Netzbetreiber vor zwei große Probleme:

- Weil der Großteil der dezentralen Energieerzeugungsanlagen im Mittel- und Niederspannungsnetz installiert wird, ist zum einen der Netzbetrieb nicht mehr mit bestehenden Modellen abbildbar, für die eine Messung

der Spannungen und Ströme am Umspannwerk zur Spannungshaltung genügte.

- Zum anderen werden die in der Nieder- und Mittelspannungsebene überwiegend eingesetzten Kabel an sonnen- und windreichen Tagen deutlich stärker belastet, als dies früher der Fall war. Dabei ist der aktuelle technische Zustand der Kabel in diesen Spannungsebenen meist unbekannt, da konventionelle diagnostische Verfahren mit einem hohen Aufwand verbunden sind und vergleichsweise selten eingesetzt werden. Zudem wird das Störungsgeschehen maßgeblich durch Kabelfehler in diesen Spannungsebenen bestimmt.

Eine Lösung für diese Probleme liegt in der Verwendung der Breitband-Powerline- (BPL-) Technologie, welche durch Anwendung von OFDM-Modulation über insgesamt 917 Trägerfrequenzen im Frequenzbereich von 2 bis 30 MHz die Stromkabel zur Datenübertragung nutzt [1]. Diese Kommunikationstechnologie wird auch für den in Deutschland bevorstehenden Smart-Meter-Rollout verwendet. Ein BPL-Modem, welches Daten an ein benachbartes Modem übertragen will, prüft vorab, wie gut die Signalqualität auf dem Kabel ist. Ein Ergebnis dieser „Prüfung“ ist der Signal-Rausch-Abstand (SNR) für jeden der genutzten Träger. Dieser Parameter kann als Abbild der Datenübertragungsqualität ausgewertet werden, um weitere Erkenntnisse über das Netz und die Kabel zu gewinnen.

2 Überwachung von Netz- und Anlagenzuständen als Sekundärnutzen der BPL-Kommunikation

2.1 Kabelzustände

Der SNR wird bestimmt durch die Dämpfung der Übertragungsstrecke respektive der Kabel und dem zeitabhängigen Rauschen, das z.B. durch weitere angeschlossene Anlagen erzeugt werden kann [2].

In Labormessungen im Rahmen des BMBF-geförderten Forschungsprojekts „Fühler im Netz“ konnte nachgewiesen werden, dass die Dämpfung eines Kabels grundsätzlich vom Zustand des Dielektrikums beziehungsweise

se von der Alterung abhängig ist. Abbildung 1 zeigt exemplarisch den Einfluss thermischer Alterung auf ein VPE-Kabel. Um diesen Alterungsprozess zu beschleunigen, wurde dabei ein Kabel für mehrere hundert Stunden auf 90 °C erwärmt. Nachdem es sich danach abgekühlt hatte, wurde die spezifische Dämpfungskonstante gemessen [3].

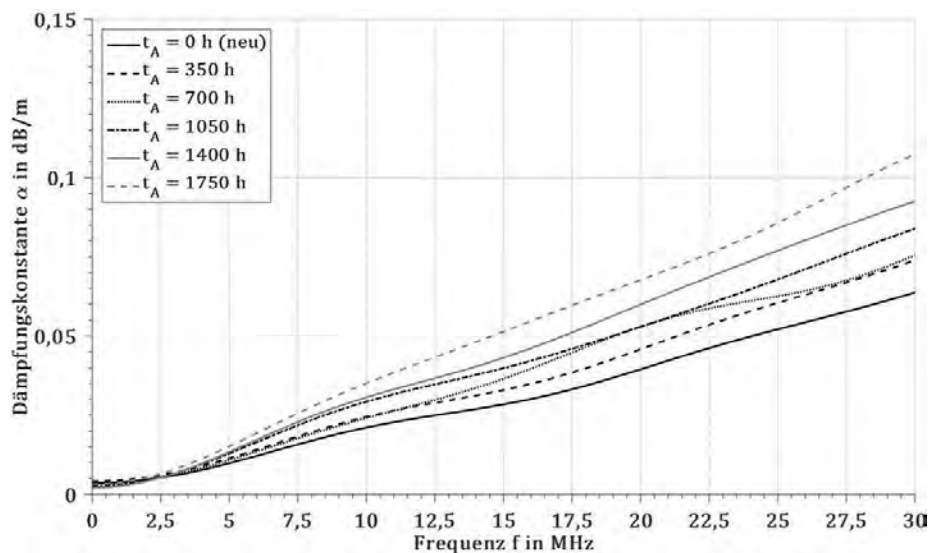


Abb. 3 Zunahme der Dämpfung eines VPE-Kabels durch thermische Alterung (gemäß [3])

Je höher die Frequenz ist, desto höher ist die spezifische Dämpfungskonstante α (längenbezogen) eines Kabels, was aus dessen natürlichem Tiefpassverhalten resultiert. Durch den Alterungsprozess wird dieses Verhalten verstärkt. Die Laborergebnisse zeigen, dass insbesondere der obere Frequenzbereich der BPL-Kommunikation (nahe 30 MHz) daher prinzipiell deutlich durch Alterungsprozesse beeinflusst wird und folglich im SNR abgebildet werden kann.

Je höher die Dämpfung eines Kabels, desto niedriger ist der SNR einer Signalstrecke zwischen zwei Modems, die über dieses Kabel kommunizieren. Dieser Zusammenhang zeigte sich auch in den Messungen des Feldtests beim Vergleich zweier unterschiedlich alter Kabel. In Abbildung 2 sind die SNR-Werte zweier unterschiedlich alter Kabel dargestellt. Auf der Ordinate ist die Frequenz aufgetragen (2 bis 30 MHz) und auf der Abszissenachse die Zeit. Die jeweiligen SNR-Werte sind als Farbkodierung kenntlich

gemacht, wobei schwarz für hohe Werte (40 dB) steht und weiß für sehr niedrige (0 dB). Der Vergleich zeigt, dass die SNR-Werte des älteren Kabels (Verlegejahr 1964) deutlich niedriger liegen als die des jüngeren Kabels (Verlegejahr 2000), und zwar insbesondere im oberen Frequenzbereich.

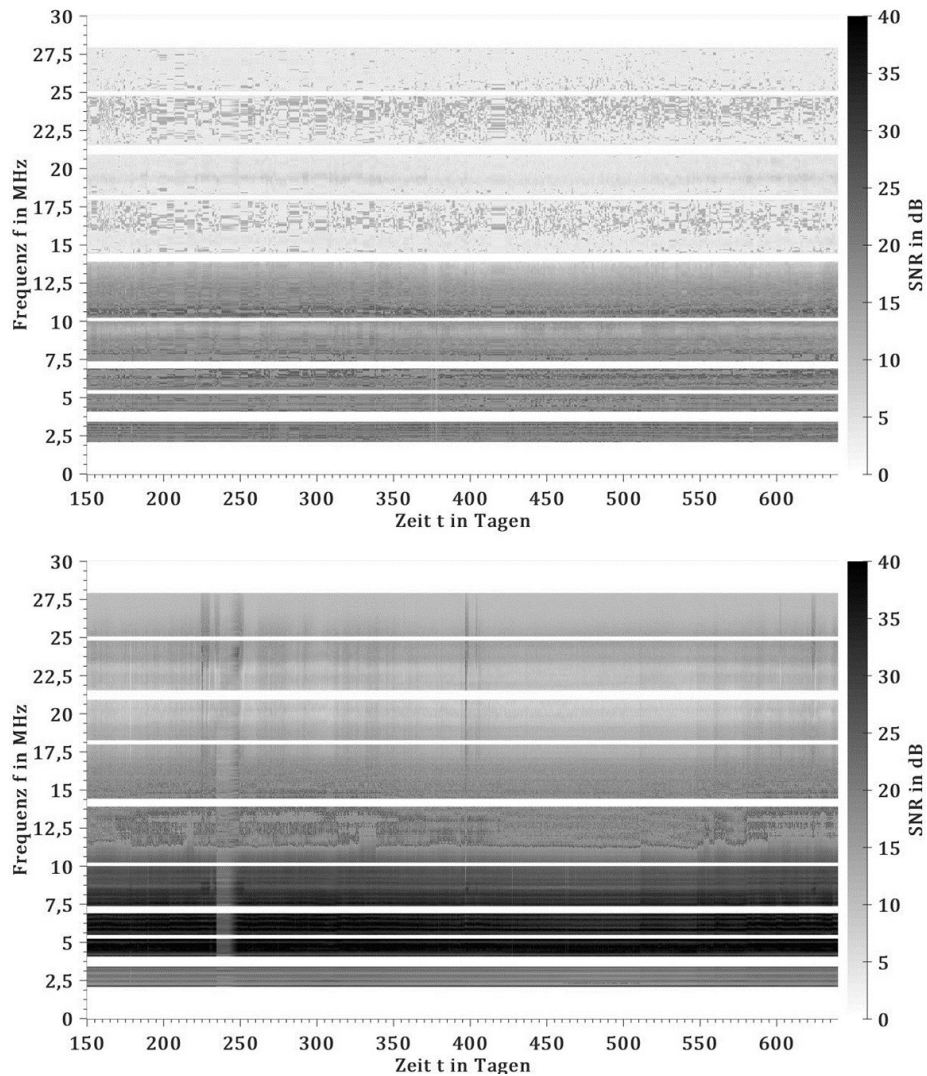


Abb. 4

SNR unterschiedlich alter Kabel (oben: Verlegejahr 1964, unten: Verlegejahr 2000)

2.2 Netztopologieänderung

Eine andere Erkenntnis bei der Analyse der SNR-Werte des Feldtests in „Fühler im Netz“ war, dass sich eine Netztopologieänderung – ausgelöst durch den Ausfall von NH-Sicherungen – im SNR-Spektrum erkennen lässt [4]. In Abbildung 3 ist der Verlauf des SNR über ca. einen Monat dargestellt; in der ersten Monatshälfte wurde der Ausfall von Sicherungen simuliert, indem defekte Sicherungen eingebaut wurden. Die Instandsetzung der Sicherungen (nach 14 Tagen) wurde durch den Einbau von Koppel-Kondensatoren mit einer Sperrfrequenz von 1 MHz simuliert.

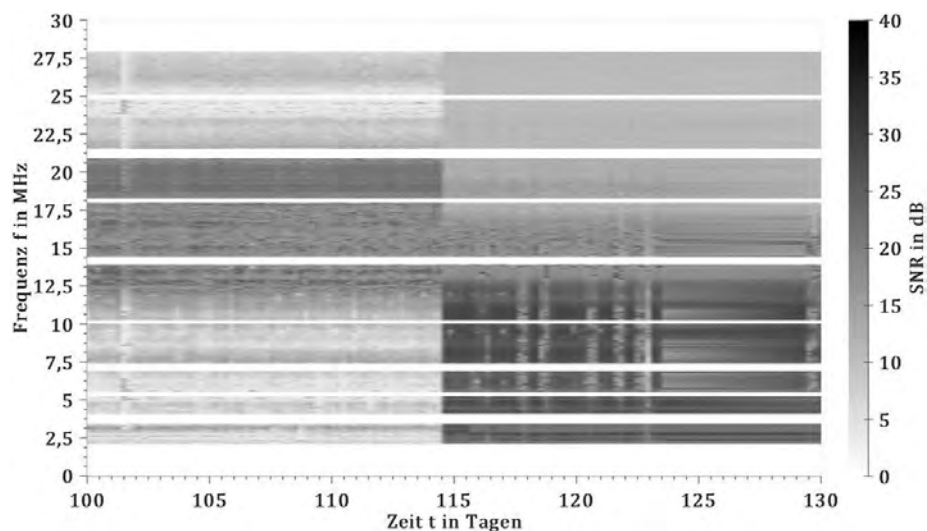


Abb. 5 Ausfall von Sicherungen im SNR erkennbar

Die nach dem Ausfall einer Sicherung offene Trennstelle agiert wie ein Hochpassfilter und lässt nur noch Signale oberhalb einer Grenzfrequenz durch, die im Bereich des BPL-Spektrums liegt. Für den Frequenzbereich darunter liegen dagegen sehr niedrige SNR-Werte vor, wie in Abbildung 3 dargestellt ist.

2.3 Spannungsbandüberwachung

Die eingesetzten Sensor-BPL-Modems messen an ihrem Installationsort nicht nur den SNR, sondern auch die Spannung aller drei Phasen. Exemplarische Ergebnisse dieser Spannungsmessungen in einem städtischen Netzgebiet sind

in den Abbildungen 4, 5 und 6 dargestellt. Messungen aus einem ländlichen Netzgebiet sind in Abbildung 7 dargestellt.

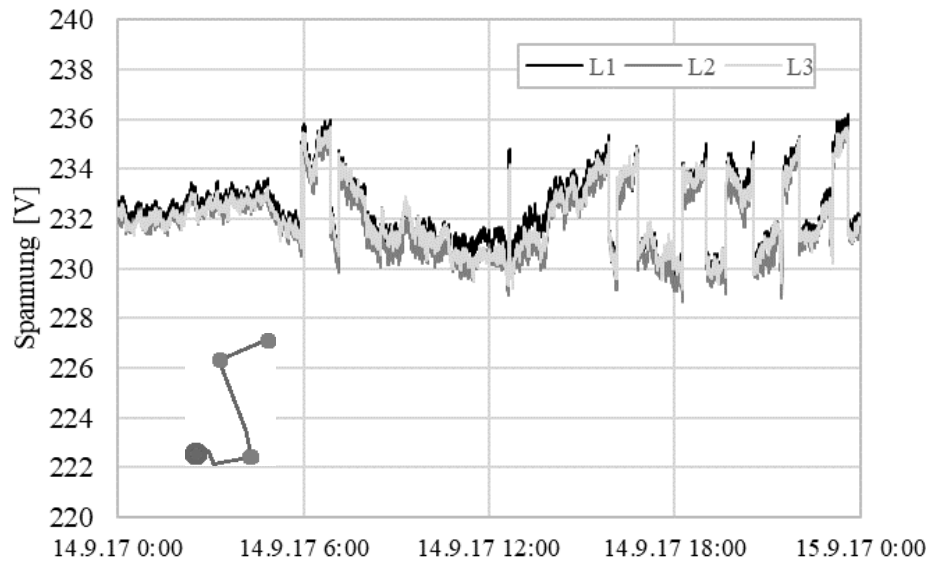


Abb. 6 Ergebnis der Spannungsmessung in einem städtischen Netzgebiet (1)

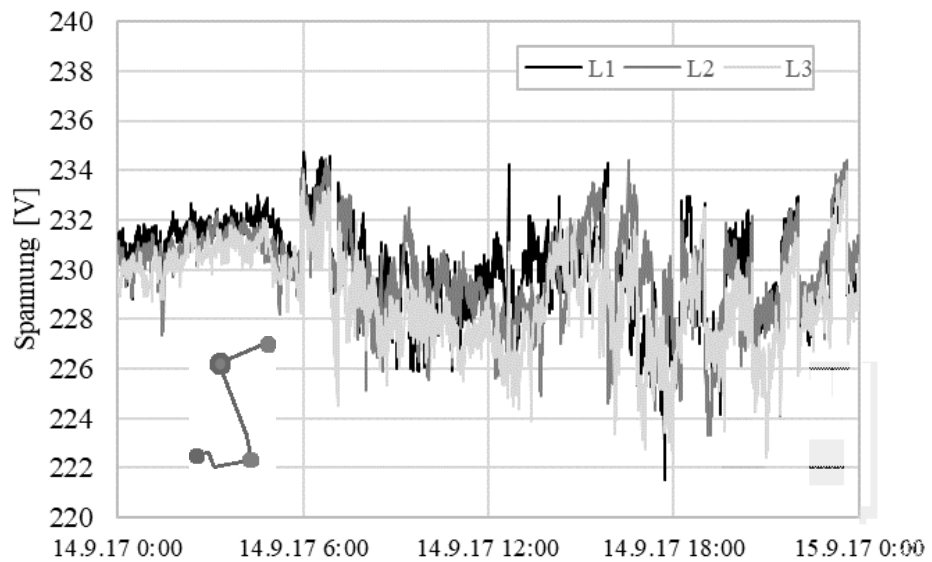


Abb. 7 Ergebnis der Spannungsmessung in einem städtischen Netzgebiet (2+3)

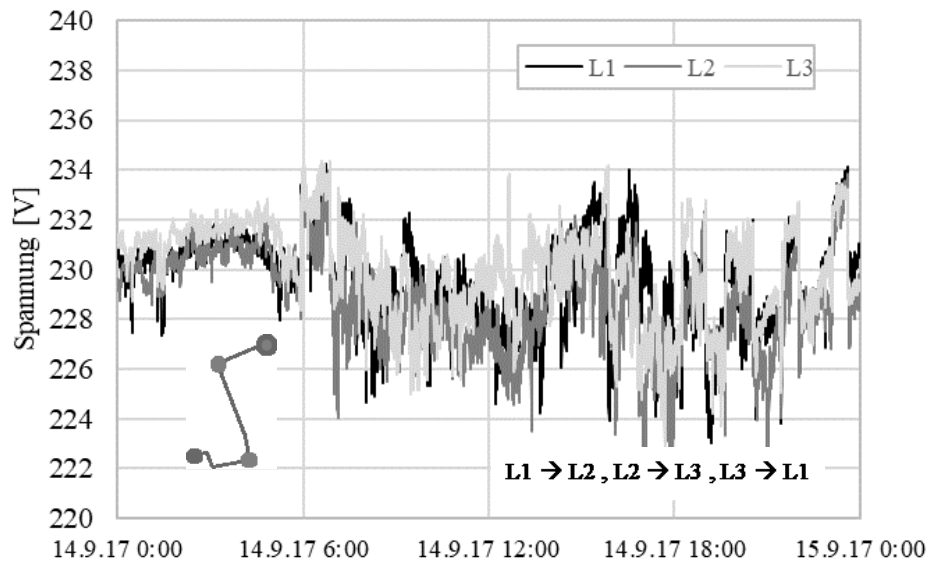


Abb. 8 Ergebnis der Spannungsmessung in einem städtischen Netzgebiet (4)

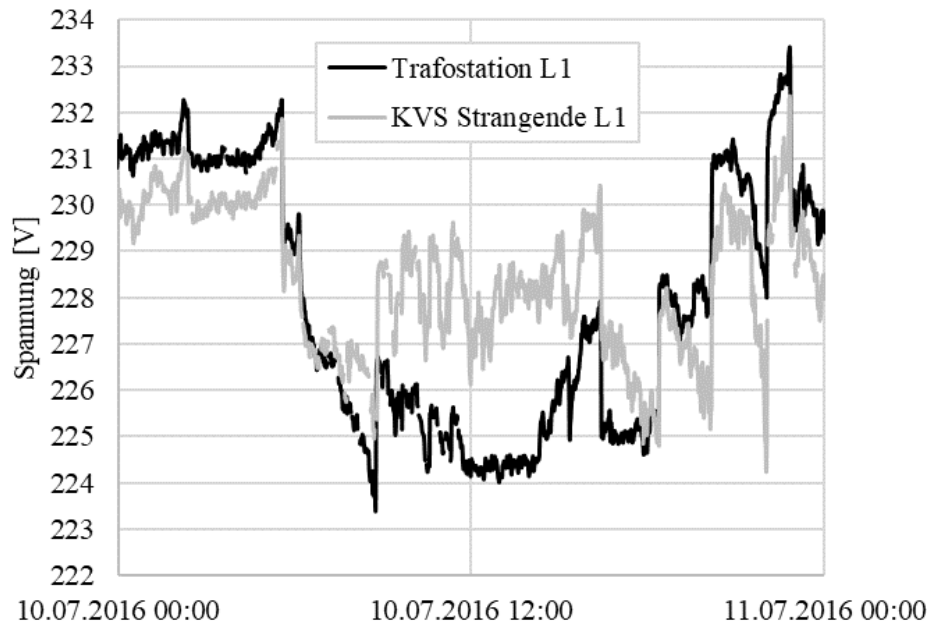


Abb. 9 Ergebnis der Spannungsmessung in einem ländlichen Netzgebiet (5)

Die erhobenen Messwerte ermöglichen es Verteilnetzbetreibern, ...

- (1) zu erkennen, wann eine Spannungsstufung stattfindet und welche Auswirkung diese hat;
- (2) zu überprüfen, ob sich alle Messwerte innerhalb des zulässigen Spannungsbandes (also $230\text{ V} \pm 10\%$) befinden;
- (3) Asymmetrien zwischen den drei Phasen zu erkennen, die z.B. bei einphasiger Belastung oder 1-phasiger Einspeisung entstehen können;
- (4) Phasendreher entlang eines Niederspannungsstrangs zu identifizieren;
- (5) nachzuweisen, wie stark PV-Einspeisung das Spannungsniveau im Verlauf des Tages anhebt.

3 Der nächste Schritt: Big Data und KI

Das Mitte 2019 gestartete, ebenfalls BMBF-geförderte Nachfolgeprojekt „Fühler im Netz 2.0“ baut auf den Erkenntnissen von „Fühler im Netz“ auf und erweitert diese, indem ein Groß-Feldtest mit über 3.500 Sensormodems durchgeführt wird, welche sowohl das SNR als auch Spannungswerte erheben.

3.1 Big Data

Grundlage hierfür ist eine effektive Datenverarbeitung und -speicherung. Die Sensormodems schicken ihre Messwerte mithilfe des IoT-Protokolls MQTT an einen sog. Broker, der sich im Rechenzentrum des Verteilnetzbetreibers befindet. Bei diesem Broker können verschiedene Systeme, auch Cloud-basierte, diese Daten (oder nur einen Teil davon) abonnieren. Damit ist die Grundlage für eine Online-Analyse der erhobenen Messdaten geschaffen. Für die Entwicklung von KI-Algorithmen wird zunächst aber nur ein Offline-Zugriff benötigt, was durch das Abspeichern der Daten in eine Datenbank ermöglicht wird.

3.2 KI

Die Datenmengen, die bei Messungen im Sekundenbereich (Sensorik) bzw. im Minutenbereich (BPL-Spektrum), anfallen, werden anschließend mit Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) untersucht. Eine Hauptaufgabe der Zeitreihenanalyse ist dabei das Erkennen von Mustern, sowohl in kurzen Zeitintervallen – wichtig z.B. für die Erkennung von Sicherheitsausfällen – als auch in langen Zeitintervallen – wichtig z.B. für die schleichenden Veränderungen im BPL-Spektrum aufgrund zunehmender Kabelalterung. In Zusammenhang gebracht werden die erkannten Muster anschließend mit den beim Netzbetreiber bereits vorliegenden Stammdaten (etwa zu Kabeltyp, Kabellänge und Verlegejahr).

Flankiert werden diese Analysen der Feldtestdaten von weiterführenden Labormessungen, welche als weitere Referenzen für die aufgefundenen Muster dienen und diese in einen kausalen Zusammenhang mit physikalischen Effekten bringen.

3.3 Dezentrale Netzautomatisierung

Die von den Sensormodems erhobenen Messwerte werden aber nicht nur zentral gesammelt, um sie einer KI-Analyse zuzuführen. Sie sollen auch Systemen zur dezentralen Netzautomatisierung (DNA) zur Verfügung gestellt werden. Diese werden typischerweise in Ortsnetzstationen eingebaut, wo sie Strom und Spannung messen und bei kritischen Netzzuständen geeignete Aktoren steuern [5]. Durch die zusätzlichen Spannungsmesswerte der Sensormodems erlangt die DNA eine noch bessere Kenntnis des lokalen Netzzustands, wodurch sich verbesserte Möglichkeiten zur Regelung ergeben. Dieser Aspekt wird insbesondere im Hinblick auf den in den kommenden Jahren zu erwartenden Ausbau der Elektromobilität und die fortschreitende Energiewende relevant.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im BMBF-geförderten Grundlagenforschungsprojekt „Fühler im Netz“ konnte im Labor wie im Feld nachgewiesen werden, dass eine systematische

Auswertung des SNR eines BPL-Modems Rückschlüsse auf Netztopologieänderungen und auf kritische Kabelzustände zulässt und eine kostengünstige, integrierte Sensorik zur Spannungsbandüberwachung eingesetzt werden kann.

Im Rahmen des ebenfalls BMBF-geförderten Folgeprojekts „Fühler im Netz 2.0“ wird die Überwachung von Netz- und Anlagenzustand auf Basis der Breitband-Powerline-Technologie in großem Maßstab erforscht. Messdaten aus über 3.500 Sensormodems werden einer zentralen Auswertung mittels künstlicher Intelligenz zugeführt und stehen zudem den Systemen zur dezentralen Netzautomatisierung zur Verfügung.

In den kommenden Monaten werden die Sensormodems im Feld installiert und beginnen dann mit der Messwertaufnahme. Aus der Analyse der Daten mittels künstlicher Intelligenz soll perspektivisch ein Modell entwickelt werden, welches sich für die Echtzeit-Analyse der Daten eignet – entweder zentral auf dem Big-Data-System oder dezentral auf verteilten Systemen im Verteilnetz selbst (z. B. im DNA-System oder im Sensormodem).

Für den Verteilnetzbetreiber ergibt sich damit perspektivisch eine auf realen Spannungswerten basierende Verteilnetzautomatisierung und eine zustandsbasierte Instandhaltungsstrategie, welche das Assetmanagement effizienter macht – und damit letztlich das Verteilnetz fit für die Aufnahme weiterer erneuerbarer Energieerzeuger und die Elektromobilität.

Referenzen

- [1] IEEE Std 1901–2010: IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specification. IEEE Standards Association.
- [2] Ferreira, H. C.; Lampe, L.; Newbury, J.; Swart, T. G.: *Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines*. Chichester: John Wiley & Sons, 2010.
- [3] Hopfer, N.; Zdrallek, M.; Dietzler, U.; Krampf, M.; Raquet, C.; Ronczka, M.: New Approach for medium voltage power cable assessment using broadband powerline communications. In: *Proceedings of the 20th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH 2017)*, Buenos Aires, Argentinien, 2017.

- [4] Hopfer, N.; Zdrallek, M.; Karl, F.; Rezaei, H.; Krampf, M.; Dietzler, U.: Analysis of Broadband PLC Characteristics as a Second Use Case for Distribution System Operators. In: *Proceedings of the 2019 IEEE International Symposium on Power Line Communications and its Applications (ISPLC)*, Prag, Tschechien, 2019.
- [5] Neusel-Lange, N.: *Dezentrale Zustandsüberwachung für intelligente Niederspannungsnetze*. Diss., Bergische Universität Wuppertal, 2013.

Konzeptionierung eines auf Semantic-Web-Technologien basierenden Digitalen Zwillings im Smart-Home-Kontext

*Markus Kuller, Fabian Kohlmorgen, Nursi Karaoglan,
Marco Niemeyer, Ingo Kunold*

Institut für Kommunikationstechnik, Fachhochschule Dortmund

{[markus.kuller](mailto:markus.kuller@fh-dortmund.de), [fabian.kohlmorgen](mailto:fabian.kohlmorgen@fh-dortmund.de), [nursi.karaoglan](mailto:nursi.karaoglan@fh-dortmund.de), [marco.niemeyer](mailto:marco.niemeyer@fh-dortmund.de),
[kunold](mailto:kunold@fh-dortmund.de)}@fh-dortmund.de

Die Digitalisierung im Smart Home und Smart Building geht wie der ausgeschriebene Digitalisierungsprozess [1] insgesamt darüber hinaus, Digitalsysteme als Einzelelemente bzw. Insellösungen zu sehen. Prinzipiell sind Lösungen zu entwickeln, die die umfassende Vernetzung und den barrierefreien Datenaustausch sowie die damit möglich werdenden neuen Anwendungsszenarien ermöglichen [2].

Im Smart Home existiert eine Vielzahl unterschiedlich ausgeprägter Geräte und Systeme. Diese bilden mit ihren Sensoren und Aktoren eine Schnittstelle zur realen Welt, stellen realzeitnah ihre Messwerte zur Verfügung und sollen zukünftig durch ein digitales Abbild – den Digitalen Zwilling (*Digital Twin*) – repräsentiert werden. Der *Digital Twin* bildet damit, soweit in diesem Zusammenhang möglich, den aktuellen Zustand ab und stellt in einer Dienstenumgebung die Schnittstelle zu KI-Systemen dar, indem auch die Historie der Daten für Lernverfahren im semantischen Zusammenhang mit dem Smart Home bereitgestellt wird. In dieser Arbeit wird ein Ansatz vorgestellt, der die vom W3C standardisierte *WoT Thing Description (TD)* [3] als Grundlage für die Umsetzung des *Digital Twin* implementiert. Die Verwendung des standardisierten *TD*-Modells soll eine hersteller- und gewerkeübergreifende Interoperabilität ermöglichen. Ziel ist die Flexibilisierung und Dynamisierung von erweiterten Diensten auf Basis der semantischen Geräte- und Gebäudebeschreibungen des *Digital Twin*.

1 Zielsetzung und Vorgehensweise

Ziel der Digitalisierung im Smart Home und Smart Building ist das semantische, interoperable Gebäude – Building as a Service (BaaS). Anwendungsentwickler sollten weitgehend unabhängig von einer konkreten Gebäudeinstallation einen verlässlich vorhandenen Grundumfang an Schnittstellen, Gerätefunktionen und -eigenschaften vorfinden. Verlässliche, in jedem automatisierten Gebäude vorhandene, semantisch beschriebene Schnittstellen können den Datenaustausch und die Interaktion mit einem Gebäude erheblich erleichtern. Die Trennung von (maschinenlesbaren) semantischen Beschreibungen und konkreter Implementierung von Schnittstellen und Informationen, im Kontext der Gebäudeautomation, ist ein wichtiger Schritt hin zu einer langfristigen Interoperabilität. Hierbei werden Abhängigkeiten zu bspw. konkreten Programmiersprachen und Systemwelten erheblich reduziert. Bezugnehmend auf die fortschreitende Digitalisierung ist dies ein wesentlicher Marktfaktor.

Die Umsetzung von neuen, gewerkeübergreifenden *Use Cases* ist bisher durch die nach wie vor äußerst heterogene Systemlandschaft im Umfeld der Gebäudeautomatisierung eingeschränkt, denn es existiert eine Vielzahl unterschiedlichster *Feldbus*-, *Middleware*- und *Cloud-Systeme*, die untereinander nicht, bzw. nur bedingt kompatibel sind. Hinzu kommt, dass die verschiedenen Systeme in Bezug auf die bereitgestellten Daten und Funktionen sehr unterschiedliche Abstraktionsniveaus aufweisen, die eine sinnvolle Interpretation der Daten außerhalb der eigenen Systemwelt erschweren. Ein Softwareentwickler möchte systemübergreifende *Use Cases* implementieren, ohne tiefgehende technologiespezifische Kenntnisse zu besitzen. Aktuell müssen Softwareentwickler die unterschiedlichen Datenmodelle und Schnittstellen kennen und verstehen, um eine sinnvolle Übersetzung (*Mapping*) implementieren zu können. Dazu müssen systemübergreifende Verknüpfungen einzelner Elemente, die eine gemeinsame Bedeutung aufweisen, identifiziert werden.

Die in dieser Arbeit verfolgten Lösungsansätze für standardisierte, semantisch beschriebene Schnittstellen, aggregierte Gebäude-/Geräteinformationen und erforderliche Basisdienste sollen eine zielgerichtete Anwendungsentwicklung adressieren. Hierbei ist das Ziel, auf Basis eines *Cyber-Physical Systems (CPS)* mit Software-definierten Funktionen und Eigenschaften [3], Informationen von Sensoren, Aktoren, Geräten und ganzen Systemwelten,

system- und herstellernerneutral, für eine effiziente Nutzung zugänglich zu machen.

Anwendungs- bzw. Dienstentwicklern soll es unter Berücksichtigung von IT-Sicherheit und Datenschutz über eine *CPS* [4] erleichtert werden, auf aggregierte Daten des Smart Homes zuzugreifen und innovative Dienstleistungen zu entwickeln. Dieses fokussiert den *Digital Twin* (Abschn. 3.3) als wesentlichen Bestandteil des *CPS*, der das Smart Home, auf Basis eines allgemein definierten Datenmodells und der Nutzung geeigneter Ontologien, semantisch beschreibt. Weitergehend sollte der *Digital Twin* in jedem derart ausgestatteten Gebäude verlässlich vorhandene Funktionen und Informationen liefern.

2 Related Works

Das Institut für Kommunikationstechnik (IKT) der Fachhochschule Dortmund arbeitet am Themenbereich der semantischen Interoperabilität [5] und der Definition der Funktionen eines *Digital Twin* für das Smart Home/Smart Building im Kontext geeigneter verteilter Systemarchitekturen. Der in dieser Arbeit vorgestellte Lösungsansatz beschreibt die prototypische Entwicklung und Nutzung eines *Digital Twin* für das Smart Home, der auf Vorarbeiten des IKT aufsetzt. Für diese prototypische Umsetzung und Evaluierung dient das vom IKT entwickelte *Cyber-Physical System (CPS)* [3, 6], das auf der Basis des IKT-Datenmodells *DeviceData 2.0* semantisch Sensor- sowie Aktor-Funktionen und -Eigenschaften in einer IP-basierten Umgebung zur Verfügung stellt. Das *DeviceData 2.0* Modell folgt *Linked Data*-Prinzipien [7, 8] und ermöglicht die Modellierung von virtuellen und physischen Geräten und adressiert vier signifikante Sichtweisen: die Geräte-, Funktions-, Gebäude- und Hardware-zentrische Sicht (s. Abschn. 3.2).

Auf Basis der erlangten Erfahrungen und Erkenntnisse bei der Entwicklung des *DeviceData*-Modells werden aktuell weitere *IoT*-Datenmodelle [7, 9, 10] evaluiert, die ggf. die Anforderungen für eine Nutzung im Kontext der Gebäudeautomation erfüllen könnten. Dies adressiert u.a. das *Web of Things*- (*WoT*-) Modell [7], welches etablierte Web-Technologien für den Datenaustausch zwischen Geräten nutzt. Zur Erweiterung der Basisbeschreibungen können in RDF/OWL [11] beschriebene Ontologien (z.B. *IoT*-

Schema – Abschn. 3.2.1) in der *WoT Thing Description (TD)* verwendet werden. Bei der Auswahl der Ontologien wird auf die Ergebnisse des ZVEI-Arbeitskreises „Semantische Interoperabilität“ [2] aufgesetzt.

Eine weitere Aufgabe dieser Arbeit ist die Konzeptionierung und die prototypische Umsetzung bzw. Erweiterung des *CPS* unter Verwendung der standardisierten *WoT TD*. Hierfür wird das in der Programmiersprache Java entwickelte *CPS* um genannte Lösungsansätze erweitert und evaluiert. Dies stellt eine Herausforderung dar, da für die Überführung einer Ontologie (z. B. als RDF/OWL-Beschreibung) in eine konkrete Java-Implementierung [12] mit entsprechender Serialisierung/Deserialisierung der Java-Objekte nach aktuellem Kenntnisstand noch keine universelle Lösung existiert.

3 Entwicklung des *Digital Twin*

Im IKT werden in verschiedenen Forschungsprojekten Lösungen für eine herstellerübergreifende semantische Interoperabilität im Smart-Home- und Smart-Building-Kontext erforscht. Ist ein geeigneter Lösungsansatz gefunden, wird neben theoretischen Betrachtungen in der Regel eine prototypische Implementierung forciert. Die Implementierung ermöglicht es, weitere praxisrelevante Erfahrungen und Erkenntnisse zu erlangen und so in weiteren Iterationen Optimierungen vorzunehmen. Zur Umsetzung einer semantischen Interoperabilität werden derzeit verschiedene Lösungsansätze und Modelle untersucht. Ein aktuell im Fokus stehender Ansatz ist die Verwendung einer einheitlichen Abstraktion in Form der *WoT Thing Description (TD)* [7].

3.1 Datenmodellierung mit *WoT Thing Description*

Das W₃C definiert im Rahmen der Arbeiten zur *TD* ein formales Modell und eine einheitliche Repräsentation für sogenannte *Web Things*. Den Kern des Modells bildet das *Thing Description Information Model*, das die semantischen Zusammenhänge mit einer Ansammlung von Klassen, bestehend aus vordefinierten Vokabeln, definiert. Das *TD*-Modell beinhaltet eine technologieunabhängige Beschreibung Internet-fähiger Geräte (*Things*) sowie deren Eigenschaften und Funktionen. Das *Thing* wird dabei in der entsprechenden *Thing*-Klasse modelliert. Es besitzt eine Reihe von Grundeigenschaften wie

beispielsweise einen eindeutigen Identifier (*id*) und einen Gerätenamen (*title*). Desweiteren besitzt ein *Thing* typischerweise eine Reihe von Interaktionen (*Interaction Affordance*). Diese Interaktionen unterteilen sich wiederum in folgende Komponenten: Eigenschaften (*Properties*), Aktionen (*Actions*) und Ereignisse (*Events*).

3.1.1 Relation des WoT TD-Modells zu DeviceData

Am IKT sind die Themengebiete Smart Metering, Smart Home und Smart Building bereits seit vielen Jahren fest etabliert und wurden bereits in diversen Forschungsprojekten mit unterschiedlichen Schwerpunkten vertieft. Eine Kernkomponente bildet das am IKT entwickelte *Cyber-physical System* (*CPS*), das als verteilte Java-Anwendung umgesetzt ist. Das *CPS* verwendet intern als Abstraktion von Geräten und deren Eigenschaften das sogenannte *DeviceData*-Modell. Dieses Modell wurde am IKT entwickelt und wird aktuell in der Version 2.0 in dem *CPS* verwendet.

Neben den Eigenentwicklungen werden am IKT Untersuchungen zu anderen Datenmodellen wie beispielsweise *WoT TD* durchgeführt. Bei der Betrachtung des *TD*-Ansatzes zeigte sich, dass viele Konzepte und Strukturen des *WoT* Ähnlichkeiten mit dem *DeviceData*-Modell aufweisen. Diese Schnittmenge begünstigt eine Datentransformation zwischen *DeviceData* und dem *TD*-Modell. Diese Modelltransformation bildet eine Basis für die vorgesehene Integration in die bestehende *CPS*-Infrastruktur (s. Abschn. 3.4).

Im Gegensatz zum *DeviceData*-Modell ist in der aktuellen *TD*-Spezifikation keine Beschreibung einer Verortung (*Location*) vorgesehen. Daher wurde die Entscheidung getroffen, eine entsprechende Erweiterung in das *TD*-Modell zu integrieren. Eine weitere strukturelle Erweiterung wurde zur Beschreibung detaillierter Geräte-/Hardware-Eigenschaften entwickelt. Diese Erweiterungen werden in Abschnitt 3.2 näher erläutert.

3.1.2 Voruntersuchungen zur Modellierung mit WoT

Im Laufe der weiteren Untersuchungen wurden zunächst exemplarische *TD*-Beschreibungen für ausgewählte gängige Smart-Home-Geräte aus der bestehenden Laborinstallation des IKT erstellt. Die Repräsentation der *TDs* erfolgt im *JSON-LD*-Format [13]. Zur Definition weitergehender semantischer Be-

schreibungen wurden unterschiedliche Schemata – wie das *Mozilla-Schema*¹ und das *IoT-Schema*² – evaluiert. Zur Reduzierung der Komplexität für die prototypische Implementierung wurde zunächst die Verwendung des *IoT-Schemas* fokussiert. Zukünftig sollen weitere Schemata genutzt werden. In diesem Zusammenhang sind weitergehend Methoden für das automatisierte *Mapping* verschiedener Schemata zu untersuchen.

Bei der Modellierung konkreter Geräte zeigte sich, dass das *TD*-Modell die Fähigkeit besitzt, eine Vielzahl von Geräten in ähnlicher Form wie das *DeviceData*-Modell zu beschreiben. Teilweise wurden bestimmte Geräte bewusst mehrfach von unterschiedlichen Entwicklern modelliert. Bei der Detailbetrachtung dieser *TDs* ergaben sich Unterschiede in der konkreten Umsetzung. Dies zeigte sich insbesondere bei der Modellierung von *Properties*, *Actions* und *Events*. Die Unterschiede sind zum einen auf die unterschiedliche Interpretation des *TD*-Modells und andererseits auf die Flexibilität des Modells zurückzuführen. Hieraus folgt, dass sich für ein und dasselbe Geräte verschiedene valide *TDs* modellieren lassen. Bezogen auf eine übergreifende Interoperabilität ist dieser Umstand möglicherweise eher hinderlich, daher wurden im Hinblick auf die praktische Umsetzung weitere, über die *TD* Spezifikation hinausgehende, Festlegungen und Einschränkungen (s. Abschn. 3.4) getroffen.

3.2 Erweiterung und Konkretisierung des *WoT*-Basismodells

Das *TD*-Modell besitzt konzeptionell eine gerätezentrische Sicht der modellierten Zusammenhänge. Die primäre Klasse einer *TD* ist das *Thing*. Diese Sichtweise ist für viele *Use Cases* z.B. im Smart Home, aber auch im allgemeinen *IoT*-Bereich, sinnvoll und ausreichend. Trotzdem zeigte sich in verschiedenen Projekten und im Dialog mit der Elektroindustrie im Zuge der Zusammenarbeit an der ZVEI-Studie „Semantische Interoperabilität“, dass eine gebäudezentrische Sicht (*Location-View*) in bestimmten *Use Cases* relevant ist. Die Hersteller aus dem Smart-Building-Bereich teilen diese Sichtweise ebenfalls.

Darauf bezugnehmend ist eine erste Version einer *Location-View* (gebäudezentrische Sicht) erarbeitet worden. Die exakte Modellierung dieser Struk-

1 WoT Capability Schema – <https://iot.mozilla.org/schemas/>

2 Iot.schema.org – <http://iotschema.org/docs/full.html>

tur ist aktuell nicht finalisiert und kann sich in Hinblick auf andere laufende Entwicklungen (z.B. BIM³, BOT⁴, SAREF4BLDG⁵) zukünftig ändern.

Eine weitere Ergänzung des *TD*-Modells wurde zur näheren Geräte- und Hardware-Beschreibung vorgenommen. Diese Datenstruktur, aktuell als *Hardware View* bezeichnet, erweitert das *TD* um Eigenschaften wie beispielsweise: Herstellername, EAN-Nummer, Seriennummer, Software-Version, Hardware-Version.

Um das *TD*-Modell nicht strukturell modifizieren zu müssen, werden *Location*- und *Hardware-View* als modulare Komponenten in separaten Datenstrukturen, die neben dem *TD*-Modell liegen, angesehen. Die Verknüpfung mit dem *TD* erfolgt, gemäß des *Linked Data*-Prinzip, als Verweis aus der *TD* auf die jeweilige Struktur.

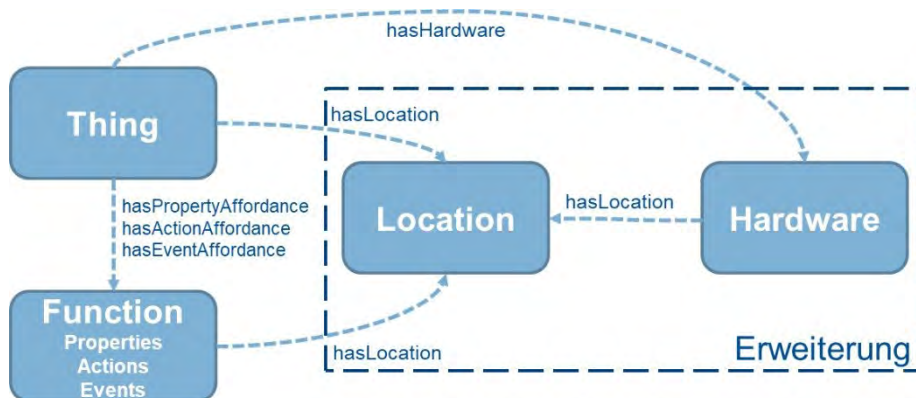


Abb. 1 Modellübersicht *Digital Twin* auf Basis von *WoT TD* mit Erweiterungen

Diese Vorgehensweise verletzt die *TD*-Spezifikation nicht. Die erzeugten *TD*-Instanzen/Individuals sind weiterhin valide. Systeme, die keine *Location*- oder *Hardware*-Information verarbeiten, können die Links auf diese Datenstrukturen ignorieren.

Um Unterschiede in der Interpretation der *TD*-Spezifikation und der individuellen Gerätemodellierung zu minimieren, wurden weitere Festlegungen getroffen. An dieser Stelle können im Hinblick auf den Umfang dieser Arbeit

3 BIM – https://de.wikipedia.org/wiki/Building_Information_Modeling

4 BOT – <https://w3c-lbd-cg.github.io/bot/>

5 SAREF4BLDG – <http://ontology.linkeddata.es/publish/saref4bldg/index-en.html>

nur einige exemplarische Vorgehensweisen, wie die im Folgenden beschriebene Schema-Auswahl, genannt werden.

Schema-Auswahl

Das *WoT TD* bietet die Möglichkeit, weitere semantische Beschreibungen in Form von unterschiedlichen Ontologien in Kombination mit dem Basismodell zu nutzen.

Zur Reduzierung der Komplexität einer praktischen Umsetzung sollen zunächst möglichst wenig verschiedene Ontologien verwendet werden. Als primäre Ontologie wurde das *IoT-Schema*⁶ ausgewählt. Dieses Schema ist eine Erweiterung des *schema.org*-Projektes⁷ mit dem Schwerpunkt auf der formalen Beschreibung von *IoT*-Inhalten.

Das *IoT-Schema* definiert vier Basiskomponenten, die in entsprechenden Dateien im *JSON-LD*-Format hinterlegt sind. In *core.jsonld* wird die grundlegende Semantik des *IoT*-Schemas beschrieben. Die Datei enthält beispielsweise eine Definition eines Sensors (*iot:Sensor*) oder eines Aktuators (*iot:Actuator*).

Die sogenannten *Capabilities* (*capability.json*) beschreiben die Fähigkeiten eines Gerätes. So kann einer Lampe beispielsweise die *Capability iot:BinarySwitchControl* zugeordnet werden. Diese *Capability* legt fest, dass die Lampe die Fähigkeit besitzt, ein- (*iot:turnOn*) und ausgeschaltet (*iot:turnOff*) zu werden.

Ein weiteres Element sind die *Interaction Patterns* (*interaction-patterns.jsonld*). Diese enthalten Information über mögliche Interaktion wie beispielsweise eine Temperaturmessung (*iot:Temperature*).

Als letztes Element ist die Definition von *Units* (*unit.json*) zu nennen. Dieses Dokument enthält eine Reihe von physikalischen Standardeinheiten.

Als weiteres Schema werden die *WoT Protocol Binding Templates* verwendet. Diese *Templates* werden zur näheren Beschreibung von *Protocol Bindings* genutzt. Übliche Anwendungsfälle sind die Beschreibung von *HTTP-Headers* oder die Definition eines *CoAP-Bindings*⁸.

6 IoT Schema Git-Projekt – <https://github.com/iot-schema-collab>

7 Schema.org – <https://schema.org/>

8 COAP – <https://coap.technology/>

3.3 Konzeptionierung des *Digital Twin*

Ein *Digital Twin (DT)* ist im Allgemeinen ein digitales Abbild von physischen Objekten, Systemen oder Prozessen. Im Smart-Home-/Building-Kontext wird ein *DT* durch die digitale Repräsentation (Abb. 2) der Gebäudeinformationen – bspw. Geräteeigenschaften und Zustandsdaten – definiert. Darüber hinaus beschreibt der *DT*, wie über entsprechende Schnittstellen auf diese Daten zugegriffen werden kann und welche *Security*-Anforderungen erfüllt werden müssen.

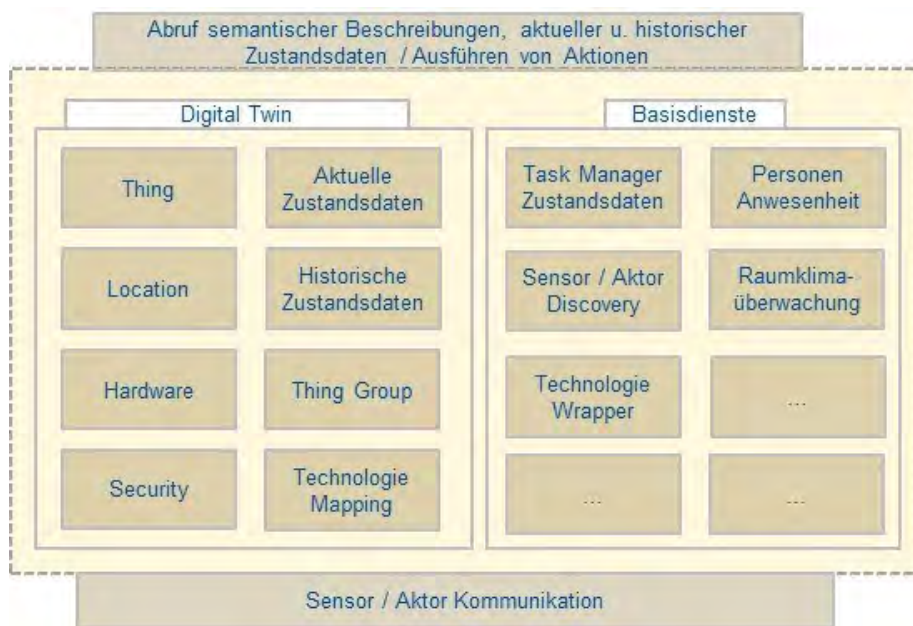


Abb. 2 Verankerung eines *Digital Twin* in einem Gerät

Das *Thing* beschreibt ein Gerät mit seinen Eigenschaften und Funktionen, Kommunikationsschnittstellen⁹ und die damit verbundenen *Security*-Anforderungen. Weitergehend referenziert das *Thing* auf Informationen zur Verortung des Gerätes (*Locations*), zusätzliche Geräteinformationen (*Hardware*) und auf die aktuellen und historischen Zustandsdaten.

⁹ bspw. eine *Webservice*-, *Websocket*- oder eine graphenbasierte Schnittstelle auf Basis der *SPARQL Protocol And RDF Query Language (SPARQL)* für RDF-Triples

Bezugnehmend auf die unterschiedlichen Hard- und Software-Anforderungen eines Gerätes oder Systems – *Constrained-* oder *Capable-Device*, *Gateway-* oder *Cloud-System* – kann der *DT* in unterschiedlicher Ausprägung realisiert werden.

Die aggregierten Zustandsdaten, kombiniert mit den maschinenlesbaren semantischen Gebäude- und Geräteinformationen, bilden die Basis für zukünftige *Machine Learning* getriebene Servicekonzepte. Im Bereich Smart Home/Building ermöglicht der *DT* die Realisierung von gewerkeübergreifenden Services, die vielseitige digitale Inhalte verbinden. Bei der Verwendung von *Machine Learning*-getriebenen Services kann die Erkennung von individuellen Nutzungsmustern (Basisdienste wie bspw. die Personenanwesenheitserkennung oder Raumklimaüberwachung) zur Umsetzung eines autonomen Gebäudes verwendet werden [14, 15].

3.4 Implementierung eines Prototyps

In diesem Abschnitt wird die Implementierung eines Prototyps auf Basis der zuvor beschriebenen *WoT TD* beschrieben. Als Programmiersprache wird Java in der Version 8 verwendet.

3.4.1 Implementierung eines WoT-Frameworks

Um die Vorgaben der *WoT TD*-Spezifikation [7] und der zuvor beschriebenen Erweiterungen (Kap. 3.2) zu erfüllen, ist ein *WoT*-Framework entwickelt worden. Dieses Framework stellt als elementarer Bestandteil eine Basiskomponente der Implementierung des Prototyps dar. Das Framework implementiert folgende Kernaufgaben:

- Implementierung eines *WoT TD*-äquivalenten Klassenmodells
- Objekt-Serialisierung in das *JSON-LD*-Format
- *objektrelationales Daten-Mapping* in einen *RDF-Triplestore*.

Bei der Umsetzung des Frameworks wird zunächst für jede in der *TD*-Spezifikation beschriebene Klasse eine gleichnamige *Java-POJO*- (*Plain Old Java Object*-) Klasse erstellt. Diese *POJO*-Klassen werden entsprechend der Spezifikation mit Variablen für die im *TD* definierten Eigenschaften versehen. Die Angaben der Datentypen im *TD* wird auf einen äquivalenten Java-Datentyp übersetzt (Tab. 1).

Tab. 1: Exemplarisches Mapping von TD- auf Java-Typen

TD Type	Java Type
anyURI	java.net.URI
string	java.lang.String
dateTime	java.util.Date
Map of	java.util.HashMap

Durch die Verwendung des *Project Lombok*¹⁰ können per Annotation (Listing 1, Zeile 1–4) Teile des Codes automatisch generiert werden. Durch die gezielte Nutzung der *@NonNull*-Annotation (Listing 1, Zeile 7) können Variablen, die in der *TD* als Pflichtfelder (engl. mandatory) markiert sind, bereits auf Java-Ebene auf Existenz geprüft werden.

```

1 @Data
2 @Builder
3 @RequiredArgsConstructor(staticName = "of")
4 @AllArgsConstructor
5 public class Thing {
6     // mandatory
7     @NonNull
8     @SerializedName("@context")
9     private List<Object> context;
10    @NonNull
11    @SerializedName("@id")
12    private URI id;
13    @NonNull
14    private String title;
15    @NonNull
16    private List<String> security;
17    ...
18 }

```

Listing 1 Ausschnitt der *Thing*-Klasse

Klassen, die in der *TD*-Spezifikation Vererbungen von anderen Klassen besitzen, werden mit den Java-Vererbungsmechanismen (z. B. *Class ActionAffordance extends InteractionAffordance*) abgebildet. Da Mehrfachvererbung (*polymorphism*) in Java nicht unterstützt wird, sind bei Klassen mit Mehrfachvererbung Interfaces zu verwenden.

10 Project Lombok – <https://projectlombok.org/>

Zur Serialisierung in das *JSON-LD*-Format wird die *Gson-Library*¹¹ verwendet. Spezielle *JSON-LD*-Elemente [13] wie *@id* oder *@context* werden durch die *@SerializedName*-Annotation (Listing 1, Zeile 8) von *Gson* erzeugt. Einige Datenstrukturen erforderten die Implementierung von speziellen *Type*-Adapttern, so kann unter anderem die *WoT TD*-konforme Serialisierung der Vererbungshierarchie sichergestellt werden.

```

1 @RDFBean("https://www.w3.org/2019/wot/td#Thing")
2 public interface ThingIf {
3     @RDFSSubject
4     String getAtId();
5
6     @RDF("https://www.w3.org/2019/wot/td#hasContexts")
7     List<Context> getContexts();
8
9     @RDF("https://www.w3.org/2019/wot/td#id")
10    String getId();
11
12    @RDF("https://www.w3.org/2019/wot/td#title")
13    String getTitle();
14
15    @RDF("https://www.w3.org/2019/wot/td#hasSecurityConfiguration")
16    List<String> getSecurity();
17    ...
18 }

```

Listing 2 Ausschnitt des *Thing*-Interface mit *RDFBeans*-Annotationen

Das *objektrelationale Mapping* zu *RDF Triple* und die Speicherung dieser Daten in einem *Triplestore* werden durch die Verwendung der *RDFBeans-Library*¹² realisiert. *RDFBeans* ist durch Anreicherung von Java-Klassen oder Interfaces mit speziellen *RDF*-Annotationen in der Lage, eine Umwandlung von Java-Objekten in äquivalente *RDF Triple* durchzuführen. Um die Implementierung der zuvor beschriebenen Mechanismen von dem *objektrelationalen Mapping* zu trennen, wird jede *POJO*-Klasse mit einem entsprechenden Interface versehen (Listing 2). Jedes dieser Interfaces wird mit einer *@RDFBean* (Listing 2, Zeile 1) und einem der Klasse zugehörigen *Uniform Resource Identifier (URI)* aus dem *TD*-Vokabular annotiert. Die Methoden der Interfaces werden anschließend mit *@RDF* versehen (Listing 2, Zeile 6). Diese *RDF*-Annotation erlaubt ebenfalls die Definition eines *URIs*. Diese

11 Gson – <https://github.com/google/gson>

12 RDFBeans – <https://github.com/cyberborean/rdfbeans>

URIs werden entsprechend den Vorgaben des *TD-Vokabular* bzw. der *TD-Ontologie* vergeben.

Zusammenfassend ermöglicht das hier beschriebene Framework eine Erstellung von beliebigen *Thing Description*. Da eine objektorientierte Umsetzung verwendet wurde, ist eine in vielen Programmiersprachen übliche Benutzung des Frameworks möglich. Ein Entwickler instanziiert Java-Klassen, die anschließend *WoT TD* konform in das *JSON-LD*-Format (Listing 3) serialisiert oder in einem *Triplestore* gespeichert werden können. Diese Daten können in einer Applikation beispielsweise über einen Webservice bereitgestellt werden.

```
{
  "@context": [
    "https://www.w3.org/2019/wot/td/v1",
    {
      "http": "http://iotschema.org/protocol/http",
      "iot": "http://iotschema.org"
    }
  ],
  "id": "http://localhost:8092/thing/81f1d73750e7495e",
  "title": "Dimmer1_ch1",
  "security": [
    "bearer_sc"
  ],
  "@type": [
    "iot:DimmerControl",
    "iot:Actuator"
  ],
  ...
}
```

Listing 3 Ausschnitt aus eine *Thing Description* in *JSON-LD*

3.4.2 Konzeptionierung und Integration in das CPS

Die Integration der *WoT TD*-konformen Schnittstelle und des *Digital Twin* wurde in einer *Microservice*-Umgebung umgesetzt. Das grundsätzliche Konzept kann in drei Komponenten unterteilt werden.

1. *DeviceData* zu *WoT Konverter*
2. *RDF-Triplestore* als Speicher des *Digital Twin*
3. *WoT TD*-Webservice.

Der Konverter ist so in die *Microservice*-Umgebung integriert, dass er jede Konfigurationsänderung der *CPS* erhält. Eine Konfigurationsänderung ist beispielsweise das Hinzufügen neuer Geräte. Wird ein neues Gerät an der *CPS* angemeldet, erhält der Konverter-Service das Konfigurations-Update. Dieses Update enthält eine oder mehrere Gerätebeschreibungen im *DeviceData*-Format. Der Konverter führt nun unter Verwendung von vordefinierten *Mapping Rules* eine Konvertierung von *DeviceData* zu einer *TD*-Abbildung durch. Dabei wird in der aktuellen Version das Mapping programmatisch unter Verwendung des in Abschnitt 3.4.1 beschriebenen *WoT*-Frameworks durchgeführt. Nach Abschließen des *Mappings* und der Erzeugung einer oder mehrerer *Thing Descriptions* werden selbige mit den Mechanismen des *WoT*-Framework in einen *RDF-Triplestore* geschrieben.

Da ein weiterer *Microservice*, der die allgemeinen *CPS*-Daten speichert, parallel dasselbe Konfigurations-Update erhält, sind die allgemeine *SQL*-Datenbank der *CPS* und der *RDF-Triplestore* jederzeit synchronisiert (Abb. 3).

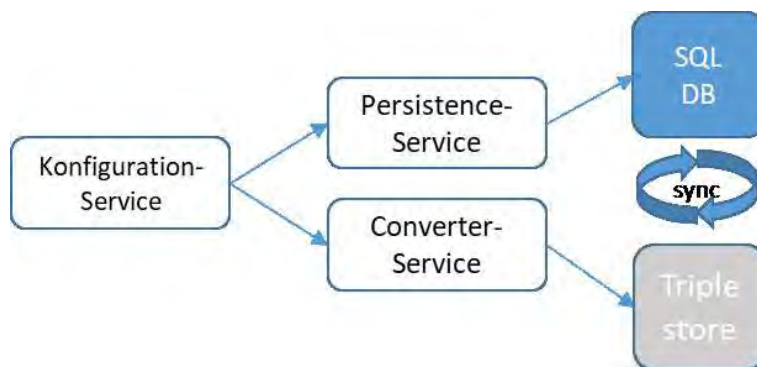


Abb. 3 Service-Umgebung zur Konvertierung und Speicherung

Zur Speicherung der *RDF-Triples* wird ein *Triplestore* des *Eclipse rdf4j*-Projektes¹³ eingesetzt. Dieser *Triplestore* bindet sich in der *Microservice*-Umgebung in einem eigenen *Docker*-Container ein und kann über eine *REST-API* adressiert werden. Zur logischen Trennung verschiedener Datensätze können *Repositories* für den *Triplestore* erstellt werden. Diese werden über einen eindeutigen *Identifier* adressiert. Die Anbindung an den *Triplestore* wird durch das *WoT*-Framework bzw. durch die *RDFBeans*-Library reali-

¹³ Eclipse rdf4j – <https://rdf4j.eclipse.org/>

siert. Der sogenannte *RDFBeanManager* baut eine *RepositoryConnection* auf und stellt ein *CRUD-Interface (Create Read Update Delete)* zur Verfügung. Die durch den Konverter erzeugten *TDs* können so komfortabel hinzugefügt, modifiziert und gelöscht werden. Der *Triplestore* enthält nach der erfolgreichen Konvertierung alle Daten des *Digital Twin* als *RDF Triples*. Der Datensatz umfasst die *WoT TD-Gerätebeschreibungen*, die *Location-View* und die *Hardware-View*. Sollen gezielt bestimmte Information aus dem *Triplestore* abgefragt werden, kann das von *rdf4j* bereitgestellte *SPARQL-Interface* verwendet werden. Die Daten können so jederzeit in standardisierter und maschinenlesbarer Form abgerufen und weiterverarbeitet werden. Eine mögliche Weiterverarbeitung ist beispielsweise die Verwendung in einem höherwertigen Service.

Die dritte Komponente ist der *WoT TD-Webservice*. Dieser Webservice ermöglicht es, die *TDs* von *Web Things* über eine *REST-API* abzurufen. Der genutzte *Application-Type* ist *JSON-LD*. Führt ein Benutzer eine Anfrage für eine *TD* durch, wird zunächst die Berechtigung des Benutzers geprüft. Besitzt der Benutzer die entsprechende Berechtigung für einen Zugriff, wird die *TD* vom *Triplestore* abgerufen und in ein Java-Objekt (*Thing.class*) deserialisiert. Anschließend wird dieses Objekt mit Hilfe des *WoT-Frameworks* und *Gson* in das *JSON-LD* Format überführt. Die in *JSON-LD* beschriebene *TD* wird nun dem Benutzer zurückgeliefert.

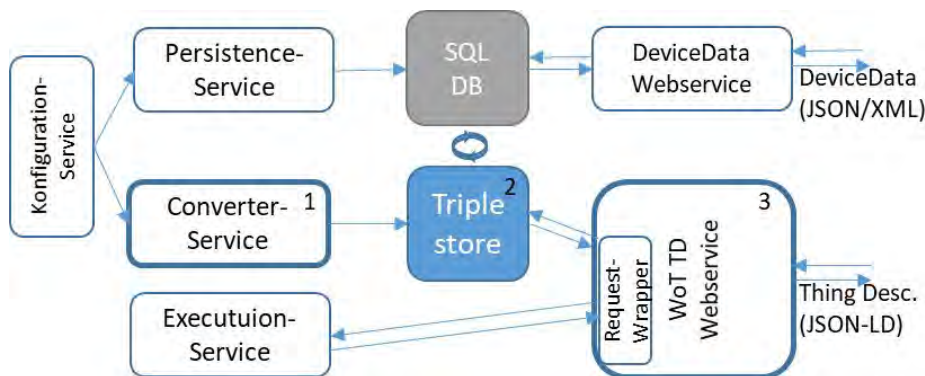


Abb. 4 Konzeptübersicht mit den Kernkomponenten: Converter-Service, *Triplestore* und *WoT TD-Webservice*

Der Zwischenschritt der Speicherung der *TD*-Daten als Java-Objekt-Instanz ist aktuell notwendig, um das *TD*, welches als *JSON-LD* repräsentiert wird, in einer für den Menschen gut lesbaren Form zu präsentieren. Ein

äquivalentes *JSON-LD* Dokument kann auch direkt aus den *Triples* des *Triplestore* generiert werden. Dieses Dokument ist aber für einen Menschen unleserlich formatiert und enthält sogenannte *Blank-Nodes*, die zur Indizierung vom *Triplestore* erzeugt wurden.

Eine weitere Aufgabe des Webservice ist die Verarbeitung von Schaltanfragen zur Ansteuerung von Aktorik. Diese Anfragen sollen zur weiteren Ausführung zum *ExecutionService* weitergegeben werden. Der *ExecutionService* besitzt aber eine auf *DeviceData* zugeschnittene Schnittstelle, daher muss der *WoT TD*-Webservice zunächst unter Verwendung eines speziellen *Request-Wrappers* eine Konvertierung vornehmen. Ist diese Konvertierung beendet, wird die Anfrage an den *ExecutionService* weitergegeben und ausgeführt.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die aktuelle Weiterentwicklung des IKT-CPS, mit der Überführung signifikanter Eigenschaften aus dem Datenmodell *DeviceData* in das *WoT TD*-Modell, konnte in Form eines ersten Prototypen erfolgreich umgesetzt werden. Dieser umfasst die Modellierung unterschiedlicher *IoT*-Geräte aus der Gebäudeautomation auf Basis des *WoT TD*-Modells mit ausgewählten Ontologien [16] für eine erweiterte Semantik. In diesem Rahmen wurde eine erste Version eines *Digital Twin* auf Basis des hier vorgestellten Datenmodells umgesetzt.

Die Weiterentwicklung des CPS unter Verwendung eines aktuell verfügbaren standardisierten Datenmodells [7] und Ontologien [16] zeigt einen praxisnahen Lösungsansatz zur Umsetzung eines *Digital Twin* im Smart Home/Smart Building.

Weitere Untersuchungen müssen zeigen, ob die ausgewählten Technologien eine umfassende Verwendung im Gebäudeautomationskontext zulassen und somit für eine nachhaltige, flexible Umsetzung eines *Digital Twin* geeignet sind. Dazu werden in weiteren Iterationen Konzepte erarbeitet und evaluiert, die den *Digital Twin* in einer verteilten Systemarchitektur adressieren. Weitergehend werden Untersuchungen durchgeführt, ob auch komplexe Geräte, bspw. aus dem Bereich Energiemanagement, mit den ausgewählten

Technologien abgebildet und in eine herstellerneutrale interoperable Dienstumgebung eingebunden werden können.

Anmerkung

Diese Arbeit wird im Rahmen des Forschungsprojektes SENSE [5] entwickelt, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie sowie von Industriepartnern im Rahmen der Forschungsförderung 01MT18007C gefördert wird.

Literaturverzeichnis

- [1] BMWi: Digitale Agenda Legislaturbericht. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Digitale-Welt/digitale-agenda-legislaturbericht.pdf?blob=publicationFile&v=20> [Zugriff am 27.09.2019].
- [2] A. Hüneburg, A. Hoffmann, I. Kunold, H. Hoffmann: ZVEI-Studie Semantische Interoperabilität, Berlin, 2017.
- [3] Fachforum Autonome Systeme im Hightech-Forum: Autonome Systeme – Chancen und Risiken für Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft, Berlin, 2017.
- [4] M. Niemeyer, I. Kunold: Security Aspects of Cyber Physical Systems and Services. Vortrag auf *Smart Energy 2016 : Digitalisierung der Energieversorgung – Treiber und Getriebene*, Dortmund. https://www.smart-systems-conference.de/wp-content/uploads/2016/11/03_Niemeyer.pdf [Zugriff am 27.09.2019].
- [5] SENSE-Konsortium: SENSE Projekt. <https://www.projekt-sense.de/> [Zugriff am 24.09.2019].
- [6] Guided-AL-Konsortium: Guided AL Projekt. <http://guided-al.de/> [Zugriff am 24.09.2019].
- [7] W3C: Web of Things (WoT) Thing Description, 16 May 2019. <https://www.w3.org/TR/wot-thing-description/> [Zugriff am 24.09.2019].
- [8] W3C: Linked Data for the semantic web. <https://www.w3.org/standards/semanticweb/data/> [Zugriff am 02.04.2019].
- [9] KNX Association: KNX IOT SPECIFICATION, 2018.

- [10] ETSI: TS 103 264 V2.1.1 SAREF version 2 Technical Specification. https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103200_103299/103264/02.01.01_60/ts_103264v020101p.pdf [Zugriff am 11.07.2018].
- [11] W3C: RDF1.1 primer. <https://www.w3.org/TR/rdf11-primer/> [Zugriff am 02.04.2019].
- [12] A. Kalyanpur, D. Jimenez, S. Battle, J. Padget: Automatic Mapping of OWL Ontologies into Java, 2004. https://www.researchgate.net/publication/2874611_Automatic_Mapping_of_OWL_Ontologies_into_Java [Zugriff am 07.11.2018].
- [13] JSON-LD. <https://json-ld.org/> [Zugriff am 11.07.2018].
- [14] M. Mohammadi, A. Al-Fuqaha, M. Guizani, J.-S. Oh: Semisupervised Deep Reinforcement Learning in Support of IoT and Smart City Service. In: *IEEE Internet of Things Journal* 5 (2), S. 624–635, April 2018.
- [15] A. Nagy, H. Kazmi, F. Cheaib, J. Driesen: Deep Reinforcement Learning for Optimal Control of Space Heating, 2018.
- [16] Schema.org: IoT Schema. <http://iotschema.org/> [Zugriff am 25.09.2019].
- [17] Schloman, Kleeberger, Geiger, Pich, Gruber: Energieverbrauch des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD) in Deutschland für die Jahre 2011 bis 2013.
- [18] Universität Karlsruhe: Effiziente Energienutzung in Bürogebäuden, Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2008.
- [19] Institut für Kommunikationstechnik der FH Dortmund: Schlussbericht Forschungsprojekt INES (Intelligent e-net switching), Dortmund, 2014.
- [20] U. Bogenstätter: Bauwerkszuordnungskatalog ifBOR BZK 2007-10, Institute for Building Operations Research at Nürtingen-Geislingen University, Nürtingen-Geislingen, 2007.
- [21] SIA, Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein: Leitfaden für die Anwendung der Empfehlung SIA 380/4, Zürich, 1996.
- [22] T. Heath: linkeddata.org. <http://linkeddata.org/tools> [Zugriff am 07.11.2018].
- [23] Eclipse-Foundation: Eclipse rdf4j, Scalable RDF for Java. <https://rdf4j.eclipse.org/> [Zugriff am 25.09.2019].
- [24] RDFBeans: RDFBeans, Object-RDF mapping framework for Java. <https://rdfbeans.github.io/> [Zugriff am 25.09.2019].

Prognose des Strompreises in Deutschland mithilfe neuronaler Netze

Felix Wentzel, Alexander Stuckenholz

Hochschule Hamm-Lippstadt

Felix-Mario.Wentzel@stud.hshl.de

Alexander.Stuckenholz@hshl.de

Strompreisprognosen sind für eine sichere und kosteneffiziente Energieversorgung unerlässlich. Für eine möglichst genaue Prognose müssen diverse Einflussfaktoren wie z.B. das Wetter berücksichtigt werden, woraus sehr große Datenmengen resultieren. Einem Menschen ist es nahezu unmöglich, aus einer solchen Masse an Daten komplexe Zusammenhänge zu erkennen, um eine Prognose zum Strompreis zu erstellen. An dieser Stelle kommt ein Long-Short-Term-Memory-neuronales-Netz (LSTM) zum Einsatz. Das LSTM verarbeitet diese Datenmenge und berechnet eine Prognose des Strompreises, die im Durchschnitt um weniger als 3 €/MWh vom tatsächlichen Preis abweicht.

1 Strompreis

Strom, den Stromanbieter weiterverkaufen, wird an der Strombörse in Leipzig gehandelt. Daher müssen Stromanbieter Wirtschaftlichkeitsentscheidungen treffen, die mit einer Unsicherheit verbunden sind. Eine Prognose des Strompreises kann diese Unsicherheit reduzieren, wodurch ein enormer wirtschaftlicher Vorteil entstehen kann.

Eine Vorhersage des Strompreises ist nicht trivial – er ergibt sich aus Angebot und Nachfrage. Sowohl auf Angebots- als auch auf Nachfrageseite wirken aber volatile Einflussfaktoren wie Tages- und Jahreszeit, Witterungsverhältnisse wie Temperatur, Wind und Sonneneinstrahlung und die Höhe von Brennstoffpreisen [1].

Für eine Prognose müssen diese Einflussfaktoren in einem mathematischen Modell miteinander in Beziehung gebracht werden. Derartige Modelle basieren meist auf statistischen Methoden oder Machine Learning. Beispiele für statistische Methoden sind gleitendes Mittel, lineare Regression oder autoregressives integriertes gleitendes Durchschnittsmodell (ARIMA). Zu den Machine-Learning-Ansätzen zählen Multilayer Perceptrons, Convolutional Neural Networks und LSTMs. Im Folgenden wird die Strompreisprognose auf Basis von LSTMs dargestellt.

2 Aufbau und Funktion eines LSTMs

LSTMs sind eine verbesserte Version rekurrenter neuronaler Netze. Beide bestehen aus einem bestimmten Zelltyp, der immer wieder mit sich verbunden ist. Der Zelltyp eines LSTM ist aber komplexer, da die LSTM-Zelle einen Zellstatus und Möglichkeiten, diesen zu beeinflussen, besitzt.

Der Zellstatus wird in der Abbildung 1 durch die obere durchgehende Linie dargestellt. Er ist sozusagen das Gedächtnis und somit der zentrale Punkt des Netzes. Er transportiert Informationen entlang des ganzen Netzes, die auf dem Weg von Gates verändert werden können.

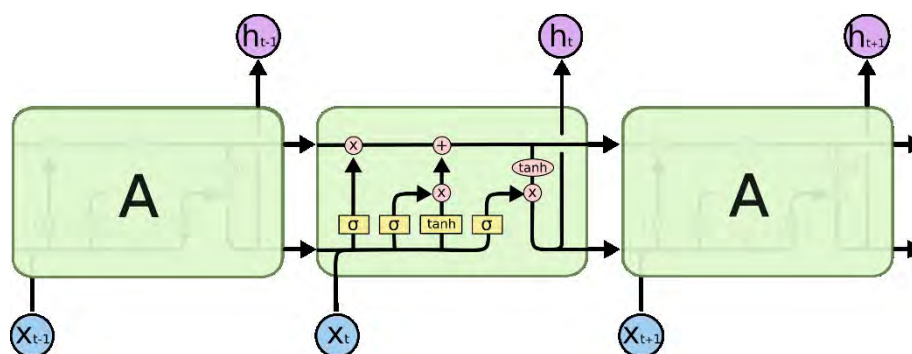


Abb. 1 Darstellung eines „ausgerollten“ LSTMs mit drei Zellen.

Neben der Zellstruktur sind jeweils die Inputs und Outputs sowie deren Verläufe innerhalb der Zelle abgebildet.

Gates sind simple neuronale Netze (Perzeptrons), die für Inputs mit entsprechenden Gewichtungen einen Wert zwischen 0 und 1 ausgeben und somit

bestimmen können, wie stark die verschiedenen Inputinformationen „x“ den Zellstatus beeinflussen (0 = gar nicht, 1 = sehr stark). Sie werden in der Abbildung durch gelbe Kästchen dargestellt.

Neben dem Zellstatus wird auch ein versteckter Status „h“ von Zelle zu Zelle weitergegeben. Dieser beeinflusst zusammen mit den Inputs den Zellstatus. Er beschreibt in diesem Fall die Prognose dieses Zeitschrittes [1].

Wie genau das Netz aufgebaut wird und wie lernfähig es ist, wird über Parameter bestimmt. Der wichtigste Parameter eines neuronalen Netzes ist die Lernrate. Sie steuert die Lernfähigkeit und -geschwindigkeit des Netzes, indem sie bestimmt, wie stark das Netz die Gewichtungen der einzelnen Inputs verändert. Wird die Lernrate zu hoch oder zu niedrig angesetzt, lernt das Netz suboptimale Konfigurationen der Gewichtungen, wodurch das Netz ungenaue Prognosen liefert.

Das hier verwendete LSTM nutzt die Daten der letzten zwölf Stunden als Input, besteht also aus zwölf Zellen im Inputlayer. Die Lernrate wurde auf 0,0005 festgelegt. Hinzu kommen zwei Hidden Layer. In jeder LSTM-Zelle befinden sich zehn Speicherzellen/Neuronen. Diese Konfiguration wurde empirisch bestimmt und führte zu den besten Fehlerwerten.

Die Implementierung des Netzes wurde mithilfe der Machine-Learning-Bibliothek Tensorflow und der Programmiersprache Python durchgeführt.

3 Strompreisprognose

Auf Basis des zuvor beschriebenen LSTMs wurde eine Kurzfristprognose der jeweils nächsten zwölf Stunden des deutschen Strompreises erstellt. Für einen solchen Zeitraum kann die Wettervorhersage als verlässlich angesehen werden [2], was für einen späteren Anwendungsfall relevant wäre. Die historischen Strompreisdaten entstammen der Datenbank der Bundesnetzagentur | SMARD.de für den Zeitraum ab dem 1.1.2015 bis zum 7.8.2019. Für den gleichen Zeitraum werden die Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes genutzt, die stündlich für alle Wetterstationen in Deutschland verfügbar sind. Für die Prognose wurden Wetterstationen aus Bielefeld, Bremen, Leipzig und München ausgewählt und deren Werte gemittelt, um einen deutschlandweiten Durchschnittswert zu erhalten.

Zur Bewertung der Prognosegüte wird der Root Mean Square Error (RMSE) verwendet. Er gibt an, wie stark eine Prognose im Durchschnitt von den tatsächlichen Beobachtungswerten abweicht. Berechnet wird der RMSE aus der Quadratwurzel des durchschnittlichen Prognosefehlers. Je größer der RMSE ist, desto schlechter ist die Anpassung des Modells (spezifische Konfiguration eines neuronalen Netzes).

4 Ergebnisse

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen jeweils eine 12-Stunden-Wochenendprognose (blau) im Vergleich zum tatsächlichen Preis (rot) sowie den jeweiligen RMSE.

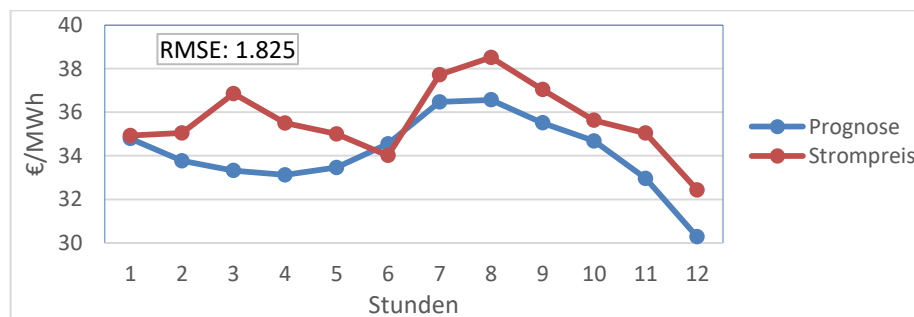


Abb. 2 Vergleich einer Prognose ausgehend von einer Samstagnacht (3.8.2018, 0 Uhr) mit dem tatsächlichen Strompreis. Der RMSE ist der Abbildung beigelegt.

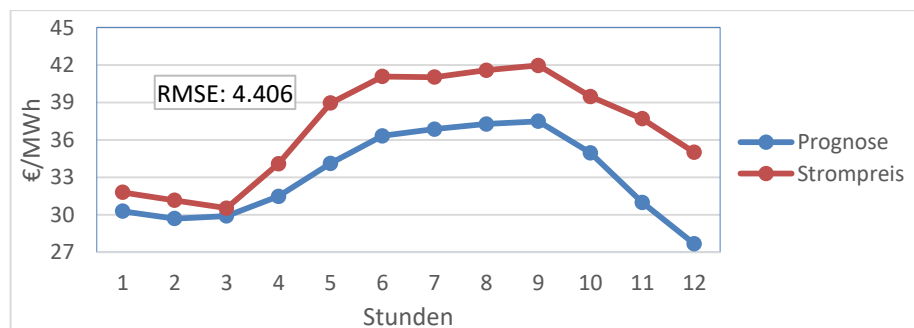


Abb. 3 Vergleich einer Prognose ausgehend von einem Samstag (3.8.2018, 12 Uhr) mit dem tatsächlichen Strompreis. Der RMSE ist der Abbildung beigelegt.

Es fällt auf, dass die Prognosen trotz einer leichten zeitlichen Verschiebung einen starken Unterschied in der Genauigkeit aufweisen. Ein Wert von 1.825, der für eine nächtliche Prognose erreicht wurde, ist bereits gut, aber die Genauigkeit für Tagesstunden bietet noch Raum für Verbesserungen.

Die Prognosen für Wochentage sind insgesamt ungenauer und bewegen sich um einen RMSE von 5 für nächtliche und 6 für tagsüber Prognosen, was ebenfalls ausbaufähig ist.

5 Fazit

Die Strompreisprognose mithilfe von neuronalen Netzen ist prinzipiell möglich. Da die Genauigkeit aber sehr stark von den Parametern und Tageszeiten abhängt, kann hier eine gute, aber nicht optimale Konfiguration gezeigt werden.

Zur Verbesserung des Vorhersagemodells sollten mehr bzw. auch andere Daten in die Prognose einfließen. Man könnte auch einzelne Modelle für Wochentage und Wochenenden sowie Tages- und Nachtzeiten trainieren.

Zuletzt wäre ein Vergleich zu anderen Methoden sinnvoll, um zu überprüfen, wie groß der tatsächliche Nutzen eines neuronalen Netzes zur Strompreisprognose ist.

Referenzen

- [1] Christopher Olah: Understanding LSTMs. <http://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/> – Aktualisierungsdatum: 05.09.2019.
- [2] Markus Übel: Numerische Wettervorhersage – Ensemblevorhersagen zur Abschätzung der Vorhersageunsicherheit. https://www.dwd.de/DE/wetter/thema_des_tages/2019/5/26.html – Aktualisierungsdatum: 27.08.2019.

2 Intelligente Energiesysteme

Autarke Stromversorgung in lokalen Netzen mit speichergestützten Kleinwindanlagen

Matthias Wendel

E.ON Energie Deutschland GmbH, Kühnehöfe 1–5, 22761 Hamburg

matthias.wendel@eon.com

1 Einleitung

Lokal erzeugte Windenergie ist neben Solarstrom ein wesentlicher Faktor für eine klimaneutrale und nachhaltige Energiegewinnung für gewerbliche und industrielle Betriebe, aber auch im öffentlichen Sektor. Effiziente Kleinwindkraftanlagen steigern die Wirtschaftlichkeit der Energieversorgung erheblich, wenn sie auf den Eigenverbrauch im Betrieb optimiert werden. Sie nehmen verhältnismäßig wenig Platz in Anspruch und produzieren grünen Strom direkt vor Ort. Setzt man auf die passende Windkraftanlage, amortisiert sich die Investition innerhalb weniger Jahre. Die „E.ON Windrad 250“-Windkraftanlage von b.ventus ist daher mit ihren 250 kW für genau diesen Eigenverbrauch optimiert und zielt auf eine Eigenverbrauchsquote von bis zu 80 Prozent. Dank der nahezu kostenlosen Energie des Windes können Unternehmen, Gewerbetreibende und Kommunen in der Regel mehr als 60 Prozent Stromkosten einsparen.

2 Zielgruppe und angebotener Mehrwert

Eine solche Anlage mit einem im Verhältnis zur geringen Gesamthöhe von unter 50 Metern verhältnismäßig großen Rotordurchmesser verspricht eine beachtliche Leistung: Bei einer durchschnittlichen Standard-Windverteilung von 5 m/s jährlich können bei der installierten Leistung von 250 kW mehr als

600 MWh Strom erzeugt werden. Die Windkraftanlage eignet sich somit insbesondere für Kommunen, Stadtwerke, große landwirtschaftliche Betriebe und das produzierende Gewerbe. Damit sichert sich der lokale Betreiber mit dieser effizienten, wirtschaftlichen und nachhaltigen Eigenversorgung nicht nur gegen steigende Energiepreise, sondern auch gegen den schwer abschätzbaren Wandel im regulierten Energiemarkt und sich stetig ändernde Steuergesetzgebungen ab.

2.1 Kleinwindanlagen in gewerblichen und kommunalen Betrieben

Es gibt und gab viele Konzepte für Kleinwindkraft auf dem Markt – oft mit wenig Erfolg. Die Kleinwindanlage „E.ON Windrad 250“ von b.ventus löst diese Herausforderungen, denen Kleinwindkraftanlagen in der Vergangenheit gegenüberstanden – allen voran die des Energieertrags, denn der ist bei der Anlage von E.ON und b.ventus aufgrund der Leistungsklasse von 250 kW deutlich höher als bei anderen Kleinwindanlagen, die i.d.R. über kleinere zweistellige kW-Leistungen und daher über ein ungünstigeres Verhältnis zwischen Investitionskosten und möglichem Ertrag verfügen.

Aufgrund der attraktiven Leistungsklasse der Anlage kann die wirtschaftliche und nachhaltige Eigenversorgung mit Windenergie insbesondere für Gewerbeparks, Industrieunternehmen, aber auch für kommunale Betriebe und andere lokale Einzelkunden, die über Jahresverbräuchen von < 400 MWh/a verfügen, interessant werden. Hauptziel der E.ON-Lösung ist dabei immer der wirtschaftliche Betrieb der Anlage zur Reduzierung der Energiekosten durch Eigenerzeugung und nicht der Betrieb der Anlage zur Maximierung von Subventionszahlungen aus dem EEG.

Setzt man auf die passende Windkraftanlage, amortisiert sich die Investition innerhalb weniger Jahre – und damit ist nur einer der Vorteile genannt.

3 Das Betriebs-Szenario

3.1 Lokale Stromerzeugung aus Windkraft und Solar

Der Energiebedarf von energieintensiven Betrieben unterliegt über den 24-Stunden-Tag und die 7-Tage-Woche starken Schwankungen. Auch ist die Windkraft-Erzeugung abhängig vom wechselnden Windangebot. Nur selten kommt es vor, dass eine Verbrauchsspitze durch lokal erzeugte Windkraft abgedeckt wird. Der am Wochenende und nachts erzeugte überschüssige Strom muss ins öffentliche Netz eingespeist werden, Verbrauchsspitzen wieder von dort bezogen werden. Um eine möglichst autarke Stromversorgung auf Kundenseite zu erreichen, sind somit weitere Erzeugungsanlagen und/oder der Einsatz von Speichern erforderlich. Eine zusätzlich installierte Photovoltaikanlage kann während der Tageszeiten weiteren Strombedarf decken, ist aber ebenfalls volatil und daher nicht verlässlich planbar. Außerdem haben Solaranlagen größerer Leistungsklassen im Vergleich zur Windkraftanlage einen deutlich größeren Flächenbedarf, der nicht überall zur Verfügung steht.

3.2 Der Energiespeicher-Bedarf bei Einspeisungs- und Lastwechseln

Die meisten Betriebe sind auch in den Zeiten, in welchen die Sonne nicht scheint und der Wind nicht weht, von einer leistungsfähigen Stromversorgung abhängig. Der Anschlusswert zum öffentlichen Stromnetz kann daher i.d.R. nicht oder nur sehr eingeschränkt reduziert werden. Für eine weitgehend autarke Eigenstromversorgung werden Energiespeicherstrukturen notwendig, welche Lastwechsel von über ± 300 kW ausgleichen können. Neben dem Einsatz „klassischer“ elektro-chemischer Speichertechnologien sei hier verwiesen auf den Lösungsansatz mit Carnot'schen Energiespeichern mit einem rechts- oder linksläufigen Clausius-Rankine-Prozess. Gepaart mit der Möglichkeit einer lokalen Segmentkopplung, wurde die Lösung auf der *Smart Energy*-Konferenz im November 2018 von der Hochschule Zittau-Görlitz [1] und der Spilling Technologies GmbH Hamburg [2] vorgetragen. Auch sollte zum Thema Speicher und/oder stationärer, planbarer Zusatz-Eigenerzeugung das Thema der synthetischen Kraftstoffe – bis hin zum Einsatz von CO_2 -neutral erzeugten, kurzkettingen Kohlenwasserstoffen wie

z.B. Methanolen (M100) oder Ethanolen (E85/E100) eine tiefere Berücksichtigung finden. Über reine Batteriespeicher der heutigen Technologie kann auch auf längere Sicht eine autarke Energieversorgung durch erneuerbare Energie gerade für größere Industrieunternehmen nicht umgesetzt werden.

4 Das Leistungs-Portfolio der Kleinwindanlage von b.ventus und E.ON

4.1 Effiziente Kleinwindkraftanlagen

Die Wirtschaftlichkeit der Energieversorgung – und damit die Senkung der Energiekosten auf Kundenseite – kann erheblich gesteigert werden, wenn die Erzeugung erneuerbarer Energie – z.B. aus lokalen Windrädern – konsequent für den Eigenverbrauch im Betrieb optimiert wird. Einen neuen Lösungsansatz stellen die Kleinwindanlagen von E.ON dar, da sie nicht nur speziell für den Eigenverbrauch konzipiert sind, sondern auch über verhältnismäßig einfache Bau- und Betriebseigenschaften verfügen. Sie nehmen wenig Platz in Anspruch und produzieren grünen Strom direkt vor Ort. In der Regel amortisiert sich die Investition für solch ein Windrad innerhalb weniger Jahre.

4.2 Hohe Stromkostensparnis

Die Kleinwindkraftanlage „E.ON Windrad 250“ ist für den Eigenverbrauch optimiert und kann – je nach Kundenbedarf – Eigenverbrauchsquoten von bis zu 80 Prozent erreichen. Dank der nahezu kostenlosen Energie des Windes – auf den selbst erzeugten und genutzten Strom sind 40 Prozent der EEG-Umlage zu entrichten, also etwa 2,56 Cent pro kWh (Stand März 2019) – können Unternehmen, Gewerbetreibende und Kommunen in der Regel mehr als 60 Prozent Stromkosten einsparen. Der überschüssige Strom wird ins öffentliche Netz eingespeist und entsprechend vergütet.

4.3 Kurze Amortisationszeit

Aufgrund der hohen Effizienz auch bei geringeren Windgeschwindigkeiten und der damit möglichen hohen Stromersparnis amortisiert sich das Windrad von E.ON im Schnitt bereits innerhalb von sechs bis zehn Jahren. Da die Anlage auf Eigenverbrauch optimiert ist, ist sie auch ohne Subventionen wirtschaftlich.

4.4 Hohe Effizienz – auch in windarmen Regionen

Die patentierte Technologie wurde speziell für den Eigenverbrauch bei deutschen Binnenlandverhältnissen entwickelt und läuft bereits bei einer Windgeschwindigkeit von 2,5 m/s an – das entspricht einer leichten Brise. Das Windrad kann also auch in mittleren Betrieben mit einem Jahresverbrauch ab 400 MWh Strom und in windarmen Regionen wie Bayern effizient und wirtschaftlich eingesetzt werden.

Jährlicher Windproduktion in MWh bei einer durchschnittlichen lokalen Windgeschwindigkeit:

- 4 m/s 369 MWh p.a.
- 4,5 m/s 496 MWh p.a.
- 5 m/s 627 MWh p.a.
- 5,5 m/s 755 MWh p.a.
- 6 m/s 877 MWh p.a.

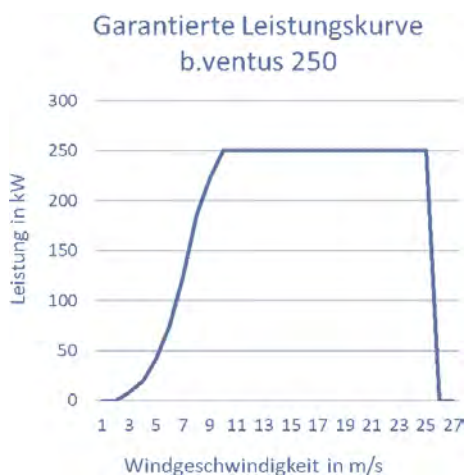


Abb. 1 Garantierte Leistungskurve b.ventus 250

4.5 Einfaches Genehmigungsverfahren

Da die Kleinwindanlage weniger als 50 Meter hoch ist, ist sie als Nebenanlage eines Betriebes nicht raumbedeutsam und daher auch nicht an Raumordnungs- oder Flächennutzungspläne gebunden. Sie kann somit auch außerhalb von Vorranggebieten errichtet werden, also beispielsweise auf Betriebsgeländen in Gewerbe- und Mischgebieten oder auf landwirtschaftlichen Flächen. Die Genehmigung für das Windrad ist denkbar einfach: Im Gegensatz zu einem langwierigen Zulassungsverfahren nach dem Bundesimmissionsschutzgesetz, wie bei großen Windkraftanlagen, ist für die Installation einer Kleinwindanlage von E.ON lediglich eine Baugenehmigung erforderlich – genau wie beispielsweise für den Bau einer neuen Halle. In der Regel dauert die Genehmigung drei bis fünf Monate.

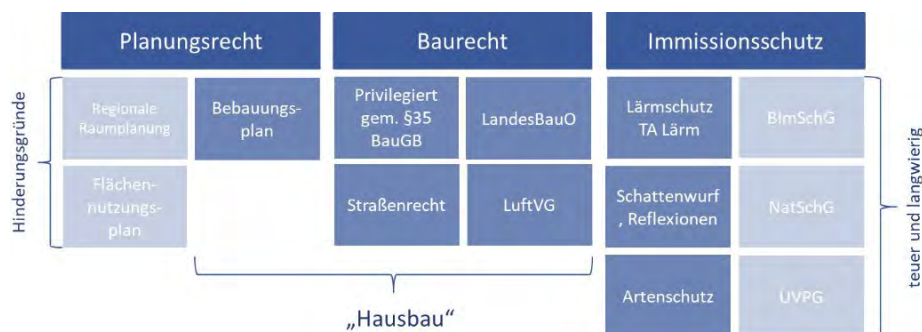


Abb. 2 Übersicht Planungsrecht, Baurecht und Immissionsschutz

4.6 Geringe Flächennutzung

Im Gegensatz zu einer Photovoltaikanlage braucht ein Windrad dieser Bauart sehr wenig Platz, um die gleiche oder mehr Leistung zu erzeugen. Dafür ist lediglich eine Grundfläche mit einem Durchmesser von acht Metern für das Fundament notwendig, sodass es auch den Anbau auf landwirtschaftlichen Flächen kaum beeinträchtigt. Erntemaschinen können in unmittelbarer Umgebung des Windrads problemlos arbeiten. Zu Gebäuden sollte allerdings ein Mindestabstand von 50 Metern eingehalten werden.

4.7 Extrem leiser Betrieb

Das Windrad verfügt über einen innovativen Direktantrieb, der nicht nur Reibungsverluste minimiert, sondern die Windkraftanlage sehr leise macht. Bereits ab 80 Metern Entfernung erfüllt es die Lärmschutzauflagen in Mischgebieten bei Nacht von weniger als 45 Dezibel.

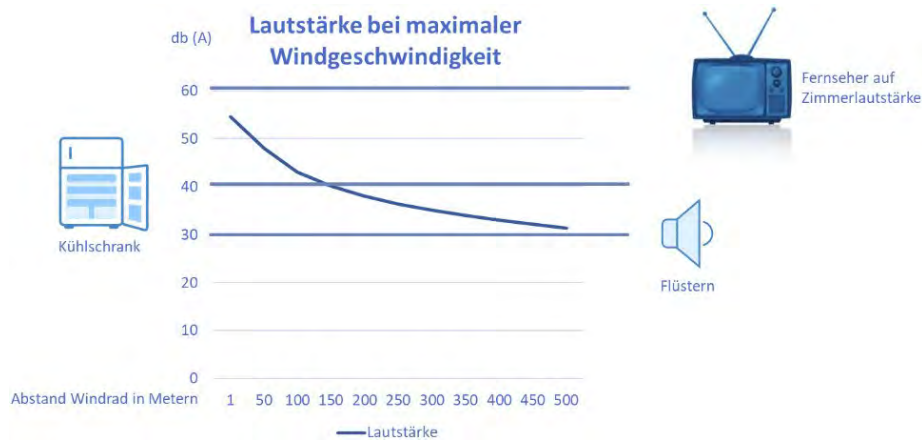


Abb. 3 Schall-Emission bei maximaler Windgeschwindigkeit

4.8 Nachhaltig und ideal für Unternehmen

Die Kleinwindkraftanlage erzeugt grüne Energie genau dort, wo sie auch genutzt wird: im eigenen Betrieb. Sie erzielt abhängig von der benötigten Energie eine CO₂-Einsparung von bis zu 400 Tonnen jährlich. Da bis zu 80 Prozent des erzeugten Stroms direkt vor Ort verbraucht werden, sind auch keine Investitionen in den Netzausbau seitens der Netzbetreiber notwendig, um den Einsatz der Windanlage zu ermöglichen. Damit ist sie der ideale und nachhaltige Einstieg in die (Eigen-)Nutzung erneuerbarer Wind-Energien und damit auch die Abkehr von der derzeitigen Ausrichtung der Windenergie nahezu ausschließlich auf den Erhalt von Subventionen (durch die Allgemeinheit). Aber auch als Ergänzung zu einer bestehenden PV-Anlage ist das E.ON-Windrad bestens geeignet. Denn in der Regel weht der Wind stärker, wenn die Sonne nicht scheint – und umgekehrt.

4.9 Wartungsarm

Der Direktantrieb der Kleinwindanlage hat einen weiteren Vorteil: Er ist deutlich weniger komplex aufgebaut als ein klassischer Motor mit Getriebe. Daher ist die Anlage äußerst wartungsarm und muss nur einmal jährlich überprüft werden.

4.10 Technische Compliance mit Sicherheitszertifikat

Die Kleinwindkraftanlage wird vom bekannten Windturbinen- und Liftanlagenhersteller der Unternehmensgruppe Leitner in Südtirol nach höchsten Qualitätsansprüchen gefertigt. Der Windradtyp wurde entsprechend geprüft und mit dem nötigen Sicherheitszertifikat versehen.

5 Projektbeispiel einer Kleinwindanlage von b.ventus und E.ON

In einem ersten Pilotprojekt zwischen b.ventus und E.ON wurde ein Prototyp des E.ON Windrad 250 errichtet und befindet sich seit der Errichtung erfolgreich im Betrieb. Dabei zeichnet sich ab, dass die vorab erstellten Leistungskurven im realen Betrieb erfreulicherweise z.T. deutlich übertroffen und somit die Wirtschaftlichkeit der Anlagen für den Kunden nochmals gesteigert werden.

Die öffentliche Einweihung der Pilotanlage ist erfreulicherweise nicht nur auf eine sehr große Resonanz bei potenziellen weiteren Kunden getroffen, sondern wurde auch von einer Vielzahl von Medien aufgenommen. So schrieb z.B. die EUWID-Energie:

„E.ON und b.ventus haben den Prototypen der patentierten Kleinwindanlage fürs Betriebsgelände im schleswig-holsteinischen Steinfeld in Betrieb genommen. Damit steht das erste von insgesamt 49 Windrädern mit einer Höhe von 49 Metern, die die beiden Unternehmen bis Ende 2020 in Deutschland errichten wollen. Die Anlage soll einen Landwirtschaftsbetrieb jährlich mit 660 MWh selbst produziertem Strom versorgen und rund 370 Tonnen CO₂ im Jahr vermeiden.“ [3]

Die mittlerweile sehr hohe Kundenresonanz zeigt, dass gerade für Kleinwindanlagen der Leistungsklasse um 250 kW ein hohes Interesse besteht und daher nun auch die Windkraft erfolgreich zur Eigenstromerzeugung insbesondere für Gewerbe und Industrie eingesetzt werden kann.



Abb. 4
Installation einer b.ventus-
Kleinwindanlage für einen
landwirtschaftlichen Betrieb

Referenzen

- [1] Sebastian Braun, Alexander Kratzsch: Thermische Energiespeicher für die Sektorenkopplung. In: U. Großmann, I. Kunold, C. Engels (Hg.): *Smart Energy 2018 : Vom Smart Home bis zur Smart City – Aspekte der Digitalisierung*. Glückstadt: Verlag Werner Hülsbusch, S. 36–46
- [2] Matthias Wendel: Industrielösung eines reversiblen Wärmekraftprozesses mit skalierbarer thermischer Energie-Speicherkapazität. In: U. Großmann, I. Kunold, C. Engels (Hg.): *Smart Energy 2018 : Vom Smart Home bis zur Smart City – Aspekte der Digitalisierung*. Glückstadt: Verlag Werner Hülsbusch, S. 24–35
- [3] EUWID-Energie: E.ON und b.ventus weihen erste Kleinwindanlage ein. <https://www.euwid-energie.de/e-on-und-b-ventus-weihen-erste-kleinwindanlage-ein/>

Virtuelles Kraftwerk Neckar-Alb: eine Demonstrations- und Versuchsanlage

*Florian Heimgärtner¹, Bernhard Nold², Frank
Truckenmüller², Michael Menth¹*

¹ Universität Tübingen, Lehrstuhl Kommunikationsnetze
{[florian.heimgaertner](mailto:florian.heimgaertner@uni-tuebingen.de), [menth](mailto:menth@uni-tuebingen.de)}@uni-tuebingen.de

² Hochschule Reutlingen, Reutlinger Energiezentrum
{[bernhard.nold](mailto:bernhard.nold@reutlingen-university.de), [frank.truckenmueller](mailto:frank.truckenmueller@reutlingen-university.de)}@reutlingen-university.de

Ein Virtuelles Kraftwerk ist ein Verbund von Energieanlagen, koordiniert von einem gemeinsamen Leitsystem, um eine bessere Ausnutzung wetterabhängiger Energiequellen oder die gemeinsame Vermarktung von erzeugtem Strom zu ermöglichen. Der Demonstrator Virtuelles Kraftwerk Neckar-Alb ist eine Demonstrationsplattform für Forschung und Lehre, die Anlagen auf dem Campus der Hochschule Reutlingen und verteilte Anlagen in der Region Neckar-Alb integriert.

1 Einleitung

Der Ausbau erneuerbarer Energien führt durch die überwiegend wetterabhängige Erzeugung zu einem zeitlich schwankenden Angebot an Strom. Die zeitliche Verschiebung des Strombezugs und der flexible Einsatz von wetterunabhängigen Erzeugern ermöglichen eine verbesserte Ausnutzung dieses Angebots. Dezentrale Kraft-Wärme-Kopplung kann zur flexiblen Stromerzeugung beitragen, während flexible Verbraucher durch die Elektrifizierung des Wärme- und Verkehrssektors zunehmend zur Verfügung stehen. Zusätzlich bietet in Zukunft die Flexibilisierung von Industrieprozessen mit Speichern die Möglichkeit, den Lastgang zeitlich besser an das Energieangebot anzupassen.

Zeitliche Flexibilität beim Anlagenbetrieb kann sowohl zur Minimierung der Bezugskosten für Strom aus dem Netz als auch zur Vermarktung von erzeugtem Strom eingesetzt werden. Dies erfordert jedoch eine intelligente Koordination der einzelnen Anlagen unter Einbeziehung von Prognosedaten. Einen solchen Verbund von verteilten Energieerzeugern, Energiespeichern und steuerbaren Verbrauchern, die von einem gemeinsamen Leitsystem koordiniert werden, bezeichnet man als Virtuelles Kraftwerk. Im Rahmen des Demonstrationsprojekts Virtuelles Kraftwerk Neckar-Alb ist mit Förderung des Landes Baden-Württemberg eine Demonstrationsanlage [1, 2, 3] an der Hochschule Reutlingen errichtet worden.

2 Struktur und Komponenten

Abbildung 1 zeigt den Aufbau des Demonstrators.

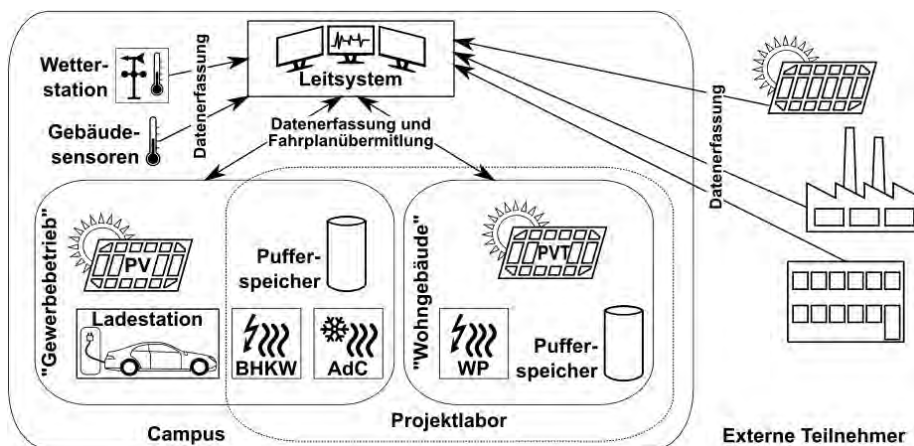


Abb. 1

Übersicht über den Aufbau des Demonstrators mit lokalen und externen Anlagen

In einem Projektlabor und auf dem Campus sind zwei Gruppen von Anlagen installiert worden, die als virtuelle Microgrids betrieben werden. Die Microgrids sind insofern virtuell, als die Anlagen im Hochschulnetz verteilt sind und keine abgeschlossenen Subnetze darstellen. Die erste Anlagengruppe repräsentiert einen Gewerbebetrieb und umfasst eine 212-kWp-Photovoltaik-Anlage, ein gasbetriebenes Blockheizkraftwerk mit 20 kW elektrischer

Leistung, eine Adsorptionskältemaschine, einen thermischen Speicher sowie vier 22-kW-Ladepunkte für Elektrofahrzeuge. Die zweite Anlagengruppe repräsentiert ein Wohngebäude und besteht aus einem photovoltaisch-thermischen Hybridkollektor, einer Wärmepumpe mit Eisspeicher, einem thermischen Speicher und Niedertemperaturheizungen. Die Anlagengruppen sind jeweils mit Messinfrastruktur und einer intelligenten Anlagensteuerung ausgestattet.

Zusätzlich sind reale Gewerbebetriebe aus der Region zur Datenerfassung eingebunden. Einzelne Anlagen werden außerdem als digitaler Zwilling in einer Realtime-Simulation abgebildet und ebenfalls ins Virtuelle Kraftwerk eingebunden [4]. Sensoren in Gebäuden der Hochschule sowie eine Wetterstation liefern weitere Messdaten.

Ein übergeordnetes Leitsystem auf Basis von WinCC OpenArchitecture koordiniert die Anlagen, erstellt Energiebedarfsprognosen und mithilfe von Energiepreisprognosen optimierte Fahrpläne.

Die Kommunikation zwischen Anlagensteuerungen und Leitsystem erfolgt über TCP/IP. Für die Übermittlung von Zustandsdaten und Fahrplaninformationen kommt eine HTTP-Schnittstelle mit JSON als Datenformat zum Einsatz. OpenVPN-Tunnel schützen die Datenübertragung gegen Manipulation und Abhören. Der zugelassene Teilnehmerkreis ist durch die Authentifikation mit X.509-Zertifikaten eingeschränkt. Zudem ermöglicht OpenVPN dem Leitsystem, die Mess- und Steuereinrichtungen zu erreichen, deren IP-Adressen durch Network Address Translation maskiert sind (z. B. bei externen Teilnehmern über den kundeneigenen Internet-Zugang).

Die Datenübermittlung zwischen der Anlagensteuerung und den einzelnen Anlagen basiert auf den anlagenspezifischen Schnittstellen und verwendet Modbus, analoge und digitale Signale oder proprietäre Protokolle.

3 Forschungsarbeiten am Demonstrator

Der Demonstrator wird am Reutlinger Energiezentrum als Versuchsplattform für Forschung und Lehre genutzt. In der laufenden Betriebsphase wird die Infrastruktur für Kommunikation, Monitoring und Steuerung getestet. Außerdem laufen Untersuchungen zur Elektromobilität, externen Industriebetrieben und zur Optimierung von Fahrplänen auf Basis von Preisvorhersagen

für den Day-Ahead-Energiemarkt [5]. In Folgeprojekten werden der automatisierte Handel mit Blockchain-Technologie und der gemeinschaftsdienliche Betrieb von Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge erprobt.

4 Informations- und Öffentlichkeitsarbeit

Neben dem Einsatz in Forschung und Lehre dient der Demonstrator auch der Informations- und Öffentlichkeitsarbeit. Das Projektlabor mit den Anlagen auf dem Campus kann von interessierten Besuchern besichtigt werden. Neben den Energieanlagen steht dort ein interaktives Exponat bereit, das die Herausforderungen der Energiewende und die Rolle des Virtuellen Kraftwerks spielerisch erläutert.

Zudem bestehen im Rahmen des Demonstrationsprojekts Angebote für Energieanalyse und -beratung für Betriebe in der Region Neckar-Alb. Hierbei werden Einspar- und Flexibilisierungsmöglichkeiten ermittelt sowie Potenziale für die Teilnahme an Virtuellen Kraftwerken aufgezeigt.

Danksagungen

Das Projekt wurde über das Programm „Smart Grids und Speicher Baden-Württemberg“ des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg mit Mitteln des Landes durch den Projektträger Karlsruhe (PTKA) am Karlsruher Institut für Technologie gefördert (Förderkennzeichen BWSGD15004-15012). Für den Inhalt dieses Beitrags sind ausschließlich die Autoren verantwortlich.

Referenzen

- [1] F. Heimgärtner et. al.: Das Demonstrationsprojekt Virtuelles Kraftwerk Neckar-Alb. In: Christoph Kutter (Hrsg.): *VDE-Kongress 2016 – Internet der Dinge* :

- Technologien/Anwendungen/Perspektiven*. Mannheim, 7.–8. Nov. 2016 [CD-ROM]. Berlin/Offenbach: vde Verlag
- [2] F. Heimgärtner, E. Schur, F. Truckenmüller, M. Menth: A Virtual Power Plant Demonstration Platform for Multiple Optimization and Control Systems. In: Rainer Speh (Hrsg.): *Die Energiewende : International ETG Congress 2017*, Bonn, Nov. 28–29, 2017 [CD-ROM]. Berlin/Offenbach: vde Verlag
- [3] P. Tugarinov, F. Truckenmüller, B. Nold: Virtual Power Plant Demonstration Platform, Forum of Mining Engineers, Sept. 2019
- [4] P. Tugarinov, F. Truckenmüller, B. Nold: Digital Twin of Energy Devices, Forum of Mining Engineers, Sept. 2019
- [5] T. Stüber, F. Heimgärtner, M. Menth: Day-Ahead Optimization of Production Schedules for Saving Electrical Energy Costs. In: *e-Energy '19 – Proceedings of the Tenth ACM International Conference on Future Energy Systems*, Phoenix, June 25–28, 2019. New York: ACM, S. 192–203

Integration eines multifunktionalen Wärmepumpensystems als Hardware-in-the-Loop in ein Niederspannungsnetzmodell

*Maximilian Rödder¹, Thomas Spiegel, Lena Frank,
Matthias Neef, Mario Adam*

ZIES – Zentrum für Innovative Energiesysteme, Hochschule Düsseldorf,
Münsterstraße 156, 40476 Düsseldorf

I maximilian.roedder@hs-duesseldorf.de

Eine der Herausforderungen bei der Integration nachhaltiger Energien im Wohngebäudebereich ist unter anderem die geregelte Abnahme erneuerbarer Strommengen in Zeiten hoher Einspeisung unter Berücksichtigung der zeitlichen Flexibilität des Betriebs von Haushaltsgeräten. Mit zunehmender Anzahl von Spannungserhöhungen im Niederspannungsnetz aufgrund dezentraler Einspeisung von bspw. Photovoltaik-(PV-)Anlagen, ist es für den Netzbetreiber vorteilhaft, zusätzliche Last netzdienlich im jeweiligen Ortsnetz abzufragen, z. B. die Gebäudetechnik zum Heizen bzw. zum Kühlen.

Haushaltsgeräte wie Waschmaschine, Geschirrspüler, Trockner, Kühlschrank und Gefrierschrank können zusätzlich über sensible Wärmespeicher in das Wärmepumpensystem integriert werden. Die zeitliche Entkopplung zwischen Wärmebereitstellung bzw. Kühlung und Gerätebetrieb durch das Speichersystem ermöglicht Flexibilität und die Einhaltung von Komfortkriterien für den Endverbraucher.

Erste experimentelle Ergebnisse in dem vom BMBF geförderten Projekt „energiBUS4home“ zeigen, dass elektrische Energieeinsparungen bis zu 30% erreicht werden können, wenn Haushaltsgeräte thermisch mit der Wärmepumpe gekoppelt sind. Die Wärme kann dabei mit netzdienlichen Strommengen durch die Wärmepumpe generiert werden.

1 Motivation

Gemäß Abbildung 1 sind 25% des Gesamtenergiekonsums der EU-28-Staaten in 2015 (1084 Mtoe) dem Haushaltssektor zuzuschreiben [1]. Dieser bietet damit europaweit großes Potenzial für Neuentwicklungen im Bereich der Energieversorgung/-verteilung und der Systemtechnik, um die Ziele der EU-Klimaschutzstrategie bis 2030 und darüber hinaus zu erreichen [2]:

- Senkung der Treibhausgasemissionen,
- Ausbau erneuerbarer Energien,
- Energieeffizienz verbessern.

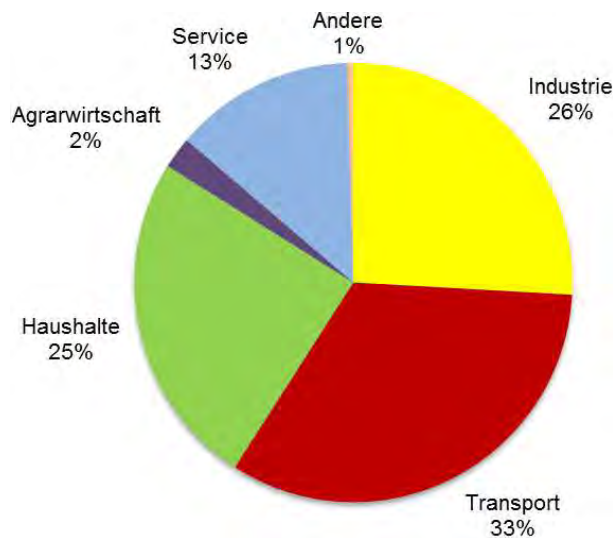


Abb. 1 Anteil Energiesektoren EU-28 in 2015

Multifunktionale Systemansätze, wie z.B. Wärmepumpensysteme [3], bieten bereits eine effiziente Art der Energiebereitstellung, sind aber durch Erweiterungen wie bspw. Solarthermie und die Anwendung von Regelungsstrategien noch ausbaufähig. Integrierte Gebäudesysteme erweitern den Systemgedanken der effizienten und zentralen Energieversorgung im Haushalt: von der Gebäudetechnik zum Heizen, Kühlen und der Warmwasserversorgung bis hin zum Haushaltsgerätebereich.

Das Funktionsmuster eines solchen Wärmepumpensystems mit integrierten Haushaltsgeräten wird derzeit im Labor der Hochschule Düsseldorf betrieben. Untersuchungen werden in einer Hardware-in-the-Loop- (HiL-)

Entwicklungsumgebung durchgeführt, die der Kopplung von Systemkomponenten dient (s. Abb. 2). Sie umfasst die Abbildung von Simulations-, Emulations- und Hardwareebene. Untersuchungsschwerpunkte sind zum einen die Reduzierung des Strombedarfs durch ein integriertes Systemkonzept mit Heizungs-/Lüftungstechnik und Haushaltsgeräten und zum anderen eine netzdienliche Deckung des verbleibenden Strombedarfs durch eine sinnvolle Systemintegration in das Niederspannungsnetz.

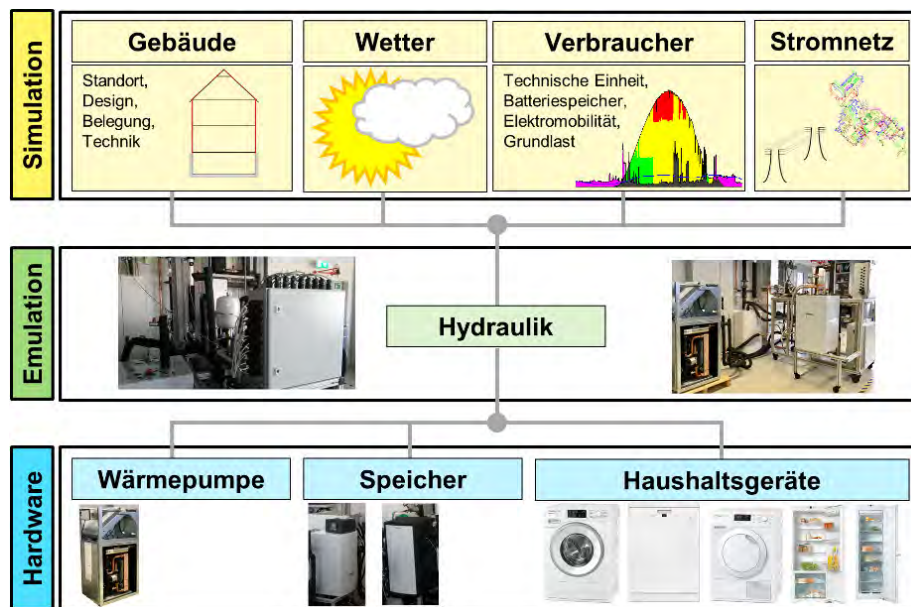


Abb. 2 Hardware-in-the-Loop-Entwicklungsumgebung

2 Systemintegration und Betrieb

Waschmaschine, Geschirrspüler, Wäschetrockner, Kühlschrank und Gefrierschrank werden über den „energiBUS“ betrieben (s. Abb. 3). Wärmeverbraucher profitieren dabei von der effizient bereitgestellten Wärme über den zentralen Wärmespeicher (75 l), der an die Wärmesenke der Wärmepumpe angeschlossen ist. Kühlgeräte werden über den Kältespeicher (35 l) mit niedrigen Temperaturen versorgt. Der Kühlschrank kann dabei direkt – ohne

zusätzlichen Kältekreislauf – und der Gefrierschrank indirekt – mit internem Kältekreislauf – in das System integriert werden.

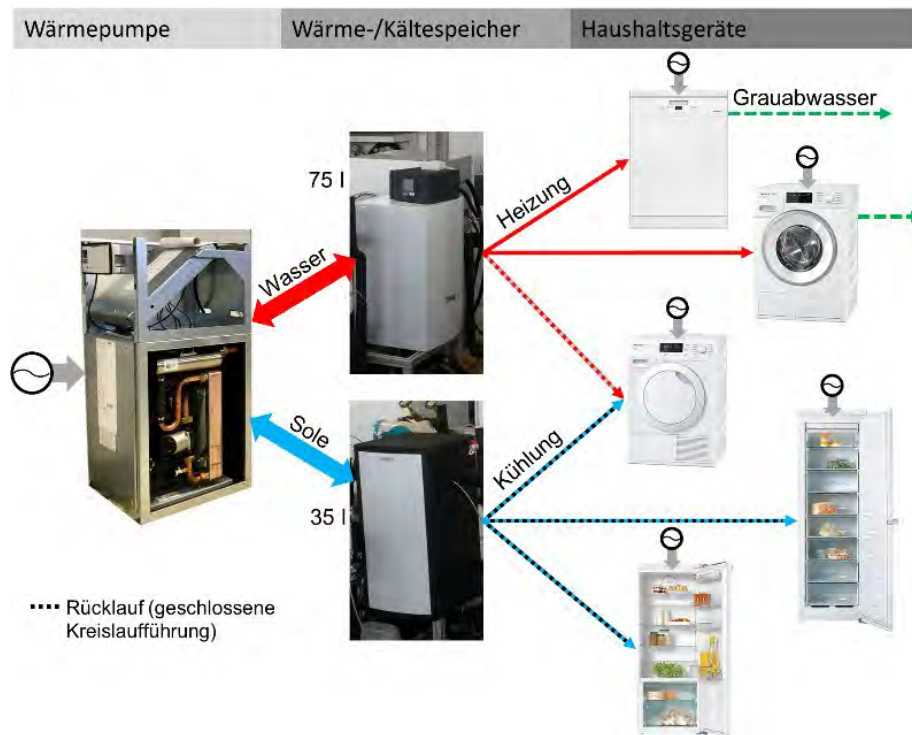


Abb. 3 Integration von Haushaltsgeräten in das energiBUS-System

Um Wärme auf höherem Temperaturniveau für das Warmwasser oder zum Heizen bereitzustellen, wird die von den Kühlgeräten aufgenommene Wärmeenergie über den Kältespeicher an die Wärmepumpe übertragen. Kühlwärme (Q_k), bzw. die Wärmeaufnahme über die Geräte, ist damit ein zusätzlicher Nutzen zur Heizwärme (Q_w) (s. Gleichung 1). Die Leistungszahl der Wärmepumpe (COP) ergibt sich aus dem Verhältnis von Nutzwärme zur Arbeit (W_{el}) und steigt durch synchronen Heiz-/Kühlbetrieb:

$$COP = \frac{Q_w + Q_k}{W_{el}} \quad [1]$$

2.1 Systembetrieb

Die Integration der Haushaltsgeräte erfolgt in zwei Schritten. In dieser Arbeit werden Verbraucher in das System integriert, die nicht im Dauerbetrieb sind und zeitlich flexibel betrieben werden, d. h. Waschmaschine, Geschirrspüler und Wäschetrockner. Vermessungen werden an dem HiL-Prüfstand im Labor durchgeführt (vgl. Abb. 2).

Tabelle 4 zeigt das Einsparpotenzial bezogen auf den Referenzfall (3,43 kWh bei einmaliger Nutzung jedes der drei Geräte), wenn die Geräte einzeln betrieben werden. Der Mehrverbrauch der Wärmepumpe hängt von der benötigten Wärmeenergie, der Außenlufttemperatur, der nicht nutzbaren Wärme in den Speichern und den Wärmeverlusten ab. Die Einsparungen werden hier für die Messung bei 10 °C Außenlufttemperatur und eine Hochrechnung für 20 °C und 25 °C dargestellt. Es zeigt sich, dass eine Reduzierung des Stromverbrauchs von bis zu ca. 1 kWh (30% vom Referenzfall) möglich ist, wenn die Geräte unter den genannten Bedingungen und in einer sinnvollen Reihenfolge betrieben werden: Waschen von 5 kg Baumwolle bei 60 °C, Geschirrspülen im „SolarSpar“-Programm und Trocknen von 5 kg Wäsche bis auf eine Restfeuchte von 1,6% (schranktrocken).

Tab. 2: Geräteverbrauch von Wärmepumpe (WP), Waschmaschine (WM), Geschirrspüler (GS) und Wäschetrockner (WT) im Einzelbetrieb und im sinnvollen Systembetrieb bei unterschiedlichen Außenlufttemperaturen

Betrieb (Außenluft)	WP kWh	WM kWh	GS kWh	WT kWh	Gesamt kWh	Anteil %
einzeln	–	1,27	0,87	1,29	3,43	100
System (10 °C)	1,90	0,32	0,06	0,40	2,68	78
System (20 °C)	1,70	0,32	0,06	0,40	2,48	72
System (25 °C)	1,62	0,32	0,06	0,40	2,40	70

2.2 Netzdienliche Integration

Lund et al. [4] beschreiben drei Phasen der Integration erneuerbarer Energien bis zur 100%-Deckung aller Sektoren:

- *Introduction phase* – ein geringer Anteil erneuerbaren Stroms ohne Einfluss auf den Netzbetrieb wird in das Stromnetz integriert.

- *Large-scale integration phase* – die Integration mit hohem Anteil erneuerbarer Energie und großem Einfluss auf den Netzbetrieb erfordert situationsbedingten Eingriff des Netzbetreibers zur Erhaltung der Netzstabilität.
- *100 percent renewable energy phase* – das regelungstechnische Verhalten regional unterschiedlicher Energieträger (Wind, PV, Wasser und Biomasse) ist eine große Herausforderung bei der Integration und muss auf nationaler Ebene aufeinander abgestimmt werden, um die Frequenz- und Spannungsstabilität systemdienlich zu gewährleisten.

Die Verbindung von Verbraucher- und Versorgersektor scheint derzeit die Herausforderung für Länder mit hohem Anteil erneuerbarer Energien zu sein [5], um z.B. den zu Spitzenlastzeiten zur Verfügung stehenden Strom lokal abzunehmen. In diesem Zusammenhang ist der netzdienliche Betrieb einer technischen Einheit eine Einsatzkategorie, die der Vermeidung oder Behebung lokaler Netzengpasssituationen dient. Wärmepumpensysteme der beschriebenen Art bieten eine Möglichkeit für den netzdienlichen Betrieb im Niederspannungsnetz. Im Einklang mit einem nutzerdienlichen Betrieb ist dies möglich, da Wärme für einzelne Geräte – zeitlich entkoppelt vom Betrieb der Geräte selbst – über ein Speichersystem bereitgestellt werden kann. Schaltsignale, basierend auf Netzzuständen, welche einer Ampelfunktionalität zugeordnet werden [6] (Abb. 4), werden vom Netzbetreiber des Niederspannungsnetzes generiert und an das System übergeben. An Netzknotenpunkten wird dazu je Zeitschritt ein Spannungswert sowie an Betriebsmitteln, bspw. Leitungen und Transformatoren, die zugehörige Betriebsmittelauslastung erfasst [7].

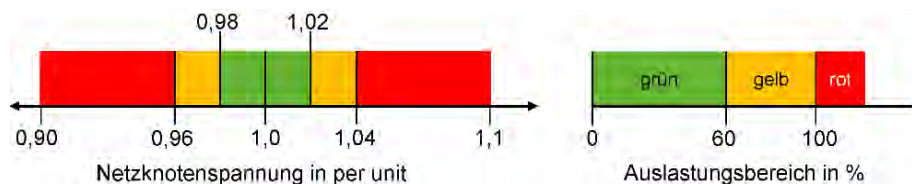


Abb. 4 Ampelfunktionalität für den netzdienlichen Einsatz [7]

In Abhängigkeit von der Differenz zwischen Stromeinspeisung und -entnahme ergeben sich Zustände, die einer Ampelphase zugeordnet werden. Die grüne Ampelphase repräsentiert unkritische Netzzustände, in denen der Netzbetreiber nicht in den Markt eingreift. Weitere Ampelphasen beschreiben Netzengpasssituationen, auf die der Netzbetreiber reagieren muss. Die gelbe

Ampelphase nutzt der Netzbetreiber für eine marktbasierete Akquise netzdienlicher Flexibilitätsoptionen, wie sie z.B. ein multifunktionales Wärmepumpensystem darstellt. In der roten Ampelphase regelt und steuert der Netzbetreiber außerhalb des Marktes mit direkten Eingriffen in das Stromnetz, z.B. durch Leistungsreduktion von Einspeise- und Verbrauchseinheiten [6].

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass ca. 70% der noch aufzubringenden elektrischen Energie zum Betrieb der Haushaltsgeräte im energiBUS-System von der Wärmepumpe zu den vom Netzbetreiber vorgegebenen netzdienlichen Zeitpunkten abgenommen werden können, um den Wärmespeicher aufzuheizen bzw. den Kältespeicher zu kühlen. Die übrigen 30% des Strombedarfs sind auf Anforderung des Nutzers für die Elektronik und den Antrieb der einzelnen Geräte kundendienlich abzunehmen.

3 Fazit und Ausblick

Im Gegensatz zu dem einzelnen Betrieb von Haushaltsgeräten zur Abnahme von erneuerbar produziertem Strom bietet die Erweiterung des Wärmepumpensystems zur zentralen Wärmebereitstellung eine flexible Alternative. Um die nötige Wärme und Kälte aus erneuerbarem Strom zu generieren, kann die Speicherbeladung dabei zeitlich versetzt vor dem Betrieb der Geräte erfolgen. Der Wärmepumpenzentrale und dem Nutzer wird dabei ein Schaltsignal übermittelt, das basierend auf dem Zustand des Niederspannungsnetzes generiert wird.

Die Kopplung der Geräte verspricht eine Reduzierung des Strombedarfs um bis zu 30% durch die effiziente Bereitstellung der Wärme und Kälte mit der Wärmepumpe. Ca. 70% des verbleibenden Gesamtstrombedarfs lassen sich dabei aus netzdienlichen Strommengen über die Wärmepumpe decken und 30% werden geräteintern für den Betrieb der Haushaltsgeräte benötigt.

Verbesserungen sind durch eine optimale Anpassung der Speichervolumina und der Betriebsparameter zu erwarten, wodurch die Ressourcen noch besser ausgenutzt werden können.

In Folgearbeiten wird das Regelverhalten der Gebäudetechnik auf netzdienliche Schaltsignale für das Modell eines Niederspannungsnetzes untersucht. Ziel ist der Entwurf eines nutzer- und netzdienlichen Systemreglers für den Anlagenbetrieb.

Referenzen

- [1] Bertoldi, P.; López-Lorente, J.; Labanca, N. (2016): *Energy Consumption and Energy Efficiency Trends in the EU-28 2000–2014*. Joint Research Centre: Ispra.
- [2] Europäische Kommission (2014): Übermittlungsvermerk des Generalsekretariats des Rates für die Delegationen, EUCO 169/14
- [3] McCahill, D. I. (1989): U.S. Patent No. 4,856,578. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office
- [4] Lund, H.; Andersen, A. N.; Østergaard, P. A.; Vad Mathiesen, B.; Connolly, D. (2012): From electricity smart grids to smart energy systems – A market operation based approach and understanding. In: *Energy* 42 (1), S. 96–102
- [5] Meesenburg, W.; Omme, T.; Elmegaard, B. (2018): Dynamic exergoeconomic analysis of a heat pump system used for ancillary services in an integrated energy system. In: *Energy* 152, S. 154–165
- [6] BDEW (2015). Smart Grids Ampelkonzept. Ausgestaltung der gelben Ampelphase, Berlin, 10. März 2015
- [7] Winter, S. (2016): *Modellierung und marktorientiertes Lastmanagement von Haushaltslasten*. Göttingen: Sierke Verlag

Möglichkeiten und Anwendungen zellularer Energienetze

Reiner Johannes Schütt, Carina Balke

Fachhochschule Westküste, Fritz-Thiedemann-Ring 20, 25746 Heide

{[schuett](mailto:schuett@fh-westkueste.de), [balke](mailto:balke@fh-westkueste.de)}@fh-westkueste.de

Für emissionsarme, kostengünstige und sichere Energiesysteme wird der Einsatz multimodaler Energiezellen vorgeschlagen. Mithilfe eines zugehörigen Energiemanagementsystems wird der Energiefluss innerhalb dieser Zelle gemäß den vorgegebenen Zielen optimiert und der Energiefluss von und zu den über- oder nebengeordneten Zellen koordiniert. Die einzelnen Energiezellen in einer Region sind derart zu einer übergeordneten Zelle zusammenzufassen, dass der Leistungsaustausch mit benachbarten Regionen so gering wie möglich ist und so die vorhandenen Leitungskapazitäten der Energienetze optimal ausgenutzt werden.

Dieser Beitrag beschreibt den Bottom-up-Ansatz unter Berücksichtigung der vorhandenen Infrastruktur und schlägt die ersten Charakterisierungen anhand von Größe, Zusammensetzung und Schnittstellen dieser Energiezellen vor. Wesentliche Bausteine der multimodalen Energiezellen sind die geeigneten Wandlungen zwischen Strom, Wärme, Kühlung, Gas und Kraftstoff, wobei insbesondere die Nutzung von Wasserstoff zu neuen Lösungen führt. Mithilfe erster Beispiele wird die Verwendung der eingesetzten Energiespeicher und Power-to-X-Lösungen skizziert.

Zellulare Energienetze können für eine bestimmte Zeit als Inselssysteme agieren. Der Beitrag zeigt wesentliche Herausforderungen für den Umgang mit dieser Inselnetzfähigkeit und geht auf die Schwarzstartfähigkeit der Energiezelle ein. Damit gibt das Paper Antworten auf die Frage, wie die Resilienz der Energieversorgung in Regionen mithilfe von zellularen Energienetzen verbessert werden kann.

1 Einleitung

Energieerzeugung, -übertragung und -verteilung befinden sich in einem tiefgreifenden Veränderungsprozess. In vielen Regionen ist die jährliche Erzeugung elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen schon jetzt wesentlich größer als der Verbrauch. Vor allem in Norddeutschland mit seinen zahlreichen Windenergieanlagen besteht ein großer Bedarf, die Energieversorgung mithilfe neuer Lösungen emissionsärmer, kostengünstiger und sicherer zu machen und gleichzeitig den Ausbau der Energieübertragungs- und verteilnetze auf ein Mindestmaß zu begrenzen.

Elektrische Energienetze mit einer zentralen Steuerung zum Ausgleich zwischen Erzeugung und Verbrauch unter Nutzung steuerbarer Elemente wie Energiespeicher, sogenannte Smart Grids oder intelligente Stromnetze, werden in Pilotprojekten bereits betrieben, um die aus den Erneuerbaren erzeugte elektrische Energie in der Region optimal zu nutzen (Buchholz et al. 2019). Dabei werden die großen Bedarfe an Wärme und an Kraftstoffen für Mobilitätslösungen nicht berücksichtigt, sodass der wesentliche Teil des Energieverbrauchs in der Region immer noch nicht emissionsarm erfolgt. Neue Möglichkeiten ergeben sich durch die Sektorkopplung mithilfe geeigneter Energiewandler und durch die Nutzung von Wärme- und Gasspeichern.

Unter anderem in Henning et al. (2013) wird die Reduktion energiebedingter CO₂-Emissionen durch den Einsatz erneuerbarer Energien mithilfe eines sektor- und energieträgerübergreifenden Energiesystems ausführlich beschrieben und als Top-down-Entwurf für Deutschland insgesamt behandelt. Erste Ansätze für die erforderliche Informations- und Kommunikationstechnologie für Energie-Hybridnetze werden in Irlbeck et al. (2013) detailliert beschrieben, allerdings wieder aus einer Top-down-Sicht für die Behandlung des Energiesystems Deutschland insgesamt.

Seit einigen Jahren wird intensiv an einem Bottom-up-Ansatz zum Umbau der Energieversorgung gearbeitet, der auf Basis multimodaler, zellularer Energienetze erfolgt (ETG 2015) und dezentrale und zentrale Ansätze zur Netzsteuerung und Energiesystemführung in geeigneter Weise verknüpft. Standardisierte oder etablierte Lösungen zur Auslegung und zum Betrieb multimodaler, zellularer Energienetze liegen noch nicht vor. Im Rahmen von Pilotprojekten wird an der Thematik gearbeitet. So wird in Vopova et al. (2017) die Anwendung zellularer Ansätze zur Auslegung zukünftiger Ener-

giesysteme unter Berücksichtigung der vorhandenen Infrastruktur für die Mittelstadt Loeben in Österreich vorgestellt.

In diesem Beitrag werden unter Nutzung erster Ergebnisse für ein „Lehr- und Ausstellungsgebäude als Liegenschaft für ein multimodales, zellulares Energienetz: NESTrail SmartRegion 2.0“ (Schütt 2017) und für „Resiliente, integrierte und systemdienliche Energieversorgungssysteme im städtischen Bestandsquartier unter vollständiger Integration erneuerbarer Energie (QUARREE100) – Reallabor Rüdorfer Kamp“ (Gößling-Reisemann et al. 2017) Antworten auf ausgewählte Fragestellungen zu Aufbau, Struktur, Funktionalität, Schnittstellen und Betriebsarten gegeben.

2 Grundideen multimodaler, zellularer Energiesysteme

Das multimodale, zellulare Energiesystem ist ein Organisationsmodell zur gleichzeitigen Optimierung verschiedener Energieflüsse wie Strom, Wärme oder Energien in Öl, Gas oder Wasserstoff über ein Steuerungs-, Regelungs- und Betriebsführungssystem – dem mehr oder weniger intelligenten Zellen-Energiemanagementsystem –, das die Energieflüsse beeinflusst, um vorgegebene Optimierungsziele zu erreichen.

Das multimodale, zellulare Energiesystem – kurz *Energiezelle* – ist lokal abgegrenzt, verfügt über eine Infrastruktur für die verschiedenen Energieformen, ist über Energienetze mit Nachbarzellen verbunden und kommuniziert mit ihnen zum Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch innerhalb der verschiedenen Energieformen.

Abbildung 1 zeigt den Aufbau einer Energiezelle mit den Basiselementen Generatoren als Erzeuger (E), Lasten als Verbraucher (V), Energiespeicher (S) für die unterschiedlichen Energieformen, Wandlern oder Transformatoren (W) zwischen den Energieformen und der Steuerung, Regelung, Überwachung und Betriebsführung als Energiemanagementsystem (EMS) der Zelle.

Nach außen wirkt die Energiezelle als Einheit mit einer Residualleistung für jede Energieform, begrenzten Erzeugungs-, Verbrauchs-, Transport- und Speicherkapazitäten und einer Schnittstelle zum Austausch der Informationen von und zu anderen Energiezellen.

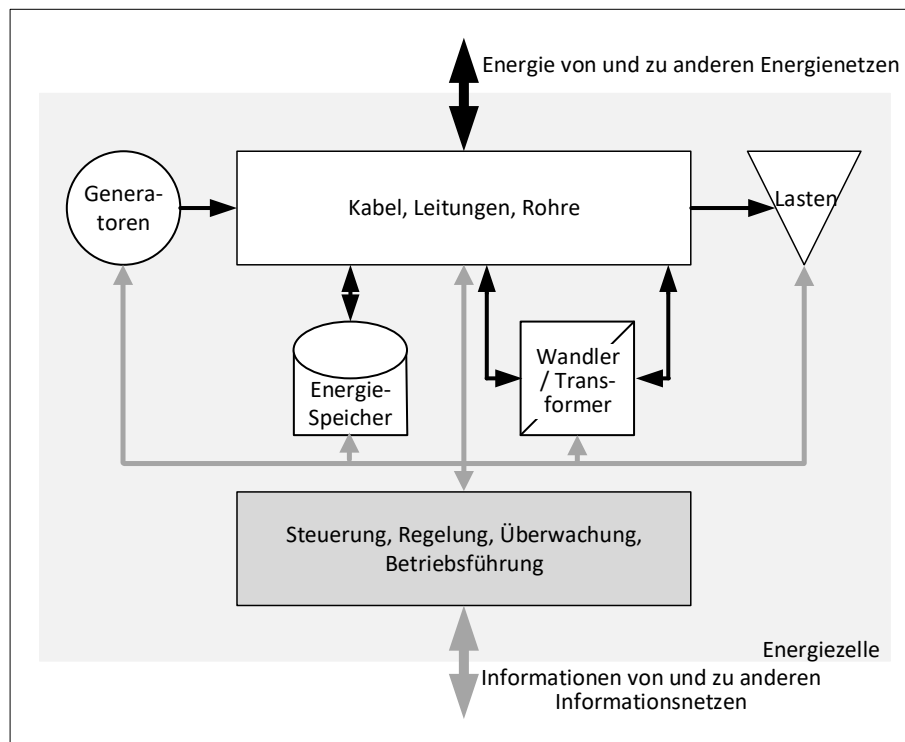


Abb. 1 Multimodale Energiezelle mit Basiselementen

Mehrere benachbarte Energiezellen, die über ein überlagertes Energienetz verbunden sind, können zu einer resultierenden Energiezelle zusammengefasst werden, wenn sie über ein gemeinsames überlagertes EMS verfügen, das die Energieflussoptimierung übernimmt, die Daten der Einzelzellen zusammenfasst und nach außen übermittelt sowie die erhaltenen Daten von außen gemäß vorgegebener Optimierungsziele an die Einzelzellen weitergibt.

Abbildung 2 zeigt die Zusammenfassung durch Einführen des zusätzlichen EMS und des überlagerten Energienetzes für die Gesamtzelle. Schrittweise können so lokale Kombinationen von Basiszellen, Zellen in Gebäuden, Liegenschaften, Gewerbe- und Industriebetrieben, in Quartieren, Städten und Regionen in einem aufsteigenden Bottum-up-Ansatz zusammengefasst werden. Damit folgt der Ansatz dem in ETG (2015) formulierten Grundprinzip für zellulare Netze, „Erzeugung und Verbrauch von Energie auf der niedrigsten möglichen Ebene auszubalancieren“.

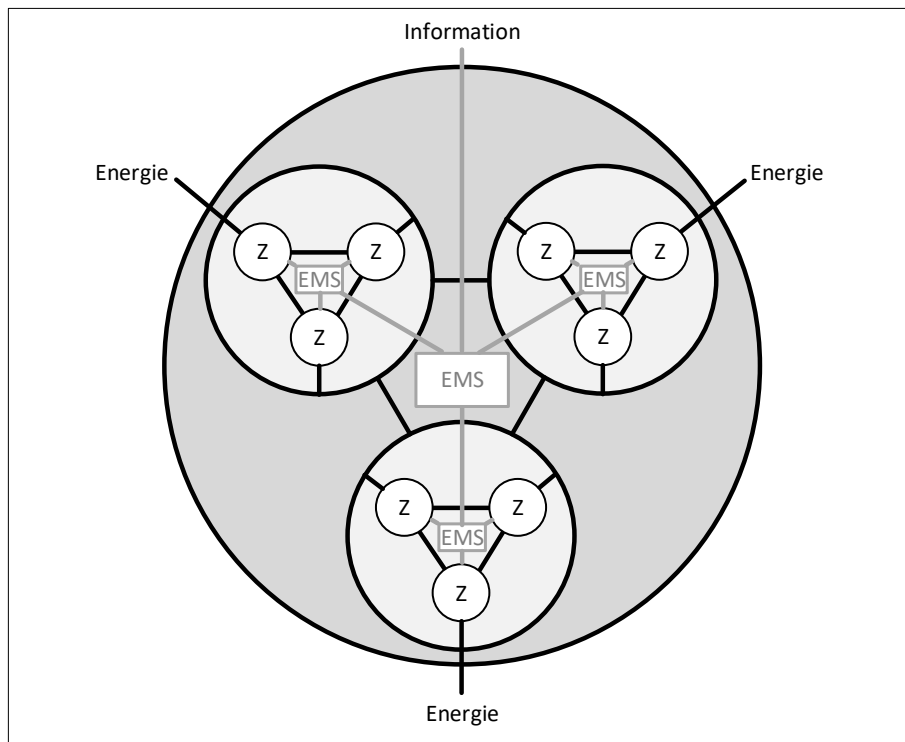


Abb. 2 Bottum-up-Zusammenfassung von Energiezellen

Für diesen Ansatz sind zunächst die Fragen zu klären, welche Infrastruktur zu einer Zelle sinnvoll zusammenzufassen ist und wie die vorhandene Infrastruktur in der Zelle geeignet zu ergänzen ist, um diesen Energieausgleich zu ermöglichen.

Abbildung 3 zeigt als Beispiel für die Zusammenfassung eine multimodale Energiezelle zur nachhaltigen Energieversorgung eines Wohnquartiers mit Anschluss an das öffentliche elektrische Netz und das öffentliche Gasnetz sowie einem internen Nahwärme- und Wasserstoffnetz. Die zu integrierenden Komponenten ergeben sich aus den vorhandenen Erzeugern, Lasten und dem vorhandenen Energieversorgungs- und Kommunikationsnetz sowie der vorhandenen Leittechnik des Quartiers und den zu ergänzenden Energiespeichern, Energiewandlern, dem Wärme- und Wasserstoffnetz sowie den zusätzlichen Kommunikationskomponenten und dem EMS.

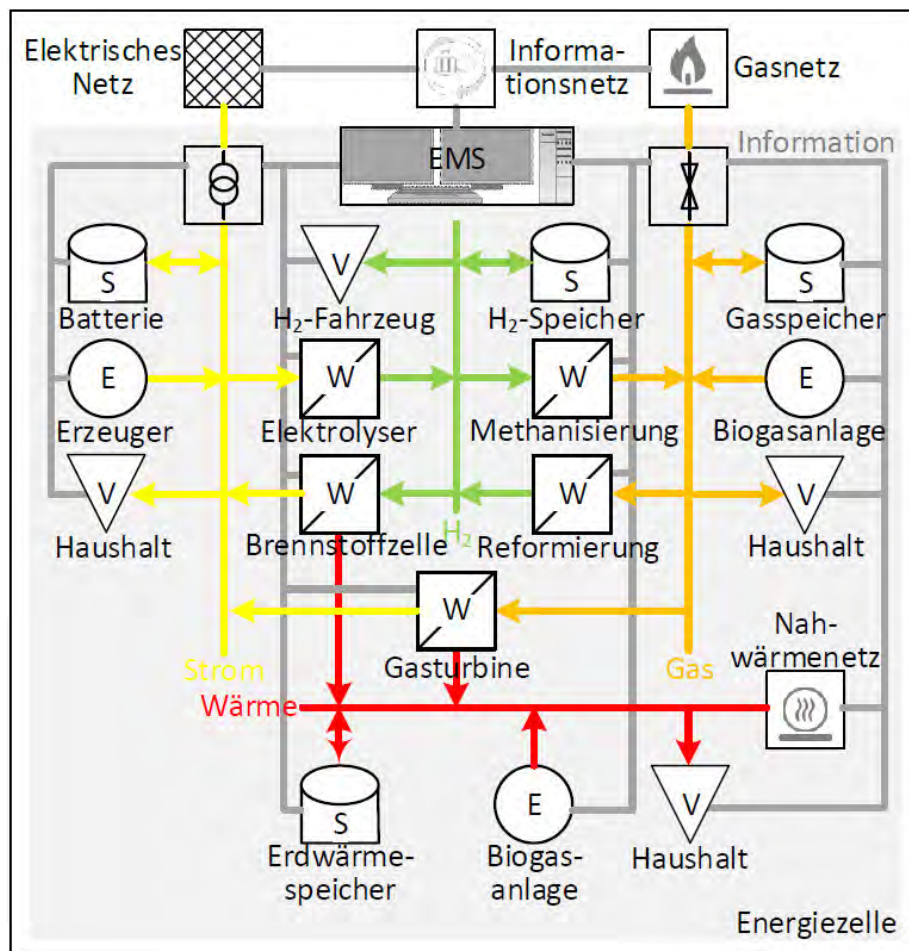


Abb. 3 Beispiel einer multimodalen Energiezelle zur nachhaltigen Energieversorgung eines Wohnquartiers

3 Eigenschaften multimodaler Energiezellen

Zahlreiche Ansätze und Modelle zur Beschreibung, Auslegung und zum Betrieb multimodaler Energiezellen sowie deren Zusammenfassungen sind in der Diskussion und in Pilotprojekten im Einsatz. Eine standardisierte Lösung existiert zurzeit nicht, Handlungsempfehlungen und eine Auflistung aktueller Umsetzungsprojekte finden sich in Bayer (2019).

Vierversprechend zur Bottom-up-Zusammenfassung ist der Ansatz, die einzelnen Zellen durch Technologiesteckbriefe oder sogenannte Zellenprofile zu beschreiben, in denen die für die weitere Verwendung und Zusammenfassung wichtigen Informationen hinterlegt sind (Schegner et al. 2016). Komponenten ohne eigenes EMS werden als Basiskomponenten oder -zellen bezeichnet, das können nichtsteuerbarer Haushalte, Batteriespeicher, Transformatoren, Umrichter, Wärmepumpen oder Photovoltaikanlagen ohne eigene Steuerung, aber auch die Leitungen, Kabel und Rohre für die Energienetze sein.

Zu Energiezellen werden die Basiskomponenten dann, wenn sie in ihrem Energiefluss gesteuert werden können. So erweitert sich das Zellenprofil einer Photovoltaikanlage als Energiezelle neben den schon vorhandenen Angaben zum Typ, zur Peak-Leistung, zum Standort, zu den Investitionskosten und energiespezifischen Betriebskosten und CO₂-Emissionen um steuerungsrelevante Parameter wie Abtastzeiten für die Messwerte und mögliche Leistungsgradienten. Für die schrittweise Ergänzung und Zusammenfassung der Energiezellen für Häuser, Liegenschaften, Quartiere und Regionen kommen dann noch die Angaben für die unterschiedlichen Energieformen und deren Parameter zur Beschreibung der Speicherfähigkeiten innerhalb der Zelle hinzu.

Sowohl Auslegung als auch Betriebsführung der Energiezellen erfolgen anhand vorgegebener Optimierungsziele, die als Geschäftsmodell, Variante, Betriebsstrategie oder Betriebsart bezeichnet werden. Eine einheitliche Verwendung der Betriebsarten in multimodalen Energienetzen liegt nicht vor, Ansätze orientierten sich an der Betriebsführung elektrischer Netze und hier insbesondere von erprobten Smart Grids. So wird im Forschungsvorhaben SmartRegion Pellworm zwischen vier Geschäftsmodellen unterschieden (Koopmann et al. 2014):

- Beim marktorientierten Betrieb erfolgt der Einsatz der einzelnen Energiespeicher, steuerbaren Erzeuger und Verbraucher allein anhand der mit den Energieflüssen verbundenen Energiekosten, Einspeisevergütungen und Börsenpreisen für den Strom.
- Beim umweltorientierten Betrieb erfolgt der Einsatz allein anhand der mit den unterschiedlichen Energieformen verbundenen CO₂-Emissionen. Dieser Betrieb führt zum maximal möglichen Eigenverbrauch der auf der Insel erzeugten erneuerbaren Energie.

- Im netzorientierten Betrieb erfolgt die Ladung und Entladung der hybriden Energiespeicher so, dass für das vorgelagerte Verteil- und Übertragungsnetz möglichst wenige Regeleingriffe für weitere Erzeuger und Verbraucher erfolgen müssen. Dies wird wesentlich durch die Reduzierung der Peak-Leistung an den Anschlusspunkten der Insel an das überlagerte Netz ermöglicht.
- Im kombinierten Betrieb wird anhand einer festgelegten Bearbeitungsreihenfolge dafür gesorgt, dass zunächst die Netzdienstleistungen zu erbringen sind, bevor der umweltorientierte Betrieb zum CO₂-minimierten Stromversorgung der Insel führt. Erst dann werden die Möglichkeiten des markorientierten Betriebes genutzt.

Rummeny et al. (2019) erweitern den netzorientierten Betrieb um das Erbringen der Systemdienstleistungen Frequenzhaltung, Spannungshaltung und Versorgungswiederaufbau. Durch den Einsatz multimodaler Energienetze mit Energiespeichern wird es möglich, die Energiezelle bei Ausfall der übergeordneten Stromversorgung für eine definierte Zeit selbst zu versorgen, als Inselnetz zu betreiben und die Stromversorgung in der Energiezelle auch ohne überlagerte Stromversorgung aufzubauen. Neue Vorhaben für sogenannte resiliente Energieversorgungssysteme nutzen daher den zellularen Ansatz (Gößling-Reisemann et al. 2017).

Zur Vereinheitlichung der Bearbeitungsreihenfolge in der kombinierten Betriebsweise orientiert sich die Betriebsführung multimodaler Energienetze am eingeführten Ampelkonzept im Verteilnetz der elektrischen Energieversorgung (Drayer et al. 2015; Zacharias 2017). Energiezellen-übergeordnet werden Ampelphasen für die übergeordneten Energienetze ermittelt. In der roten Ampelphase liegt eine unmittelbare Gefährdung der Netzstabilität im übergeordneten Netz vor, sodass das EMS der übergeordneten Einheit direkt in den Energiefluss der Energiezelle eingreift. In der gelben Ampelphase zeichnet sich ein Netzengpass im übergeordneten Energienetz ab, sodass vereinbarte Flexibilitäten der Energiezelle durch die übergeordnete Einheit abgerufen werden. Nur in der grünen Ampelphase organisiert das EMS der Energiezelle den Energiefluss völlig unabhängig nach einer vorher festgelegten Betriebsstrategie.

Zur Betriebsführung und Überwachung sowie zur Steuerung und Regelung der Energieflüsse ist ein geeignetes EMS erforderlich, das die Komponenten der Energiezellen durch ihre Technologiesteckbriefe oder Zellenprofile berücksichtigt und die Eingangs- und Ausgangsinformationen von und zu

den Komponenten über eine einheitliche Schnittstelle austauscht. Abbildung 4 zeigt den Extrakt der Ein- und Ausgangsinformationen zur Steuerung und Regelung einer multimodalen Energiezelle. Unterschieden wird wie in der Steuerungstechnik üblich zwischen den Soll- und Istwerten für die Energieflüsse, den Informationen von weiteren über- und nebengeordneten Energiezellen sowie den von allen Zellen zu nutzenden Informationen wie die Marktpreise und deren Prognosen, den aktuellen Wetterdaten und Vorhersagen sowie weiteren übergeordneten Netzstrukturinformationen.

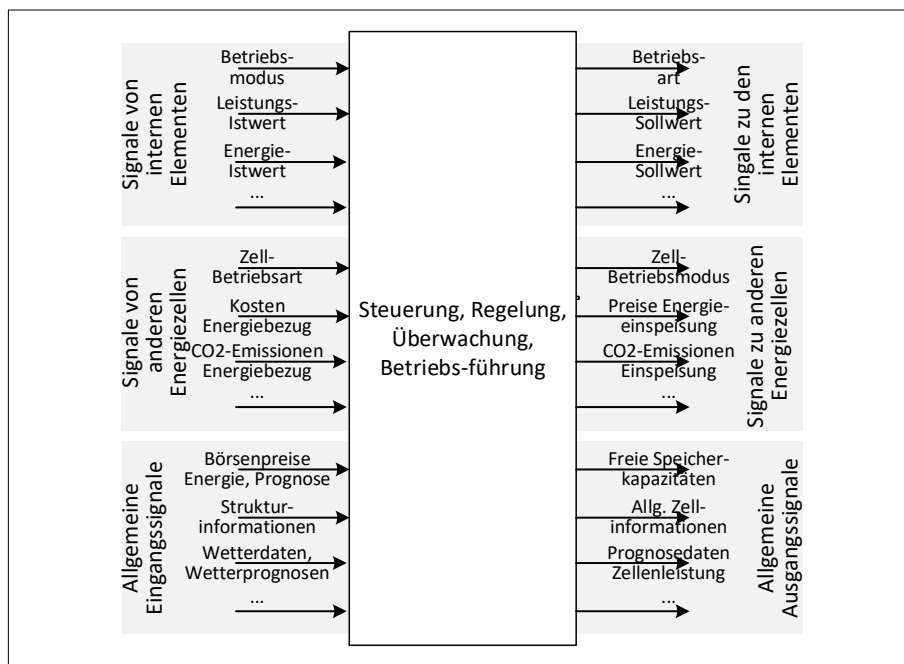


Abb. 4 Extrakt der Ein- und Ausgangsinformationen zur Steuerung und Regelung einer multimedalen Energiezelle

Abbildung 5 zeigt die Realisierung einer multimodalen Energiezelle anhand der umweltgerechten Energieversorgung eines Lehr- und Ausstellungsgebäudes (Schütt 2017). Aus dem öffentlichen Stromversorgungsnetz wird Strom aus dem konventionellen Kraftwerksmix bezogen. Die Wärmeversorgung geschieht über ein Blockheizkraftwerk (BHKW), das aus dem öffentlichen Erdgasnetz gespeist wird.

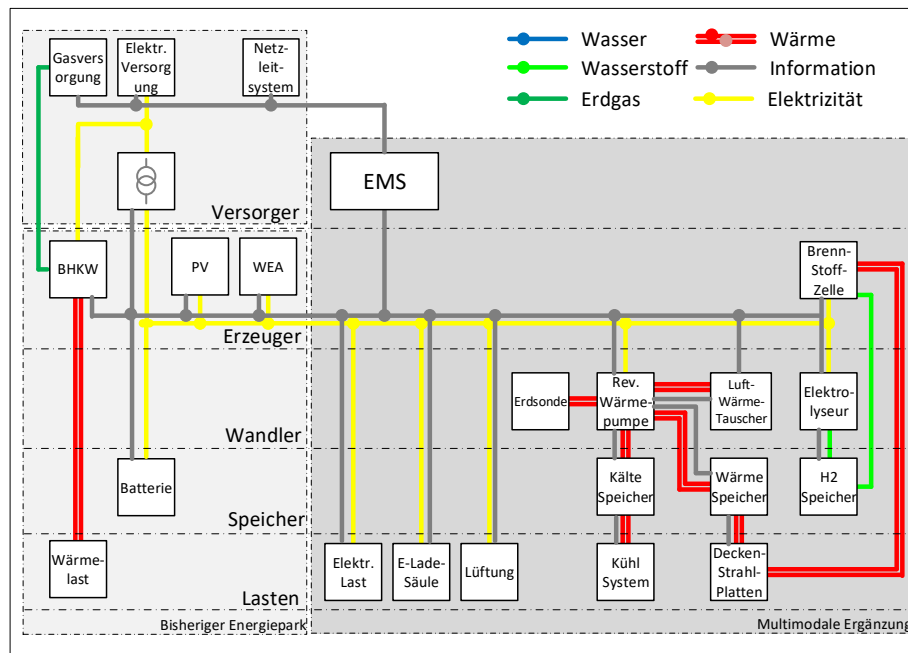


Abb. 5 Multimodale Energiezelle für die emissionsarme Energieversorgung eines Lehr- und Ausstellungsgebäudes

Zur emissionsarmen Energieversorgung ist die Versorgung ergänzt durch eine Photovoltaikanlage (PVA), eine Windenergieanlage (WEA) und einen Lithium-Ionen-Batteriespeicher. Zur multimodalen Energiezelle wird das Lehr- und Ausstellungsgebäude durch die reversible Wärmepumpe mit Erdsonde, den Kälte- und Wärmespeicher und die Brennstoffzelle mit Elektrolyseur und Wasserstoffspeicher. Durch die Kombination aus Batterie als Kurzfristspeicher, Wasserstoff als Langfristspeicher und weiteren Wärmespeichern ist eine Versorgung aus erneuerbaren Energien jederzeit möglich, durch die Versorgung der E-Ladesäulen wird auch der Mobilitätssektor eingebunden. Das zentrale EMS für das Gebäude soll die oben beschriebenen Betriebsstrategien implementieren und die kurzfristige Inselnetzfähigkeit und Schwarzstartfähigkeit nachweisen.

4 Zusammenfassung

Für den Umbau der Energieversorgung unter Berücksichtigung und Verwendung vorhandener Infrastrukturen bietet sich die Planung, der Einsatz und der Betrieb multimodaler, emissionsfreier Energiezellen an. Der Beitrag zeigt die wesentlichen technischen Eigenschaften dieses Ansatzes und die offenen Fragen zum jetzigen Stand. Der Ansatz wird zurzeit in zahlreichen Pilotprojekten eingesetzt, ohne dass jedoch wesentliche Standardisierungen erfolgt sind.

Durch die Diskussion von Betriebsstrategien und Betriebsarten sowie durch die Beschreibung der Informationsschnittstellen für Energiezellen geht der Beitrag auf zwei wesentliche Eigenschaften multimodaler Energiezellen ein, die eine effektive Nutzung erst ermöglichen. Die im Beitrag gezeigte Energieversorgung eines Lehr- und Ausstellungsgebäudes zeigt, dass der energietechnische Umbau zu emissionsarmen Systemen möglich ist.

Referenzen

- Bayer, J. et al. (2019): *Zellulares Energiesystem – Ein Beitrag zur Konkretisierung des zellularen Ansatzes mit Handlungsempfehlungen*. Frankfurt a.M.: vde Verlag.
- Buchholz, Bernd Michael; Styczynski, Zbigniew (2019): *Smart Grids – Grundlagen der Technologien der elektrischen Netze der Zukunft*. Frankfurt a.M.: vde Verlag.
- Drayer, Elisabeth et al. (2015): Umsetzung des BDEW-Ampelkonzeptes für eine agenten-basierte Verteilnetzbetriebsführung. In: *Von Smart Grids zu Smart Markets 2015 : Zur zukünftigen Wechselwirkung von elektrischem Netz und Energie-marktaktivitäten ; Beiträge der ETG-Fachtagung, 25.–26. März 2015 in Kassel* [CD-ROM]. Berlin/Offenbach: vde Verlag.
- ETG Task Force Grundsätzliche Auslegung neuer Netze (2015): *Der zellulare Ansatz – Grundlage einer erfolgreichen, regionenübergreifenden Energiewende*. Frankfurt a.M.: vde Verlag.
- Gößling-Reisemann, Stefan; Burmeister, Dirk (2017): Resiliente, integrierte und systemdienliche Energieversorgungssysteme im städtischen Bestandsquartier unter vollständiger Integration erneuerbarer Energien (QUARREE100) – Reallabor Rüsdorfer Kamp. Bremen/Heide, für BMBF als Projektträger, Gesamtvorhabensbeschreibung zur Antragsstellung.

- Henning, Hans-Martin; Palzer, Andreas (2013): Energiesystem Deutschland 2050; Sektor- und Energieträgerübergreifende, modellbasierte, ganzheitliche Untersuchung zur langfristigen Reduktion energiebedingter CO₂-Emissionen durch Energieeffizienz und den Einsatz erneuerbarer Energien. Freiburg: FhG ISE, 2013.
- Irlbeck, Maximilian; Koutsoumpas, Vasileios (2013): E-Energy Abschlussbericht Bereich Informations- und Kommunikationstechnologie, Nov. 2013. München: Technische Universität, Fakultät für Informatik, Lehrstuhl IV Software & Systems Engineering.
- Koopmann, Simon; Nicolai, Steffen; Schettler, Armin (2014): Multifunctional Operation of a Virtual Power Plant in an Active Distribution Grid: Modelling Approaches and First Field Test Experiences from the Smart Region Pellworm Project. In: *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, 12–15 Oct. 2014, Istanbul 2014. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1267 bis 1272.
- Rummeney, Silvan; Waffenschmidt, Eberhard (2019): Autarkiebetrieb eines kommunalen Stromnetzes mit Batterie und Erneuerbaren Energien. In: *Zukünftige Stromnetze 2019*, Berlin, 30./31. Januar 2019 [E-Book]. Pforzheim: Conexio.
- Schegner, P. et al. (2016): Eine zellulare Energieversorgung – Vision oder Fiktion. SIMLA-Forum. München: Solarinitiative München Land.
- Schütt, Reiner (2017): NESTrail SmartRegion 2.0: Lehr- und Ausstellungsgebäude für den Betrieb eines zellularen multimodalen Energienetzes. Fachhochschule Westküste an die Wirtschaft- und Technologieförderung Schleswig-Holstein als Projektträger.
- Vopova, Julia et al. (2017): Anwendung zellularer Ansätze bei der Gestaltung zukünftiger Energieverbundsysteme. In: *e & i Elektrotechnik und Informationstechnik* 134 (3), S. 238–245.
- Zacharias, Jan (2017): Diskussionspaper: Konkretisierung des Ampelkonzepts im Verteilungsnetz. Berlin: BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft.

Erschließung neuer Einsatzoptionen für Batteriegroßspeicher zur Realisierung einer kombinierten Vermarktungsstrategie

*Robert Schmidt¹, Evgeny Schnittmann¹, Benedikt Dahlmann¹,
Markus Zdrallek¹, Thomas Arnoneit²*

¹ Bergische Universität Wuppertal

{[robert.cj.schmidt](mailto:robert.cj.schmidt@uni-wuppertal.de), [schnittmann](mailto:schnittmann@uni-wuppertal.de), [benedikt.dahlmann](mailto:benedikt.dahlmann@uni-wuppertal.de), [zdrallek](mailto:zdrallek@uni-wuppertal.de)}
@uni-wuppertal.de

² Stadtwerke Iserlohn GmbH

t.armoneit@heimatversorger.de

Im Zuge der Transformation des deutschen Energiesystems gewinnen Batteriespeicher zunehmend an Bedeutung. Mit Blick auf ihre Vermarktung ist insbesondere die Erbringung von Primärregelleistung (PRL) zu betrachten, wobei sinkende Erlösmöglichkeiten Anreize schaffen, neue Einsatzkonzepte zu entwickeln. Dieser Tagungsbeitrag stellt den kombinierten Einsatz eines Batteriegroßspeichers für PRL und Peak Shaving vor, durch den sich Mehrerlöse von ca. 30% gegenüber der ausschließlichen PRL-Vermarktung erzielen lassen.

1 Einleitung

Das deutsche Energiesystem befindet sich in einem Transformationsprozess von der unidirektionalen Verteilung zentral erzeugten Stroms hin zur Integration einer Vielzahl erneuerbarer dezentraler Energiewandlungsanlagen (DEA) auf Mittel- und Niederspannung. Bedingt durch deren volatiles Einspeiseverhalten gewinnt die Regelleistung zunehmend an Bedeutung [1]. Bei der Vermarktung von Batteriespeichern in der Primärregelleistung (PRL) ist zu berücksichtigen, dass seit 2015 die jährlichen Leistungspreise für PRL fallen, während die installierte Batteriespeicherleistung in Deutschland

steigt [2]. Mit sinkenden Erlösmöglichkeiten aus der PRL wächst für Betreiber von Batteriespeichern der Anreiz, ihre Flexibilität anderweitig zu vermarkten oder Vermarktungsoptionen zwecks Ausnutzung von Synergieeffekten zu kombinieren.

Dementsprechend liegt der Fokus der in diesem Tagungsbeitrag vorgestellten Untersuchungen auf dem kombinierten Einsatz eines Batteriespeichers für PRL und Peak Shaving. Es wird eine gemeinsame Vermarktungsstrategie vorgestellt, die unter Einhaltung aller regulatorischen Vorgaben (insbesondere durch die deutschen Übertragungsnetzbetreiber) die Kappung von Lastspitzen auf einen vordefinierten Wert garantiert und darüber hinaus verfügbare Leistung am PRL-Markt anbietet.

2 Kombinierte Einsatzstrategie

Für die vorgestellte Einsatzstrategie wird angenommen, dass für ein Industrieunternehmen durch Peak Shaving die Leistungskomponente der Netznutzungsentgelte (NNE) reduziert werden soll. Des Weiteren wird unterstellt, dass anhand der internen Produktionsplanung im Voraus entschieden werden kann, ob der Batteriespeicher potenziell für Peak Shaving zur Verfügung stehen muss. Der Batteriespeicher soll zudem bzgl. Anschlussleistung und Speicherkapazität für reines Peak Shaving überdimensioniert sein.

Im Folgenden werden die Dimensionierung der für Peak Shaving benötigten Leistung und Energie, die Umsetzung regulatorischer Vorgaben für die PRL-Erbringung sowie die kombinierte Vermarktung vorgestellt.

2.1 Leistung/Kapazität für Peak Shaving

Für das betrachtete Industrieunternehmen zeigt Tabelle 1 die aus einer ganzjährigen Lastganganalyse resultierende Leistung und Speicherkapazität, um die durch Peak Shaving maximal mögliche Einsparung an NNE zu erreichen. Hierbei wird ausschließlich die Leistungspreiskomponente berücksichtigt.

Eine Reduktion der Lastspitze auf 5.700 kW führt zu jährlichen Einsparungen bei der Leistungspreiskomponente der NNE in Höhe von 39.600 €.

Tab. 3: Kenngrößen/Speicherdimensionierung für Peak Shaving

bisherige Lastspitze in kW	6.300
Leistungspreis NNE in € / (kW · a)	66
Lastspitze für Peak Shaving in kW	5.700
maximale einmalige Energiemenge für Peak Shaving in kWh	500
Anzahl Tage mit Überschreitung der Peak-Shaving-Lastspitze	32

2.2 Primärregelleistung

Bei der Erbringung von PRL aus Batteriespeichern wird vonseiten der deutschen Übertragungsnetzbetreiber (ÜNB) insbesondere gefordert, dass das Verhältnis der nutzbaren Speicherkapazität (E_{nutzbar}) in Megawattstunden zur präqualifizierten Leistung (P_{PQ}) in Megawatt größer als 1 ist [3]. Der Ladezustand (SOC) der Batterie befindet sich im Normalbetrieb (Frequenzabweichung < 50 MHz) zu jeder Zeit innerhalb der oberen und unteren Grenzen, die jeweils durch das Verhältnis $E_{\text{nutzbar}}/P_{\text{PQ}}$ bestimmt werden (s. Abb. 1). Der Betreiber des Batteriespeichers stellt dies durch Anwendung der in [4] genannten Maßnahmen sicher. Die Leistungselektronik des Batteriespeichersystems ist mindestens um ein Viertel größer auszulegen als P_{PQ} .

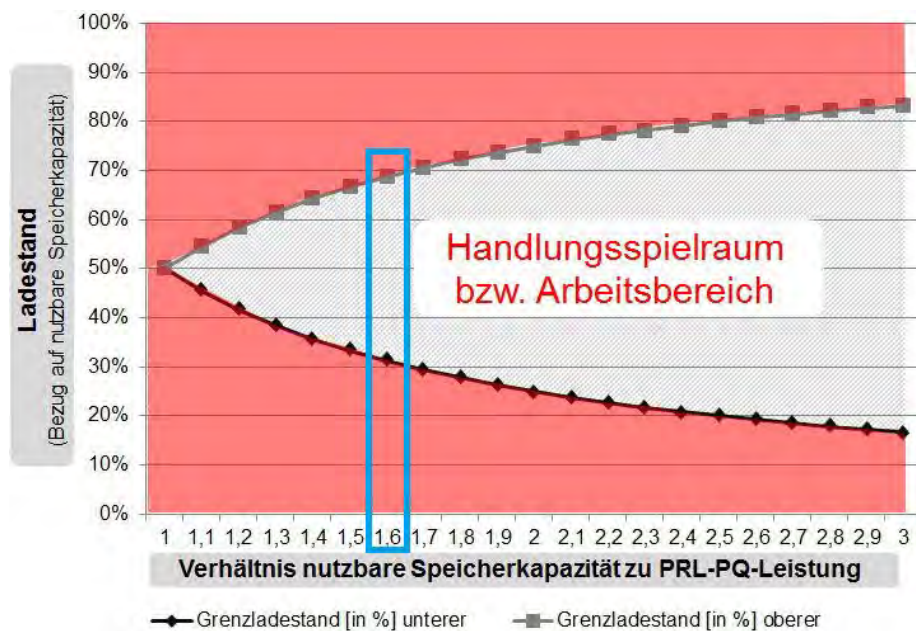


Abb. 1 SOC-Grenzen für Batteriespeicher in der PRL [3]

Da in [5] bereits gezeigt wurde, dass Nachlade-Fahrplangeschäfte (beispielsweise am kontinuierlichen Intraday-Markt der EPEX SPOT SE) zur Einhaltung der SOC-Grenzen obligatorisch sind, wird im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen diese Maßnahme angewandt. Es werden innerhalb der ÜNB-Grenzen neue Grenzen für die Auslösung von Fahrplangeschäften (FP-Geschäften) am kontinuierlichen Intraday-Markt definiert. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Spezifikationen des betrachteten Batteriespeichers inkl. der ausschließlichen PRL-Vermarktung.

Tab. 4: Spezifikationen des Batteriespeichers für die PRL-Vermarktung

Nennleistung in kW	1.100
Speicherkapazität in kWh	1.200
PQ-Leistung in kW (inkl. FP-Geschäfte)	880 (750)
Leistung für FP-Geschäfte in kW	350
obere/untere ÜNB-Grenze für den SOC in %	69 / 31
obere/untere FP-Grenze für den SOC in %	57 / 43
Soll-SOC für FP-Geschäfte in %	50

Mit einer PQ-Leistung von 750 kW werden (basierend auf mittleren Leistungspreisen im Jahr 2018) PRL-Erlöse in Höhe von ca. 83.500 € erzielt. Die Kosten für FP-Geschäfte (basierend auf ID3-Preisen am kontinuierlichen Intraday-Markt im Jahr 2018) betragen ca. 500 €.

2.3 Kombination PRL/Peak Shaving

Für den kombinierten Einsatz des Batteriespeichers in der PRL und fürs Peak Shaving wird die Peak-Shaving-Prognose verwendet. Muss der Batteriespeicher potenziell für Peak Shaving zur Verfügung stehen, wird die hierfür benötigte Leistung reserviert. Die Verfügbarkeit der maximal benötigten Energiemenge im Batteriespeicher wird über die untere Grenze für FP-Geschäfte sichergestellt. Die verbleibende Leistung des Batteriespeichers wird in der PRL vermarktet, wobei Mindestangebotsmengen vernachlässigt werden. Außerhalb des Peak Shavings kann die maximal mögliche Leistung des Batteriespeichers vermarktet werden (s. Tab. 3).

Tab. 5: Spezifikationen des Batteriespeichers für den kombinierten Einsatz

für Peak Shaving reservierte Leistung in kW	600
PQ-Leistung in kW	350
Leistung für FP-Geschäfte in kW	150
obere/untere ÜNB-Grenze für den SOC in %	85 / 15
obere/untere FP-Grenze für den SOC in %	80 / 62
Soll-SOC für FP-Geschäfte in %	71

Die Reduzierung der PQ-Leistung zwecks Peak Shaving an 32 Tagen (vgl. Tab. 1) führt zu verringerten Erlösen aus der PRL-Vermarktung in Höhe von ca. 67.500 €. Die Kosten für FP-Geschäfte betragen ca. 400 €. Gleichzeitig wird jedoch auch die Einsparung von knapp 40.000 € an NNE pro Jahr realisiert, sodass der Gesamterlös ca. 107.000 € beträgt.

3 Fazit

Die hier vorgestellte Einsatzstrategie ermöglicht die gleichzeitige Nutzung eines in der PRL vermarkteten Batteriespeichers für Peak Shaving, wodurch sich Mehrerlöse von ca. 30% erzielen lassen. Die regulatorischen Vorgaben der ÜNB bezüglich PRL aus Batteriespeichern werden eingehalten.

Die Untersuchungen erfolgen im Rahmen des Forschungsprojekts WIKI – Wirtuelles Kraftwerk Iserlohn, das vom EFRE-Programm der Europäischen Union gefördert wird (Förderkennzeichen: EFRE-0800708).



Referenzen

- [1] C. Linnemann: Aktuelle Entwicklung bei der Regelleistung, Berlin, 2017.
- [2] P. Stenzel: Bereitstellung von Primärregelleistung durch stationäre Großbatteriespeicher, Jülich, 2016.

- [3] Deutsche ÜNB: Anforderungen an die Speicherkapazität bei Batterien für die Primärregelleistung, 2015.
- [4] Deutsche ÜNB: Eckpunkte und Freiheitsgrade bei Erbringung von Primärregelleistung, 2014.
- [5] A. Zeh, M. Müller, M. Naumann, H. Hesse, A. Jossen, R. Witzmann: Fundamentals of Using Battery Energy Storage Systems to Provide Primary Control Reserves in Germany. In: *Batteries* 2016, 2 (3). [doi: 10.3390/batteries2030029](https://doi.org/10.3390/batteries2030029)

Elektrische Verbindungstechnik für smarte und autonome Systeme

Kevin Krüger, Haomiao Yuan, Jian Song

Technische Hochschule Ostwestfalen-Lippe

{[kevin.krueger2](mailto:kevin.krueger2@th-owl.de), [haomiao.yuan](mailto:haomiao.yuan@th-owl.de), [Jian.song](mailto:Jian.song@th-owl.de)}@th-owl.de

Smarte und autonome Systeme erfordern einen hohen Vernetzungsgrad. Eine zuverlässige und echtzeitnahe Vernetzung wird derzeit vor allem durch den Einsatz von Steckverbindungen erreicht. Dementsprechend ist die Zuverlässigkeit der eingesetzten Steckverbinder für einen störungsfreien Betrieb von hoher Relevanz. Bereits in der Planungsphase solcher Systeme wird dieser Bauteileigenschaft eine elementare Bedeutung zugeschrieben. Die Zuverlässigkeit kann durch die Angabe der FIT-Rate (Failure in Time) quantifiziert werden. Oft wird die FIT-Rate bei Steckverbindern rechnerisch bestimmt. Dazu existieren verschiedene Modelle bzw. Standards. Im Vergleich mit Felddaten zeigen diese jedoch erhebliche Abweichungen. Ebenso werden mechanische Belastungen nicht oder nicht ausreichend berücksichtigt. In diesem Beitrag wird ein allgemeingültiges Modell zur Zuverlässigkeitsbestimmung vorgestellt. Dabei werden alle relevanten Schädigungsmechanismen miteinbezogen. Das Modell wird mittels erhobener Daten aus Labor und Feld validiert. Im Weiteren werden einige Konzepte zur Verbesserung der Zuverlässigkeit von Steckverbindungen vorgestellt. Hauptaugenmerk liegt dabei auf dem Einsatz von Funktionsbeschichtungen aus Gold. Untersucht werden Lösungen zur Optimierung durch eine Veränderung der Legierungszusammensetzung, den Einsatz von Nanopartikeln und die Passivierung mit einer dünnen selbstorganisierenden Monoschicht (SAM).

1 Einleitung

Sowohl die Entwicklung von autonomen Fahrzeugen als auch die fortschreitende Vernetzung von Fabrikssystemen hin zu sogenannten Smart Factories

bedingen einen stetig steigenden Einsatz von elektrischen Verbindungskomponenten. Die Zuverlässigkeit der verbauten Steckverbinder stellt infolgedessen einen zunehmend signifikanten Teil der Gesamtzuverlässigkeit eines Systems dar [1]. Resultierend daraus ist die Zuverlässigkeitsbestimmung solcher Verbindungselemente von hoher Relevanz. Mit ihrer Hilfe lassen sich bereits in der Planungsphase Vorhersagen über die Lebensdauer bzw. das entsprechende Ausfallverhalten treffen [2, 3].

In Kontrast dazu steht die nach wie zuvor sehr aufwendige und zeitintensive Vorgehensweise bei der Bestimmung von Zuverlässigkeitskennwerten. Die regulär veranschlagte Lebensdauer einzelner Komponenten übersteigt den Rahmen einer akzeptablen Prüfzeit erheblich [4, 5]. In Konsequenz werden beschleunigte Lebensdauerprüfungen eingesetzt. Bei diesen werden die Belastungen über das übliche Niveau hinaus angehoben, um bewusst Ausfälle hervorzurufen [4, 6].

2 Zuverlässigkeitsbestimmung mittels bestehender Normen und Standards

Die Angabe der Zuverlässigkeit einer Komponente erfolgt in der Regel durch die FIT-Rate (Failure in Time). Definiert ist diese als Anzahl der Ausfälle während einer Betriebsdauer von 10^9 h [3, 7, 8]. Nach ISO 26262 bestehen Vorgaben für die verschiedenen Automotive Safety Integrity Levels (ASIL). Die höchste Stufe ASIL D eines Systems erlaubt eine FIT-Rate von maximal 10 FIT. Da Steckverbinder nur einzelne Bestandteile eines Systems sind, wird für diese eine niedrigere FIT-Rate von maximal 1 FIT hergeleitet [9].

Um die FIT-Rate von Systemen bzw. Komponenten zu bestimmen, existieren bereits verschiedene Normen und Standards [2, 10, 11, 12]. Prinzipiell wird bei diesen Modellen eine Berechnung anhand einer ermittelten Grundausfallrate und der spezifischen Einflussfaktoren vorgenommen. Diese Faktoren beschreiben Umgebungs- und Betriebsbedingungen sowie konstruktive und qualitative Merkmale [2, 12, 13].

Werden die berechneten FIT-Raten jedoch Felddaten gegenübergestellt, sind teils sehr gravierende Abweichungen erkennbar [2, 6, 12, 13]. In Abb. 1 ist ein solcher Vergleich gegeben. Die höchsten Abweichungen liegen bei der Siemens-Norm SN 29500 in konservativer und bei BellCore in optimistischer

Hinsicht vor [12]. Dies ist zum einen durch das Fehlen von Daten aktueller Steckverbinder und Materialien begründet. Zum anderen werden Schadensursachen, wie z.B. Vibrationen oder allgemein mechanische Belastungen, nicht bzw. unzureichend berücksichtigt [2, 5, 12, 14, 15].

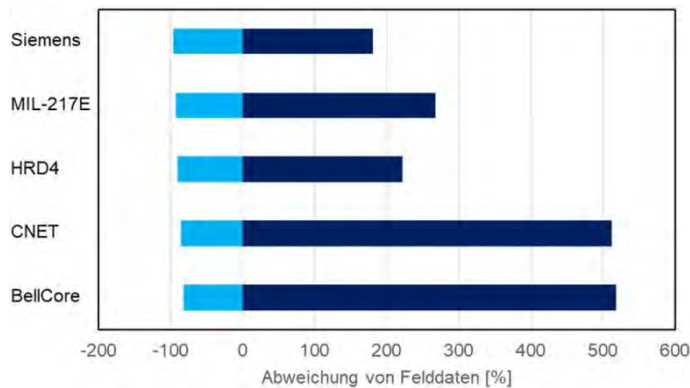


Abb. 1 Vergleich berechneter FIT-Raten mit realen Felddaten nach [12]

Infolgedessen kann nur ein begrenztes Produktportfolio an Steckverbindern mit bestimmten Konstruktionsmerkmalen untersucht werden. Dementsprechend ist das Ziel dieses Papers, ein neuartiges allgemeingültiges Modell zur Zuverlässigkeitsbestimmung vorzustellen, welches alle relevanten Schädigungsmechanismen miteinbezieht. Darüber hinaus wird eine Validierung des Modells dargelegt.

3 Beschleunigungsmodell

Zur Bestimmung von Ausfallraten im Labor werden beschleunigte Lebensdauerprüfungen eingesetzt. Um die ermittelten Daten in Bezug zu realen Betriebsbedingungen zu setzen, werden Beschleunigungsmodelle genutzt. Häufig eingesetzt werden dabei die Arrhenius- oder die Coffin-Mason-Gleichung [16]. Weiterführend findet die Norris-Landzberg-Gleichung Anwendung, welche verschiedene Modelle kombiniert [17]. Zur Berücksichtigung einer mechanischen Belastung durch Vibrationen wird ein weiterer Term zur Norris-Landzberg-Gleichung hinzugefügt.

Das Modell lautet somit [18]:

$$AF_{VTW} = \frac{t_B}{t_T} = \left(\frac{\Delta T_T}{\Delta T_B} \right)^p \left(\frac{f_B}{f_T} \right)^q \exp \left[\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_{o,B}} - \frac{1}{T_{o,T}} \right) \right] \left(\frac{V_T}{V_B} \right)^r \quad [I]$$

AF_{VTW}	Beschleunigungsfaktor [-]
t_B	Lebensdauer bei normalem Betrieb [h]
t_T	charakteristische Lebensdauer bei beschleunigter Prüfung [h]
ΔT_T	Temperaturdifferenz bei beschleunigter Prüfung [K]
ΔT_B	Temperaturdifferenz bei normalem Betrieb [K]
p	Schädigungskoeffizient Temperaturdifferenz [-]
f_B	Frequenz des Temperaturwechsels bei normalem Betrieb [h^{-1}]
f_T	Frequenz des Temperaturwechsels bei beschleunigter Prüfung [h^{-1}]
q	Schädigungskoeffizient Temperaturwechsel [-]
E_a	Aktivierungsenergie [eV]
k	Boltzmann-Konstante [eV/K]
$T_{o,B}$	obere Temperatur bei normalem Betrieb [K]
$T_{o,T}$	obere Temperatur bei beschleunigter Prüfung [K]
V_T	Vibrationsbelastung bei beschleunigter Prüfung [g]
V_B	Vibrationsbelastung bei normalem Betrieb [g]
r	Schädigungskoeffizient Vibration [-]

4 Beschleunigte Lebensdauerprüfungen

Um eine Validierung des Modells vornehmen zu können, werden zunächst beschleunigte Lebensdauerprüfungen im Labor durchgeführt. Basis dafür bildet ein Prüfablauf orientiert an der Prüfvorschrift für Kfz-Steckverbinder LV 214 [19]. Dabei werden Vibrationsprüfungen mit einer sinusförmigen Schwingungsanregung durchgeführt. Drei verschiedene Belastungslevel werden definiert mit einer Erhöhung der Belastung um 50%, 100% und 150% im Vergleich zum Schärfegrad 4 der LV 214.

Ebenso werden Temperaturwechselprüfungen durchgeführt mit einem Temperaturminimum von -40 °C und drei verschiedenen Maxima von 10 K, 20 K und 30 K oberhalb des Temperaturlimits der Steckverbinder. Ein Zyklus beträgt dabei 10 h, wobei jeweils 2 h Wechselzeit und 3 h Haltezeit vorge-

sehen sind. Die Vibrations- und Temperaturwechselprüfungen erfolgen im Wechsel.

Während der Prüfungen werden die Durchgangswiderstände der Steckverbinder kontinuierlich mittels Vier-Leiter-Messverfahren überwacht. Als Ausfallkriterium wird das Zehnfache des Grenzwiderstands aus der LV 214 definiert. Der allgemeine Prüfablauf ist in Abb. 2 dargestellt.

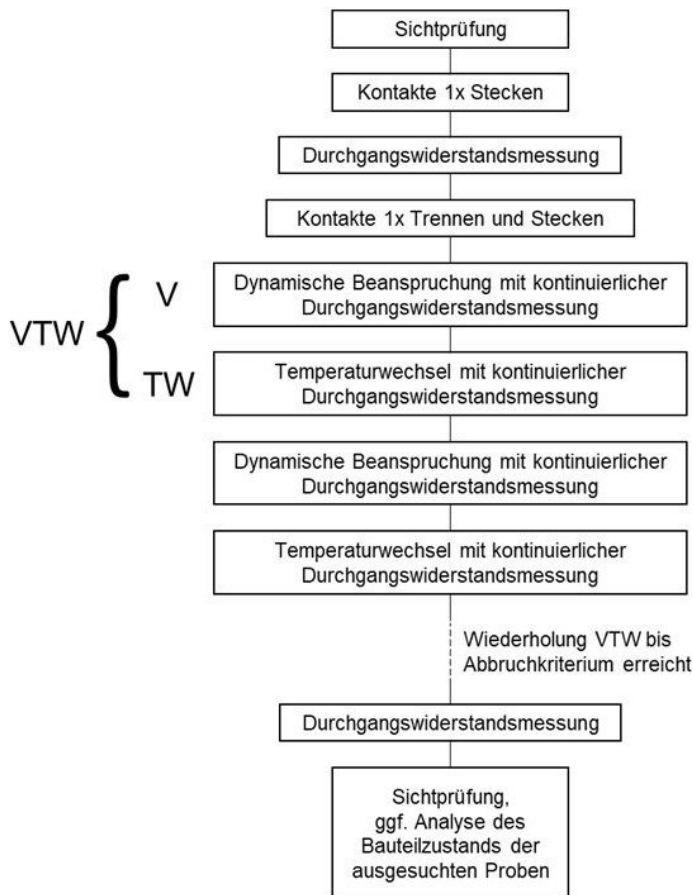


Abb. 2 Ablaufplan der beschleunigten Lebensdauerprüfungen nach [18]

5 Validierung des Modells

Anhand der bei den beschleunigten Lebensdauerprüfungen ermittelten Ausfallraten werden mithilfe statistischer Verteilungen die FIT-Raten bestimmt. Grundlage dafür bilden zum einen die Weibull- und zum anderen die CHI^2 -Verteilung. Darüber hinaus wird die am besten zum Datensatz passende Verteilung mittels geeigneter Software ermittelt.

Mithilfe einer Konvergenzanalyse wird das Beschleunigungsmodell aus [1] validiert. Konvergieren die berechneten FIT-Raten aus den verschiedenen beschleunigten Laborprüfungen, so gilt das Modell als validiert. Für verschiedene Prüfungen sind die bestimmten FIT-Raten in Abb. 3 visualisiert. Aus der Abbildung geht eine gute Konvergenz hervor.

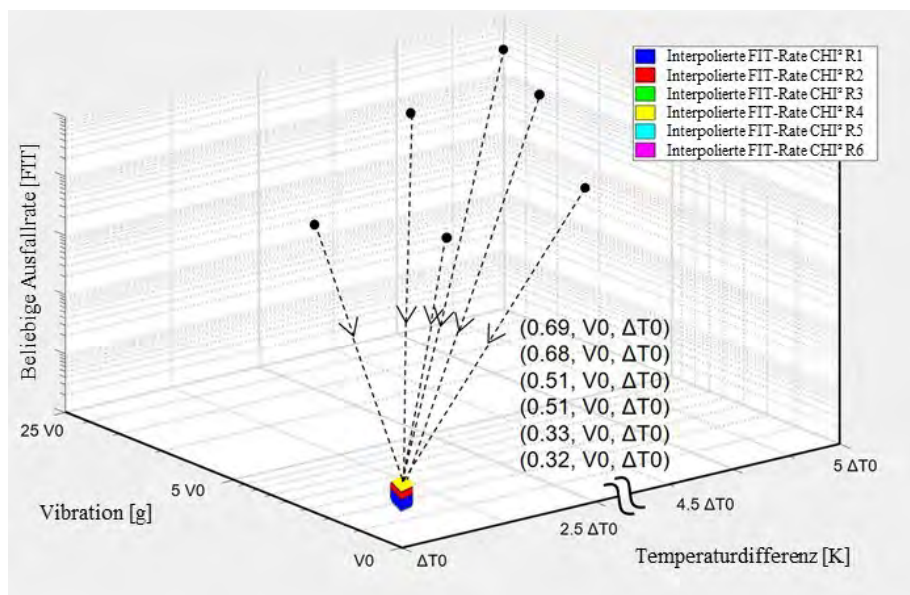


Abb. 3 Ermittelte FIT-Raten aus den beschleunigten Lebensdauerprüfungen [20]

Neben den Ergebnissen der Laborprüfungen werden Felddaten beschafft. Grundlage dafür bilden Altfahrzeuge mit einer Laufleistung von ca. 300.000 km und einer Betriebsdauer von 15 Jahren. Alle in den Fahrzeugen verbauten Steckverbinder werden demontiert und einer elektrischen Prüfung unterzogen. Die ermittelten Widerstände werden mit dem vorherig definierten Ausfallkriterium in Relation gesetzt. Anschließend werden die FIT-Raten aus diesen Daten bestimmt.

Letztendlich zeigen die aus den Felddaten gewonnenen Ergebnisse eine gute Übereinstimmung mit den Resultaten der Lebensdauerprüfungen. Das vorgestellte Beschleunigungsmodell wird somit als validiert angesehen.

6 Konzepte zur Verbesserung der Zuverlässigkeit von Steckverbindungen

Um die Funktionsfähigkeit von Steckverbindungen sicherzustellen, werden elektrische Kontakte häufig mit einer Funktionsbeschichtung versehen. Aufgrund der relativen Bewegung zwischen der Kontaktpaarung sollten solche Beschichtungen sowohl eine hohe Korrosionsbeständigkeit als auch eine gute Verschleißbeständigkeit aufweisen.

Für Anwendungen unter hohen thermischen und/oder mechanischen Belastungen werden vornehmlich Edelmetalloberflächen eingesetzt. Gold besitzt die beste Korrosionsbeständigkeit und findet daher bevorzugt Einsatz als Beschichtungsmaterial. Kritische Punkte bei der Anwendung einer reinen Goldschicht sind jedoch die geringe Verschleißbeständigkeit und die hohen Materialkosten. Im Folgenden werden deshalb einige Lösungen untersucht, mithilfe derer der Goldverbrauch minimiert und die allgemeine Leistung von Steckverbindern optimiert werden kann:

- Anwendung von Goldlegierungen und Optimierung der Legierungszusammensetzung
- Implementierung von Nanopartikeln
- Passivierung durch dünne selbstorganisierende Monoschichten (SAM).

6.1 Erhöhung der Lebensdauer durch den Einsatz von Goldlegierungen

Durch das Legieren von Gold kann eine höhere Härte der Beschichtung erreicht werden. Infolgedessen wird die Verschleißbeständigkeit verbessert [21]. Häufig genutzte Legierungselemente sind dabei Kobalt, Eisen oder Nickel. Allerdings wird der Effekt der Legierungselemente durch den Prozess des Galvanisierens und die Oberflächeneigenschaften, z.B. Duktilität und Rissbildung, begrenzt. Daher ist eine Optimierung des Legierungs-

elementgehalts von großer Bedeutung. Abb. 4 zeigt den Einfluss des Elementgehalts auf die Lebensdauer. Bei der Au-Fe-Legierung ist ein optimaler Eisenanteil klar erkennbar. Dahingegen weist die Au-Co-Legierung insgesamt betrachtet keinen signifikanten Unterschied bei Erhöhung des Kobaltanteils auf.

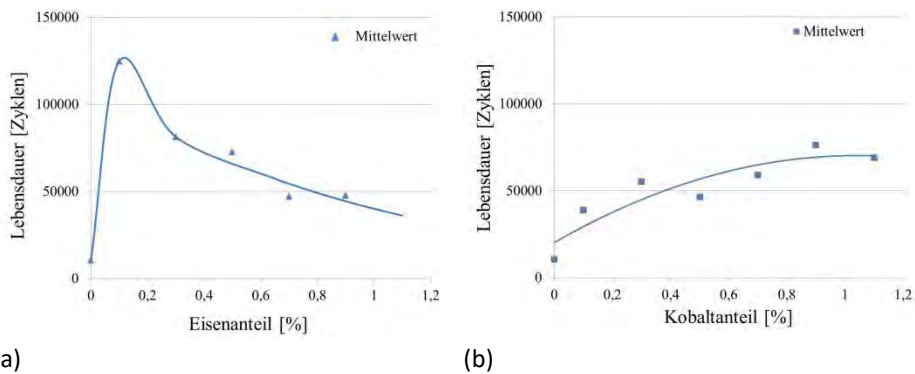


Abb. 4 Einfluss des Legierungselementgehalts auf die Lebensdauer: (a) Au-Fe, (b) Au-Co nach [22]

6.2 Implementierung von Nanopartikeln in die Goldschicht

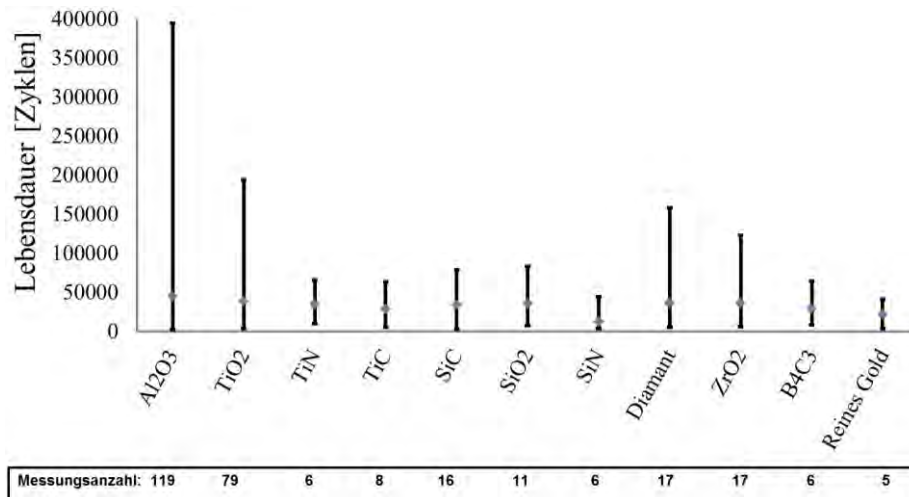


Abb. 5 Steigerung der Lebensdauer durch Zugabe verschiedener Nanopartikel im Vergleich zur reinen Goldbeschichtung nach [22]

Durch eine Implementierung von Nanopartikeln in die Metall-Matrix kann die Verschleißbeständigkeit erhöht werden [23]. Die maximal erreichbare Steigerung der Lebensdauer durch Zugabe verschiedener Nanopartikel ist in Abb. 5 dargestellt. Al_2O_3 - und TiO_2 -Nanopartikel zeigen die besten Ergebnisse.

6.3 Passivierung mit dünner selbstorganisierender Monoschicht (SAM)

Anforderungen an selbstorganisierende Monoschichten bei der Anwendung an elektrischen Kontakten sind:

- Der Kontaktwiderstand sollte nicht merklich erhöht oder destabilisiert werden.
- Bei Betriebstemperatur muss das Beschichtungssystem stabil sein, sowohl bei erhöhter Temperatur als auch bei Raumtemperatur.

Die Methode zur Abscheidung einer selbstorganisierenden Monoschicht ist in Abb. 6 visualisiert. Die Wirkung von selbstorganisierenden Monoschichten auf den Korrosionsschutz ist in Abb. 7 veranschaulicht. Bei beiden Oberflächen werden Poren detektiert. Jedoch sind bei der passivierten Oberfläche keine Korrosionsprodukte erkennbar.

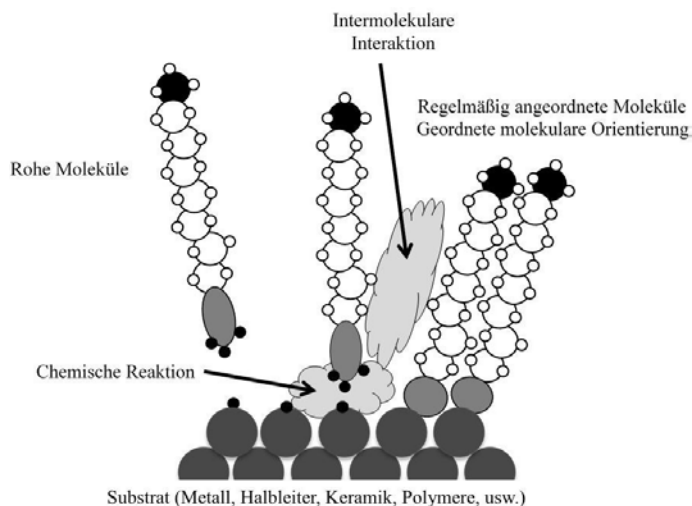


Abb. 6 Methode zur Abscheidung einer selbstorganisierenden Monoschicht – Ultraschall-unterstütztes Eintauchen nach [22]

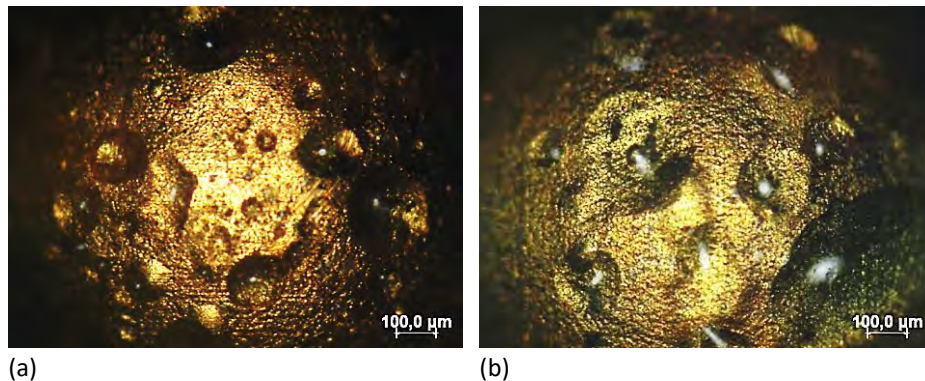


Abb. 7 Kontaktoberflächen nach einer Korrosionsprüfung, Schichtdicke $0,4 \mu\text{m}$: (a) mit selbstorganisierender Monoschicht, (b) ohne selbstorganisierende Monoschicht [22]

7 Zusammenfassung

Dieses Paper stellt ein neues Beschleunigungsmodell zur Berechnung von FIT-Raten im Rahmen der Zuverlässigkeitsbestimmung zur Verfügung. Berücksichtigt werden dabei sowohl thermische als auch mechanische Belastungen. Durch eine Konvergenzanalyse und den Vergleich mit Felddaten wurde das Modell validiert. Darüber hinausgehend wurden Konzepte zur Verbesserung der Zuverlässigkeit von goldbeschichteten Steckverbindungen vorgestellt. Zurzeit werden die Weiterentwicklungen der vorgestellten Konzepte für Silber- und Zinnoberflächen untersucht.

Danksagung

Gefördert durch:
 Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie
aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Arbeit wurde teilweise über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi, IGF, Vorhaben-Nr. 20139 N) gefördert. Die Autoren bedanken sich für die Förderung.

Referenzen

- [1] SRINIVASAN, Jayanth; ADVE, Sarita V.; BOSE, Pradip; RIVERS, Jude; HU, Chao-Kun: Ramp: A model for reliability aware microprocessor design. IBM research report, RC23048 (W0312-122), 2003.
- [2] BOWLES, John B.: A survey of reliability-prediction procedures for microelectronic devices. In: *IEEE Transactions on Reliability* 41 (1992), Nr. 1, S. 2–12
- [3] FROST, David F.; POOLE, Kelvin F.: A Method for Predicting VLSI-Device Reliability Using Series Models for Failure Mechanisms. In: *IEEE Transactions on Reliability* R-36 (1987), Nr. 2, S. 234–242
- [4] KLINGER, D. J.: On the notion of activation energy in reliability : Arrhenius, Eyring, and thermodynamics. In: *1991 proceedings, Annual Reliability and Maintainability Symposium*. Orlando, Florida, USA, 1991 January 29–31. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1991, S. 295–300
- [5] YANG, Shaoyong; BRYANT, A.; MAWBY, P.; XIANG, Dawei; RAN, Li; TAVNER, P.: An Industry-Based Survey of Reliability in Power Electronic Converters. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 47 (2011), Nr. 3, S. 1441–1451
- [6] ECONOMOU, M.: The merits and limitations of reliability predictions. In: *Annual Symposium Reliability and Maintainability, 2004 – RAMS*. Piscataway, N.J.: IEEE, 2004, S. 352–357
- [7] HIRSCHMANN, Dirk; TISSEN, Dietmar; SCHRODER, Stefan; DE DONCKER, Rik W.: Reliability Prediction for Inverters in Hybrid Electrical Vehicles. In: *IEEE Transactions on Power Electronics* 22 (2007), Nr. 6, S. 2511–2517
- [8] GOTTSCHALK, Armin: *Qualitäts- und Zuverlässigkeitssicherung elektronischer Bauelemente und Systeme : Methoden – Vorgehensweisen – Voraussagen ; mit 61 Tabellen*. 2., völlig neu bearb. Aufl., Renningen: expert-Verl., 2010
- [9] ISO 26262-5:2018-12. 2018. Road vehicles – Functional safety – Part 5: Product development at the hardware level
- [10] JEDEC SOLID STATE TECHNOLOGY ASSOCIATION: JESD91A – Method for Developing Acceleration Models for Electronic Component Failure Mechanisms. Arlington County, 2003
- [11] JEDEC SOLID STATE TECHNOLOGY ASSOCIATION: JESD94B – Application Specific Qualification Using Knowledge Based Test Methodology. Arlington County, 2008
- [12] JONES, Jeff A.; HAYES, Joe A.: A Comparison of Electronic Reliability Prediction Methodologies. In: *Proceedings / Annual Reliability and Main-*

- tainability Symposium (RAMS)*, 2013. 28–31 Jan. 2013, Orlando, FL, USA. Piscataway, NJ: IEEE, 2013, S. 1–7
- [13] CATELANI, Marcantonio; CIANI, Lorenzo; GRADITI, Giorgio; ADINOLFI, Giovanna: Measurement and Comparison of Reliability Performance of Photovoltaic Power Optimizers for Energy Production. In: *Metrology and Measurement Systems* 22 (2015), Nr. 1, S. 139–152
- [14] JEDEC SOLID STATE TECHNOLOGY ASSOCIATION: JESD47J.01 – Stress-test-driven qualification of integrated circuits. Arlington County, 2017
- [15] JEDEC SOLID STATE TECHNOLOGY ASSOCIATION: JEP122F – Failure Mechanisms and Models for Semiconductor Devices. Arlington County, 2010
- [16] NELSON, Wayne B.: *Accelerated Testing : Statistical Models, Test Plans, and Data Analysis*. Hoboken: John Wiley & Sons
- [17] NORRIS, K. C.; LANDZBERG, A. H.: Reliability of Controlled Collapse Interconnections. In: *IBM Journal of Research and Development* 13 (1969), Nr. 3, S. 266–271
- [18] SONG, Jian; YUAN, Haomiao; KOCH, Christian: Accelerated Testing of Electromechanical Connectors Considering Thermal and Mechanical Loads. In: *2018 IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*. Piscataway, NJ: IEEE, 2018, S. 467–474
- [19] AUDI AG, BMW AG, DAIMLER AG, PORSCHE AG, VOLKSWAGEN AG: Kfz-Steckverbinder : Prüfvorschrift LV 214. 2010
- [20] SONG, Jian; YUAN, Haomiao; KOCH, Christian: Zuverlässigkeit von Steckverbindern. In: SONG, Jian (Hrsg.): *Elektrische und optische Verbindungstechnik 2019 : Tagungsband der GMM-Fachtagung 7. Symposium Connectors*. Lemgo: Strohmeier Medien, 2019, S. 91–98
- [21] KATO, Koji; ADACHI, Koshi: Wear Mechanisms. In: BHUSHAN, Bharat (Hrsg.): *Modern tribology handbook*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2001, S. 273–300
- [22] SONG, Jian; WANG, Liangliang; ZIBART, Andre; KOCH, Christian: Corrosion Protection of Electrically Conductive Surfaces. In: *Metals – Open Access Metallurgy Journal* 2 (2012), Nr. 4, S. 450–477
- [23] ARUNA, S. T.; EZHIL SELVI, V.; WILLIAM GRIPS, V. K.; RAJAM, K. S.: Corrosion- and wear-resistant properties of Ni-Al₂O₃ composite coatings containing various forms of alumina. In: *Journal of Applied Electrochemistry* 41 (2011), Nr. 4, S. 461–468

3 Connected, Safe and Green Mobility

Die Zukunft der Brennstoffzelle als Ersatz für die Batterie

Konzeptstudie mit Computersimulation –
exemplarisch am Fahrzeug Tesla Model S dargestellt

Marius Geller¹, Norbert Kluck, Marc Steffens

Fachhochschule Dortmund

¹ geller@fh-dortmund.de

Die zukünftige Mobilität steht vor einem gravierenden Umbruch. Aufgrund des in den letzten Jahren stark gestiegenen CO₂-Ausstoßes tritt die Forderung nach emissionsfreien Fahrzeugen immer stärker in den Vordergrund. So wird zurzeit das batteriebetriebene Auto als zukunftsichere Lösung propagiert. Jedoch haften dieser erhebliche Nachteile wie eine hohe Ladezeit und eine geringe Reichweite an. Spannenderweise hat sich bereits vor über einem Jahrhundert Henry Ford wie folgt geäußert:

„Ich hoffe, dass wir innerhalb eines Jahres mit der Herstellung eines Elektroautos beginnen. Bisher bestand das Problem darin, eine Speicherbatterie von geringem Gewicht zu bauen, die für den Betrieb auf langen Strecken ohne Aufladen geeignet ist.“ (Henry Ford im Januar 1914)

Es ist abzusehen, dass die spezifischen Nachteile der Batterie als Energieträger durch den Einsatz von Brennstoffzellen ausgeräumt werden. In dieser Studie wird das Potenzial am Beispiel des Tesla Model S exemplarisch aufgezeigt. Basis dieser Studie sind Computersimulationen mit der Software ANSYS.

1 Von der Batterie zur Brennstoffzelle

Die Energieversorgung wird in den nächsten Jahrzehnten eines der größten Probleme der modernen Welt. Die Weltbevölkerung wächst rasant und ein

immer größerer Teil der Weltbevölkerung heizt den globalen Konsum an. Die sich daraus ergebende immense Nachfrage nach Energie führte in den letzten Jahren zu immer mehr Problemen.

Die Ressourcen fossiler Energieträger nehmen ab und können durch erneuerbare Energieträger noch nicht kompensiert werden. Der immer stärker zutage tretende Klimawandel ist ein zweites hoch brisantes Problem.

Ein weltweites Entgegenwirken wird aber immer schwieriger, da sich energiepolitische Ziele mit den ökologischen und ökonomischen Vorstellungen einzelner Staaten kaum noch in Einklang bringen lassen.

Als Hauptursache des durch die globale Erwärmung entstehenden Klimawandels gilt die menschliche Nutzung fossiler Brennstoffe. Abbildung 1 verdeutlicht die gegenwärtig gültige Bilanz.

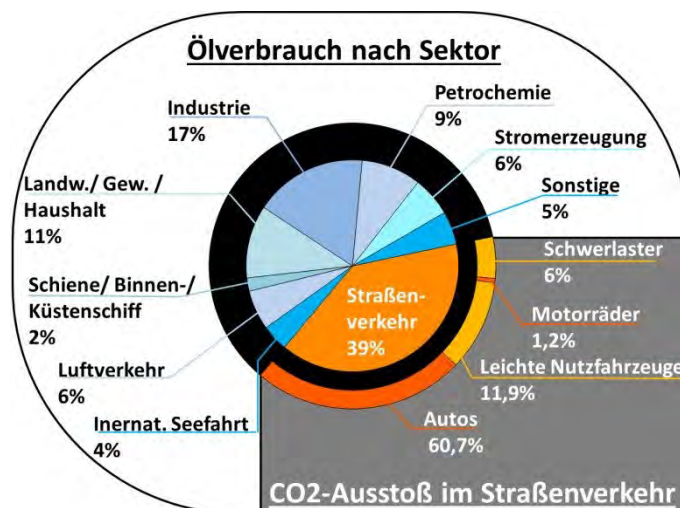


Abb. 1 Ölverbraucher und CO₂-Ausstoß nach Verkehrssektoren

In Abbildung 2 ist der Anstieg der CO₂-Konzentration und der Anstieg der energiebedingten Emissionen der letzten 150 Jahre dargestellt. Deutlich erkennbar ist hier der rapide Anstieg in den letzten 60 Jahren, in denen sich der jährliche energiebedingte CO₂-Ausstoß um den Faktor vier vergrößert hat.

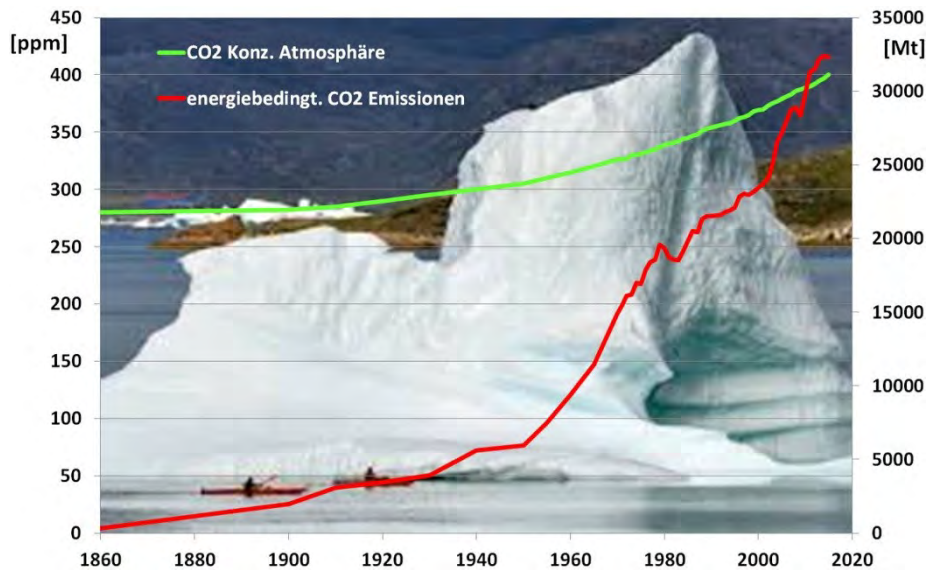


Abb. 2 CO₂-Konzentration der Atmosphäre; energiebedingte CO₂-Emissionen

Einer der größten Verursacher von CO₂-Emissionen ist der Straßenverkehr und davon mit ca. 60% das Auto (vgl. Abb. 1). Aus diesem Grund versucht die Politik in Europa und somit auch in Deutschland seit geraumer Zeit, der Steigerung des Schadstoffausstoßes entgegenzuwirken. Erst kürzlich wurde beschlossen:

- Bis 2021 dürfen neu zugelassene Pkw im Schnitt max. 95 g CO₂/km ausstoßen,
- der CO₂-Ausstoß von Neuwagen soll bis 2025 um 15% verringert werden,
- der CO₂-Ausstoß von Neuwagen soll bis 2030 um 37,5% verringert werden.

Die Einhaltung dieser Ziele verlangt immense technische Veränderungen auf der einen Seite, aber auch große gesellschaftliche Anstrengungen hinsichtlich der Akzeptanz neuartiger Modelle in der Mobilität.

Als erster Meilenstein wurde von der Bundesregierung als Zielsetzung der Einsatz von einer Millionen elektrisch angetriebenen Fahrzeugen bis 2020 ausgelobt. Aktuell ist dieses Ziel jedoch trotz Subventionsprogrammen schon auf 2022 verschoben worden. Dies hat mehrere Gründe:

- hohe Anschaffungskosten,
- geringe Reichweiten,
- mangelnde Verfügbarkeit von Ladestationen,

- relativ lange Ladezeiten,
- mangelnde gesellschaftliche Akzeptanz in Bezug auf Sicherheit und Zuverlässigkeit.

Die gelisteten Punkte sind als **Störfaktoren** bei der Markteinführung elektrisch angetriebener Fahrzeuge nicht von der Hand zu weisen. Der ein oder andere Punkt lässt sich jedoch schnell relativieren. Die nicht ausreichende Bereitstellung von Ladestationen ist mit Verwendung innovativer Ideen (z.B. Laternenanschluss) zu verbinden. Andere Punkte, wie die mangelnde Reichweite und die langen Ladezeiten, sind dagegen nicht wegzudiskutieren. In diesen Punkten schafft ein anderes Konzept Abhilfe: **weg von der Batterie und hin zur Brennstoffzelle.**

Nachfolgend wird die Machbarkeit dadurch gezeigt, dass ein Tesla Model S mithilfe moderner Methoden der Computersimulation virtuell umgerüstet wird. Abbildung 3 zeigt dieses Fahrzeug in seiner gegenwärtigen Ausführung.



Abb. 3 Tesla Model S [Bildquelle: https://www.tesla.com/de_DE/models]

2 Projektziel

Der Forschungsschwerpunkt „Computersimulation im Maschinenbau“ der Fachhochschule Dortmund hat den Austausch des batterieelektrischen Antriebs durch einen brennstoffzellenelektrischen Antriebs als Potenzialanalyse durchgeführt. Es wird anhand des derzeitigen Marktführers auf dem Gebiet der elektroangetriebenen Fahrzeuge eine Neukonzeptionierung des Antriebes

und der damit verbundenen Verbesserungen mithilfe modernster numerischer Strömungs- und Struktursimulationen aufgezeigt. Innerhalb der Neukonzeptionierung ist dabei mit komplexen „State-of-the-art“-Optimierungsalgorithmen gearbeitet worden. Am Ende werden beide Antriebskonzepte vergleichend gegenübergestellt.

3 Vorgehensweise der Potenzialanalyse

Das Hauptmerkmal der Arbeiten ist der **Austausch der Energiequelle**, bei dem die Batterie durch Brennstoffzellen-Stacks ersetzt wird. Der Einsatz von Brennstoffzellen erfordert notwendigerweise die Bereitstellung von Wasserstoff (H_2), welcher aktuell technisch nutzbar in drei Varianten gespeichert werden kann. Innerhalb des Projektes wird die transkritische Speicherung zugrunde gelegt, welche bei einem sehr hohen Druck von bis zu 700 bar und bei sehr niedriger Temperatur von ca. -220 °C abläuft.

Im Rahmen der Potenzialanalyse sind die folgenden Schritte bearbeitet worden:

- Analyse der Fahrzeugdaten, der Geometrie, der Leistung und der Reichweite des vorhandenen Modells,
- Ermittlung verschiedener Leistungsdaten in Abhängigkeit des Luftwiderstandes auf der Basis numerischer Simulationen der Karosserieumströmung,
- numerische FSI-Simulationen der Brennstoffzelle,
- Volumenberechnung des benötigten Wasserstoff-Drucktanks mit Simulation der Festigkeit und der thermischen Einflüsse,
- Auslegung und thermische FSI-Simulation einer E-Maschine,
- Bauteiloptimierung der Hinterachse mittels numerischer Struktursimulation und integrierter Optimierung.

Jede Neukonzeptionierung wird hinsichtlich der Realisierung überprüft. Insbesondere ist sicherzustellen, dass neue Baugruppen überhaupt verbaut werden können. Die Abbildungen 4 und 5 verdeutlichen dies. Dort sind die Baugruppen, die tiefgreifende Veränderungen erfahren, in roter Farbe dargestellt.



Abb. 4 Originalversion des Tesla S; Batterie in rot dargestellt



Abb. 5 Fahrzeug in der Neukonzeptionierung; Austauschchteile in rot dargestellt

Die Veränderungen der Leistungsdaten und die erreichten Verbesserungen werden am Ende dargestellt.

3.1 Analyse des vorhandenen Modells

Im Rahmen der Potenzialanalyse wurde das Tesla Modell S75 als Basis gewählt. In seiner batterieelektrischen Antriebsversion verfügt dieses Modell über einen Asynchronmotor mit einer Leistung von 315 kW, was einer äquivalenten Leistung von ca. 428 PS entspricht. Der Motor zeichnet sich durch

seinen hohen Wirkungsgrad bei niedriger Leistung aus. Er benötigt zur präzisen Ansteuerung eine aufwendige Software. Bei einer Batteriekapazität von 75 kWh ergibt sich laut Herstellerangabe eine Reichweite von ca. 490 km, die im Vergleich zu aktuell auf dem Markt befindlichen Modellen der Mitbewerber relativ hoch ist. Die Beschleunigung von 0 auf 100 km/h ist in 4,6 s realisierbar. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt 225 km/h.

Die Ladezeit beträgt an einer 120 kW Ladestation für eine 80%-ige Aufladung ungefähr 45 Minuten. Das Modell S besitzt ein Leergewicht von 2183 kg und ein zulässiges Gesamtgewicht von 2600 kg.

3.2 Konzeptionierung der Brennstoffzelle

Technisch werden heutzutage zwei Arten von Brennstoffzellen (BZ) eingesetzt. Zum einen ist dies die Polymer-Membran-BZ (PEMFC – Proton Exchange Membrane Fuel Cell) und zum anderen die Festoxid-BZ (SOFC – Solid Oxid Fuel Cell). Der Unterschied liegt im Bereich des Elektrolytes. Im Fall der PEMFC besteht das Elektrolyt aus einer dünnen festen Kunststoffhaut und im Fall der SOFC aus der Hightech-Keramik Zirkondioxid, die auch bei hohen Temperaturen wärme- und korrosionsbeständig ist.

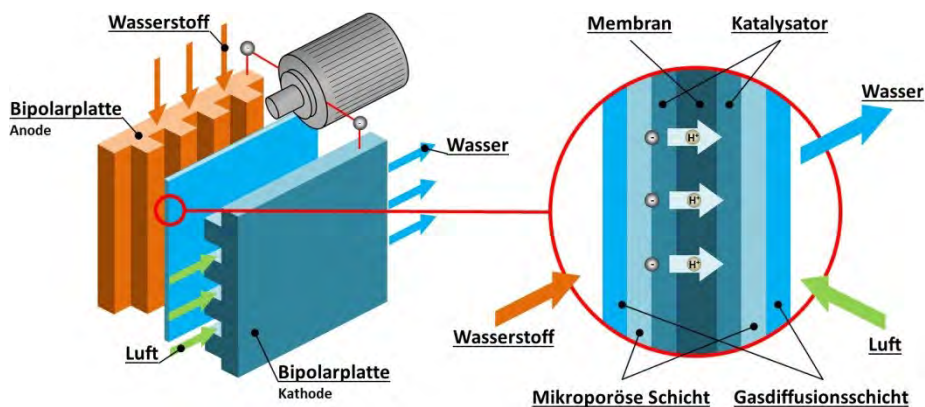


Abb. 6 Aufbau einer Polymer-Membran-Brennstoffzelle

Nachfolgend wird ausschließlich die PEMFC-Brennstoffzelle betrachtet. Der Aufbau einer solchen Brennstoffzelle ist in Abbildung 6 dargestellt. Sie besteht aus einem Anodenbereich und einem Kathodenbereich, die durch eine Membran getrennt sind. Sowohl der Anoden- als auch der Kathodenbereich bestehen aus mehreren Schichten mit unterschiedlichen Funktionen.

Die jeweils außen liegende Schicht ist eine Bipolarplatte, die mehrere Funktionen innehat. Zum einen stabilisieren die Platten die Brennstoffzelle. Darüber hinaus stellen die internen Fluidkanäle, die die Form eines Mäanders oder einer Spirale besitzen, eine gleichmäßige Reaktandenverteilung sicher. Sie sind für das Wärmemanagement der Brennstoffzelle verantwortlich. Zum anderen haben die Platten die wesentliche Aufgabe, die Elektronen über einen externen Stromkreis von der Anode zur Kathode zu leiten. Bipolarplatten müssen dementsprechend folgende Eigenschaften besitzen:

- hohe elektrische Leitfähigkeit,
- chemische, thermische und mechanische Stabilität mit guter Oxidations- und Reduktionsbeständigkeit,
- gute Abdichtung gegenüber allen auftretenden Stoffen.

In den weiteren Schichten, der sogenannten Membran-Elektroden-Einheit (MEA), erkennbar in Abbildung 6 rechts, finden die elektrochemischen Reaktionen statt. Die MEA besteht aus einer mehrlagigen Struktur mit den einzelnen Komponenten der Membran, dem Katalysator und den Diffusionsschichten. Die MEA dient dazu, die jeweiligen Reaktionsedukte und -produkte zuverlässig zu separieren. Die Membran wirkt darüber hinaus als elektrischer Isolator, die den Protonenfluß von der Kathode zur Anode über den Verbraucher gewährleisten soll. Für die einzelnen Schichten sind dementsprechend folgende Eigenschaften zwingend erforderlich:

- hohe ionische Leitfähigkeit in Bezug auf Protonen,
- hoher elektrischer Widerstand,
- geringe Permeabilität gegenüber Sauerstoff und Wasserstoff,
- hohe chemische, thermische und mechanische Stabilität über die gesamte Betriebszeit.

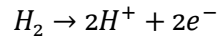
Der Katalysator, der in der Niedertemperaturbrennstoffzelle aus Platin oder einer Platinlegierung besteht, muss die folgenden Eigenschaften aufweisen:

- hohe katalytische Aktivität,
- stabiles Langzeitverhalten.

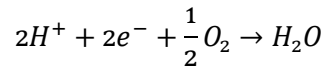
Die Diffusionsschichten, die die Funktion der Versorgung des Katalysators mit Reaktanden besitzen und dem Abtransport der Reaktionsprodukte und der Ladungsträger dienen, sollten folgende Eigenschaften erfüllen:

- hohe elektrische Leitfähigkeit,
- hohe Permeabilität gegenüber den Reaktanden,
- chemische, thermische und mechanische Stabilität.

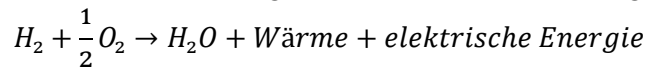
Die Energie in einer Brennstoffzelle entsteht äquivalent zu einer Batterie durch eine elektrochemische Reaktion zwischen Anode und Kathode. Auf der Kathodenseite wird Wasserstoff oder ein wasserstoffreiches Gasgemisch zugeführt:



Die Anodenseite wird mit Sauerstoff oder Luft beaufschlagt:



Es reagiert der Wasserstoff mit Sauerstoff in der Brennstoffzelle zu Wasser, Strom und Wärme in einer sogenannten „kalten Verbrennung“:



Unter Standardbedingungen bei einer Temperatur von 298,15 K und einem Druck von 1 bar_{abs} ergibt sich für die Wasserstoffoxidation bei der Entstehung von flüssigem Wasser eine Ruheklemmspannung E_0 von 1,229 V. Wenn gasförmiges Wasser entsteht, liegt die Spannung E_0 bei 1,185 V. Bei davon abweichenden Bedingungen der Temperatur und des Druckes ergibt sich eine angepasste Spannung, die sogenannte Nernstspannung $E_N(T,p)$.

Die entstehende Spannung einer Brennstoffzelle wird jedoch im Leerlauf ($i = 0$) als auch im Betrieb ($i > 0$) durch weitere diverse Effekte gemindert.

Folgende Effekte sind dabei von Bedeutung:

- Verluste durch interne Ströme η_{int}
- Verluste durch Durchtrittsüberspannungen η_D
- Verluste durch Ohm'schen Widerstand η_Ω
- Verluste durch Konzentrationsüberspannung η_K

$$E(i) = E_N - \eta_D - \eta_{int} - \eta_\Omega - \eta_K$$

Zum Schluss spielen auch die Fluidkanäle und die Stöchiometrie eine entscheidende Rolle im Betrieb einer Brennstoffzelle.

Immer, wenn es zu Wirkungsgradverlusten oder Beeinflussungen der Funktionalität aufgrund von Fluidströmung, Konzentrationen, Temperaturen oder Drücken kommt, werden moderne numerische Simulationen genutzt, um Erkenntnisse zu generieren und Optimierungen in die Konzeptphase einfließen zu lassen.

Dementsprechend sind in diesem Projekt umfangreiche komplexe Fluid-Struktur-Simulationen (FSI-Simulationen) mit ANSYS Fluent zum Einsatz gekommen. In der nachfolgenden Abbildung 7 wird beispielhaft die Temperaturverteilung im Fluidkanal der Anode dargestellt.

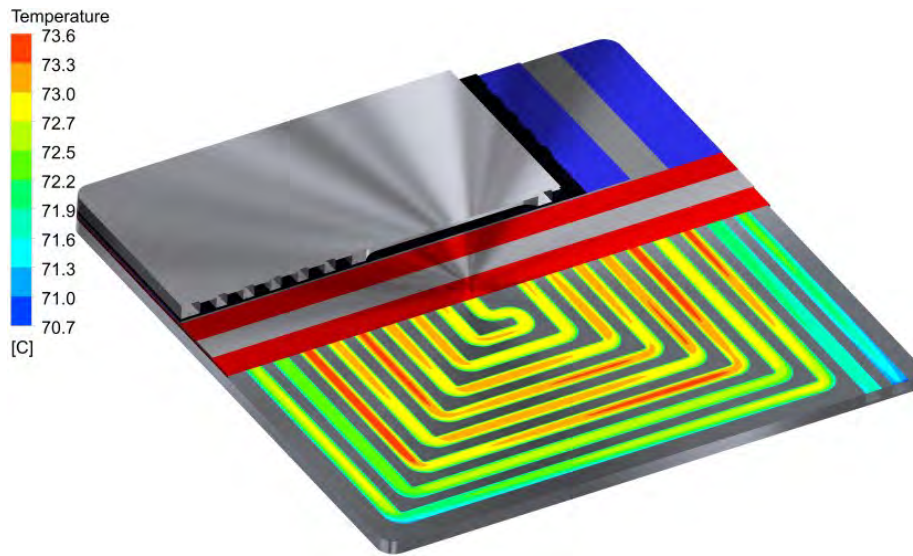


Abb. 7 Temperaturverteilung in einer Brennstoffzelle

Mithilfe von relativ aufwendigen Simulationen konnte in einer Optimierungsphase die Brennstoffzelle in Bezug auf die oben beschriebenen Verluste optimiert werden. Die Dicke der einzelnen Schichten, die Form der Strömungskanäle und die Querschnitte der Strömungskanäle sowie die Festigkeit der Zelle können den Gegebenheiten angepasst werden.

3.3 Auslegung und Berechnung des Drucktanks

Die Speicherung und Bereitstellung des Wasserstoffes gehört mit zu den aufwendigsten Teilgebieten innerhalb eines brennstoffzellenelektrischen Antriebes. Man unterscheidet heutzutage im Wesentlichen drei technisch ausgereifte Verfahren, die im automotiven Bereich einsetzbar sind:

- Speicherung als gasförmigen Stoff (GH_2) unter hohem Druck von ca. 700 bar,
- Speicherung in einer flüssigen Form (LH_2) bei Temperaturen von ca. -250 °C und einem Druck von 1 bis 5 bar,
- Die transkritische Speicherung als Kombination mit einer flüssigen Phase unter hohem Druck von ca. 700 bar und Temperaturen von ca. -220 °C .

Die transkritische Speicherung besitzt dabei die höchste Energiedichte der drei Verfahren.

Der Behälter muss dem sehr hohen Druck standhalten. Darüber hinaus muss das verwendete Behältermaterial den effektiven Schwund durch Diffusion unterbinden. Die extrem niedrige Temperatur innerhalb des Behälters muss zudem sehr gut zur Umgebung isoliert werden, um die Abdampfverluste zu verringern.

Heute verwendete Isolationen, die den Druck- und Temperaturanstieg verringern sollen, zeichnen sich durch eine doppelwandige Ausführung aus. Der Wärmetransport durch Konvektion wird im Zwischenraum mit einem eingebrachten Vakuum auf ein Minimum reduziert, zudem dient eine additiv eingebrachte Multi-Layer-Schicht dazu, den Wärmetransport durch Strahlung zu minimieren. Diese modernen hochkomplexen Isolationen sind äquivalent einer Isolationsdicke von 9 m Polystyrol.

Innerhalb des Projektes ist der zur Verwendung kommende Drucktank ausgelegt worden und ein strukturmechanischer und thermischer Nachweis der Einsetzbarkeit geführt worden.

Abbildung 8 stellt auf der unteren linken Seite beispielhaft die verwendete Multi-Layer-Isolation dar. Die rechte Seite der Abbildung zeigt auf der einen Seite die Spannungsverteilung des inneren Drucktanks und auf der anderen Seite die Temperaturverteilung der Isolationsschicht.

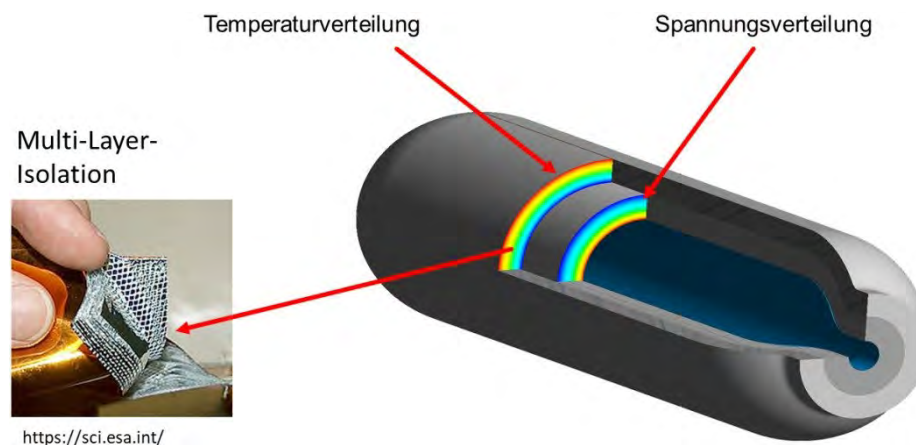


Abb. 8 Ergebnis der thermischen-Simulation und der Festigkeits-Simulation

Die Auslegung des Drucktanks basiert auf den Anforderungen des batterieelektrischen Antriebes, indem eine Reichweite von 490 km bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 80 km/h zugrunde gelegt wird. Über die aufzubringende Antriebsleistung (P), die sich aus den Kräften resultie-

rend aus dem Rollwiderstand und dem aus einer Strömungssimulation ermittelten Luftwiderstand (Abb. 9) sowie der Geschwindigkeit ergibt

$$P = (F_{Roll} + F_{Luft}) * v,$$

wird der Verbrauch in Abhängigkeit von der Reichweite (S) und der spezifischen Energiedichte (ω_{H_2}) berechnet.

$$m_{H_2} = \frac{e * S}{\omega_{H_2}}$$

Das entsprechend bereitzustellende Volumen des Drucktanks beträgt demzufolge

$$V_{Tank} = \frac{m_{H_2}}{\rho_{H_2 \text{ bei } 700\text{bar}}}$$

Mit den zugrunde gelegten Werten des batterieelektrischen Antriebs ergibt sich eine benötigte Wasserstoffmasse von 2,182 kg, was einem Tankvolumen von ca. 30,7 Liter entspricht.

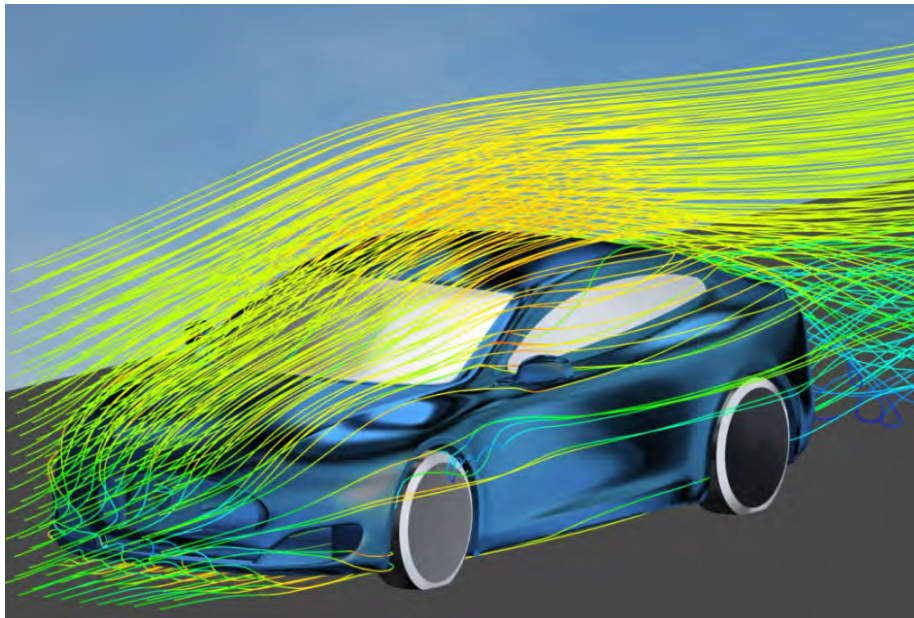


Abb. 9 Strömungssimulation zur Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwerts

Aus der permanent mitlaufenden Package-Betrachtung ist bei der Neukonzeptionierung die Möglichkeit zur Platzierung von zwei Drucktanks mit jeweils 32 Liter Fassungsvermögen entstanden. Dies wiederum bedeutet, dass auf Basis der ermittelten Werte eine Reichweite von ca. 1020 km erreicht werden kann.

3.4 Auslegung und Berechnung des Elektromotors

Ein weiterer Aspekt der Neukonzeptionierung ist die Abkehr von der Asynchron-Maschine des aktuellen Tesla Modell S hin zu einem permanentmagneterregten synchronen Elektromotor mit den gleichen Leistungsdaten. Dieser ist aufgrund seiner kompakteren Bauweise und mit seinem im Teillastbetrieb höheren Wirkungsgrad im Vergleich zu dem von Tesla verwendeten Asynchronmotor erheblich im Vorteil. Der Nachteil der Asynchronmaschine resultiert bereits daraus, dass im Leerlauf etwa 30% des Nennstromes für die Magnetisierung der Bleche benötigt werden und somit nicht für den Vortrieb zur Verfügung stehen.

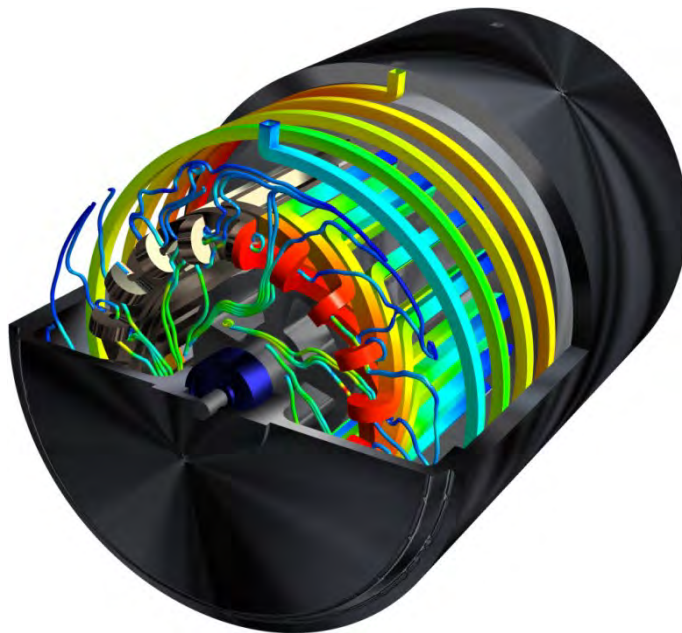


Abb. 10 Fluid-Struktur-Simulation der elektrischen Maschine

Aus diesen Gründen ist die PMS-Maschine ebenfalls im Forschungsschwerpunkt der Fachhochschule Dortmund ausgelegt worden. Da sich die Erwärmung im Betrieb stark auf den Wirkungsgrad der Maschine auswirkt, ist der Elektromotor mit einer externen spiralförmigen, im Gehäuse eingebrachten Fluidkühlung versehen. Die Auswirkung und Optimierung der Kühlung bzw. der Kühlkanäle ist mittels umfangreicher FSI-Simulationen vollzogen worden. In Abbildung 10 erkennt man sowohl die Temperaturver-

teilung in den Wicklungen als auch die sich einstellende Temperaturverteilung des externen Fluid-Kühlsystems. Im vorderen Bereich der Maschine sind zudem die Stromlinien des Luftvolumens im Wickelkopfbereich zu sehen. In Abbildung 11 ist nochmal detailliert der Temperaturverlauf im thermisch kritischsten Bereich des Wickelkopfes erkennbar.

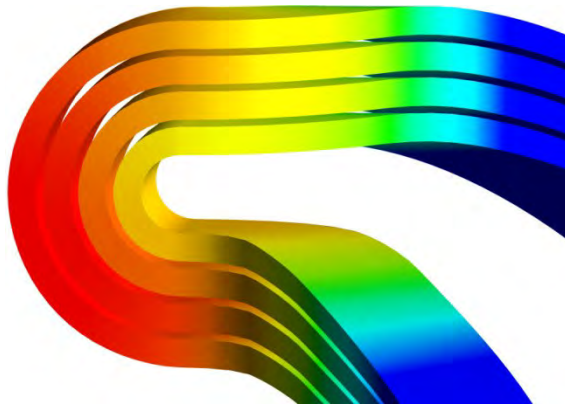


Abb. 11 Temperaturverteilung im Wickelkopf

Die thermischen FSI-Simulationen eignen sich hervorragend, um den Wärmehaushalt einer elektrischen Maschine zu optimieren.

3.5 Optimierung der Hinterachse

Die im Vorhinein beschriebenen Veränderungen haben zusätzlich den positiven Effekt, dass das zugrunde gelegte Modell des Tesla S75 wesentlich leichter wird.

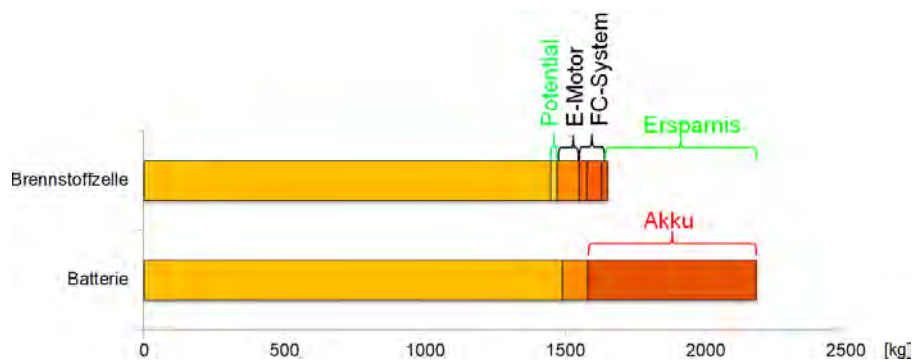


Abb. 12 Reduktion des Fahrzeuggewichtes

Um diesen Effekt zu nutzen, wurde innerhalb des Projektes die Festigkeitsbetrachtung der Hinterachse mit in die Neukonzeptionierung aufgenommen. So wurde entschieden, diese auf Basis eines Design of Experiments (DOE) strukturmechanisch zu optimieren. Abbildung 13 zeigt beispielhaft die Neugestaltung der Radträgerabstützung mithilfe einer Response-Surface-Methode.

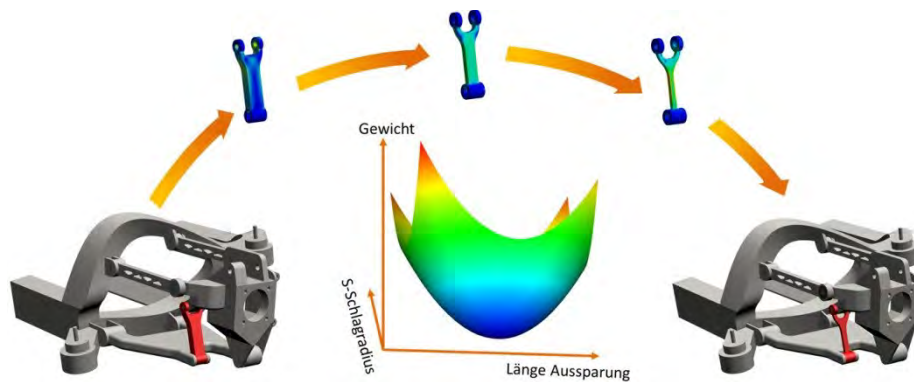


Abb. 13 Strukturmechanische Untersuchung und Optimierung der Hinterachse

Infolge der Optimierung ist es möglich, das Bauteil – wie auf der rechten Bildseite dargestellt – erheblich schlanker zu gestalten. Durch die Verringerung des Materialbedarfs sinkt das Bauteilgewicht um über 32%. Diese Reduktion des Gewichtes ist möglich, ohne die Bauteilfestigkeit negativ zu verändern.

4 Fazit

In dieser Potenzialanalyse wurde untersucht, wie sich das Tesla Model S durch die Verwendung eines alternativen Antriebskonzepts verändern kann. Infolge der Substitution des batterieelektrischen Antriebes durch den Brennstoffzellenantrieb bleiben nicht nur die Vorteile der Elektromobilität wie die lokal emissionsfreie Fortbewegung und das konstante Motordrehmoment erhalten, sondern es werden auch die Nachteile der schweren Akkus, der langen Ladezeit und der mangelhaften Ladesäuleninfrastruktur behoben. Wie auf der nachfolgenden Abbildung zu erkennen ist, wird die Auffüllzeit des

Akkus beziehungsweise des Wasserstofftanks erheblich verringert, sodass diese auch den Vergleich mit den heutigen Verbrennern nicht scheuen muss.

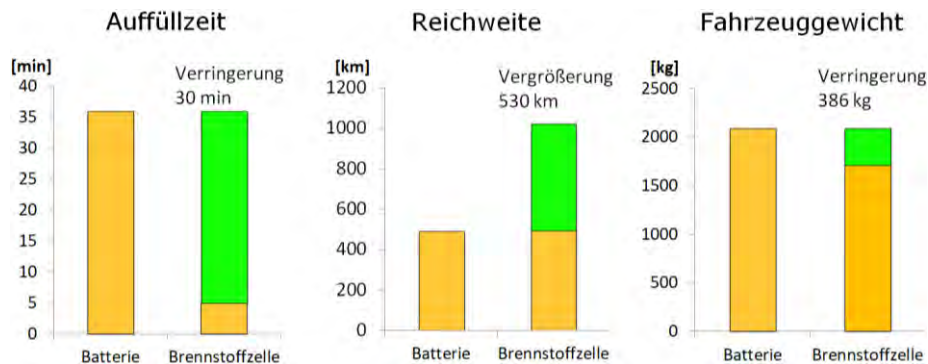


Abb. 14 Vergleich des Batterie- und Brennstoffzellenkonzeptes

Durch die Neukonzeptionierung ist es möglich, die Auffüllzeit um über 30 min. zu verringern. Darüber hinaus kann ein Brennstoffzellenfahrzeug bei 1020 km pro Tankfüllung mehr als die doppelte Reichweite eines Batteriefahrzeugs erreichen. Infolge des Einsatzes des wesentlich leichteren Brennstoffzellensystems wird eine weitergehende Gewichts- wie auch Kostenreduktion bei diversen Fahrzeugkomponenten möglich. So ist es nicht nur möglich, den Anschaffungspreis zu senken, sondern auch die „Reichweitenangst“ der Fahrzeugkäufer zu besiegen. Deshalb wird das Brennstoffzellen-Antriebskonzept eine erhebliche Rolle in der zukünftigen Mobilität spielen.

Referenzen

- [1] F. Weiß: *Optimale Konzeptauslegung elektrifizierter Fahrzeugantriebsstränge – Eine computergestützte Methodik zur Beschleunigung des Auslegungsprozesses*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2018
- [2] S. Srinivasan: *Fuel Cells – From Fundamentals to Applications*. New York: Springer, 2006
- [3] P. A. Rosen: *Beitrag zur Optimierung von Wasserstoffbehältern – Thermische und geometrische Optimierung für die automobilen Anwendung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2018
- [4] P. Kurzweil: *Brennstoffzellentechnik – Grundlagen, Materialien, Anwendungen, Gaserzeugung*. 3., überarb. u. aktual. Aufl., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016

Erfolgsfaktoren für die Wasserstoffmobilität in Deutschland

Matthias Schlegel¹, Peter Brucksch²

¹ Fichtner GmbH & Co. KG
matthias.schlegel@fichtner.de

² Netze BW
p.brucksch@netze-bw.de

In der aktuellen Diskussion über zukünftige Antriebstechnologien spielt Wasserstoff eine wichtige Rolle. Im Kontrast dazu ist die Verbreitung von Fahrzeugen mit Brennstoffzellenantrieb aktuell gering. Um das erwartete Potenzial von Wasserstoff in der Mobilität zu heben, sind drei Erfolgsfaktoren relevant: erstens ein gemeinsamer, projektbasierter Ausbau von Betankungsinfrastruktur und Abnahme, zweitens die Reduktion der Energiekosten durch Nutzung konventionell erzeugten Wasserstoffs zumindest in einer Anlaufphase und drittens der Aufbau der Serienproduktion im konkurrenzfähigeren Bereich des Schwerlast- und Fernverkehrs.

1 Einleitung

In der aktuellen politischen Diskussion spielt Wasserstoff als flexibler und sektorübergreifender Energieträger eine große Rolle, um langfristige Klimaziele erreichen zu können. Fast täglich erscheinen Zeitungsveröffentlichungen und Diskussionsbeiträge zur Rolle von Wasserstoff im Energiesystem der Zukunft. Dabei spielt die Mobilität als Anwendungsfeld eine große Rolle. Aktuell sind jedoch laut Kraftfahrtbundesamt nur 487 Brennstoffzellenfahrzeuge [1] in Deutschland registriert und 75 Wasserstofftankstellen in Betrieb [2]. Vergleicht man diese Zahlen mit den Gesamtwerten für Deutschland von ca. 47 Millionen Personenkraftwagen und über 14.500 Tankstellen, so wird klar, dass dem großen Potenzial, welches der Wasserstoffmobilität in der

öffentlichen Diskussion zugeschrieben wird, aktuell eine vernachlässigbare Verbreitung gegenübersteht.

Wasserstoff kann jedoch einen wertvollen Beitrag zur Reduktion von Treibhausgasemissionen liefern. Gerade bei großen Reichweiten werden Vorteile von Brennstoffzellen- gegenüber batterieelektrischen Fahrzeugen aufgrund des hohen Akkugewichts erwartet [3]. Um dieses Potenzial zu heben, sind jedoch aktuell bestehende Hemmnisse der Elektromobilität mit Wasserstoff zu beseitigen. Im Folgenden werden die daraus resultierenden Erfolgsfaktoren für die zukünftige Wasserstoffmobilität abgeleitet.

2 Erfolgsfaktoren

Brennstoffzellenfahrzeuge (engl. Fuel Cell Electric Vehicles, FCEVs) konkurrieren vor allem mit zwei Technologien um Marktanteile: batterieelektrischen Fahrzeugen (Battery Electric Vehicle, BEV) und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor (Internal Combustion Engine Vehicle, ICEV). In diesem Wettbewerb zeigen sich derzeit drei Hauptnachteile von FCEVs:

1. Eine schlechter ausgebaute Infrastruktur: Wie einleitend beschrieben und in Abschnitt 2.1 vertiefend erläutert, ist die Dichte des Wasserstoff-Tankstellennetzes in Deutschland vernachlässigbar klein gegenüber konventionellen Tankstellen und Ladesäulen für Batteriefahrzeuge.
2. Teils teurere Energiekosten: Regenerativ erzeugter Wasserstoff, der in der aktuellen Diskussion eine prominente Rolle spielt, hat Gestehungskosten, die aktuell über den Endverbrauchskosten konkurrierender Energieträger für Mobilitätsanwendungen liegen (vgl. Abschn. 2.2).
3. Deutlich teurere Fahrzeugkosten: Zurzeit ist die Auswahl und Anzahl produzierter FCEVs im Vergleich zu BEVs und vor allem ICEVs sehr gering. Dementsprechend liegen die Fahrzeugkosten von FCEVs, wie in Abschnitt 2.3 dargestellt, über denen der Alternativen.

Als aktuell am wenigsten verbreitete der drei verglichenen Technologien sind ein Entwicklungsrückstand und damit ein derzeitiger Wettbewerbsnachteil von Wasserstoffantrieben gegenüber Alternativtechnologien erwartbar. Gerade der geringe Infrastrukturausbau und die hohen Fahrzeugkosten sind bei einer am Anfang ihrer Verbreitung stehenden Technologie unvermeidbar. So betrug beispielsweise die Anzahl von Ladesäulen für Batteriefahrzeuge im

ersten Quartal 2018 nur ca. 40% der heutigen [4]. Aktuelle Wettbewerbsnachteile der FCEV sind daher nicht als grundsätzliche, technologiespezifische Nachteile zu sehen, sondern sind teils dem Entwicklungs- und Verbreitungsrückstand gegenüber ICEV und BEV geschuldet. Um diese aufzuholen und das wirtschaftliche und ökologische Potenzial der Wasserstoffmobilität zu heben, sind jedoch Hürden zu überwinden. Daher stellt die Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit von FCEVs in den drei o. g. Bereichen die Erfolgsfaktoren für die Wasserstoffmobilität in Deutschland dar.

2.1 Erfolgsfaktor 1: Infrastrukturaufbau

Für ICEVs steht bereits heute ein gut ausgebautes Tankstellennetz mit ca. 14.500 Stationen zur Verfügung [4]. Auch für BEVs steht mit 17.400 bereits eine signifikante Anzahl an öffentlich zugänglichen Ladepunkten bereit [5]. Demgegenüber existieren mit 75 Wasserstofftankstellen in Deutschland kaum Tankmöglichkeiten für FCEVs. Um auf eine konkurrenzfähige Infrastruktur zurückgreifen zu können, benötigen FCEVs also einen signifikanten Ausbau der Betankungsinfrastruktur. Einem starken Ausbau von Wasserstofftankstellen stehen aktuell jedoch die hohen Investitionen in Kombination mit der geringen Nachfrage gegenüber: So werden typische Kosten für eine Wasserstofftankstelle mit einem Zapfpunkt in [7] mit ca. 1 Million € angegeben. Diese gegenüber Lade- bzw. Tankstationen für BEV bzw. ICEV hohen Investitionskosten machen eine hohe Auslastung der Tankstellen nötig, um wettbewerbsfähig zu sein, wie Abbildung 1 zeigt. Es wird deutlich, dass bei geringer Auslastung die benötigten Preise stark ansteigen. Gegenüber einer nahezu vollen Auslastung von 90% der maximalen Abgabekapazität muss bei nur 10% Auslastung mehr als eine Verdopplung des Wasserstoffpreises erzielt werden.¹ Damit wird klar, dass gering ausgelastete Wasserstofftankstellen mit den aktuellen Preisen nicht kostendeckend betrieben werden können und bei der aktuellen Fahrzeugzahl in Deutschland kein wirtschaftlicher Anreiz zum Zubau von Tankstellen besteht.

¹ Der abgeschätzte Wasserstoffpreis bei 90% Auslastung entspricht in etwa den 9,50 €/kg, zu dem aktuell an Tankstellen von h2 mobility die Abgabe erfolgt.

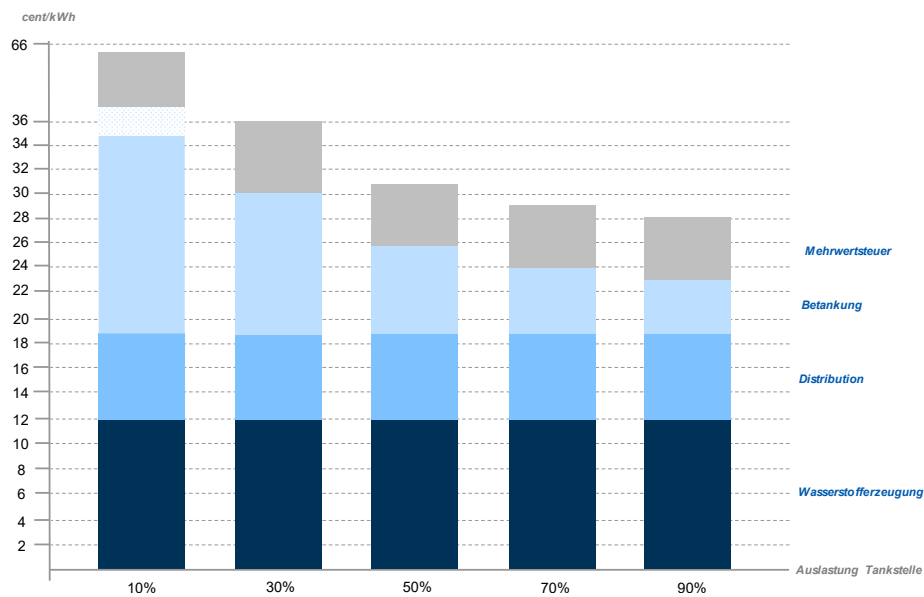


Abb. 1 Benötigte Wasserstoffpreise zur Kostendeckung für verschiedene Auslastungsgrade einer Wasserstofftankstelle [7]

Damit besteht das Dilemma, dass eine geringe Anzahl an Fahrzeugen Wasserstofftankstellen unwirtschaftlich macht und die dadurch bedingte geringe Tankstellenzahl wiederum den Zuwachs an Brennstoffzellenfahrzeugen hemmt. Dies kann aus Sicht der Autoren nur sinnvoll durch die Entwicklung integrierter Projekte durchbrochen werden. Unter einem integrierten Projekt ist die gleichzeitige Entwicklung von Infrastruktur und Abnahme zu verstehen. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Anschaffung einer FCEV-Busflotte durch ein Stadtwerk in Kombination mit der Errichtung einer Wasserstofftankstelle: Durch die gesicherte Abnahme kann eine bedarfsangepasste Betankung geplant und gebaut werden, die Wasserstoff zu wettbewerbsfähigen Preisen bereitstellen kann. Somit entsteht eine entsprechend hohe Auslastung, welche die Tankstelle wirtschaftlich attraktiv macht. Gleichzeitig kann die verbleibende Kapazität öffentlich zur Verfügung gestellt werden. Damit ist eine Infrastruktur vorhanden, die einen abnahmeseitigen Zuwachs decken kann und somit einen Anreiz zur Anschaffung weiterer FCEVs, z.B. im privaten Bereich, schafft.

Erfolgsfaktor 1 ist somit die gemeinsame Entwicklung von Betankungsinfrastruktur und Abnahme als Basis für den Infrastrukturausbau.

2.2 Erfolgsfaktor 2: Energiekosten

Neben der Verfügbarkeit der Betankung spielen auch die Kosten der Mobilität eine zentrale Rolle, da Nutzer auch für neue Technologien nur eine begrenzte Mehrkostenbereitschaft zeigen, wie in [8] für BEV diskutiert wird. Zusammen mit den in Abschnitt 2.3 diskutierten Fahrzeugpreisen sind hier die Kosten für den Energieträger selbst entscheidend. Um die Kosten von Wasserstoff gegenüber konkurrierenden Energieträgern einordnen zu können, sind in Abbildung 2 die Gestehungskosten von Wasserstoff im Vergleich zu den Verbraucherpreisen konkurrierender Energieträger dargestellt.² Es zeigt sich, dass die Erzeugung von Wasserstoff aus Strom durch Elektrolyse („Power-to-Gas“) Gestehungskosten in der Größenordnung der Endverbraucherpreise konkurrierender Energieträger (Strom und Benzin) hat.

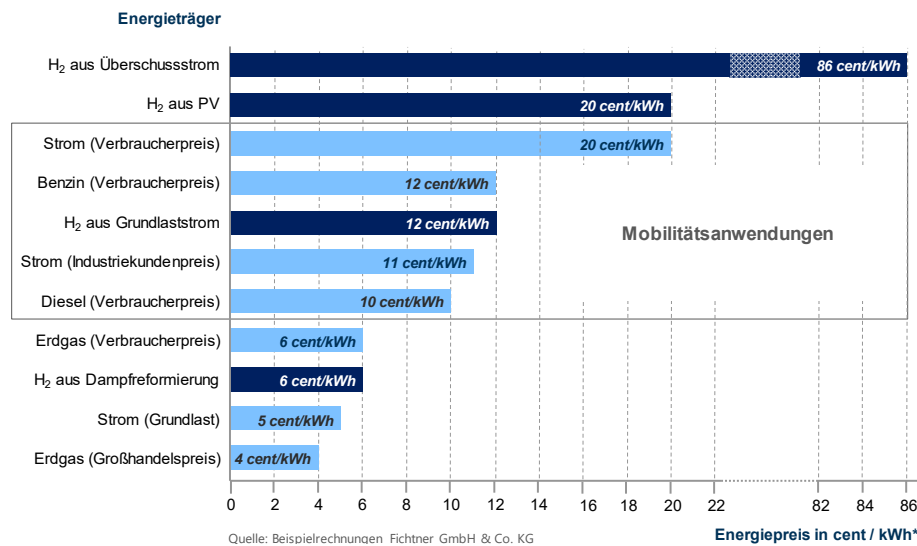


Abb. 2 Gestehungskosten von Wasserstoff im Vergleich zu Verbraucherpreisen konkurrierender Energieträger³ [7]

² An dieser Stelle ist anzumerken, dass sich das Verhältnis der Energiekosten pro 100 km aufgrund der unterschiedlichen Effizienzen der Antriebstechnologien von den Kosten der Energieträger unterscheidet.

³ ohne Umlagen auf Strom (Annahme: Nutzung selbst erzeugten Stroms) erzielbar; alle Werte exklusive Mehrwertsteuer

Unter Berücksichtigung von Distribution, Betankung und steuerlichen Aspekten sind damit deutlich höhere Verbraucherpreise als diejenigen konkurrierender Energieträger nötig, um Wasserstoff kostendeckend anbieten zu können. Wasserstoff aus Dampfreformierung von Erdgas hingegen liegt in seinen Erzeugungskosten deutlich unterhalb der Kosten für Wasserstoff aus Power-to-X sowie den Verbraucherpreisen für Mobilitätsanwendungen. Damit wird deutlich, dass Wasserstoff zumindest in einem Mix aus CO₂-neutraler und nicht CO₂-neutraler Erzeugung genutzt werden muss, um in naher Zukunft ein konkurrenzfähiges Produkt für den Mobilitätsbereich darstellen zu können. So kann in einer Hochlaufphase eine Nachfrage aufgebaut werden, die zum Teil mit kostengünstigem Wasserstoff aus Dampfreformierung bedient wird. In einem zweiten Schritt kann deren Klimabilanz sukzessive durch Hinzunahme klimaneutral erzeugten Wasserstoffs verbessert werden. Dies entspricht auch der Industriestrategie Japans, das zunächst einen Markt und eine Lieferkette aufbauen möchte und hierbei in einem ersten Schritt nicht auf CO₂-neutral hergestellten Wasserstoff setzt [9].

Erfolgsfaktor 2 ist damit die – zumindest teilweise – Nutzung von nicht regenerativ, sondern mittels Erdgas-Dampfreformierung erzeugten Wasserstoffs zur Reduktion der Verbraucherpreise in einer Anlaufphase.

2.3 Erfolgsfaktor 3: Fahrzeugkosten

Die aktuell geringe Produktionszahl von FCEVs bedeutet hohe Kosten pro Fahrzeug. In Abbildung 3 sind beispielhafte Vollkosten der Mobilität mit unterschiedlichen Technologien für PKW dargestellt. Folgendes wird deutlich: Fahrzeugkosten der FCEV entsprechen unter den getroffenen Annahmen bereits den Vollkosten von ICEV und BEV. Die Summe der übrigen Kosten (Instandhaltung, Fixkosten und Energiekosten) unterscheidet sich in weitaus geringerem Maße zwischen den drei Fahrzeugtypen. Damit wird deutlich, dass ohne eine signifikante Reduktion der Fahrzeugkosten die beiden anderen Erfolgsfaktoren die Wasserstoffmobilität – zumindest im PKW-Bereich – nicht attraktiv machen werden. Inwieweit eine Kostenreduktion auf das Niveau von BEV und ICEV möglich ist, wird sich erst bei tatsächlichem Markthochlauf für PKW auf FCEV-Basis zeigen. Studien wie [10] geben zumindest eine Indikation, dass dies möglich ist.

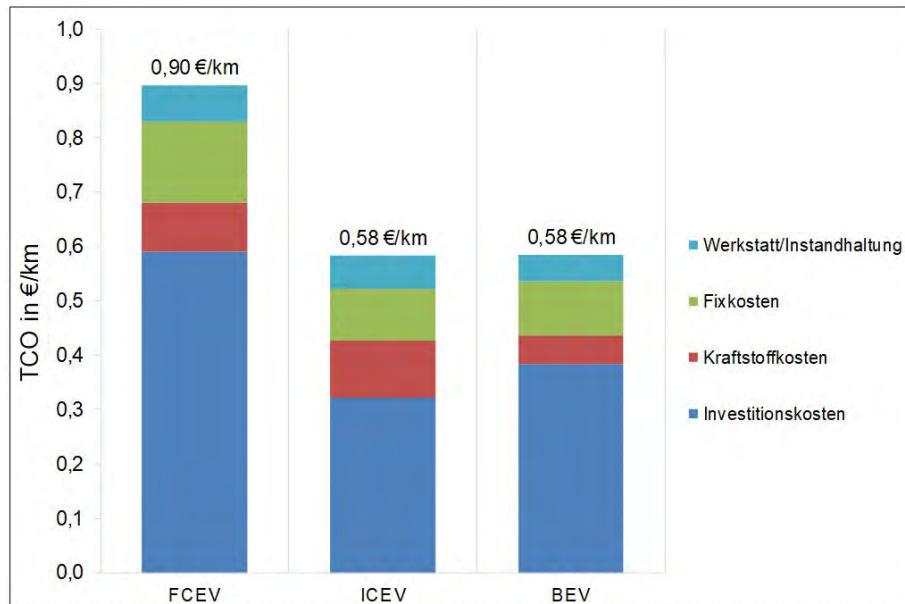


Abb. 3 Beispielhafte Vollkostenrechnungen für FCEV, BEV und ICEV [7]

In näherer Zukunft kann jedoch vor allem der Schwerlast- und Fernverkehr eine attraktive Anwendung für FCEV sein: Hohe Batteriegewichte machen hier BEVs weniger wettbewerbsfähig [3]. Somit ist dieses Segment deutlich attraktiver für die Einführung von Wasserstoff im Mobilitätssektor. Dies zeigt sich u. a. auch in den Aktivitäten der Robert Bosch GmbH, die bis 2022 PEM-Brennstoffzellen für den Schwerlastverkehr in Serie produzieren möchte. Mit durch Serienfertigung reduzierten Fertigungskosten kann sich in einem zweiten Schritt zeigen, wie weit die Brennstoffzelle in das PKW-Segment vordringen kann [11]. Diese Erkenntnis deckt sich auch mit den Ergebnissen von [12]. Darüber hinaus kann die Brennstoffzelle in diesem Segment als die Technologie mit dem geringsten CO₂-Fußabdruck gesehen werden [13]. Daher ist die Markteinführung der Brennstoffzellentechnologie in der Mobilität zunächst im Fern- und Schwerlastverkehr ein naheliegender Schritt.

Erfolgsfaktor 3 ist damit der Aufbau der Serienproduktion von FCEV-Antriebssträngen zunächst im wettbewerbsfähigeren Segment des Schwerlast- und Fernverkehrs zur Erzielung einer Kostendegression.

3 Zusammenfassung und Ergebnis

Brennstoffzellenfahrzeuge sind im Wettbewerb mit verbrennungsmotorgetriebenen und batterieelektrischen Fahrzeugen aktuell mit den typischen Nachteilen neuer Technologien konfrontiert: Eine mangelnde Infrastrukturverfügbarkeit macht sie für Anwender wenig attraktiv, was wiederum den Ausbau der Infrastruktur hemmt. Darüber hinaus sind sie aufgrund geringer Stückzahlen und dem Entwicklungsrückstand gegenüber etablierten Technologien vergleichsweise teuer in der Anschaffung. Neben diesen dem Entwicklungsstand der Technologie geschuldeten Problemen hat Wasserstoff den Nachteil eines verhältnismäßig teuren Energieträgers, im Falle der regenerativen Erzeugung für einen Beitrag zur Dekarbonisierung.

In der vorliegenden Arbeit wurden Erfolgsfaktoren in den folgenden drei Teilbereichen dargestellt, die zur Verbesserung der Wettbewerbssituation zugunsten von Wasserstoff im Mobilitätssektor notwendig sind und über dessen Verbreitung entscheiden werden:

1. Erfolgsfaktor 1 – Infrastrukturaufbau: gemeinsame Entwicklung von Betankungsinfrastruktur und Abnahme auf Projektbasis;
2. Erfolgsfaktor 2 – Energiekosten: zumindest teilweise Nutzung von nicht regenerativ, sondern mittels Erdgas-Dampfreformierung erzeugten Wasserstoffs zur Reduktion der Verbraucherpreise in einer Anlaufphase;
3. Erfolgsfaktor 3 – Fahrzeugkosten: Aufbau der Serienproduktion von Brennstoffzellen-Antriebssträngen zunächst im wettbewerbsfähigeren Segment des Schwerlast- und Fernverkehrs zur Erzielung einer Kostendegression.

Hierbei stellen der projektbasierte Infrastrukturausbau und der Aufbau einer Serienproduktion für den Schwerlast- und Fernverkehr sehr gute Ansatzmöglichkeiten für die staatliche Förderung zum Ausbau der Wasserstoffmobilität dar.

Referenzen

- [1] T. Herbert (NOW): Elektromobilität mit Wasserstoff und Brennstoffzelle in Deutschland, Vortrag 22.11.2018, Braunschweig

- [2] H2 mobility: Website h2.live. <https://h2.live/> [Abruf 09.09.2019]
- [3] G. Tjarks: Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie in Deutschland, Seminar Erneuerbare Energien, Karlsruhe, 30.05.2018
- [4] Statista, 2019
- [5] BDEW: Elektromobilität: Neue Zahlen aus dem BDEW-Ladesäulenregister, 2016, Frankfurt am Main
- [6] FVV: Renewables in Transport 2050, 08.04.2019
- [7] Fichtner, interne Research, 2019
- [8] M. Wietschel, P. Plötz, A. Kühn, T. Gnam (Fraunhofer ISI): Markthochlaufszenerarien für Elektrofahrzeuge, 2013
- [9] J. Koenen, M. Buchenau, K. Knitterscheid, M. Kölling: Alles eine Frage der Geduld. In: *Handelsblatt*, 24.06.2019
- [10] D. Kreyenberg: *Fahrzeugantriebe für die Elektromobilität – Total Cost of Ownership, Energieeffizienz, CO₂-Emissionen und Kundennutzen*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016
- [11] Robert Bosch GmbH: Bosch steigt in die Serienfertigung von Brennstoffzellen für Lkw und Pkw ein, 29.04.2019
- [12] International Energy Agency: The future of hydrogen – seizing opportunities today, 2019
- [13] McKinsey & Co.: A portfolio of power-trains for Europe, 2011

Die Zukunft der Automobil-Antriebe ist nicht nur elektrisch

**Die speichergespeiste Wärmekraftmaschine
„Thermo-Hybrid Heat Engine Carnot 2.0“
als eine mögliche Alternative**

Martin Doster

DEKRA SE, Handwerkstr. 15, 70565 Stuttgart

martin.doster@dekra.com

Bis vor wenigen Jahren wurden fast alle Kraftfahrzeuge von Hubkolbenmotoren angetrieben. Das Prinzip hat sich seit 140 Jahren nicht wesentlich verändert: In jedem Kolben-Zylinder findet die Verdichtung, die Verbrennung und die Krafterzeugung statt. Wegen der verschärften Klima- und Umweltgesetze mussten zur Wirkungsgrad-Steigerung Druck und Temperatur im Verbrennungstakt drastisch erhöht werden. Hohe Verbrennungs-Temperaturen und hoher Druck von ca. 1000 °C und 100 bar sind jedoch die Ursachen für eine erhöhte NO_x- und Feinstaub-Belastung. Mit immer komplexeren Abgasreinigungs- und Filtersystemen versuchte man, die NO_x- und Feinstaubgrenzwerte einzuhalten. Auf dem Hintergrund der sich verschärfenden Klima- und Immissionsgrenzwerte haben fast alle Automobil-Konzerne die Weiterentwicklung von Verbrennungsmotoren eingestellt und setzen auf Elektromobilität. Spätestens seit der von der EU beschlossenen CO₂-Reduktion für Nutzfahrzeuge (30% bis 2030!) wird auch die Weiterentwicklung der leistungsstarken Dieselantriebe ein hohes Risiko.

Aus Sicht der Thermodynamik ist ein Wärmekraft-Prozess mit deutlich niedrigeren Verbrennungstemperaturen mit vergleichbarem Wirkungsgrad und verbessertem Teillastverhalten machbar. Ein solcher Weg wurde bis 1925 mit dem Steam-Car-Konzept verfolgt. Das Kolben-Zylindersystem diente nur zur Krafterzeugung. Die Verbrennung und die Wärmezuführung fanden außerhalb des Arbeits-Zylinders statt. Diese in den 20er-Jahren ausgereifte Technologie spielt eine wichtige

Rolle in dem vorliegenden Konzept: Mit einer Kombination aus Clausius-Rankine-Dampfkraft-, Otto-/Diesel- und Gasturbinen-Prozess kann eine „Carnotisierung“ des Verbrennungs-Kraft-Prozesses erreicht werden: die speichergespeiste Wärmekraftmaschine „Thermo-Hybrid Heat Engine Carnot 2.0“ – betankt mit kurzkettingen Kohlenwasserstoffen, z. B. mit Methanol aus erneuerbarer Quelle, mit klima- und umweltneutralen Eigenschaften.

1 Einleitung

Die umwelt- und klimapolitischen Vorgaben der EU-Verordnungen zur Verminderung der CO₂-Emissionen auf 95 g / 63 g CO₂/km (2020/2023) und der EU-Richtlinie zur Luftqualität aus dem Jahr 2008 zur Verminderung von NO_x- und Feinstaubgrenzwerten richten an die Automotives sehr hohe Anforderungen. Die politisch-ideologisch geprägten Vorgaben der Umwelt- und Klimapolitik geben der Elektromobilisierung eindeutige Präferenzen und folgen damit einem global-wirtschaftlichen Trend. Mit den wirtschaftspolitischen Rahmenbedingungen zur Förderung der E-Mobilisierung positionieren sich die Automotives nach diesem Trend.

Die Automotives sind gezwungen, der klimapolitischen Herausforderung mit einem nie da gewesenen Aufwand zu begegnen. Auf wissenschaftlich-technischer Ebene, in der Industrie und in der Wirtschaft wird jedoch kaum angezweifelt, dass der Verbrenner zum Antrieb leistungsstarker PKWs, von Nutzfahrzeugen und Arbeitsmaschinen noch viele Jahrzehnte benötigt wird. Immer seltener positionieren sich die Automobil-Hersteller dazu öffentlich.

Aus Sicht der Wissenschaft und Forschung gibt es noch erhebliche Potenziale bei den Antriebskonzepten. Auch die Wärmekraftmaschine hat noch ein Zukunftspotenzial. Leider ist die Forderung der Automobil-Hersteller und Verbände nach Technologie-Offenheit in letzter Zeit verhaltener geworden.

Der vorliegende Beitrag soll als Anregung an die Politik, Industrie, Wirtschaft und Wissenschaft verstanden werden und soll aufzeigen, dass das Nutzenpotenzial von „Kraft aus Wärme“ – auch bei den sehr hohen Umwelt-Auflagen – noch lange nicht ausgeschöpft ist.

2 Wärmekraftmaschinen gestern und heute

2.1 Historischer Rückblick zur Entwicklung des Wärmekraftprozesses

2.1.1 Das Gedanken-Experiment von Carnot

Das Gedanken-Experiment von Carnot (1824) eines reibungsfreien Gas-Kompressionskolbens war bei der Entwicklung der Verbrennungsmotoren Ende des 19. Jahrhunderts von richtungsgebender Bedeutung:

Drei der von Carnot definierten vier Teilsysteme,

1. die isentrope Kompression,
2. die isotherme Wärme-Zufuhr und
3. die isentrope Expansion mit abgeführter Nutzarbeit

wurden in *einem* Hubkolben-Zylinder realisiert.

Die Konzepte von Reitmann/Otto, Clerk und Diesel lösten die Wärmezufuhr (2) durch Verbrennung von Kohlenwasserstoffen in unterschiedlicher Weise.

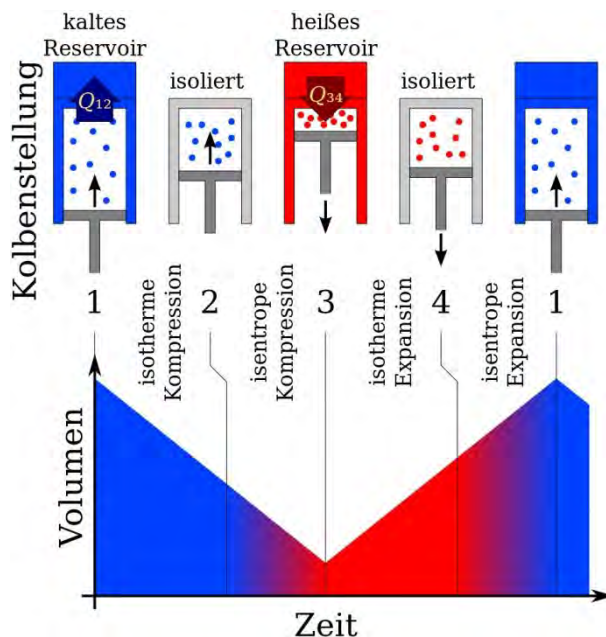


Abb. 1 Carnot'sches Gedankenmodell mit Gas-Kompressionskolben

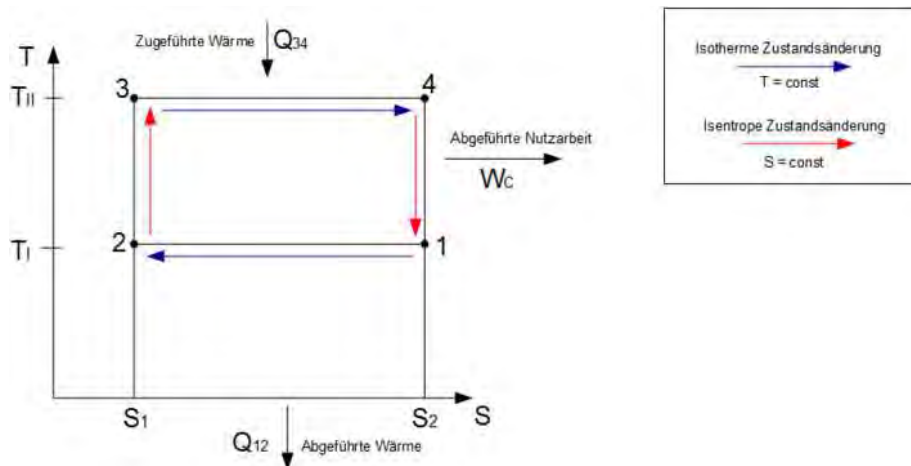


Abb. 2 Carnot'scher Ideal-Prozess auf T-S-Ebene (Temperatur-Entropie)

2.1.2 Der Entwicklungsweg der Verbrennungs-Kraftmaschine

Einen Hubkolben-Zylinder und die Antriebskinetik mit der dafür notwendigen Präzision zu bauen, war im 19. Jahrhundert mit einem hohen Aufwand verbunden.

In dem *einen* Hubkolben-Zylinder fand der Ladewechsel, die Verdichtung, die Verbrennung und die Expansion statt. Mit wachsendem Leistungsbedarf wurden die Hubkolben-Zylinder in bis zu zwölf parallel eingebundene Mehrzylinder-Blöcken gepackt.

Auch nach 140 Jahren hat man das Prinzip mit einer in jedem Zylinder stattfindenden Verdichtung und Verbrennung beibehalten.

2.1.3 Wärmekraftmaschinen im 19. Jahrhundert bis heute

Nachfolgend eine kurze Aufzählung verschiedener Wärmekraft-Antriebe im historischen Rückblick:

- Stirling-Motor als ein geschlossener Kreisprozess (1816)
- Clausius-Rankine-Dampfkraftprozess (1865)
- Reitmann/Otto-Gasmotor (1893)
- Dampfmaschinen-Antrieb für Fahrzeuge Stanley & Doble (ab 1900 bis 1925)
- Gasturbine (1935)
- Wankelmotor (1960).

2.2 Wo stehen wir heute bei der Motoren-Entwicklung?

Beobachtet aus dem Blickwinkel der ersten drei von Carnot definierten vier Teilsysteme, haben die motortechnischen Aggregate eine beachtliche Komplexität erreicht. Das vierte Carnot'sche Teilsystem, die isotherme Verdichtung, ist beim offenen Verbrennungskraftprozess ohne Relevanz. Das entspannte Abgas gelangt in die Umgebungs-Atmosphäre und wird nicht isotherm verdichtet.

Wesentliche Funktions- oder Prozessteile wurden aus dem Hubkolben-Zylinder-Aggregat ausgelagert. Auch der elektronische Aufwand zur Steuerung und Regelung durch das Motormanagement stieg entsprechend.

Bezogen auf die von Carnot definierten Teilsysteme 1, 2 und 3 können die von außen unterstützenden Teilaggregate wie folgt eingeordnet werden:

2.2.1 *Aggregate in Bezug zum Teilsystem „isentropie Verdichtung“*

Die Luft-Verdichtung findet nicht nur im Kolben-Zylinder-System statt. In einem vorgeschalteten Kompressor oder einem Turbolader wird die Ladeluft vorverdichtet. Mit der Ladeluftkühlung kann die molare Masse der Verbrennungsluft im Zylinder zusätzlich erhöht werden.

2.2.2 *Verbrennung in Bezug zu Teilsystem „isotherme Wärmezufuhr“*

Im realen Kreisprozess eines Otto-Motors finden die Verbrennung und die Wärmezufuhr mit einer isobaren Zustandsänderung statt. Die Temperatur steigt in einem kurzen Zeitintervall in der Spitze bis zu 1000 °C an, mit einem Druck bis 100 bar. Insbesondere bei aufgeladenen Motoren entstehen in einem Zeitintervall von Millisekunden CO-, NO_x- und Feinstaubanteile. Mit nachgelagerten Abgasreinigungssystemen, der Abgasrückführung und Rußfiltern müssen die Verbrennungsgase gereinigt werden, um die strengen Abgas-Grenzwerte einzuhalten. Auf dem T-S-Diagramm fällt eine progressiv ansteigende Temperaturspitze auf.

2.2.3 *Krafterzeugung in Bezug zu Teilsystem „isentropie Entspannung“*

Pro Arbeitstakt kann nur die molare Masse der Verbrennungsgase aus der vorausgegangenen Verbrennung expandieren und Arbeit verrichten. Eine variable Füllung der Zylinder in Abhängigkeit von Drehzahl und gefordertem

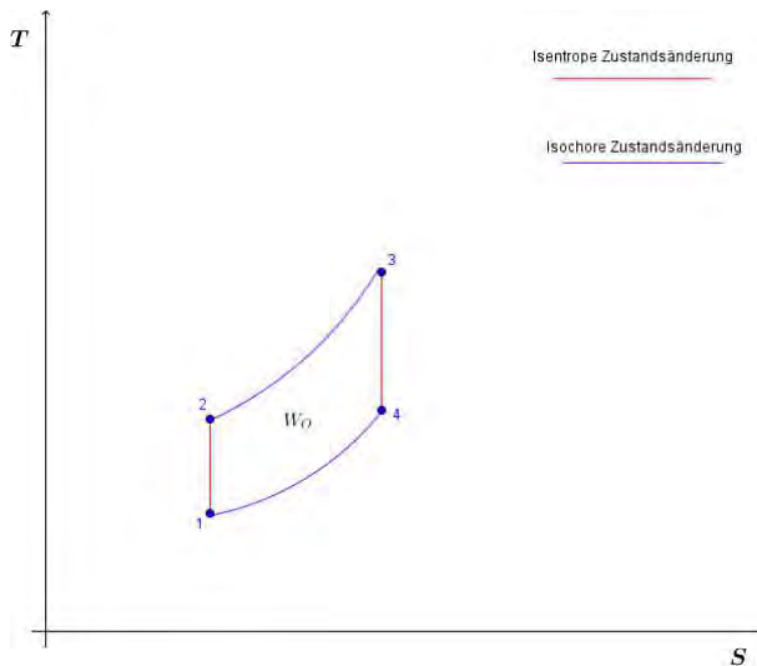


Abb. 4 T-S-Diagramm Otto-/Diesel-Prozess

- Die hohe Verbrennungstemperatur ist die Ursache für erhöhte NO_x - und Feinstaubwerte.
- Wirkungsgradsteigerung und damit verbunden geringerer CO_2 -Ausstoß sind leider nur durch eine Erhöhung der Verbrennungstemperatur (3) und durch einen nachgeschalteten Abgas-Turbolader möglich.
- Besonders bei hoher Drehzahl wird die Steuerung und Regelung der Verbrennung und der Abgasreinigung sehr aufwendig. Abschaltvorrichtungen in der Abgasreinigung, damit im Grenz- oder Hochleistungsbetrieb der Motor nicht geschädigt wird, stehen in der öffentlichen Kritik.

2.2.6 Hohe klimapolitische und technische Risiken bei der Weiterentwicklung von Verbrennern

Zum Antrieb leistungsstarker PKWs, von Nutzfahrzeugen und von Arbeitsmaschinen im Leistungsbereich von $> 150 \text{ kW}$ wird der Verbrenner noch viele Jahrzehnte dringend benötigt. Dass mit Dieseltechnologie den Heraus-

forderungen durch die von der EU beschlossene CO₂-Reduktion nur noch mit hohem Risiko begegnet kann, haben die Nutzfahrzeughersteller erkannt.

Die Entwicklung von Otto-/Diesel-Motoren nach dem 140 Jahre bewährten Prinzip der Verdichtung, Verbrennung und Krafterzeugung in demselben Kolben-Zylinder-System hat wohl ihre Grenzen erreicht. Fast alle deutschen Automobilhersteller und System-Zulieferer beschränken die Weiterentwicklung des Verbrenners auf ein Mindestmaß.

3 Die speichergespeiste thermo-hybride Wärmekraftmaschine als eine Alternative zum Antrieb von Nutzfahrzeugen

Hat der Verbrennungskraft-Motor aus thermodynamischer und technologischer Sicht noch ein Zukunftspotenzial?

Der Otto- oder Dieselmotorprozess ist wegen der isochoren Verbrennung, welche im Zeitintervall von Millisekunden stattfindet, und der hohen Temperaturspitze am Anfang des Arbeitstaktes weit von dem Carnot'schen Idealprozess entfernt. Auch die hohe Abgastemperatur weicht von dem Carnot'schen Idealmodell ab.

Anfang des letzten Jahrhunderts nutzte das Steam-Car den Clausius-Rankine-Dampfkraft-Prozess und war damit dem Carnot'schen Optimum deutlich näher. Wegen des trägen und recht komplizierten Dampfkessels wurde diese Antriebstechnologie jedoch schon Ende der 20er-Jahre aufgegeben.

Der nachfolgende Lösungsansatz zeigt auf, wie Wärmekraftmaschinen im Leistungsbereich über 100 kW gebaut werden können, die hohe Prozess-temperatur-Spitze vermieden wird und die hoch gesteckten EU-Grenzwerte trotzdem erfüllt werden können.

Die Wärmekraftmaschine hat dann noch eine Zukunft, sofern die Vorteile beider Kreisprozesse genutzt werden und eine Kombination der Technologien gefunden wird. Auch auf Aggregate des Gasturbinen-Prozesses darf zurückgegriffen werden. Zukunftsentscheidend wird sein, dass die Abgaswerte von NO_x, CO und Feinstaub drastisch reduziert werden und zugleich die CO₂-Emissionen klima-neutral geschehen.

3.1 Lösungsansatz und das Funktionsmodell

3.1.1 *Die Überdruck-Brennkammer mit isochorer Verbrennung ersetzt den Dampferzeuger*

Der Lösungsansatz geht zurück zu der 1925 aufgegebenen Steam-Car-Technologie und ersetzt zunächst den schwerfälligen Dampferzeuger durch eine Überdruck-Brennkammer. Die Verbrennung des Kraftstoffes geschieht dort isochor wie im Otto-/Dieselmotor nach dem technischen Vorbild der Gasturbinen-Brennkammer. In den letzten Jahren hat die Firma Silent Power AG in der Schweiz eine Brennkammer für Methanol im Leistungsbereich > 100 kW entwickelt, welche sie in eine kompakte Klein-Gasturbine integriert.

Würde man Wasserstoff mit reinem Sauerstoff im stöchiometrischen Verhältnis dort verbrennen, besteht das Abgas zu 100% aus unter Druck stehendem überhitztem Wasserdampf. Aus 2 Mol Wasserstoff und 1 Mol Sauerstoff würde 2 Mol H_2O , also überhitzter Wasserdampf, entstehen. Damit könnte man theoretisch gedacht den Dampferzeuger im Dampfkraftprozess ersetzen.

Für den Fall, dass die Brennkammer mit aufgeladener Luft und mit Methan (CNG) oder Methanol beschickt wird, besteht das druckführende Abgas nur zu etwa $\frac{1}{4}$ aus Wasserdampf. Über $\frac{3}{4}$ des Volumens besteht aus aufgeheiztem Stickstoff und CO_2 . Die Stöchiometrie sieht in erster Näherung wie folgt aus:

1 Mol Methanol + 2 Mol Sauerstoff + 8 Mol Stickstoff \rightarrow

ergeben als Verbrennungsprodukt:

1 Mol CO_2 + 2 Mol H_2O + 8 Mol Stickstoff

Störend für einen geschlossenen Dampfkraft-Prozess ist der hohe Anteil an Stickstoff und das CO_2 .

Mit dem unter Druck stehenden Abgas-Dampfgemisch kann ein Dampfmotor direkt angetrieben werden. Die thermodynamischen Eigenschaften des aufgeheizten Stickstoffs und von CO_2 verhalten sich im Entspannungsprozess wie der überhitzte Wasserdampf.

Mit den hohen Verbrennungstemperaturen bei über 1000 °C würde wie im Dieselmotor auch NO_x und Feinstaub entstehen. Durch Wassereinspritzung in die Brennkammer kann die Verbrennungstemperatur bei ca. 700 °C gehalten werden.

In der nicht bewegten Brennkammer kann der Verbrennungsprozess deutlich langsamer ablaufen. Mithilfe der Regelung und Steuerung wird eine

optimale Verbrennung auch im Voll- und Teillastbetrieb erreicht werden. NO_x-, CO- und Feinstaub-Reduktion (= Abgasreinigung) kann als ein integrierter Teil in der Brennkammer-Funktion ablaufen.

3.1.2 Ein Druckwasserspeicher als Energiepuffer begrenzt die maximale Temperatur und erhöht den Wasserdampfanteil

Dampfmaschinen vertragen nach dem aktuellen Stand der Technik Eintrittstemperaturen bis höchstens 300 °C bei einem Druck von 55 bar. Der Gasaustritt aus der Brennkammer wird durch den Druckwasserspeicher geführt. Die Siedelinie des Druckwassers begrenzt die maximale Eintritts-Temperatur zum Dampfmaschine. Auch erhöht sich dadurch der H₂O-Anteil im Abgas.

Das Gasvolumen in der Brennkammer und das Druckwasser- und Dampf-volumen können so ausgelegt werden, dass die Energiespeicherkapazität die Größenordnung von elektro-hybriden Antrieben mit über 20 kWh erreicht.

3.1.3 Die Thermoelektroden-Beheizung des Druckwasserspeichers begünstigt das Schnellstartverhalten

Optional kann der Druckwasserspeicher vor Fahrtbeginn mit einer Thermoelektrode auf Betriebstemperatur gebracht werden. Mit „CO₂-neutral“ erzeugtem Strom kann auf diese Weise die CO₂-Emission pro km gesenkt werden. Ähnlich wie bei „plugable Elektro-Hybrid-Fahrzeugen“ kann der Druckwasserspeicher aus „CO₂-neutraler“ elektrischer Quelle vor Fahrtbeginn mit mehr als 20 kWh Energie geladen werden. Das Fahrzeug hat dann genügend Antriebskraft, um sich zu bewegen, bevor die Verbrennungs-Energie aus der Brennkammer die Antriebsleistung erhöht.

3.1.4 Der Verbund-Dampfmaschine

Stickstoff und CO₂ verhalten sich im Expansionsprozess wie überhitzter Wasserdampf und tragen gleichermaßen zur Krafterzeugung bei. Der Verbunddampfmaschine entspannt das Dampf-Abgasgemisch in mehreren Stufen. Diese Technologie ist aktuell nur für den stationären Betrieb oder für Schiffsantriebe verfügbar. Die Integration in den Fahrzeugantrieb nach dem Vorbild des Doble-Steam-Cars muss noch geschehen. Die Steam-Cars benötigten

keine Getriebe. Auch für die Rückwärtsfahrt konnte bei Doble der Dampf-antrieb umgesteuert werden.

Eine Motor-Kühlung wie bei klassischen Verbrennungsmotoren ist nicht notwendig. Ein Dampfmotor benötigt nur einen Ölkühler.

3.1.5 Der atmosphärische Kondensator und das Kühlsystem

Aus dem Abgas-Dampfgemisch am Austritt aus dem Verbund-Dampfmotor und dem nachgeschalteten Turbolader wird der Wasserdampf-Anteil kondensiert und kann so wieder in die Druckwasserzelle eingespeist werden. Die Kühleretemperatur beträgt ca. 60 °C. Die Restwärme versorgt die Fahrzeugheizung und die Klimaanlage.

3.2 Der funktionale Aufbau der speichergespeisten thermo-hybriden Wärmekraftmaschine

3.2.1 Das Funktionsprinzip im Überblick

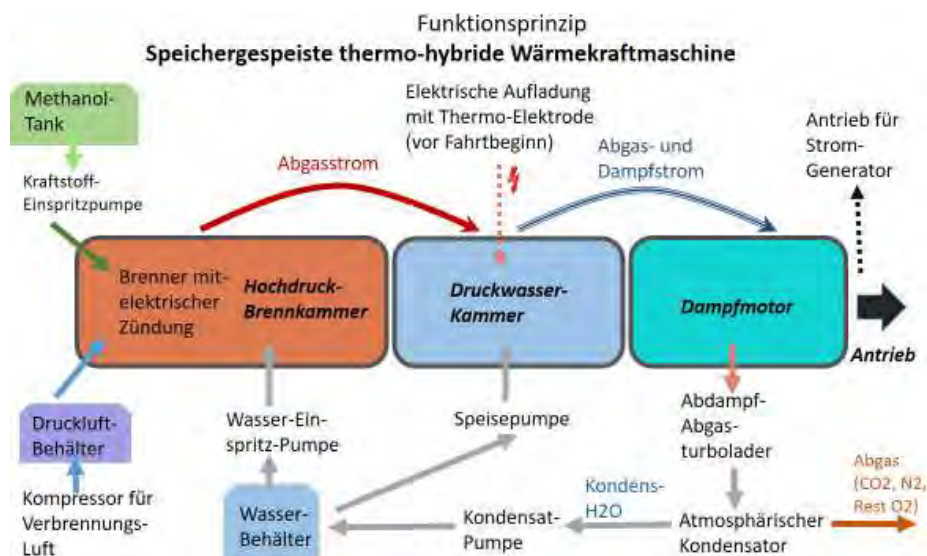


Abb. 5

Funktionsprinzip der speichergespeisten thermo-hybriden Wärmekraftmaschine

3.2.2 Die funktionale Aufbau mit den Teil-Aggregaten

- A. Die Aggregate zur Verdichtung und Druckaufbau
 - 1. Der Kompressor, für die Ladeluft, verdichtet von 3 bis 40 bar.
 - 2. Die Einspritzpumpe verdichtet den Treibstoff (das Methanol) auf bis zu 60 bar.
 - 3. Der Turbolader, angetrieben von dem Abdampf- und Abgasgemisch aus dem Verbund-Dampfmotor, verdichtet die Umgebungsluft bis 3 bar und führt die vorkomprimierte Luft dem Ladeluft-Kompressor zu.
 - 4. Die Speisepumpe bringt das Kondenswasser auf das Druckniveau der Druckwasserzelle.
- B. Die Aggregate zur Verbrennung und zum Wärmeübergang auf das Arbeitsmedium
 - 1. die Überdruck-Brennkammer nach dem Vorbild einer Klein-Gasturbine
 - 2. der Überdruck-Brenner mit der Methanol-Injektionsdüse, Ladeluft-Ventil und elektrischer Zündung
 - 3. Druckwasser-Einspritzdüse, um die Verbrennungstemperatur in der Brennkammer unter 700 °C zu halten (NO_x-Feinstaub-Vermeidung!)
- C. Das Arbeitszylinder-System (der Verbund-Dampfmotor)
 - 1. Verbund-Dampfmotor, das Dampf-Abgasgemisch wird in drei bis vier Zylindern stufenweise entspannt; Vorbild dafür ist der Dampftrieb des Doble-Steam-Cars (1925) und die Dampfmotoren-Technologie der Spilling GmbH in Hamburg.
 - 2. Einlass- und Auslasssteuerung mit Schiebertechnik
 - 3. Austritts-Druck liegt bei etwa 3 bar; treibt den Turbolader an
 - 4. Nachgeschaltet der Kondensator; optional kann das Abdampf-Abgas auch in die Umgebung ausgestoßen werden.
- D. Ein Getriebe wird nicht benötigt.
- E. Der Stromgenerator und die Stromversorgung
 - 1. Der Stromgenerator wird vom Dampfmotor direkt angetrieben und
 - 2. versorgt den Kompressor-Antrieb, die Druckwasser-Speisepumpe und die Einspritzpumpe.
- F. Die Energiespeicher-Aggregate
 - 3. Das Brenngas wird zirkulierend in den Druckwasser-Behälter eingeblasen, mit dem Sattedampf vermischt und bringt den Dampf in einen leicht überhitzten Zustand bis max. 300 °C und 50 bar.

4. Der Druckwasser-Behälter ist mit einer Elektrodenheizung verbunden. Mit „CO₂-neutraler“ elektrischer Energie kann das Druckwasser auf Betriebstemperatur von ca. 220 °C gebracht werden. Vorbild für diese Heizvorrichtung ist das elektrische Dampfkessel-Aufheizsystem der DLM Winterthur.
5. Die Ladeluft kann ebenfalls in einem Druckbehälter gespeichert werden und mit elektrischer Leistung vor Fahrtbeginn aufgeladen werden.

G. Unterstützende Aggregate

1. der Kondensator mit einer Kühlertemperatur von ca. 60–80 °C
2. Das Dampf-Abgasgemisch besteht aus 2–4 Mol Wasserdampf, 1 Mol CO₂ und bis zu 8 Mol Stickstoff. Im Vergleich zu einem Kondensator in einem geschlossenen Dampfkraft-Prozess müssen die gekühlten Kondensator-Flächen etwa dreifach größer sein.
3. Die Kühler-Abwärme kann für die Fahrzeugbeheizung genutzt werden.
4. Die Speisewasserpumpe bringt das Wasser-Kondensat auf 50 bar zur Injektion in den Druckwasserbehälter.

3.3 Beispiel-Sammlung bewährter maschinen-technischer Teilaggregate oder Technologien

3.3.1 Aus historischer Quelle: Doble-Steam-Car-Komponenten



Abb. 6 Doble Steam Car Model E (1924)

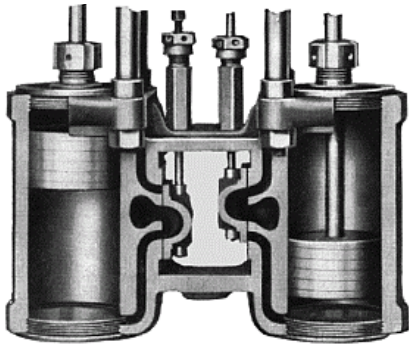


Abb. 7 Der Steam-Car-Dampfantrieb aus dem Jahr 1925

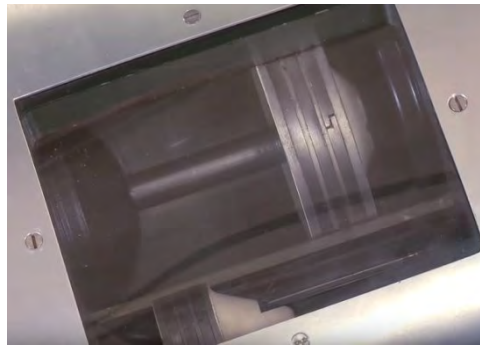


Abb. 8 Sicht auf die Arbeitszylinder des Dampfantriebes

3.3.2 Die Dampfmotoren-Technologie der Spilling GmbH Hamburg



Abb. 9 Der Spilling-Dampfmotor für den stationären Betrieb

3.3.3 Eine Klein-Gasturbine der Fa. Silent Power AG (Schweiz)



Abb. 10 Das Methanol-befeuertes Minikraftwerk der Silent Power AG (Schweiz)

Die Auslegung der Brennkammer ist optimiert für Methanol-Treibstoff. Der Entwicklungsstand der Mini-Brennkammer und die Steuerungs- und Regelungstechnik sollte im weiteren Verlauf mit einfließen.

3.3.4 *Elektrisches Vorheizgerät für Dampflokomotiven zur Druckwasseraufheizung*

Die DLM in Winterthur hat ein elektrisches Vorheizgerät für Dampfkessel entwickelt. Mit einem 400-Volt-Drehstrom-Anschluss kann Druckwasser bis 10 bar auf eine Kesseltemperatur von 180 °C aufgeladen werden. Die Technologie sollte so weiterentwickelt werden, dass Druckwasser bis auf 50 bar und 260 °C in die Druckwasserzelle geladen werden kann.

In schweren Nutz- oder Schienenfahrzeugen ist auch die Integration eines solchen elektrischen Aufheiz-Aggregates „on board“ denkbar.



Abb. 11 Elektrisches Kessel-Vorheizgerät der Firma DLM AG in Winterthur

4 Kritische Anwendungsszenarien

4.1 Gefährdung bei Außentemperaturen unter 0 °C

In allen thermodynamisch beanspruchten Aggregaten ist Wasser in flüssiger oder gasförmiger Form enthalten. Außentemperaturen unter 0 °C würden die

Aggregate beschädigen und eine Inbetriebnahme gefährden. Auch Brennstoffzellen und Li-Ionen-Batterien kennen die Frostgefährdung und müssen dagegen geschützt werden.

Bei negativen Außentemperaturen wird dem Wassertank und dem Druckwasserbehälter bis zu 15% Methanol oder Ethanol beigemischt. Im Warmbetrieb kondensiert das Methanol im Kondensator zusammen mit dem Wasser. Damit kann der Gefrierpunkt auf unter -20 °C abgesenkt und ein Einfrieren vermieden werden.

Ein kleiner Teil des Wasserumlaufes mit dem Methanol-Anteil wird zur Einspritzung in die Brennkammer verwendet. Nachdem die Antriebsaggregate bei solchen Winterbedingungen „warmgelaufen“ sind, verbrennt der Methanol-Anteil in der Brennkammer nach und nach. Der Methanol-Anteil im Kondensat wird kontinuierlich geringer und muss während der Fahrt auf Null zurückgehen.

4.2 Verfügbarkeit von Methanol, CO₂-Reduktion und Gefährdungspotenziale

4.2.1 Verfügbarkeit, Produktion und Logistik

Mit einer Jahresproduktion von über 45 Millionen Tonnen ist Methanol eine der meisthergestellten organischen Chemikalien. Es ist möglich, auf die weltweit funktionierende Logistik aufzubauen, welche heute schon die chemische Industrie versorgt. Der Großhandelspreis liegt bei ca. 30 €-Cent pro Liter.

Der größte Teil des Methanols wird durch Dampfreformierung von Erdgas, katalytisch aus Kohlen-Monoxid und Wasserstoff erzeugt. Die Verfahren zur Erzeugung von Methanol aus erneuerbarer Quelle sind so weit entwickelt, dass sie industriell produziert werden können. CO₂ aus der Luft oder aus Abgasen mit elektrolytisch gewonnenem Wasserstoff wird katalytisch aufbereitet. Etwa 50% der elektrischen Energie ist dann chemisch in Methanol gebunden. Synthetisch gewonnene synthetische Treibstoffe Octan oder Cetan liegen im Vergleich aktuell deutlich unter 20% der aufgewendeten elektrischen Energie.

4.2.2 *Methanol hat das Potenzial zur drastischen Reduktion des CO₂-Ausstoßes von Kraftfahrzeugen*

Methanol hat im Vergleich zu Dieselöl einen deutlich höheren Wasserstoffanteil. Das Atom-Verhältnis Kohlenstoff zu Wasserstoff von

- Dieselöl liegt bei 22 H zu 10 C, dezimal Faktor 2,2 zu 1,
- Methanol liegt bei 4 H zu 1 C, dezimal Faktor 4 zu 1.

Bezogen auf einen Brennwert von 1 kWh liegt

- Dieselöl bei 0,27 kg CO₂/kWh und
- Methanol bei 0,21 kg CO₂/kWh.

Dies bedeutet, dass Methanol-Antriebe ca. 28% weniger CO₂ ausstoßen.

Mit der Annahme, dass alle Nutzfahrzeuge bis 2025 mit Methanol aus fossiler Quelle angetrieben werden, würde sich der CO₂-Ausstoß um 28% verringern. Die erste Stufe der von der EU für 2025 geforderten Reduktion von 15% des CO₂-Ausstoßes für Nutzfahrzeuge wäre damit erfüllt. Mit einem geringen Anteil zusätzlich erneuerbar erzeugtem Methanol kann auch der Reduktionswert für 2030 von 30% leicht erreicht werden.

4.2.3 *Gefährdungspotenzial*

Im Vergleich zu Benzin und Diesel liegt bei Methanol im Brandfall eine erhöhte Gefährdung wegen der nicht sichtbaren Flamme vor. Deshalb muss diesem Treibstoff ein Additiv zugesetzt werden, welches die Flamme sichtbar macht.

Methanol-Dämpfe (wie auch Benzin-Dämpfe) sind giftig und sollten nicht eingeatmet werden.

5 Zusammenfassung

Sofern ein Teil der Antriebsenergie aus elektrischer Quelle versorgt werden kann und die thermische Energie durch langsame, gut steuerbare Verbrennung von kurzkettigen, CO₂-reduziert erzeugten Kohlenwasserstoffen erfolgt (sogenannte Flex-Fuels Methan, Methanol, Ethanol), sind klima- und umweltfreundliche Wärmekraft-Antriebe auch für Nutzfahrzeuge mit mehr als 150 kW Leistung und mit Motor-Drehmomenten über 800 Nm möglich.

1. Die aus dem Otto-/Diesel-Prozess bekannte isochore Verbrennung wird in einen halboffenen Clausius-Rankine-Prozess integriert. Die Verbrennung findet im Dampfmedium statt.
2. Verlagerung der Wärmezufuhr bzw. der Verbrennung außerhalb des Kolben-Zylinder-Systems in eine Hochdruck-Brennkammer mit der Möglichkeit einer deutlich besser steuerbaren Verbrennung; Druckwasser-Zelle und Hochdruck-Brennkammer haben in dem Clausius-Rankine-Prozess die Funktion des Dampferzeugers.
3. Diese Prozessvariante ermöglicht eine deutliche Carnotisierung des Verbrennungs-Kraftprozesses: Reduktion der Verbrennungstemperatur um mehrere 100 °C bei gleichem Wirkungsgrad. Eine nachgeschaltete Abgasreinigung zur NO_x-, CO- und Feinstaubreduktion wird vermieden.
4. Isentrope Verdichtung und Expansion zur Abführung der Nutzarbeit findet in getrennten Aggregaten statt. Je nach Antriebsleistung und gefordertem Drehmoment werden die Arbeitszylinder des Dampfmotors variabel gefüllt. Der Antrieb des Dampfmotors geht direkt auf den Achsantrieb. Es besteht keine zwingende Notwendigkeit für ein Schaltgetriebe.
5. Skalierbare Energiespeicherfähigkeit durch variabel große Druckwasserzellen. Sowohl die verdichteten Verbrennungsluft als auch die thermische Energie aus dem Brennraum kann zwischengespeichert werden. Optional besteht die Möglichkeit, den thermischen Energie-Speicher (Druckwasserzelle) auch aus „CO₂-neutral erzeugter“ elektrischer Quelle aufzuladen, z. B. an einer Ladesäule für Elektromobile.
6. Mit der Annahme, dass alle Nutzfahrzeuge bis 2025 mit Methanol aus fossiler Quelle angetrieben werden, würde sich der CO₂-Ausstoß um 28% verringern. Die erste Stufe der von der EU für 2025 geforderten Reduktion von 15% des CO₂-Ausstoßes für Nutzfahrzeuge wäre damit erfüllt. Mit einem geringen Anteil zusätzlich erneuerbar erzeugtem Methanol kann auch der Reduktionswert für 2030 von 30% erreicht werden.

Im Vergleich zu einem elektrisch angetriebenen Nutzfahrzeug mit seinem sehr hohen Batteriegewicht dürfte das spezifische Leistungsgewicht des vorgeschlagenen thermischen Antriebskonzeptes merklich geringer sein.

Auch im stationären Einsatz kann eine solche Wärmekraftmaschine zur Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt werden. In autarken Inselnetzen mit wind- und solargestützter Energieerzeugung kann mit dieser teillastfähigen Wärmekraftmaschine eine hohe Verfügbarkeit der Strom- und Wärmeversorgung erreicht werden.

Towards a Simple Decision Criterion

Selection of Application Server Runtime Environment Based on End-to-End Latency

*Jithin Reju*¹, *Rolf Schuster*¹, *Wolfgang Theimer*²

¹ Computer Science Department, Fachhochschule Dortmund,
Sonnenstraße 96, 44139 Dortmund

jithin.reju001@stud.fh-dortmund.de; rolf.schuster@fh-dortmund.de

² Volkswagen Infotainment GmbH, Bochum

wolfgang.theimer@volkswagen-infotainment.com

By now edge computing has become a mainstream extension of cloud computing. However, there are a number of challenges we still need to address to make it work in real-world environments. In this paper we look at the decision criteria for edge handoff, i.e. how can we decide on which edge runtime environment an edge application should run on? This decision to select the optimal compute environment is a very complex task due to numerous dependencies such as the network service quality and the performance of compute as well as storage resources. All of these parameters vary with time and are difficult to access and measure. We postulate that for a broad set of edge application categories, it is possible to use the end-to-end latency (E2EL) as a simple and efficient handoff decision criterion to meet the overall quality requirements of the edge application (e.g. user experience, application performance). We have implemented our approach with an example object tracking application running in a simple edge environment with LTE connectivity. Our experiments show that end-to-end latency does reflect all relevant edge influence factors and can be used as a simple, easy to access and efficient decision criterion for edge handoff.

1 Introduction

The drive towards IoT, making everything connected and each device communicating with each other involves lot of data transfer, computation, storage and should meet real-time requirements. The concept of edge computing is not new, it follows cyber foraging [9, 20]. In cyber foraging mobile devices are able to offload the computation to the cloud in order to save battery life. Edge computing is an expansion of cloud computing. Edge nodes are referred to as cloudlets [13, 23], fog nodes [1] or micro datacenters [20]. The major argument for moving from cloud computing towards edge computing is latency [21]. Edge computing ensures that the servers providing the computation are nearby and hence the end-to-end latency for the data being transferred is significantly reduced. Other benefits of edge computing compared to cloud computing are the reduction of the amount of data transferred to the backend cloud, better security and privacy etc. [18, 17]. Some of the use cases of edge computing include autonomous driving, augmented reality (AR), medical surgeries etc. [5, 6]. In the automotive sector, offloading the computation to the edge can contribute to reduction in cost of IT hardware in vehicles. Additionally, the edge provides better user experience owing to its low latency compared to the cloud. Investment in edge computing has increased significantly over the recent years [20]. Edge computing market is estimated to reach 3.24 billion dollars by 2025 [19]. By now there are a number of organisations shaping the global ecosystem of edge computing (e.g. the Open Edge Computing Initiative [14], Automotive Edge Computing Consortium [4]). The Linux Foundation launched the ‘LF Edge’ [7], an umbrella organization to establish an open, interoperable framework for edge computing. The ETSI MEC (Multi Access Edge Computing) is a major contributor in standardization of edge systems from a telecom industry perspective.

2 Problem, Requirements and Approach

2.1 Problem, Description

In edge computing the application server runtime environment can be local, on the edge node or in the cloud. The term ‘local’ refers to the user equipment. This user equipment could be a car, a drone, or a head mounted display etc. Edge computing requires dynamic switching of compute runtimes between these environments based on the available resources in the overall system. This so called handoff between different compute environments needs to consider the available resources (compute, network and storage) and decide where to run the application. The handoff between edge nodes is also required if the user is moving from one edge node to another edge node. Switching of the application runtime environment during run time can have an impact on the user experience and application performance. Similarly in applications where the user is not involved and machine to machine interaction takes place, the performance or quality criteria are also affected. It is the target of the edge application developer to minimize this impact. The key question is how we can provide a simple approach to control the edge system handoff and at the same time optimize the user experience or the quality criteria defined for the application.

During recent years quite a lot of research has been done on edge computing and handoff. The details regarding emergence of edge computing is described in [20]. The authors of [15, 24, 16] describe strategies for service handoff between edge nodes. There are research publications that focus on adaptively changing the compression level of raw data sent to the edge nodes based on the network throughput levels during handoff between edge nodes [8, 11]. The approach discussed in this paper is also an adaptive approach. However, we focus on the switching decisions between local and remote compute. The publication [10] discusses the Gabriel architecture that could be used for the edge infrastructure. Some interesting edge applications in case of automotive are described in [12, 22]. In this, the authors describe how the edge is used to gather information regarding the potholes on roads, moving objects etc. from the vehicles via 4G LTE connectivity. The authors of the ETSI standard [3, 2] specify a network API to retrieve information about the current network service quality. For an application developer without network know-how this is complex to understand. Furthermore, in real-world

deployments in live networks it is challenging to provide distributed access to the network layer. Therefore, in this paper we explore simple and efficient handoff decision criteria's suitable for real-world edge deployments.

2.2 Our Approach

In general edge applications are different, they have different rate of change and different response times based on the quality of user experience required. The idea we discuss is a general approach that is applicable for all edge domains where the computation resources available locally are limited. The approach is applicable to a broad set of applications including automotive, drones and cognitive applications. Computing on an edge node is typically superior to local computation due to more performance hardware resources at the edge and limited local computation resources. We postulate that for a broad set of application categories, it is possible to use end-to-end latency (E2EL) as the handoff criteria to choose the most efficient computation environment. The E2EL is the duration, from when the local device sends a request (raw sensor data) to the edge to when it receives the computed results from the edge. E2EL includes all elements of latency including the network latency and the compute time on the edge. Some of the contributions in E2EL from the network side are described in [13]. We explore the relation between E2EL and throughput of the network. In doing so we prove that throughput is not required for the application to make handoff decision as this information is reflected in the E2EL. The E2EL is a single parameter that is easy to determine and utilize for the application developer. First, a static approach is discussed where we use a static latency threshold to make handoff decisions. Second, for some application categories it is possible to use an adaptive threshold for the handoff decision. Here, the dynamics of the application are measured in the runtime, based on which the latency parameter is adaptively changed to choose the computation environment. Slow changes in the application lead to high latency thresholds, whereas fast changes in the application lead to lower latency thresholds. In doing so, we protect the user experience and ensure the quality criteria defined for the application.

3 Edge Architecture

A distributed application or service can be described with three modules Figure 1:

- The application client acts as a front-end, reading sensor information and providing actuator output. A human-machine interface can e.g. be considered as an application client. The user equipment is the computation device available locally. The application client runs on this user equipment.
- The application server is a computing module to process input data (from sensors) and returns the output (for the actuators).
- The application manager is an entity, which decides where the application server will run based on rules outlined below.

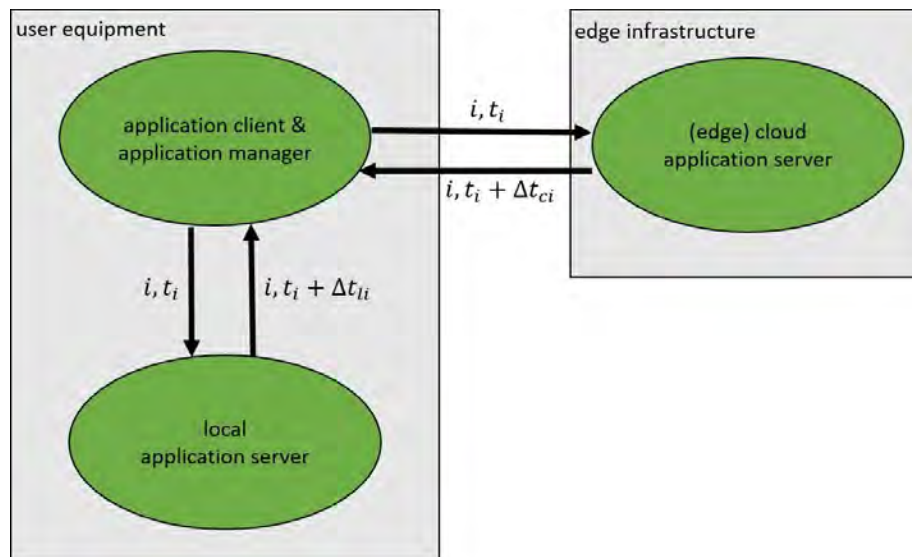


Fig. 1

Partitioning of distributed application between different runtime environments

The application server can of course run locally as well where the application client is located. It can also be moved to an edge cloud server or to a larger datacenter in the cloud. Figure 1 shows the communication between an application client and manager and the application server that can run locally or in the cloud.

The raw data entities sent from application client to an application server are numbered sequentially with an index i . This index is sent to the application server together with the actual input information and is also added to the response of the application server. This mechanism ensures that the application client can compare response times from various application servers, for the same input. The application client can measure and compare the response times of a local app server ($t_i + \Delta t_{li}$) and a remote application server in the (edge) cloud ($t_i + \Delta t_{ci}$). Each application has a specific deadline Δt_{max} indicating when a computation on the application server needs to be finished. Latency higher than Δt_{max} results in unacceptable user experience or application performance. In the following, we do not distinguish between edge and cloud, the concept outlined below is applicable for multiple remote runtime environments i.e. edge and cloud.

4 Static Decision Threshold for Application Server Runtime Environment

In Figure 2 the end-to-end latency (E2EL) for a computing task with index number i from the local runtime Δt_{li} or the (edge) cloud runtime Δt_{ci} are compared to the deadline Δt_{max} . The E2EL contains all sources of latency including the communication delay and the computation time on the application server. If both response times are below the deadline, the application manager is free to select both runtime environments. It might favor one or the other due to some constraints (e.g. using cloud whenever possible). In Figure 2, remote computing is favored if the remote response time is not more than Δt longer than the local response time. Clearly, local computing is the only viable choice if the remote response time exceeds the deadline Δt_{max} . Similarly, only remote computing is possible if the local response time is longer than Δt_{max} . If both times are longer than Δt_{max} , no acceptable response is possible. The idea is to use this value of Δt_{max} and compare with the E2EL in the runtime. Based on this, a decision to use the edge is made. If the E2EL of the edge is less than Δt_{max} the edge is favored over local computation. The methodology to calculate the static value of Δt_{max} is discussed below. We propose two techniques. The first method can be used in case a real-world edge environment is available to the developer. Once the edge application is

developed, the edge application is run on this edge infrastructure two times for a defined sequence of input data. In the first run, the application computation is done on the user equipment completely and the edge is not used. In the second run, the application computation is done on the edge completely and the user equipment computation is not used.

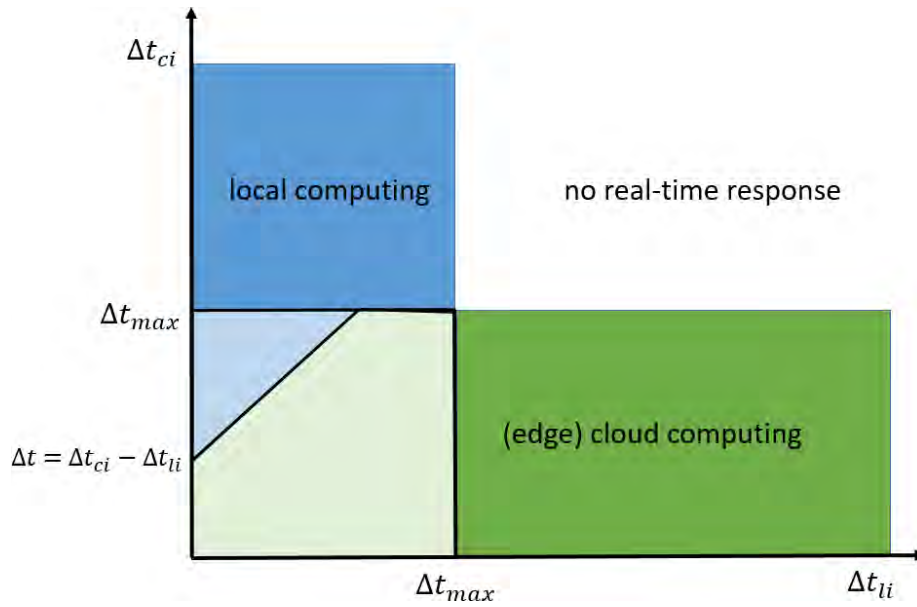


Fig. 2

Decision boundaries for scheduling computing tasks locally or in the (edge) cloud

The same sequence of input data is used in both runs. The E2EL of each raw data entity for the defined sequence is averaged over the total raw messages in the sequence for both runs. This value is then defined as the static Δt_{max} . The equation is shown below:

$$\Delta t_{max} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N (\Delta t_{ci} + \Delta t_{li}) \quad (1)$$

where N is the number of raw data messages sent to the application server in the sequence. The above method is a safe approach to derive the static value as it is based on the actual E2EL values recorded from the real-world edge infrastructure. However, this method may not prove feasible if the developer does not have access to the edge infrastructure. This value of E2EL also depends on the hardware specifications of the edge and the computation load

from other applications on the edge as well as the typical network load. The measured E2EL might also vary if the same application is running on different machines with different compute power. Hence, we propose the second method, which is based on the dynamics of the underlying process. Without restricting the applicability one or several key application parameters are described as a function of time $f(t)$. The faster this signal $f(t)$ changes, the shorter is the tolerable E2EL for keeping track in real-time. Any computation requires at least a minimum E2EL for its completion. So the computed response will most likely always deviate from the actual signal. The application developer has to specify a maximum tolerable deviation Δf_{max} , which determines the tolerable E2EL of Δt_{max} . A static value of Δt_{max} is calculated as shown in following equation:

$$\Delta t_{max} = \frac{k}{|\dot{f}_{mean}|} \quad (2)$$

k is a constant and it is the maximum allowed deviation of the application compared to the baseline specified by the developer. The application computes a function $f(t)$ whose dynamics can be estimated by its derivative $\dot{f}(t)$. \dot{f}_{mean} is the mean of rate of change of the application function. The baseline is the output sequence the application should provide for the provided input message sequence in an ideal scenario (no network latency, compute delays etc.). In this approach \dot{f}_{mean} is not allowed to become zero, e.g by replacing this value with a small positive value.

This second approach is well suited for a developer who does not have access to the real world edge infrastructure to determine the actual latencies.

5 Adaptive Approach

For some applications the maximum allowed response time Δt_{max} is known and can be static, but in many cases it is not known or it varies as a function of time. In these cases, an automatic adaptation of the decision threshold Δt_{max} is required. To illustrate the problem, consider that the task for the application server is the computation of a function $f(t)$ whose dynamics can be estimated by its derivative $\dot{f}(t)$. If the function is slowly varying (i.e. the first derivative is close to zero), even a slow application server response is

sufficient to follow the function $f(t)$ within a certain error bound. The application developer must define a tolerable deviation Δf_{max} , which should not be exceeded when the application server introduces a E2E delay. The relationship between the maximum allowed change and the corresponding maximum allowed response time is given by the following equation:

$$\Delta f_{max} = |\dot{f}_{mean}| \Delta t_{max} \quad (3)$$

where strictly speaking \dot{f}_{max} is the maximum value of $\dot{f}(t)$ in the interval of length Δt_{max} between request and response, as you can see drawn in dotted lines from Figure 3. Taking the maximum rate of change \dot{f}_{max} ensures that the response time is always below the acceptable limit. Practically speaking \dot{f}_{mean} can be approximated by measurements from a longer interval and be adaptable using a moving average approach.

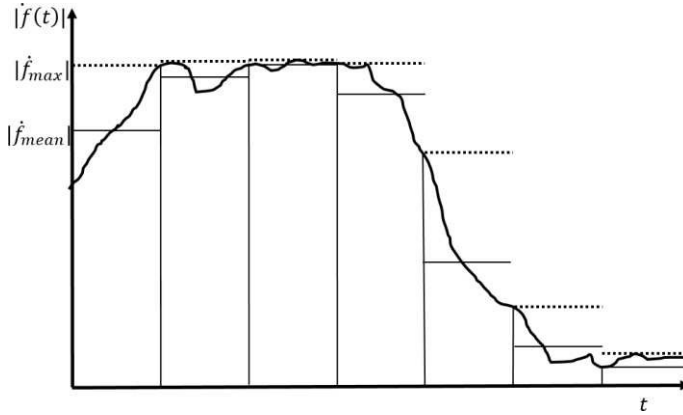


Fig. 3

Approximation of signal dynamics during response time from application server

The adaptive threshold $\Delta t_{max}(t)$ can be computed as:

$$\Delta t_{max}(t) = \frac{\Delta f_{max}}{|\dot{f}_{mean}(t)|} \quad (4)$$

The small rate of change $\dot{f}_{mean}(t)$ determines a maximum allowed response time. The value of $\Delta t_{max}(t)$ will be capped at a maximum value based on a minimum value allowed for \dot{f}_{mean} . Figure 4 shows the plot between $\Delta t_{max}(t)$ and $\dot{f}_{mean}(t)$, this is not a pure hyperbola as per the above equation because the $\Delta t_{max}(t)$ is capped based on a minimum \dot{f}_{mean} allowed. It should be noted that the only parameter the developer set in the adaptive approach is Δf_{max} . All other parameters are either measured from the application in runtime or derived from Δf_{max} .

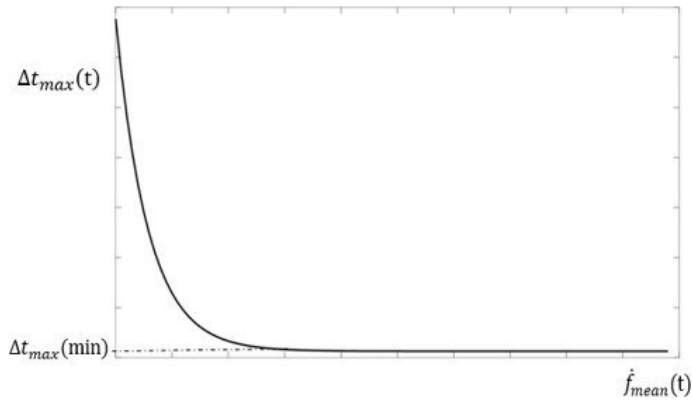


Fig. 4 Relation between \dot{f}_{mean} and Δt_{max}

A practical example of a function $f(t)$ (which can not only be a scalar function, but also a vector function) is tracking vehicular objects in a driver assistance system. For tracking a maximum tolerable spacial distance between real object and tracking estimate can be specified (Δf_{max}). This maximum deviation is then converted into a maximum tolerable E2EL (Δt_{max}) of the tracking module to keep the maximum error within the allowed bounds. An overall quality measure for the application performance (e.g. how well we are able to track the object in the previous example) can be created by mapping the actual E2EL from the selected runtime environment (vehicle, edge, cloud) to a quality value between 0% and 100%, as can be seen in Figure 5.

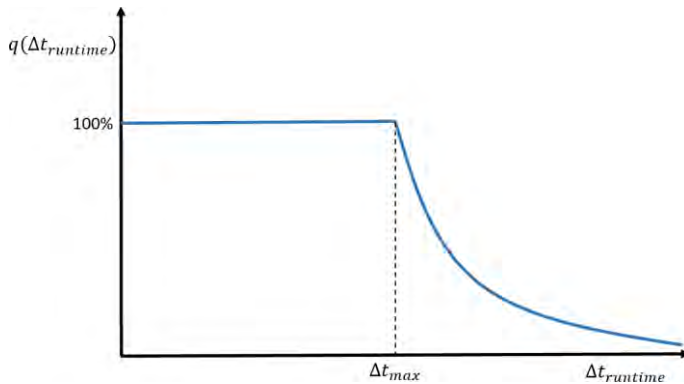


Fig. 5 Mapping of response time to application performance

The performance quality for a window of $N + 1$ measurements ranging from time $t_{(n-N)}$ to the current time t_n can be computed as an average over all individual measurements:

$$Q(t_n) = \frac{1}{N+1} \sum_{i=n-N}^n q(\Delta t_{runtime}(t_i)) \quad (5)$$

6 Implementation of the Approach

The effectiveness of this approach is evaluated for an object tracking application shown in Figure 6. This application identifies the position of a red object in the camera frames. The application additionally identifies the center of the object and draws a line of its trajectory. From now, term local and user equipment will be referred as the car. The processing of the frames is carried out at the car or the remote application server (e.g. edge node). Based on the E2EL of the computation, the best application server for processing is selected by the application manager.

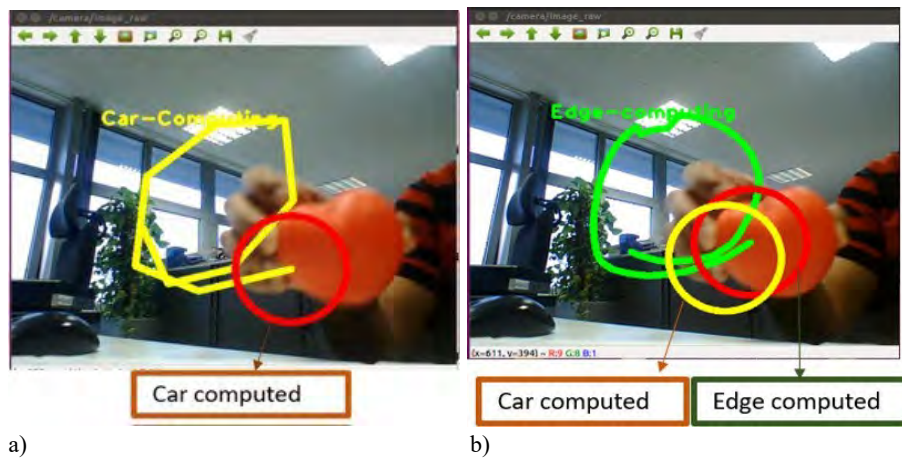


Fig. 6 Object tracking application showing the detection of the object at runtime along with its trajectory

Figure 6 shows the results of the application when computed on the edge infrastructure and when computed on the car. Figure 6(a) shows the results computed on the car. The yellow line shows the trajectory of the object and

the red circle shows the latest detected position of the object. Figure 6(b) shows the results computed on the edge infrastructure. The green line shows the trajectory of the object and the red circle shows the latest detected position of the object by the edge. The yellow circle in Figure 6(b) shows the latest detected position of the object by the car. This is to show the difference between the computed results from the car and the edge infrastructure at the same point of time.

The target of a vehicle manufacturer is to reduce the cost of the vehicle in all ways possible. This can also mean reduction of compute resources in the car. Therefore, in order to show a realistic scenario and to emulate an actual car-edge scenario, the car is configured to compute every 7th frame to emulate limited computing resources available locally whereas the edge computes every frame. This makes the deviation higher in case of the car computation when compared to the edge computation. This is also seen in Figure 6, when the car computes, the trajectory is less smooth and the object detection lags w.r.t. actual object position compared to results of edge computation.

The coordinates of the objects trajectory are stored in an array in the form $\mathbf{x}(t_1), \mathbf{x}(t_2), \mathbf{x}(t_3) \dots \mathbf{x}(t_n)$.

The function $f(t_n) = \|\mathbf{x}(t_n) - \mathbf{x}(t_{n-1})\|$ describes the motion of the object. $\dot{f}(t_n)$ in this case is the rate of change of the object position.

$$\dot{f}(t_n) = \frac{\|\mathbf{x}(t_n) - \mathbf{x}(t_{n-1})\|}{t_n - t_{n-1}} \quad (6)$$

If the object moves fast, the distance between the object position in two consecutive frames is high which implies a high $\dot{f}(t_n)$. If the object moves slowly, the distance between the object positions in two consecutive frames is low which implies low $\dot{f}(t_n)$.

The value f (Figure 7) represents the distance between the object center points of two consecutive message frames. The distance values starting from f_a until f_b within a time window is averaged and a mean value \dot{f}_{mean} at time t_b is determined. Thereby, \dot{f}_{mean} as a function of time is determined. \dot{f}_{mean} also depends on the size of the window used. As the window size increases the decision of the choosing the computing environment would be slower. Hence, an appropriate value should be selected.

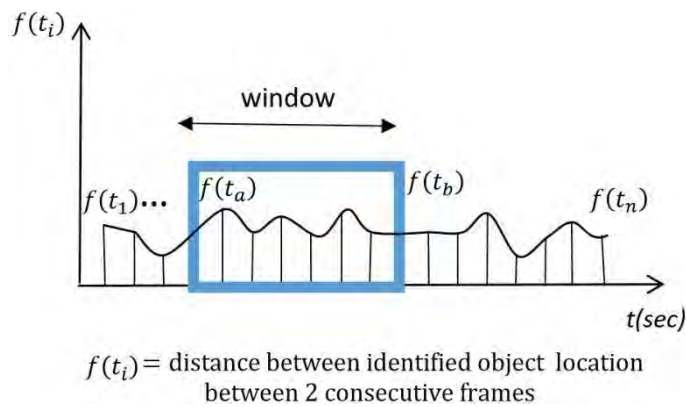


Fig. 7 Window method showing concept of adaptive value average calculation

The key message is to use E2EL as a single parameter in order to make switching decisions between edge and car. Therefore, we have to show that other influence factors like network service quality (e.g. network throughput) or available compute power on the edge are included in the E2EL. For that the experimental setup shown in Figure 8 is used. The experiment uses a Software Defined Radio (SDR) setup. The SDR is the USRP B210 by Ettus Research™. A srsLTE stack is used to simulate the LTE network. The srsUE on the car is connected to the srseNB (base station) via a LTE connection. The edge server is connected to the eNB PC via an Ethernet interface. The LTE network throughput is changed using a channel attenuator. As the channel attenuation is increased the throughput is reduced. The qualitative plot between the E2EL of the application and the throughput of the uplink is shown in Figure 9. For values of throughput > 13 Mbps or < 9 Mbps, the E2EL is high with large variance. There is an optimal range of throughput where the E2EL is low. It is very clear from Figure 9 that the variation of latency is not proportional to the throughput. Therefore the developer cannot set a threshold value for the throughput and use this to make a decision for the application handoff. However, the E2EL latency would reflect these effects coming from throughput. Hence, using the E2EL for making handoff decisions is a better method than using the throughput value. Other influence factors like the processor load, network etc. are also reflected in the end-to-end latency. Delays from codecs, hardware accelerators are also hard to measure and interpret, these effects are all reflected in the E2EL.

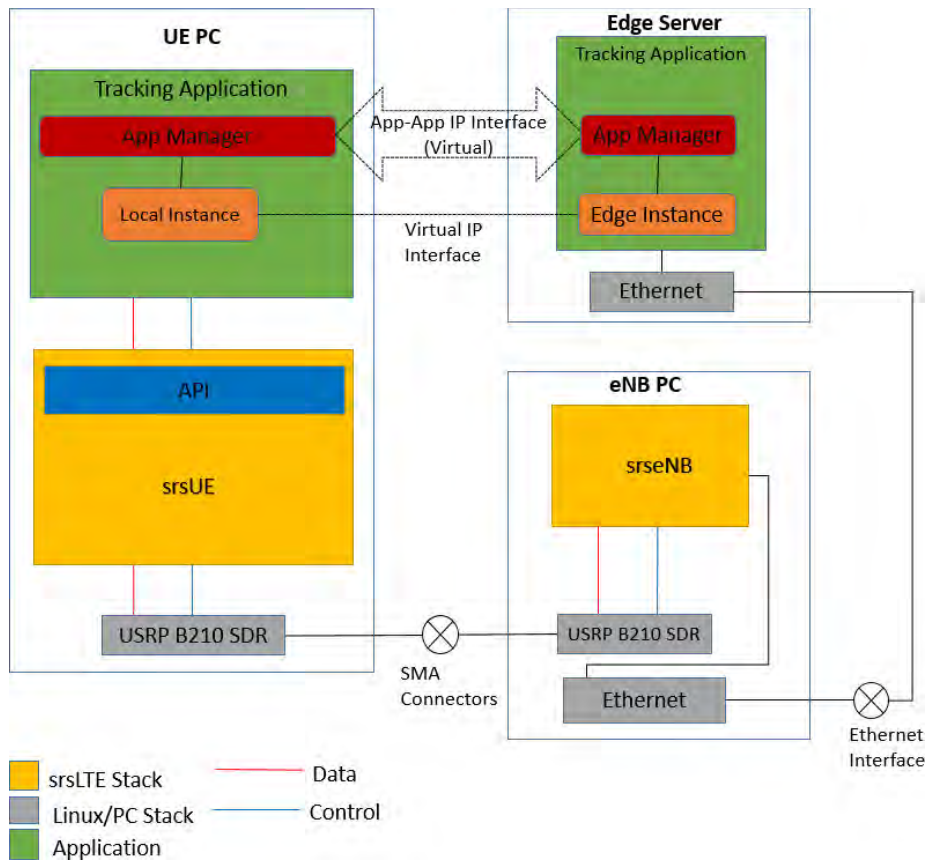


Fig. 8 Experimental setup with a software-defined radio

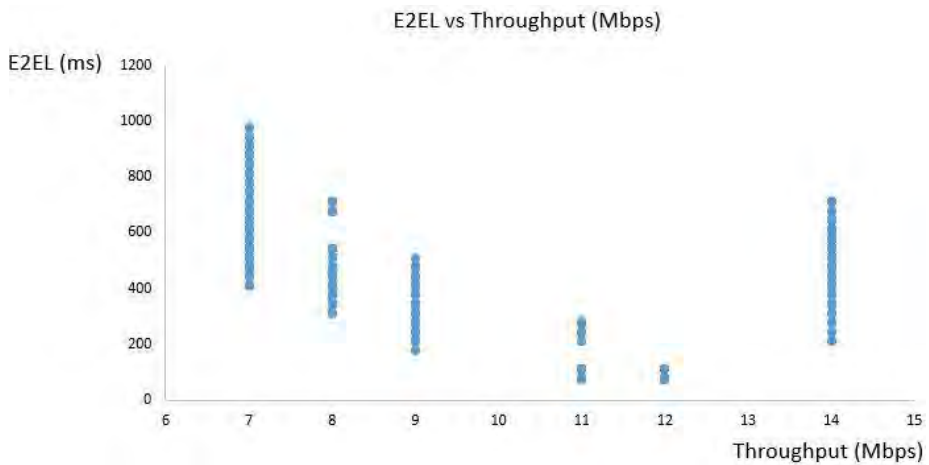


Fig. 9 Relation between uplink throughput and E2EL

The calculation steps in order to derive the Δt_{max} in case of adaptive approach are as follows:

1. The window average is calculated using the window method, the window size (M) is set to 16 frames

$$\text{Window average: } (\bar{f}) = \frac{1}{M} \sum_{i=n-M+1}^n f(t_i)$$

2. $\dot{f}_{mean} = \frac{\bar{f}}{dt}$

the raw messages are published at 30 Hz and hence $dt = 33$ ms. 30 Hz is usually used in car HMI as update frequency.

3. Different values of Δf_{max} are selected for evaluation. The selected values are 10, 15, 20, 30, 40 pixels.

4. $\Delta t_{max}(t) = \frac{\Delta f_{max}}{|\dot{f}_{mean}(t)|}$

The experimental setup shown in Figure 8 is a good choice for simulating an actual LTE network. In the next section we discuss the experimental results. For measuring the results two PCs connected over Ethernet are used.

7 Experimental Results

7.1 Static Threshold Results

First, an appropriate value for static Δt_{max} is measured. The first method described in Section 4 is used to evaluate the static value for Δt_{max} . A total of 1600 frames have been prerecorded and used for evaluating the static Δt_{max} .

$$\Delta t_{max} = \frac{1}{2N} \sum_{n=1}^N (\Delta t_{ci} + \Delta t_{li}), N = 1600$$

The calculated value of Δt_{max} is 53.98 ms. Two quality measures for evaluating the performance of the static and the adaptive case are used:

1. the deviation of the position computed at the edge and car w.r.t. to the baseline
2. percentage utilization of the edge.

The baseline refers to the actual position of the objects in each frame in terms of (x, y) coordinates in the video sequence used. The deviation is given by the equation:

$$d(n) = \|\mathbf{x}_b(t_n) - \mathbf{x}_{c/e}(t_n)\| \quad (7)$$

where n is the frame number, $\mathbf{x}_b(t_n)$ are the actual coordinates of the object trajectory stored in the baseline. $\mathbf{x}_{c/e}(t_n)$ are the coordinates of the object trajectory computed by the computing environment selected by application manager (c = car or e = edge). The average deviation d_{avg} of each frame is given by

$$d_{avg} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d(n), \quad N = \text{Total Number of Frames} \quad (8)$$

A frame ID parameter is used in the header of the message sequence. The position of the object for each of the frame IDs is computed and stored as baseline. The computed results from the edge and the car lags w.r.t. the baseline due to the E2EL. As the E2EL increases it was seen that the deviation of the results from the car/edge increases accordingly. The utilization factor of the edge gives the percentage utilization of the edge which depends on the E2EL and Δt_{max} . This measure gives an indication of edge utilization by the approach used and this can be used to evaluate the performance of adaptive and static. As mentioned earlier, in order to make it more realistic and to emulate an actual car-edge scenario, the car is made to compute every 7th frame to emulate limited computing resources available locally whereas the edge computes every frame. This makes the deviation higher in case of the car computation when compared to the edge computation.

A video sequence of 1600 frames is prerecorded and the entire video sequence is sent to the local compute node (car) and the average deviation for each frame is calculated. During the test the edge is not used. The average deviation for each frame (d_{avg}) when using only car is measured and the value is $d_{avg} = 25.62$ pixels (only local compute used). This value is the worst case d_{avg} possible since all the computation happens on the car.

The test case used to evaluate the performance of static and adaptive approach is described below.

Test case: A prerecorded video sequence is used to evaluate the performance of the static and adaptive approach. During this test cycle, the raw data of the video sequence is sent in parallel to the car and the edge for the entire video sequence. However, the computed results of the chosen computing environment by the application manager are placed in an array. This array at the end of the test has the results of all the frames in the video sequence. The array is then compared with the baseline and the deviation ($d(n)$) is summed over the entire sequence to calculate d_{avg} . The computing en-

environment chosen for each frame is recorded in a csv file. This is evaluated to calculate the percentage utilization of the edge.

8 Results Summary

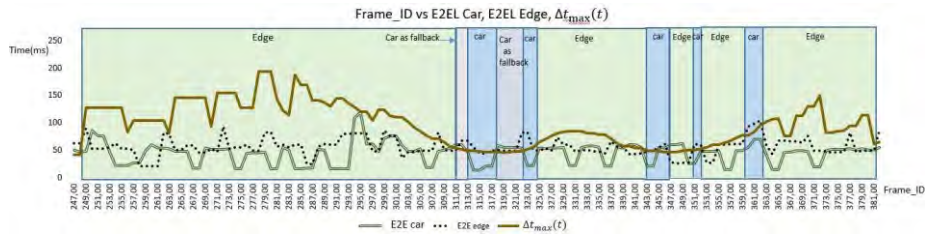
The summary of results obtained from the experiments are shown in Table 1. The test case described earlier is done for the static case, the measured value of $\Delta t_{max} = 53.98$ ms is used and for the adaptive approach the values for $\Delta t_{max}(t)$ are derived for different values of Δf_{max} . It can be seen that in all cases, the adaptive variant performs better w.r.t. to d_{avg} and edge utilization than the static one for the chosen values of Δf_{max} . The utilization of the edge in case of adaptive is higher when compared to static in all cases. Also, the d_{avg} is lower in the adaptive approach compared to the static approach. The d_{avg} in case 4 and case 5 are higher than the allowed deviation (Δf_{max}). This is because Δf_{max} refers to the maximum deviation allowed when using the edge and not the car. When the car is being used there is no guarantee that required deviation limit is fulfilled. In case 4 and case 5, the utilization of the edge is 78% and 71%. This means 22% and 29% utilization of the car takes place and hence higher deviations are observed.

Table 1: Summary of results showing edge utilization and d_{avg} for the static and the adaptive approach for different values of Δf_{max}

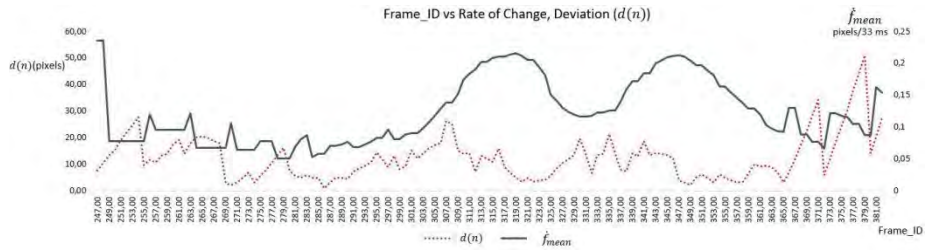
Sl no	Δf_{max} (pixels)	adaptive		static		average deviation % change of adaptive w.r.t. static
		d_{avg} (pixels)	utilization of edge in %	d_{avg} (pixels)	utilization of edge in %	
1	40	12.034	100%	18	60.56%	+ 31.98%
2	30	12.389	97.63%	18	60.56%	+ 29.97%
3	20	13.557	94.56%	18	60.56%	+ 23.37%
4	15	15.771	78.31%	18	60.56%	+ 10.86%
5	10	17.406	71.0%	18	60.56%	+ 1.61%

In our test case, when the E2EL of the car and the edge computation do not meet the required $\Delta t_{max}(t)$, as a fall back solution the car is selected as the computing environment. Figure 10 shows the plot of the result of test case

5 for the adaptive approach. Not all 1600 frames in the sequence have been plotted. However, Figure 10 shows the plot between frame ID 247 and 381. Figure 10(a) shows the plot between frame ID vs E2EL edge and E2EL car as well as $\Delta t_{max}(t)$. Whenever the value of E2EL edge is less than $\Delta t_{max}(t)$ the edge is chosen as computing environment.



Results showing frame ID vs E2EL car, E2EL edge, $\Delta t_{max}(t)$ and the computation environment chosen



Results showing frame ID vs deviation $d(n)$, f_{mean} (for 33 ms (frame rate = 30 Hz)).

Fig. 10 Experimental results for video sequence (frame ID 247 to 381) for the adaptive approach (test case number 5, $\Delta f_{max} = 10$)

Otherwise the car is chosen. As you can see from the plot, there are regions where the E2EL of car and the edge computation both are more than $\Delta t_{max}(t)$. This means in these regions the computation results are delayed and the resulting deviations exceeds the allowed Δf_{max} . In our test cases, in such regions car computation is selected as fallback solution.

Figure 10(b) shows the plot of frame ID vs deviation and f_{mean} . Deviation ($d(n)$) is the difference of the computed results w.r.t. baseline for each frame. f_{mean} for 33 ms is shown because the raw input data is published at 30 Hz frequency. It can be seen from the plots that as f_{mean} increases, $\Delta t_{max}(t)$ is reduced. This is what we expected as per Equation (4).

Figure 11 shows the comparison of the results between adaptive and static approach. As Δf_{max} increases, in adaptive approach the d_{avg} is reduced. This is because the utilization of the edge increases as seen in the plot. In case of

reducing the value of Δf_{max} to less than 10 pixels, it can be observed that the d_{avg} in case of the adaptive approach becomes higher than static approach because the utilization of the edge becomes lower than in the static approach. However, this case is not shown in the plot (Figure 11). Whereas in case of the static approach, the d_{avg} and utilization remain constant, as in the static approach the value of Δt_{max} is independent of Δf_{max} .

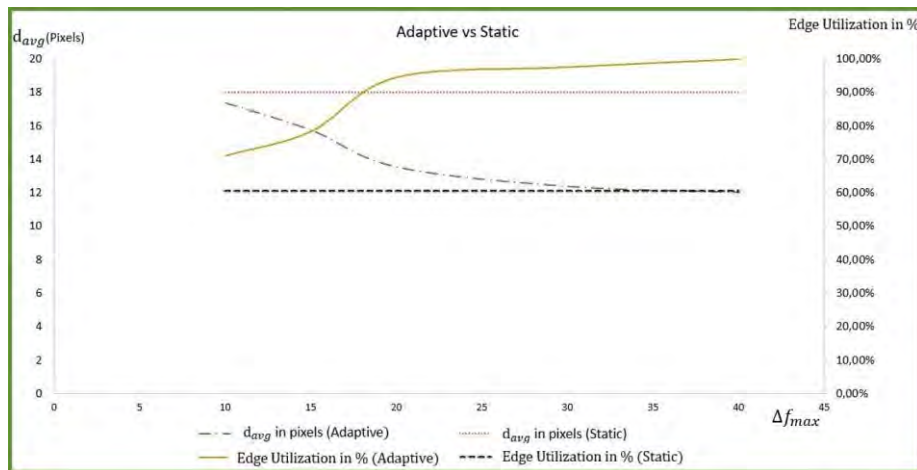


Fig. 11 Adaptive vs static results

Although during the test case the raw data is sent to car and edge for all frames, in a real scenario this is not the case. The ideal way would be starting the application initially on the car, then probe the edge with a few raw data frames once the edge is available and evaluate the E2EL received from the edge. Only if the E2EL is below Δt_{max} , a complete switching to the edge can be done reducing local computation. In case the edge E2EL exceeds the maximum threshold, the car is used as backup.

9 Conclusion

There are quite a few conclusions we can derive from the above results. Using the end-to-end latency (E2EL) as a single parameter to choose the runtime environment is a simple and efficient approach to edge handoff. There are a number of other handoff decision criteria like networks' service

quality (e.g. offered by ETSI MEC Radio Network API [2]) or parameters like processor load and storage utilisation. However, those parameters are hard to access and measure in a distributed environment. Furthermore, it is difficult to define the actual impact of those parameters on the overall performance of the edge application. For example, in our experiments we show that network throughput of a LTE connection does not directly correlate with E2E latency and user experience (Figure 9). The E2EL indirectly includes all latency elements from the network (e.g. throughput) and the compute nodes (e.g. processor load, storage utilisation, HW accelerators) and it has a direct impact on overall edge application performance (e.g. user experience). Hence, we arrive at the conclusion that for a broad set of edge application categories, it is possible to use the E2EL as the handoff decision criterion. Furthermore, the E2EL is a single parameter that can be understood, accessed and monitored easily by an edge application developer. Therefore, the approach will speed up edge application development and will help to increase the number of edge applications in the market.

In the static approach the E2EL is compared with a static threshold Δt_{max} to switch the runtime environment between the edge and local compute node. If for example, the current E2EL of the edge node is higher than Δt_{max} then the local compute node is chosen. Whereas in the adaptive approach, E2EL is compared with a dynamic threshold $\Delta t_{max}(t)$ value to switch computing between edge node and local compute node. This threshold is determined by the rate of change in the output of the application. If the rate of change in the application output is high, we reduce the latency threshold $\Delta t_{max}(t)$.

This adaptive approach is more effective than the static approach in terms of overall average deviation (d_{avg}), if the appropriate values of Δf_{max} are chosen (Figure 11). The application developer may determine Δf_{max} from the typical rate of change of his application. Additional to the reduction of the overall average deviation, the adaptive approach also increases the utilization rate of the edge node (Table 1), which is desired in many edge scenarios.

10 Outlook

In this paper we evaluate the E2EL approach for handoff decisions between edge nodes and local nodes. However, the approach should also be applicable

for handoff between edge nodes to cover scenarios where the user is moving. As one of our next steps we will run experiments on edge-to-edge handoff decisions to show that the E2EL approach works in that scenario as well.

Even though we evaluated our approach in the context of the automotive domain, we do expect that it is applicable to other edge application domains as well (e.g. drones, virtual cognitive assistance, augmented reality).

There are a number of other sensible extensions of our work:

- Based on the value of the E2EL we could change the sampling rate of the sensor. In our example implementation, we would reduce the compute and network load by sending fewer images if we observe a high E2EL value. This approach could further stabilize application performance and user experience.
- We could also improve the switching decision by considering service quality predictions from the network layer. This could help to react faster to upcoming changes in the network.
- In case there are multiple applications switching between the local node and edge node, we could introduce a central handoff manager on the local node that gathers information about the perceived E2ELs as well as the state of the compute nodes, the network and the applications and provide overall orchestration of the applications and the distributed edge infrastructure

Last but not least, it does make sense to run real-world tests of the approach with a set of automotive applications installed in a real car that are moving on streets while being connected to live networks. In that scenario it would be sensible to conduct a survey on the user experience with real application users.

Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the generous support of Volkswagen Infotainment GmbH, Bochum, in financing the research of this project. The authors would also like to thank Mr. Ernst Zielinski and Mr. Karthik Satyanarayana at Volkswagen Infotainment GmbH for their support and work with the srsLTE network.

References

- [1] Flavio Bonomi et al.: Fog computing and its role in the internet of things. In: *MCC@SIGCOMM*. 2012.
- [2] ETSI Multi-access Edge Computing (MEC): Radio Network Information API. ETSI MEC. July 2017.
- [3] ETSI Multi-access Edge Computing (MEC): Study on MEC Support for V2X Use Cases. ETSI MEC. Sept. 2018.
- [4] Automotive Edge Computing Consortium: Automotive Edge Computing Consortium. 2019. <https://aecc.org/> [Accessed: 2019, May 14].
- [5] Alison DeNisco-Rayome: Ten scenarios where edge computing can bring new value. 2018. <https://www.zdnet.com/article/10-scenarios-where-edge-computing-can-bring-new-value/> [Accessed: 2019, April 30].
- [6] Blair Felter: 5 Edge Computing Use Cases With Huge Potential. 2019. <https://www.vxchnge.com/blog/edge-computing-use-cases> [Accessed: 2019, April 30].
- [7] Linux foundation: Linux foundation Edge. 2019. <https://www.linuxfoundation.org/press-release/2019/01/the-linux-foundation-launches-new-lf-edge-to-establish-a-unified-open-source-framework-for-the-edge/> [Accessed: 2019, May 5].
- [8] Kiryong Ha et al.: Adaptive VM Handoff Across Cloudlets. June 2015. <http://elijah.cs.cmu.edu/DOCS/CMU-CS-15-113.pdf> [Accessed: 2019, Oct 12]
- [9] Kiryong Ha et al.: Just-in-time provisioning for cyber foraging. In: *MobiSys '13. Proceeding of the 11th annual international conference on Mobile systems, applications, and services*. Taipei, June 25–28, 2013. New York: ACM, 2013, pp. 153–166. DOI: [10.1145/2462456.2464451](https://doi.org/10.1145/2462456.2464451).
- [10] Kiryong Ha et al.: Towards wearable cognitive assistance. In: *MobiSys '14. Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*. Bretton Woods, June 16–19, 2014. New York: ACM, 2014, pp. 68–81. DOI: [10.1145/2594368.2594383](https://doi.org/10.1145/2594368.2594383).
- [11] Kiryong Ha et al.: You Can Teach Elephants to Dance: Agile VM Handoff for Edge Computing. In: *SEC '17. Proceedings of the Second ACM/IEEE Symposium on Edge Computing*. San Jose. New York: ACM, 2017, pp. 12:1–12:14. DOI: [10.1145/3132211.3134453](https://doi.org/10.1145/3132211.3134453).
- [12] Wenlu Hu et al.: Live Synthesis of Vehicle-Sourced Data Over 4G LTE. In: *MSWiM '17. Proceedings of the 20th ACM International Conference on Modelling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*. Miami. New York: ACM, 2017, pp. 161–170. DOI: [10.1145/3127540.3127543](https://doi.org/10.1145/3127540.3127543).
- [13] Wenlu Hu et al.: Quantifying the Impact of Edge Computing on Mobile Applications. In: *APSys '16. Proceedings of the 7th ACM SIGOPS Asia-Pacific*

- Workshop on Systems*. Hong Kong. New York: ACM, 2016, pp. 5:1–5:8. DOI: [10.1145/2967360.2967369](https://doi.org/10.1145/2967360.2967369).
- [14] Open Edge Initiative: Open Edge Computing. 2019. <http://openedge-computing.org/> [Accessed: 2019, April 30].
- [15] Lele Ma, Shanhe Yi, and Qun Li: Efficient Service Handoff Across Edge Servers via Docker Container Migration. In: *SEC '17. Proceedings of the Second ACM/IEEE Symposium on Edge Computing*. San Jose. New York: ACM, 2017, pp. 11:1–11:13. DOI: [10.1145/3132211.3134460](https://doi.org/10.1145/3132211.3134460).
- [16] Andrew Machen et al.: Live Service Migration in Mobile Edge Clouds. In: *IEEE Wireless Communications* 25 (1), Feb. 2018, pp. 140–147. DOI: [10.1109/MWC.2017.1700011](https://doi.org/10.1109/MWC.2017.1700011).
- [17] Y. Mao et al.: A Survey on Mobile Edge Computing: The Communication Perspective. In: *IEEE Communications Surveys Tutorials* 19 (4), pp. 2322–2358. DOI: [10.1109/COMST.2017.2745201](https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2745201).
- [18] S. Mittal, N. Negi, and R. Chauhan: Integration of edge computing with cloud computing. In: *2017 International Conference on Emerging Trends in Computing and Communication Technologies (ICETCCT)*. Nov. 2017, pp. 1–6. DOI: [10.1109/ICETCCT.2017.8280340](https://doi.org/10.1109/ICETCCT.2017.8280340).
- [19] Grand View Research: Edge-computing-Market. 2018. <https://www.grandview-research.com/industry-analysis/edge-computing-market> [Accessed: 2019, April 30].
- [20] M. Satyanarayanan: The Emergence of Edge Computing. In: *Computer* 50 (1), pp. 30–39. DOI: [10.1109/MC.2017.9](https://doi.org/10.1109/MC.2017.9).
- [21] Eric Simone: Edge-computing-benefits. 2018. <https://www.iotforall.com/edge-computing-benefits/> [Accessed: 2019, April 30].
- [22] Devansh Gandhi: Why Edge Computing is key for the automotive industry? 2019. <https://www.teraki.com/blog-why-edge-computing-is-key-for-the-automotive-industry/> [Accessed: 2019, May 14]
- [23] Carnegie Mellon University. Edge Computing. 2019. <http://elijah.cs.cmu.edu/> [Accessed: 2019, April 30].
- [24] S. Wang et al: A Survey on Service Migration in Mobile Edge Computing. In: *IEEE Access* 6 (2018), pp. 23511–23528. DOI: [10.1109/ACCESS.2018.2828102](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2828102).

76–79 GHz Automotive Radar Test System Based on Radar Target Simulator

Aybars Kizilay¹, Andreas Becker²

¹ Konrad Technologies

a.kizilay@konrad-technologies.de

² Fachhochschule Dortmund

andreas.becker@fh-dortmund.de

Efficient methods to test and verify automotive radar sensors are an important area of research due to the importance of radar sensors for advanced driver-assistance systems. Today's radar sensors are primarily tested either on public roads or on test tracks, which is disadvantageous in terms of time, cost and efficiency. This paper presents a test system based upon a Radar Target Simulator (RTS) and the so-called Quality Automotive Radome Tester (QAR) to overcome those difficulties and limitations. We demonstrate how this system can be used for testing and verifying automotive radar sensors comprehensively and efficiently.

1 Need of Testing Automotive Radar Sensors

The state-of-the-art automotive radars have been used to realize advanced driver-assistance systems (ADAS) along with other sensors such as LIDAR, camera and ultrasound [1]. Nowadays, on system level, radar sensors and their functions are primarily tested on test tracks or public roads. However, such tests may contain inconsistencies due to difficulties in repeatability of certain test scenario [2]. For future developments in the area of automated driving, comprehensive testing, including detailed statistics of detection probabilities and the stochastic properties of the estimation of target properties, becomes even more important.

2 Procedure of Testing Radar Sensor

Radar test requirements may contain different numbers of test stages based on the application. In general, it can be summarized in three levels such as component level test, functional level test and finally sensor integration test on the vehicle [3]. This paper proposes the following test steps to complete each test stages systematically by considering the aspect of repeatability and accuracy:

1. radar sensor characterization
2. virtual radar object simulation
3. virtual radar object simulation with a cover (bumper).

2.1 Radar Sensor Characterization

Radar sensor characterization is aimed to evaluate the radar signals and their spectral features by conducting RF measurements. It includes linearity tests with frequency demodulation, occupied bandwidth and EIRP measurement. The outcome of such measurement may provide early information about radar target detection performance, and is also helpful for deciding the type of object simulation that are suitable and meaningful to the radar DUT.

2.2 Virtual Radar Object Simulation

A Radar Target Simulator (RTS) developed by Konrad GmbH is used for object simulation. The working principle of an RTS is to receive radar transmit signals, delaying them based on the desired target distance, also modifying its amplitudes, adding a doppler shift, and then transmitting it back to the radar. Consequently, when that modified signal is processed by radar, it outputs a target in a certain distance with a specific relative velocity. In that way, radar sensors can be fully characterized; moreover, the target detection and calculation algorithms of the sensor can be revised in development stage. One of the object simulations that has been designed, comprise of an object (RCS = 10 dBsm), moving from 50 m to 20 m with a constant speed of 20 km/h at the 0° azimuth and elevation. The test result of the radar sensor for that simulation is presented in Fig 1.

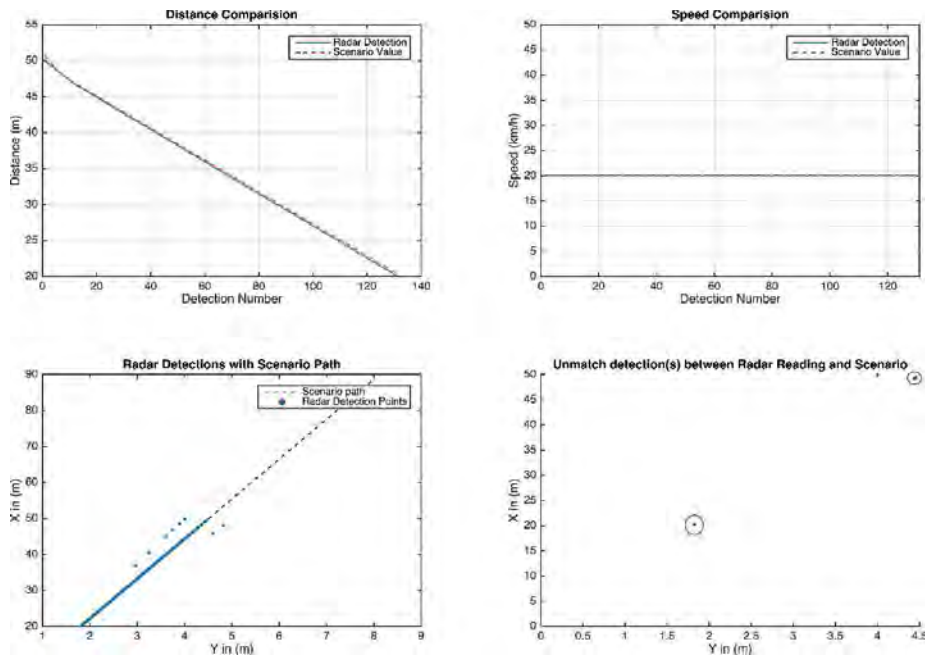


Fig. 1 Moving target simulation evaluation

2.3 Virtual Radar Object Simulation with Cover

The performance of a radar sensor mounted behind a painted fascia or a cover might be degraded if the fascia/cover does not ensure good signal penetrability. Functional impacts can include wrong lane assignment of targets or late object recognition, leading e.g. to false-positives or false-negatives. Additionally, it is not unusual to have several different fascia/cover designs even for the same vehicle platform and a very large number of different paintings. In order to test the impacts of a fascia/cover efficiently, the RTS has been used for testing the angular performance of the radar sensor in conjunction with the QAR (Quality Automotive Radome Tester) developed by Rohde & Schwarz [4] to visualize potential sources of distortion onto wave propagation. The measurement results of reflectivity and transmissivity of the cover over 77–79 GHz automotive radar operating frequency range are shown in Fig. 2 and 3 respectively.

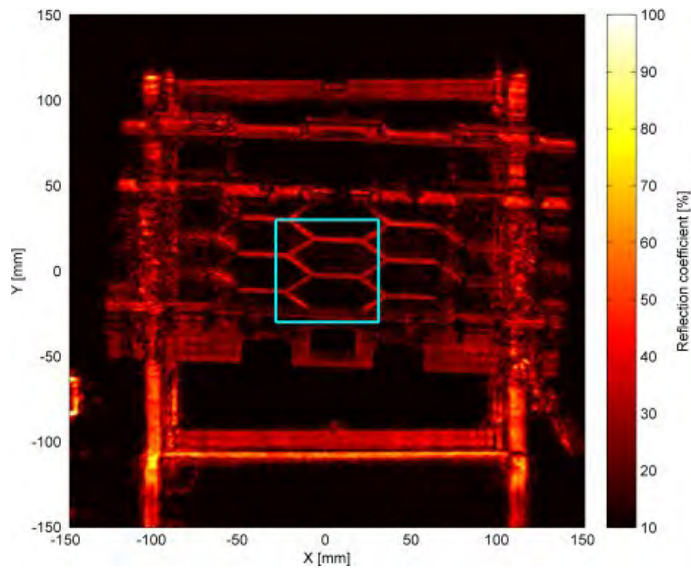


Fig. 2 Reflectivity result

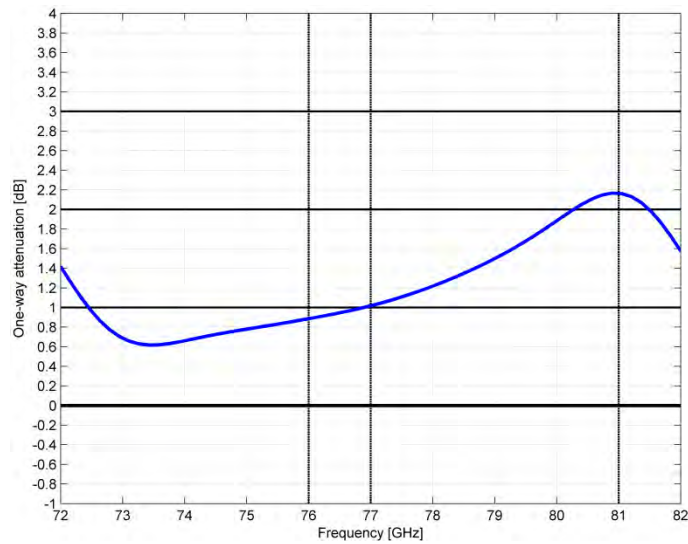


Fig. 3 One-way transmission loss

The impact of the cover on the angular performance of the radar detection is tested by simulating a radar target (RCS: 10 dBsm) departing from 20 m to 50 m with a constant speed of 15 km/h at 5° in azimuth plane. The angular value of radar detections over the simulated angle and distance is presented in Fig 4.

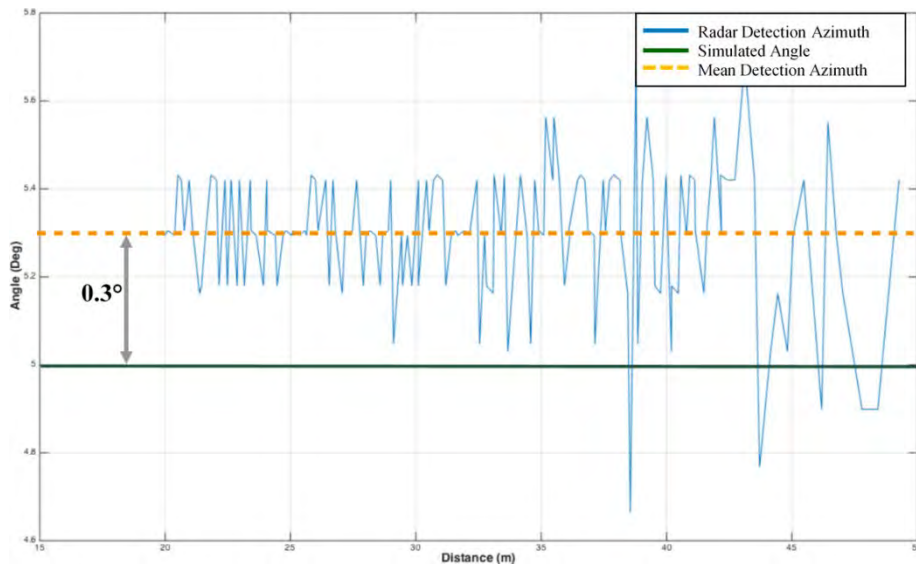


Fig. 4 Angular deviation result

3 Potential of Radar Target Simulator

This study presents a systematic testing procedure including RF measurement, object simulation with/without cover in order to test and verify the radar sensor with respect to hardware and software failures. Besides detecting general hardware and/or software failures, this testing procedure allows to detect specific failures that may occur in particular test scenarios. The great potential of RTS is due to the fact that it provides the capability of repeating a specific scenario with high precision as well as completing test catalogues for vehicle integrated radars without the need to make test drives. Next steps include extending the scenario portfolio to take higher level of functionality (e.g. tracks or output of feature functions) into account and further automation to run huge amounts of test cases. In that way, results may also be used as supervised learning for radar signal processing algorithms using artificial intelligence.

References

- [1] M. Torlak, S. M. Patole, D. Wang, and M. Ali: Automotive Radars a Review of Signal Processing Techniques, 2017.
- [2] C. Müller, H. J. Vishnukumar, B. Butting, and E. Sax: Machine Learning and Deep Neural Network-Artificial Intelligence Core for Lab and Real-World Test and Validation for ADAS and Autonomous Vehicles. In: *Intelligent Systems Conference*, London, 2017.
- [3] M. R. Abou-Jaoude: Test systems for automotive radar. In: *EEE Vehicular Technology Conference*, Tokyo, 2000.
- [4] Rohde-Schwarz: R&S® QAR Quality Automotive Radome Tester. https://www.rohde-schwarz.com/us/product/qar-productstartpage_63493-553077.html?change_c=true. [Accessed 18 August 2018]

4 Energie und Umwelt

Das Potenzial von systemrelevanten Verbrauchern

Christian Schweitzer¹, Jens-Martin Walther, Sten Wranik

bse Engineering Leipzig GmbH, Mottelerstraße 8, 04155 Leipzig

¹ office@bse-engineering.eu

Der Beitrag bestätigt den Bedarf nach systemrelevanten Verbrauchern auch für Sektoren außerhalb Power-to-Heat für das Gelingen der Energiewende und bekräftigt die Sektorkopplung. Die Schritte einer Systemtransformation unter Verwendung der verfügbaren Ressourcen werden skizziert. Power-to-Methanol wurde als verfügbarer Pfad unter den Aspekten Technologie und Anwendung als aussichtsreich identifiziert.

1 Herausforderungen Klimaschutz, Netzstabilität und Verschwendung von erneuerbarem Strom

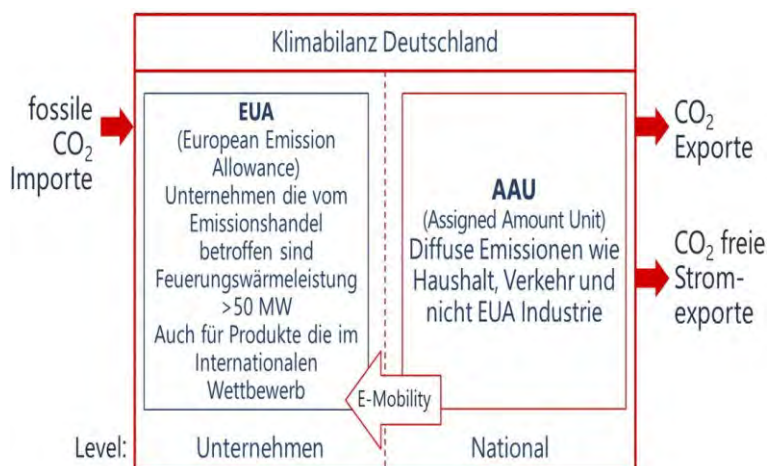
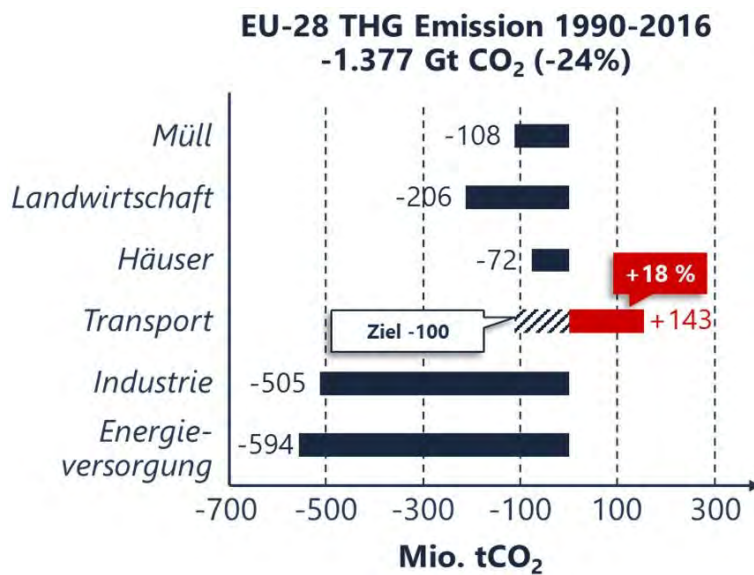
Deutschland steht zu seiner Verpflichtung, die Treibhausgas-Emissionen im Jahr 2020 auf 751 Mio. Tonnen zu reduzieren. Gleichzeitig besteht mittlerweile die Gewissheit, dass die Verpflichtung nicht erreicht wird. Es werden voraussichtlich 80 Mio. Tonnen CO₂ zu viel emittiert werden.

Zum ersten Mal wird das Nichterreichen der Klimaschutzziele signifikante Auswirkungen auf den Bundeshaushalt haben. Die Verpflichtungen, die überschüssigen CO₂-Emissionen mit Assigned Amount Units (AAU) zu decken, müssen im Gegensatz zum EUA nicht von der Industrie, sondern vom Bund finanziert werden.

Die Bundesregierung müsste, nach Berechnungen von Agora, im nächsten Jahrzehnt Steuergeld in Höhe von 30 bis 60 Milliarden Euro an andere EU-

Staaten zahlen, um dort ersatzweise Emissionsrechte für die in Deutschland fehlenden Treibhausgasminderungen zu erwerben.

Betrachtet man die Entwicklung der CO₂-Emissionen der einzelnen Sektoren in Deutschland von 1990 bis 2016, so ist es der Verkehrssektor, der im Rahmen des EU-28 THG die Emissionsziele nicht nur verfehlt, sondern die Gesamtbilanz negativ überschreiten lässt. Wir stehen hier vor der besonderen Herausforderung, die Forderung der Dekarbonisierung des Verkehrssektors in einem äußerst kurzen Zeitraum umzusetzen.



Zeitgleich fallen jährliche Stromexporte von ca. 60 Mrd. kWh an (genug Strom für 17 Mio. Haushalte), die einer Erzeugung von 30 Mio. t CO₂ bzw. gleichviel EUA entsprechen und den Stromerzeugungsanlagen im Inland zugerechnet werden. Das bedeutet, dass der Strom ohne Wertschöpfung aus Deutschland exportiert wird, jedoch CO₂-Emissionen in der nationalen Klimaschutzbilanz verbleiben.

In der Konsequenz erfüllt der Umbau des Verkehrssektors zur E-Mobilität eine Verschiebung der Bewertung der Emissionen aus Sicht der Klimabilanz von den AAU hin zu den EUA, wenn der Strom für die E-Mobilität über das Stromnetz bereitgestellt wird.

Genauso wenig stellen die bisherigen Konzepte überzeugenden Lösungen für kostenpflichtige Abschaltungen von EEG-Anlagen und andere Maßnahmen zur Stabilisierung des öffentlichen Stromnetzes dar. Die Gesamtkosten belaufen sich an dieser Stelle auf ca. 1,4 Mrd. Euro p.a.

2 Integration von erneuerbarem Strom und Sektorkopplung als Schlüssel im Transformationsprozess

2.1 Konsequenzen

- Die Ausweitung der E-Mobilität erhöht den Strombedarf und verlagert die Kosten für den Bundeshaushalt zum Kauf von Emissionszertifikaten auf den Stromsektor.
- Die Steigerung des Strombedarfs für den Verkehrssektor führt zur Preissteigerung für CO₂ (EUA), wodurch die EEX-Vermarktungspreise steigen und die EEG-Umlagekosten sinken.
- Beides zusammen – der Mehrbedarf an Strom und EUA – führt zur Verschiebung der Merit-Order auf der EEX sowie zur Umkehrung der Anlagereihenfolge. Daraus folgt, dass erneuerbare Energie-Anlagen (ohne EEG-Vergütung und) ohne CO₂-Gestehungskosten die fossilen Erzeuger verdrängen.
- Ziele muss es langfristig sein, die EEG-Anlagen ohne Förderung konkurrenzfähig zu betreiben.

Unberücksichtigt dabei sind die Aufwände zur Umstellung, Systemsicherheit und die Wettbewerbssituation der Industrie, die unter diesen Rahmenbedingungen eine große Herausforderung sehen.

2.2 Megatrends und Faktoren der Transformation

Welche Megatrends bestehen auf der EU-Ebene über 2020 hinaus? Als Megatrends lassen sich eine CO₂-arme Wirtschaft, der Ausbau einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft, eine höhere Ressourceneffizienz, die Re-Industrialisierung und die Deckung des Bruttoendenergieverbrauchs mit erneuerbarer Energie anführen.

Aus diesen Megatrends lassen sich folgende Faktoren ableiten:

- Wind, Solar und Wasserkraft erzeugen unabhängig vom Bedarf des Stroms und der Transport zum Verbraucher stellt sich derzeit als ein Hemmnis aus Sicht der Kapazität und der Wirtschaftlichkeit dar.
- Somit wird Strom zeitweise zu einer ungenutzten Ressource.
- Kohlendioxid ist eine verfügbare Resources und bislang kaum genutzte Kohlenstoffquelle.

2.3 Lösungsansätze

Zur Lösung der Herausforderungen und in Einklang mit der Systemintegration ergeben sich heute neue Möglichkeiten zur Stromverwertung mit folgenden Grundsatztechnologien:

- | | |
|-----------------|--|
| • Batterie | Stromspeicher Power-to-Power |
| • Power-to-Heat | Wärmespeicher, Stromsenke |
| • Power-to-Fuel | Verkehrsenergie, Stromsenke |
| • Power-to-Gas | Energiepeicher zur Rückverstromung |
| • Power-to-Chem | chemische Industrie, Re-Industrialisierung |

In den letzten Jahren hat sich die Sektorkopplung ausgehend von Strom als verbindendes Element etabliert. Idealerweise ergibt sich hier das Handlungsfeld entweder aus einer der Lösungen oder eine Kombination aus mehreren Möglichkeiten.

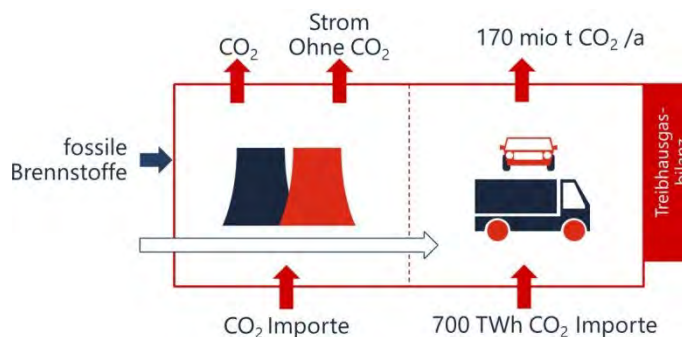
Methanol hat den Vorteil, mehrere Sektorkopplungen zu ermöglichen. Da er als Grund-Chemikalie, Energiespeicher sowie Kraftstoff gesehen werden kann → Power-to-Methanol.

3 Transformationsprozess mittels Power-to-Methanol

Ausgehend von den Herausforderungen wird in Einklang mit den EU-Megatrends im Folgenden ein Entwicklungsszenario dargestellt.

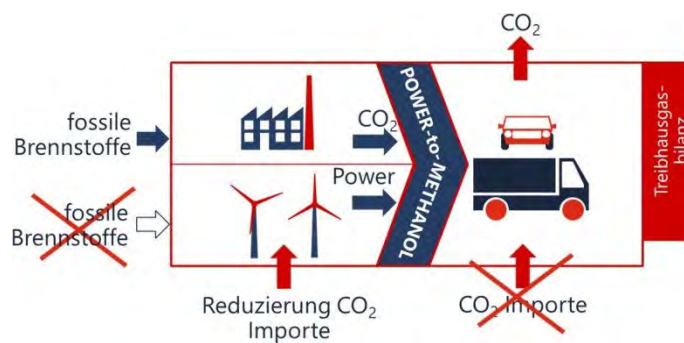
3.1 Status quo

Die aktuelle Ausgangssituation gestaltet sich im Wesentlichen durch den Einsatz von fossilen Energieträgern für den Verkehrs- und Stromsektor. Damit ist ein nötiger Import an fossilen Energieträgern verbunden – und daraus resultierende CO₂-Emissionen (Grafik: vereinfacht dargestellte nationale Treibhausgasbilanz).



3.2 Erster Transformationsschritt

Schrittweiser Ersatz der fossilen Kraftstoffe im Verkehrssektor durch den Einsatz von Methanol unter Nutzung der CO₂-Emissionen als Ressource. Hierdurch werden Stromexporte und CO₂-Importe vermieden sowie das Stromnetz von CO₂-belastetem Strom freigestellt für die maximale Durchleitung von Strom aus erneuerbaren Quellen (unter Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit).



3.5 Fazit der vollständigen Transformation der Energieerzeugung und des Verkehrssektors

Power-to-Methanol ermöglicht den schrittweisen Transformationsprozess, die Umstellung der Industrie unter Berücksichtigung des globalen Wettbewerbes und des ebenso der Transformation unterworfenen Strom- und Kraftstoffmarktes.

4 Power-to-Methanol und Einzigartigkeit in der Betriebsführung

Power-to-Methanol-Anlagen sind Stand der Technik. Sie flexibilisieren gegenüber dem Netz die Mindestlast von Kraftwerken. Durch Erhöhung der Betriebsflexibilität wirken sie Standort-sichernd, erhalten die Lebensdauer von Komponenten und erhöhen die Anlageneffizienz.

4.1 Herstellung Methanol

Die Erweiterung eines Kraftwerkes um die Herstellung von Methanol besteht aus vier Teilprozessen (alkalische Elektrolyse, CO_2 -Abscheidung, Methanolsynthese und Destillation), die eine flexible Verwertung von fluktuierendem Strom sicherstellt. Das Verfahren zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass die Elektrolyse mit einer fluktuierenden (elektrischen) Leistung betrieben und auf schnelle Lastwechsel reagieren kann. Sie gewährleistet die flexible Abnahme von Strom. Im Bedarfsfall kann sie auch Strom aus dem

Versorgungsnetz aufnehmen. Zur gesicherten Wasserstoffverwertung ist auch die Prozessführung der Methanolsynthese in der Lage, auf Lastwechsel zu reagieren.

Die einzelnen Anlagenteile werden energetisch miteinander verschaltet und in die Bestandsanlage (Stromerzeuger/Netzanschlusspunkt, CO₂-Quelle etc.) integriert, wodurch die Gesamteffizienz der Anlagenkonfiguration auf bis zu 74%, bezogen auf die eingesetzte elektrische Energie (Power-to-X), liegt. Bei der Herstellung fallen keine entsorgungspflichtigen Abfälle wie z.B. Teere an, welche aufwendig entsorgt werden müssen, da ausschließlich Reinstgase verwendet werden. Besonderheit am Energieerzeuger: Um den Kraftwerksbetrieb zu sichern, wird vor dem Einspeisepunkt ins öffentliche Versorgungsnetz eine Stromweiche geschaffen, die bei Bedarf die Stromeinspeisung gleitend reduziert und auf die Elektrolyse umschaltet.

4.2 Elektrolyse

Die alkalische Wasserelektrolyse als seit langem praktiziertes Verfahren in der Industrie stellt den Grundstein von chemischen Energiespeichern oder Basis-Chemikalien dar. Sie ist technisch ausgereift und kann unter moderaten Bedingungen betrieben werden. Mithilfe von elektrischer Energie werden H₂ und O₂ hergestellt. Der Wasserstoff wird auf 40 bar der Methanolsynthese zur Verfügung gestellt. Abwärme wird sinnvoll verwertet. Durch Integration der Bestandsanlage wird ein Hot-Standby definiert, der es ermöglicht, die gesamte elektrische Leistung in das Netz einzuspeisen.

4.3 CO₂-Abscheidung

Die Abscheidung des CO₂ aus dem abgezogenen Rauchgas erfolgt mittels Aminwäsche. Die Aminwäsche wurde für die großtechnische Abscheidung von CO₂ aus Rauchgas (Carbon Capture and Storage, CCS) sowie aus Biogas mit dem Ziel der maximierten CO₂-Abscheidung entwickelt.

Diese CO₂-Abscheidung zielt somit, im Gegensatz zu CCS, auf die bedarfsgesteuerte Bereitstellung von reinem CO₂ ab. Um die Flexibilität zu erhöhen bzw. den ND-Dampfbedarf zu reduzieren, können mehrere vorgefertigte Module zum Einsatz kommen. Verwendet werden aminhaltige, ungiftige und biologisch-abbaubare Waschlösungen.

4.4 Methanolsynthese

Der Prozess der Methanolsynthese ist Stand der Technik. Eine großtechnische Umsetzung gelang bereits 1923 durch BASF. Aktuell erfolgt die Produktion in Großanlagen auf Basis von Synthesegas (CO , CO_2 und H_2). Die Prozessbedingungen bestimmen hauptsächlich den Umsatz des Synthesegases unter Einsatz eines Katalysators. Nicht zu Methanol umgesetzte Gase werden als Kreisgas dem Reaktor wieder zugeführt. Die Effizienz der Methanolanlagen ist definiert durch: Minimierung des Katalysatoreinsatzes, Minimierung des Betriebsdruckes, Toleranz auf Gasverunreinigung aus vorgelagerten Prozessen, Maximierung der Umsatzraten, Reduzierung der Kreisgaszyklen und Maximierung der Verfügbarkeit.

Der wesentliche Unterschied in der Anforderung zu herkömmlichen Methanolreaktoren ist die Definition der „Effizienz“ der Anlage. Power-to-Methanol-Anlagen müssen hochflexibel in der Prozessführung sein. Dies bedeutet: die Minimierung der Grundlast, eine hohe Toleranz auf den Lastwechsel, eine flexible Wasserstoffaufnahme, eine hohe Wasser-, Temperatur- und Drucktoleranz des Katalysators. Diese Anforderungen sind durch einen eigens dafür entworfenen Katalysator in dem BSE-Prozess sichergestellt. Kernelemente stellen dabei die Erhöhung der Kreisgasführung gegenüber der konventionellen Anlage und die Steuerung der Umsatzrate pro Kreisgaszyklus dar.

4.5 Schlüsselkomponente Katalysator

Auf Basis dieser Prozessanforderungen hat BASF einen Katalysator entwickelt, der in Power-to-Methanol-Anlagen zum Einsatz kommt. Der Katalysator wurde nach folgenden Rahmenbedingungen bestimmt:

- hohe Aktivität/Stabilität in der Hydrogenierung von reinem CO_2 als Kohlenstoffquelle für Methanol,
- eine dynamische Prozessführung, fern der konventionellen Anwendung.

Der Katalysator hat eine selektive Wirkung auf die drei Reaktionen, die im Reaktor während der Methanolsynthese ablaufen.

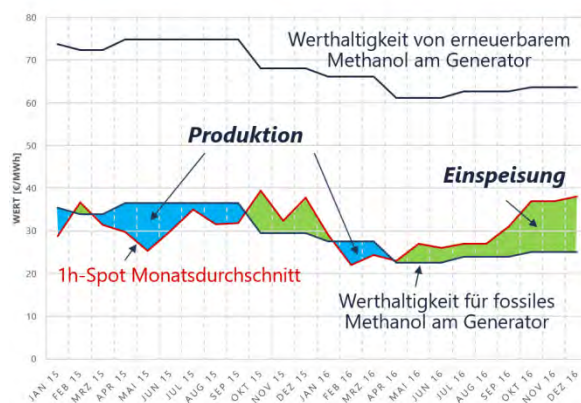
Transportsektor verwendet. Da Methanol in der Verbrennung die Schadstoffwerte (Schwefel, NO_x , Feinstaub- und Rußpartikel) verbessert, findet es auch als direkter Kraftstoff zunehmend Einsatz. Hierdurch ergibt sich der Vorteil, dass der Markt nicht neu erschlossen werden muss. Durch die Weiterverarbeitung zu Produkten wie MTBE oder als Katalysator in der Biodieselherstellung findet er bereits heute Anwendung im Kraftstoffmarkt. Hinzu kommen neue Anwendungsfelder als Substitut von Schweröl im maritimen Bereich, Weiterveredelung zu Kraftstoffen wie Polyoxymethyldimethylether (OME), Benzin (MtG) bzw. Direktbeimischung (M15, M100) in konventionelles Benzin.

5.2 Energiespeicher

Unter Energiespeichern werden heute neben den klassischen Energieträgern Kohle, Heizöl und Erdgas auch Batteriespeicher verstanden. Die klassischen Energieträger werden unter Wirkungsgradverlusten zu Strom und Wärme transformiert. Besonderes Kriterium für die Güte eines Energiespeichers ist dessen Energiedichte. Methanol ist in der Lage, die klassischen Energieträger adäquat zu ersetzen.

Wert des ungenutzten Stromes bei PtX

Strommarktabhängige Produktion



bse engineering

Flexible Märkte



Bei einem strommarktgeführten Betrieb einer Methanolanlage an einem Großzeiger wird die Werthaltigkeit des erzeugten Stromes am Generator gesteigert. Entscheidungsparameter ist also die Werthaltigkeit des Stroms am Generator in zwei unterschiedlichen Märkten (Stromweiche). Im Betrieb

wird am Generator entschieden, ob es wirtschaftlicher ist, Strom einzuspeisen oder die Verstofflichung über die Methanolanlage zu fahren.

5.3 Basis-Chemikalien

Methanol wird als globales Handelsgut in einem bestehenden, wachsenden Markt gehandelt. Hierbei handelt es sich um eine Grund-Chemikalie zur Erzeugung einer vielfältigen Produktpalette. Es dient u. a. als Ausgangsstoff bei der Produktion von Formaldehyd, Ameisensäure und Essigsäure. In den letzten Jahren wurde vor allem der Sektor von Methanol-to-Olefins (MTO) ausgebaut. Methanol hat dabei den Vorteil, auch über weite Strecken kostengünstig transportiert werden zu können, wodurch nicht zwangsläufig die vollständige Wertschöpfungskette (Methanolherstellung, Weiterverarbeitung) an einem Standort aufgebaut werden muss.

Gebäudeintegrierte Solarthermie

Helmut Hachul, Daniela Ridder¹, Thiemo Ebbert

Fachhochschule Dortmund, Lehr- und Forschungsgebiet
Architektur und Metallbau, Emil-Figge-Str. 40, 44227 Dortmund

¹ E-Mail: daniela.ridder@fh-dortmund.de

Der Beitrag befasst sich mit den Möglichkeiten Gebäudehüllen und Fassadenbauteile thermisch zu aktivieren, um Umweltwärme für Heizung und Kühlung zu nutzen. Insbesondere wird die Integration in kostenoptimierte Gewerbebauten betrachtet und wissenschaftlich analysiert.

1 Integration von Solarthermie

Energieeffizienz und ein verstärkter Einsatz erneuerbarer Energien sind nicht nur umweltpolitisch und gesellschaftlich höchst relevante Themen, sondern gewinnen in den letzten Jahren auch an wirtschaftlicher Bedeutung [1]. Laut EU-Gebäuderichtlinie 2010 sind Neubauten so zu errichten, dass für Heizung, Kühlung und Lüftung möglichst keine Energie verbraucht wird. Dieses Ziel wird ebenso im neuen Gebäudeenergiegesetz (GEG) festgeschrieben [2].

Insbesondere der Gewerbebau bietet mit großen und meist exponierten Fassadenoberflächen ein besonderes Potenzial zur Energiegewinnung. In Deutschland werden z. B. im Bereich von Dach- und Fassadenflächen Sandwichelemente mit einem Polyurethan- oder Mineralwollkern in einer Größenordnung von jährlich 14 Millionen m² hergestellt und verbaut. In Europa sind dies sogar 130 Millionen m² [3]. Hinzu kommen große Flächen an Bürogebäuden und Hochhäusern, die mit vorgehängten Metallfassaden errichtet werden.

Am Lehr- und Forschungsgebiet Architektur und Metallbau im Fachbereich Architektur an der Fachhochschule Dortmund werden vielfältige architektonische Gestaltungsmöglichkeiten von Fassadenflächen untersucht. Des

Weiteren wird erforscht, wie sich diese energetisch ertüchtigen lassen, um so einen nachhaltigen Beitrag zur Verbesserung der Energiebilanz des Gebäudes und zur CO₂-Einsparung zu liefern [4].

2 Anwendungsbezogene Forschung

Im Rahmen zweier Forschungsprojekte werden diese Möglichkeiten aufgezeigt. Dabei werden innovative Vorschläge und Konzepte für eine wirtschaftliche Gewinnung solarer Wärmeenergie durch nicht-abgedeckte Flüssigkeitskollektoren erarbeitet. Ein weiterer Betrachtungspunkt ist die Schonung von Stoffressourcen durch die optimierte Produktion von Fassadenbekleidungen und Sandwichelementen. Hierzu werden Demonstratoren in verschiedenen Varianten mit unterschiedlichen Materialkombinationen entwickelt und auf ihre Funktionalität geprüft.

2.1 Projekt Gebäudeintegrierte solare Sandwichelemente

Projektschwerpunkte sind die konstruktive, energetische und wirtschaftliche Optimierung von solarthermisch aktivierten Stahlsandwichelementen (Abb. 1). Stahlsandwichelemente mit Mineralwollkern eignen sich für eine verdeckte Integration der Bauteilkomponenten wie Rohrregister und Wärmeleitbleche. Neben Vorteilen bei der Leitungseinbringung werden auch wirtschaftlichere Methoden zur Anbindung der Anlagentechnik aufgezeigt. Alternative Werkstoffe wie Kunststoffe, Stahl, Aluminium und dünnwandige Kupferrohre werden als Leitungsmaterial untersucht. Hierzu wird ebenfalls eine geeignete Leitungsbildung als Mäander umgesetzt. Die Erarbeitung konstruktiver Konzepte zur Fixierung der Rohrregister wird durchgeführt und eine geklebte Klemmvariante des Mäanderregisters mit Wärmeleitblechen angewendet. Gleichzeitig dienen Wärmeleitbleche zur Befestigung und zur Querverteilung der absorbierten Wärme.

Die Leistungsfähigkeit sowie das statische und thermo-hydraulische Verhalten der Demonstratoren werden am Institut für Solarforschung Hameln simulativ und experimentell im Sonnensimulator untersucht. Zu Beginn wird eine Auswahl potenzieller Leitungsmaterialien anhand eines Messverfahrens für Solarabsorber bestimmt [5].

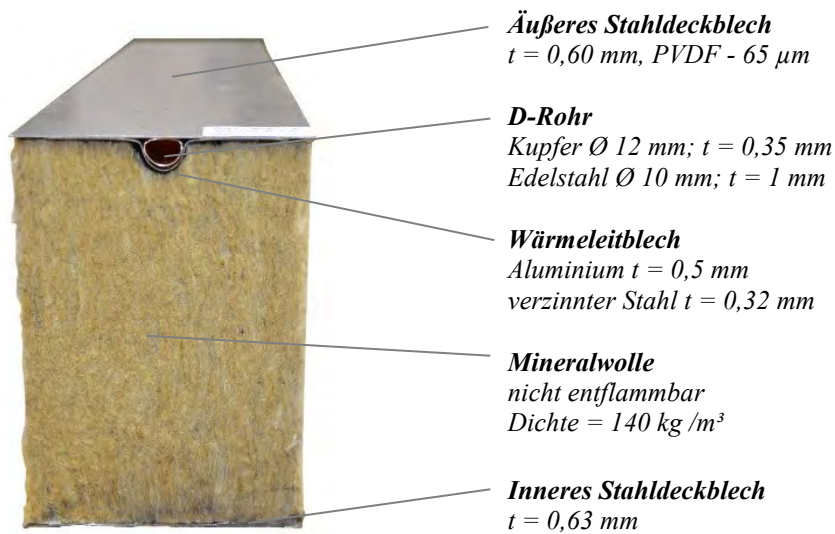


Abb. 1 Aufbau solares Sandwichelement mit D-Rohr und Wärmeleitblech

Bei üblichen Produkten werden bisher ausschließlich Wärmeleitbleche aus Aluminium für den Klimadeckenbereich eingesetzt. Im Rahmen dieses Forschungsprojekts werden diese erstmalig aus Stahlfeinstblechen untersucht. Der Leistungsfähigkeitstest zeigt, dass zwei Varianten mit unterschiedlichen Werkstoffen nahezu identische Wirkungsgrade aufweisen. Erwartet wurde, dass der Demonstrator mit Wärmeleitblechen aus Aluminium im Vergleich einen höheren Wirkungsgrad erreicht.

- Kupfer-Mäander, D-Rohr, Aluminium-WLB $\eta_0 = 53,3\%$ [6]
- Kupfer-Mäander, D-Rohr, Stahl-WLB $\eta_0 = 52,3\%$ [6]

Die erarbeiteten Systemlösungen werden mit der Software TRNSYS zur Durchführung dynamischer Gebäudesimulationen unter Berücksichtigung der ausgewählten Wärme- und Kälteprofile abgebildet und untersucht. Hierdurch werden das Potenzial und die Effizienz der Elemente in der Anwendung bewertet. Mit den neuentwickelten Solarsandwichpaneelen wird ein energetisches Gesamtkonzept mit Anbindungsvarianten an die haustechnische Anlage, Steuerung und Speichertechnik erstellt.

Bei der Betrachtung von Sandwichfassaden zeigt sich, dass sich durch die Implementierung von Rohrregistern und Wärmeleitblechen nicht nur die Möglichkeit der Wärmegewinnung ergibt, sondern ebenfalls eine statische Ertüchtigung des Sandwichelementes. Hierzu werden statische Untersuchun-

gen zur Bauteilfestigkeit an der Fachhochschule Dortmund durchgeführt (Abb. 2).

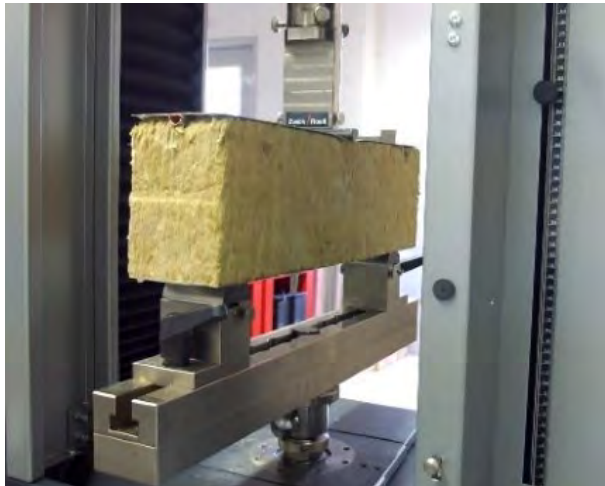


Abb. 2

3-Punkt-Biegeversuch – Ausschnitt Sandwichelement mit Bauteilkomponenten

Im Vergleich haben die Probekörper (Ausschnitt Sandwichmodul) mit Bauteilkomponenten ein um 146% höhere Steifigkeit (mit f_{zul} 1/100 - Wandbauteile [7]). Die Auswertung zeigt ferner, dass die integrierten Bauteilkomponenten aus Stahl eine höhere Steifigkeit aufweisen als die mit einem Aluminium-Wärmeleitblech. Hier liegt die Erhöhung bei 19%.

2.2 Projekt Plusenergiegebäude in Stahlleichtbauweise

Bei diesem interdisziplinären Projekt wird das Zusammenspiel von Architektur, Gebäudetechnik, Fassaden- und Baukonstruktion betrachtet. Der Fokus liegt auf Bürogebäuden in Kombination mit Gewerbehallen, wie sie bei mittelständischen Betrieben üblich sind. Dabei geht die ganzheitliche Planung den Fragen nach: Wie kann solare Wärme genutzt werden? Wo wird sie gespeichert? Und wie kann man die Fassade im Sommer zur aktiven Kühlung des Gebäudes nutzen? Bei all diesen Fragen ist die Kosten-/Nutzen-Abwägung zentraler Teil der Betrachtung.

Zur Beantwortung der Fragen wurde ein Ensemble aus Bürogebäude und Produktionshalle in typischen Abmessungen entwickelt und in drei unterschiedlichen Konfigurationen energetisch und nach Baukosten bewertet.

Dabei wurden die Wandaufbauten und Dämmstandards festgelegt, die unter Abwägung der wirtschaftlichen und energetischen Aspekte das Optimum darstellen. Abbildung 3 zeigt eine Illustration des Mustergebäudes.



Abb. 3 Bürogebäude als Massivbau mit VHF-Fassade; Produktionshalle als Stahlbau mit vorgesetzten Stahlsandwichelementen

Die Gebäudetechnik nutzt die Synergie von vernetzten Wärmequellen und Kühlmöglichkeiten für eine optimale Energieeffizienz. Die Wärme- und Kälteerzeugung basiert auf Erdwärme und fassadenintegrierten Kollektor-Paneelen. Eine Wärmepumpe bringt das Heizungswasser auf das geforderte Temperaturniveau für Niedertemperatur-Heiz- und -Kühlflächen. Über die Geothermiesonden wird Wärmeenergie im Erdreich gespeichert. Die elektrische Energieversorgung der Anlagentechnik wird im Jahresmittel vollständig über die Photovoltaik-Anlage bereitgestellt, wodurch sich der Standard eines Plusenergiegebäudes erreichen lässt (Abb. 4).

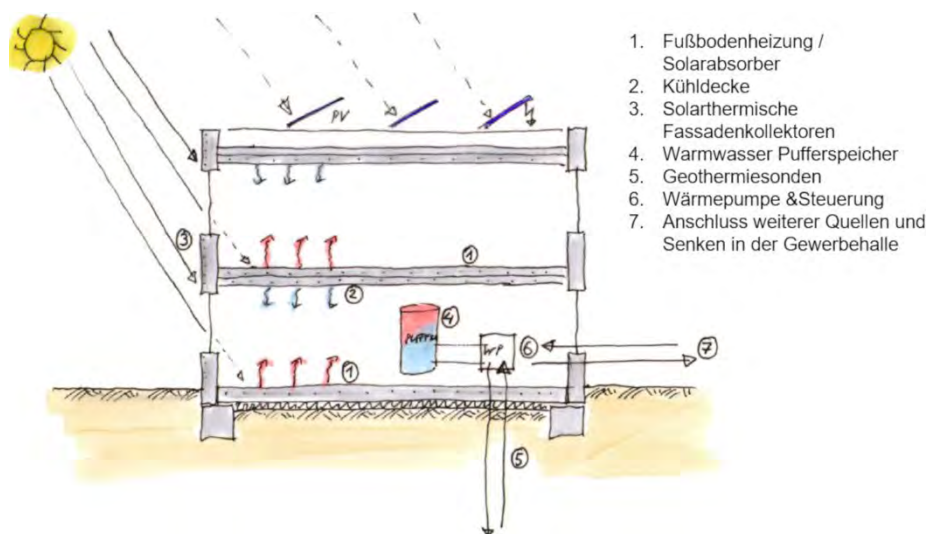


Abb. 4 Energiekonzept

Zentrales Element zur Gewinnung von Umweltwärme sind die Kollektorpaneele der Fassadenbekleidung (Abb. 5). Diese heizen sich bei direkter Sonneneinstrahlung auf bis zu 60 °C auf [1]. Nachts kühlen die Fassadenbleche unter die Lufttemperatur ab, da Wärmestrahlung an die Atmosphäre abgegeben wird – ein Effekt, den man im Herbst an vereisten Autoscheiben gut nachvollziehen kann. Diese Quellen und Senken kann man nutzen, indem ein wassergefüllter Pufferspeicher nachts abgekühlt wird. Tagsüber werden mit dem kühlen Wasser die Kühldecken beschickt.

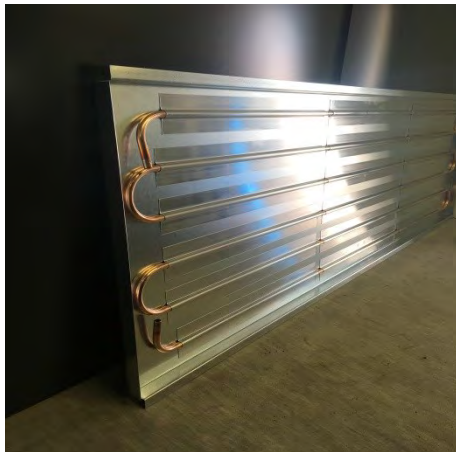


Abb. 5
Aktiviertes Stahlfassadenpaneel für ein VHF mit Rohrmäander aus Kupfer und Wärmeleitblechen aus Aluminium

Zum Beleg der Kapazität dieser Fassadenkollektoren werden mehrere Demonstratorbauteile mit diversen Konfigurationen gefertigt und auf ihre Leistung zur Wärmeabsorption und Wärmeabgabe geprüft. Ferner wird betrachtet, inwieweit sich der aktive Abtransport von Wärme von der Fassadenfläche positiv auf Solarzellen auswirkt, die in die Fassadentafeln integriert werden können.

3 Ergebnisse

Die Versuchsergebnisse aus beiden Projekten zeigen, dass fassadenintegrierte Kollektoren ein sehr hohes Potenzial haben, Umweltwärme für ein Gebäude nutzbar zu machen. Die Leistung der Kollektoren pro Fläche ist geringer als bei abgedeckten Solarkollektoren, allerdings liegen auch die Investitions-

kosten erheblich darunter. Somit liegt die Rendite für den Gewinn von Wärme auf vergleichbarem Niveau. Hinzu kommt die ganzjährige Nutzbarkeit des Systems über den Kühlungseffekt.

Ein weiterer architektonischer Vorteil des Systems ist, dass sich die Komponenten in viele unterschiedliche Fassadenbekleidungen integrieren lassen. Die Technik bleibt verdeckt. Somit spricht viel für eine großflächige Anwendung des Systems im Gewerbebau und mehrgeschossigen Wohn- und Verwaltungsbau.

Die Effizienz des Gebäudes als Ganzes wird in der Folge maßgeblich beeinflusst von der Vernetzung der Energiequellen und der intelligenten Steuerung. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf – unter Einbeziehung der Disziplinen Maschinenbau, Elektrotechnik und Informatik.

Referenzen

- [1] Feldmann, M.; Hachul, H.; Rexroth, S.: P880-Mehrdimensionale energieoptimierte Gebäudehüllen in Stahlleichtbauweise für den Industrie- und Gewerbebau, AiF-Forschungsvereinigung, Forschungsvereinigung FOSTA, 2014
- [2] Vilz, A.: Das Gebäudeenergiegesetz: aktueller Stand und Perspektiven, BBSR, 2019, http://www.enev-online.eu/geg_news/190530_geg_referentenentwurf_bericht_berliner_energetage_herdan_bmwi.htm#2. Das GEG_Vortrag_Andrea_Vilz (Stand 06.06.2019)
- [3] Spitzner, M.; Koschade, R.; Cammerer, J.: Forschungsvorhaben: Entwicklung eines Sandwichelements mit Energie-Akkumulation, Energieverteilung und Dämmung (SEA), Forschungsinstitut für Wärmeschutz e.V. München, 2010, http://www.fiw-muenchen.de/media/pdf/Energie_Akkumulation_bei_Sandwich-elementen.pdf (Stand 06.06.2019)
- [4] Hachul, H.: Industrieauseminar, Moderne Gebäudehüllen aus Stahl – Zukunft Bauen in Europa, Fintel, Vortrag 21.03.2019
- [5] Rockendorf, G.; Falk, S.; Wetzels, W.: Bedeutung und Bestimmung des Kollektorwirkungsgradfaktors bei Sonnenkollektoren. In: *Symposium Thermische Solarenergie*. Bad Staffelstein, 6, 1996. Regensburg: OTTI, S. 196–201
- [6] Giovannetti, F.; Weiland, F.; Kirchner, M.: Institut für Solarenergieforschung Hameln (ISFH), Leistungsfähigkeitstests, 2019
- [7] Industrieverband für Bausysteme im Metallleichtbau (IFBS), Statik-Bemessung von Sandwichbauteilen, 5.08, März 2006

Self-Learning Predictions for Optimizing Power Plant Operation and Energy Trading

Britta Hilt

IS Predict GmbH

Britta.hilt@ispredict.com

For Opel, we realized self-learning energy management systems for optimizing power plant operation and energy trading. Our Artificial Intelligence software PREDICTIVE INTELLIGENCE predicts energy demands and generations, analyzes machinery efficiencies and consequently, energy generation costs, simulates best possible multi-utility control center operation and controls machinery automatically, or gives recommendations for machine operator.

Project description

Opel has different locations. They require heat and energy for production. Opel has invested in heat and energy generation machinery, like steam gas turbines. They run most efficiently in CHP mode.

However, heat and energy demand varies a lot on different locations. Best efficiency for heat/electricity generation does not fit demand.

Opel trades energy at energy fair. However, it should only be traded if they make a good margin. Margin is not that easy to calculate because there are a lot of variables:

- How much energy/heat will be required in which locations when?
- How much will it cost to generate certain amount of heat / electricity? (Dynamic efficiency, depending on internal factors [age of turbine, last maintenance, ...], external factors [weather, ...] and on amount of energy produced [45th MW can be more expensive than 75th MW, but cheaper than 87th MW], ...)

To manage complexity, to reduce calculation work for traders and to achieve better overall margin, a system was required which

- predicts heat and electricity demands,
- calculates efficiency of turbines (15 min intervals),
- simulates best trading offers (considering changing prices at trade fair),
- recommends trading for traders (which products / which volume / which price).

When trading is confirmed, then, recommendation is generated for operator to run turbines, boilers, ...

Important for Opel: Processes are changing. Thus, the solution has to adapt itself to changed conditions / circumstances! (No continuous follow costs for Data Science customizing.)



PREDICT
INTELLIGENT SOLUTIONS

**SELBSTLERNENDE PROGNOSEN ZUR OPTIMIERUNG DES
KRAFTWERKBETRIEBES UND DER STROMVERMARKTUNG**

Künstliche Intelligenz macht's möglich!

www.opel.com - www.ispredict.com

OPEL/VAUXHALL

- Sitz der **Unternehmenszentrale**: Rüsselsheim
- Mehr als **37.000 Mitarbeiter***, davon mehr als **19.000 in Deutschland**
- Jährlich **über 1 Million verkaufte Autos**
- 2016 bis 2020: **29 neue Modelle**, 7 davon allein 2017.

* Stand 1. August 2017, ohne Mitarbeiter



OPEL
Das Unternehmen.
Die Marke.
Die Autos.

- 10 Fertigungsstätten
- 1 Designzentrum
- 1 Entwicklungszentrum
- 1 Testzentrum



ENERGIEVERSORGUNG RUE, KAI, BO



Energy & Utilities Service Group

- Gasbeschaffung (Ru/ESA)
- CO2-Zertifikathandel
- Energie-Vertragsmanagement (Europa)
- Strom- und Wärmeprognosen (Kraftwerke)

- ✓ Eigenstromerzeugung ermöglicht EEG Befreiung
- ✓ GuD in Rüsselsheim und Eisenach versorgen alle deutschen Standorte mit Strom



GuD-Anlage Standort Rüsselsheim

- Maximale Leistung: 111 MW_{el}
- Wärmeauskopplung: 38 MW_{th}
- Brennstoffnutzungsgrad: 88%
- Betriebsstunden: ca. 7500 h/a
- Erdgasverbrauch ca. 22.000 Nm³/h
- mit Mainwasser gekühlt

Wärme durch Kesselanlagen

GuD-Anlagen sind die konventionellen Energieerzeuger (abgesehen von Atomenergie) mit dem geringsten CO₂-Ausstoß

- Rüsselsheim (Rue)
- Kaiserslautern (Kai)
- Bochum (Bo)
- Energy Market
 - Day-Ahead (EEX)
 - Intraday (EEX)
 - Forward market (EEX)
 - Regelenergie (UNB)

EIGENVERSORGUNG - WUNSCH UND REALITÄT

PREDICT
INTELLIGENT SOLUTIONS 

Einerseits...

Das Ziel, Standorte
verlässlich und günstig mit
Strom / Wärme durch eigene
Erzeugungsanlagen zu
versorgen



Andererseits...

Hohe Dynamik in der Realität

- Strom-/Wärmebedarfe variieren stark
- Bedarfe passen nicht optimal zu den Erzeugungsanlagen
- Kosten für Erzeugung schwanken, abhängig von dynamischer Maschineneffizienz und technischen Restriktionen




2 Wochen Strombedarf in Bochum




2 Wochen Wärmebedarf in Rüsselsheim

STROMVERMARKTUNG

PREDICT
INTELLIGENT SOLUTIONS 

Querverbundoptimierung:
Größtmögliche Marge im Stromverkauf mit
geringsten Kosten für Strom-/Wärmeerzeugung




**Strombedarf
kleiner als
mögliche
Stromer-
zeugung**

- Die Anlagen könnten mehr Strom erzeugen, als in den Werken benötigt wird.
- Stromvermarktung sinnvoll, wenn lukrativ!
 - Ab welchem Preis ist der Stromhandel sinnvoll?
 - Welche Stromprodukte sollten verkauft werden?
 - Über welche Zeitperiode sollte verkauft werden?
 - Was kostet die Erzeugung zu welchem Zeitpunkt?
 - Soll Wärme durch GuD oder durch Kesselanlagen erzeugt werden?
 - ...


DYNAMIK MACHT DAS LEBEN SCHWER QUERVERBUNDOPTIMIERUNG		PREDICT INTELLIGENT SOLUTIONS	
Wie hoch wird Strombedarf?	Stromprognose für Rüsselsheim: Car Manufacturing, Power Train und Non-Manufacturing sowie für Kaiserslautern und Bochum		
Wie hoch wird Wärmebedarf?	Wärmeprognose für Rüsselsheim		
Effizienz der Stromerzeugungsanlagen	Effizienz abhängig vom Wetter, von den Wartungsaktivitäten und von der zu erzeugenden Strommenge, vom Brennstoffnutzungsgrad		
Was kostet die Stromerzeugung für welche Mengen wann?	Kosten abhängig von Gaskosten, Effizienz der Anlage, Strom-Begleitkosten wie bspw. EEG-Steuer (unterschiedlich pro Standort), Netzkosten, CO2-Emissionskosten, ...		
Was soll an der Strombörse verkauft/gekauft werden?	Unterschiedlichste Stromprodukte mit unterschiedlichen Preisen, unterschiedlichen Zeitintervallen und Restriktionen (Sekundärreserve, Minutenreserve, diverse Fixed Products, Stundenhandel, 15-Minuten-Handel, Notfall-Handel)		
Wie sollen Erzeugungsanlagen gefahren werden?	Empfehlung für Gas-Dampf-Turbine (Wärme/Strom) und Kesselanlagen (Wärme)		

SELBSTLERNENDE PREDICTIVE-INTELLIGENCE




PREDICT | Home | Asset tree | Calculations | User management | General data | Logout


Date: 01.11.2017 | Last week | Show




ELECTRICITY PRODUCTION
CP




TRADING
Electricity sale




ELECTRICITY CONSUMPTION
SOC
PAC
PUE



HEAT PRODUCTION
Tide



HEAT CONSUMPTION
Tide



PREDICTIVE INTELLIGENCE FOR OPEL


Überblick

- Mengen und Euro
- Für Wärme und Strom für Verbrauch und Erzeugung
- Sowie Stromhandel

8

SELBSTLERNENDE PREDICTIVE-INTELLIGENCE






Optimale Empfehlungen für den Stromhandel werden berechnet

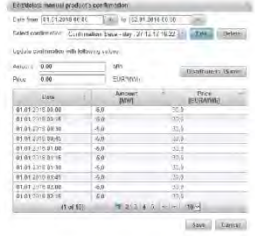
- Für die nächsten 13 Tage
- Für unterschiedliche Stromprodukte
- Unter Berücksichtigung der erzielbaren Preise der Strombörse

**Ziel: Querverbundoptimierung:
Größtmögliche Marge im Stromverkauf mit geringsten Kosten für Strom-/Wärmeerzeugung**

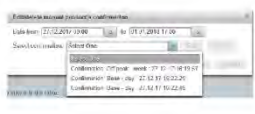
SELBSTLERNENDE PREDICTIVE-INTELLIGENCE

- **Trading-Prozess weitest gehend automatisiert**
 - Minutenreserve, Sekundärreserve (HT/NT), Stundenhandel, 15 min Handel, Intraday und After Day
 - E-Mail-Workflow wird automatisiert verarbeitet (Trading angeboten, Tradingangebot angenommen, Trading abgerechnet)
- **Bearbeitungsmasken für Stromprodukte**
 - Fixed Product (Base / Peak für Jahr, Quartal, Monat, Woche, Wochenende und Tag)
 - Emergency Trading
 - Intraday Trading







Time	Amount	Price
01.01.2019 00:00	0,0	70,3
01.01.2019 00:15	0,0	70,3
01.01.2019 00:30	0,0	70,3
01.01.2019 00:45	0,0	70,3
01.01.2019 01:00	0,0	70,3
01.01.2019 01:15	0,0	70,3
01.01.2019 01:30	0,0	70,3
01.01.2019 01:45	0,0	70,3
01.01.2019 02:00	0,0	70,3
01.01.2019 02:15	0,0	70,3
01.01.2019 02:30	0,0	70,3
01.01.2019 02:45	0,0	70,3
01.01.2019 03:00	0,0	70,3



Produktname	Produkttyp	Produktzeitraum
Produktname	Produkttyp	Produktzeitraum
Produktname	Produkttyp	Produktzeitraum

SELBSTLERNENDE PREDICTIVE-INTELLIGENCE






Stufe 1: Bilanzkreis

Stufe 2: Lokation

Stufe 3: Erzeuger


Stufe 3: Verbraucher



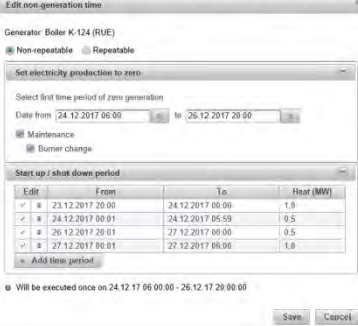
Eigenschaften pro „Asset“, bspw.

- Zuordnung zu Messzähler, zu Wetterstation, ...
- Maximalwerte (um Messfehler zu korrigieren)
- ...

SELBSTLERNENDE PREDICTIVE-INTELLIGENCE



Verwaltung aller „Assets“: Stromerzeugungsanlagen



- Ausfallzeiten festlegen, bspw. für Wartung
- Wartungshauptaktivitäten detaillieren, bspw. Austausch des Brenners (Einfluss auf Effizienz der Anlage)
- Anlauf- und Auslauf-Phasen festlegen (geringere Leistung)
- ...

SELBSTLERNENDE PROGNOSEN ZUR OPTIMIERUNG DES KRAFTWERKBETRIEBES UND DER STROMVERMARKTUNG

PREDICT
INTELLIGENT SOLUTIONS 

**Querverbundoptimierung:
Stromerzeugung zur optimalen Eigenstromnutzung und Strom-Vermarktung**



Ziel 1: Kostengünstig Eigenstrom für Automobilproduktion bereitstellen
Ziel 2: Stromerzeugungskosten querfinanzieren durch Vermarktung des „überschüssigen“ Stroms, wenn lukrativer Verkauf möglich

Problem: Eigener Strombedarf sehr volatil und schwer vorhersehbar
Strom wird erzeugt in Kombination mit Wärme (Gasturbine, Dampfturbine)
Kosten der Stromerzeugung ebenfalls volatil, da abhängig von dynamischen Faktoren
Verkaufspreise an der Börse stark schwankend


Weg: Prognose des Strombedarfs an den Produktionsstandorten
Prognose des Wärmebedarfs für Produktion und Gebäude
Dynamische Wirkungsgradprognosen für Erzeugungsanlagen
Grenzkostenkalkulation und Was-Wäre-Wenn-Simulationen
Dynamische und automatische Fahrplanerstellung


Ergebnis: * für Vermarktungsempfehlung
* für Maschinenbetrieb
Automatisierter Workflow für Stromhändler



35

Kontakt

PREDICT
INTELLIGENT SOLUTIONS 



Britta Hilt
Geschäftsführung IS Predict GmbH

IS Predict GmbH
Uni Campus Nord
D5.1 Scheer Tower
66123 Saarbrücken

M +49 176 63 72 92 28
T +49 681 96777 0
Britta.hilt@ispredict.com

36

Die Referenten/Autoren

Carina Balke, M.Sc.

Carina Balke ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für die Transformation des Energiesystems (ITE) der Fachhochschule Westküste in der Fachgruppe Netzintegration/Automatisierung von Energienetzen. Frau Balke ist Leiterin der Arbeitspakete zur Automatisierung im Projekt QUARREE100, eines von sechs in der Förderinitiative Solares Bauen/Energieeffiziente Stadt vom BMBF geförderten Projekten.

Andreas Becker, Prof. Dr.-Ing.

Andreas Becker ist zum 1.1.2016 an die Fachhochschule Dortmund berufen worden, um das Lehrgebiet Informationstechnik und Embedded Systems zu vertreten. Er hat an der Universität Wuppertal studiert und promovierte über die Entwicklung numerischer Verfahren zur Lösung elektromagnetischer Feldprobleme. Ein Anwendungsgebiet waren dabei Radarsensoren zur Untersuchung von Endlagerstätten für kerntechnische Abfälle.

In seiner Industrietätigkeit war Prof. Becker bei zwei Zulieferern der Automobilindustrie, zuletzt als Technical Manager, beschäftigt. Im Rahmen beider Anstellungen befasste er sich u. a. mit der Entwicklung von Radarsensoren für Fahrerassistenzsysteme. Dabei waren die Bereiche Signalverarbeitung und Systemauslegung Schwerpunkte seiner Arbeit.

Die aktuellen F&E-Aktivitäten von Prof. Becker werden geprägt durch die Themenschwerpunkte Radarsignalverarbeitung, Zielverfolgung, Kartierung und Verkehrstechnik.

Prof. Becker ist Mitglied im VDE, IEEE sowie der Arbeitsgemeinschaft Robotik der Fachhochschule Dortmund und Direktor der Ruhr Master School.

Peter Brucksch

Als Manager Projektsteuerung im Bereich Geschäftsentwicklung bei der Netze BW GmbH identifiziert und betreut Peter Brucksch Projekte, die das Geschäft eines Netzbetreibers in Zukunft beeinflussen können.

Martin Doster, Dipl.-Ing. Energie-Technik

DEKRA SE, Information Technology (IT), Functional Head International Office, Analytik und Design von Informations-Prozessen auf Engineering- und Business-Ebene.

Thiemo Ebbert, Dr.-Ing. Architekt

Thiemo Ebbert ist wissenschaftlicher Mitarbeiter des Lehr- und Forschungsgebiets Architektur + Metallbau an der Fachhochschule Dortmund. 2010 wurde er an der TU Delft in den Niederlanden zum Dr.-Ing. promoviert. Sein Forschungsschwerpunkt liegt in der integralen Planung von Fassaden- und Gebäudetechnik von Nichtwohngebäuden bei Sanierungen und Neubau. Neben der Tätigkeit an der FH Dortmund ist er Partner in einem Bochumer Architekturbüro für ganzheitliche Planung und Energieberater.

Helmut Hachul, Prof. Dr.-Ing.

Helmut Hachul ist seit 2006 Professor an der Fachhochschule Dortmund und leitet das Lehr- und Forschungsgebiet „Architektur + Metallbau“. Des Weiteren ist er seit 2008 Studiengangsleiter des Masterstudiengangs „Gebäudehüllen aus Metall“. Herr Hachul ist seit 2013 Kuratoriumsmitglied der FOSTA (Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V.)

Britta Hilt

Co-Founder & Managing Director IS Predict GmbH

Background

- Director Product Management & Solution Marketing, IDS Scheer AG/Software AG.
- Product Manager for ARIS Platform products with top sales turnover, IDS Scheer AG
- Solution Manager for ARIS Solution with top sales turnover, IDS Scheer AG
- Senior Manager for ARIS Product Consulting, IDS Scheer GmbH/AG
- Core Service Manager for ARIS Software Training, IDS Scheer GmbH
- Since 1995, experience in international consulting and product management, most of the time in leading roles

Michael Karagounis, Prof. Dr.

ist auf die Entwicklung von Digital- und Analog-/Mixed-Signal-CMOS-Schaltungen spezialisiert und hat umfangreiche Design-Erfahrungen sowohl im industriellen als auch im akademischen Umfeld sammeln können. Im Rahmen seiner Tätigkeit als Entwicklungs-Ingenieur bei Intel Mobile Communications hat er den Entwurf einer Phase-Lock Loop (PLL) zur Frequenzvervielfachung

auf 2,2 GHz in einer 28 nm CMOS-Technologie für die Anwendung in einem Empfänger zur Satellitennavigation maßgeblich vorangetrieben. Während seiner Industrietätigkeit bei der Infineon-Tochter EPOS GmbH & Co KG hat er an der Entwicklung eines integrierten digitalen Spannungsreglers für den Aurix-Mikrocontroller mitgewirkt. Prof. Karagounis ist Mitglied der RD53 und ATLAS-CERN-Kollaboration und im Rahmen des vom BMBF geförderten Projektes „R&D Detektoren (Tracking): Integrierte Spannungsregler und Kontrolleinheiten für die Versorgung von hybriden Pixeldetektoren“ an der Entwicklung eines energieoptimierten Auslesechips in 65 nm CMOS für den hybriden Pixeldetektor des ATLAS-Experimentes am LHC beteiligt.

Nursi Karaođlan, M.Eng.

Nursi Karaođlan ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kommunikationstechnik der FH Dortmund und mitverantwortlich für das Forschungsprojekt SENSE – Semantic, Interoperable Smart Home. Seine Tätigkeitsfelder umfassen die Forschung und Entwicklung in den Schwerpunktthemen Datenmodellierung, Datenbanken und Cyber Physical Systems.

Fabian Karl

Fabian Karl studierte Erneuerbare Energien und Energietechnik an der Universität Stuttgart. Bei der Power Plus Communications AG arbeitet er in den Forschungsprojekten „Fühler im Netz 2.0“ und „enera“ an innovativen Lösungen für das digitalisierte Energiesystem und ist Produktmanager für das Sensor BPL Modem.

Aybars Kizilay

System Engineer R&D Radar Applications at Konrad Technologies. Aybars graduated with honor degree from University of Liverpool as Electronic Engineer in 2016. After his bachelor degree, he completed master degree in Embedded Systems at Fachhochschule Dortmund in 2018, where he has focused in automotive radar and ADAS technologies. Aybars worked at Audi AG, Ingolstadt, in the radar development department and wrote his master thesis named “Efficient methods for determining software and hardware failures of automotive radars using a radar target simulator”. Presently, he is working at Konrad Technologies in the field of test technologies for ADAS.

Fabian Kohlmorgen, M.Eng.

Fabian Kohlmorgen ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kommunikationstechnik der FH Dortmund und mitverantwortlich für das Forschungsprojekt SENSE – Semantic, Interoperable Smart Home. Seine Tätigkeitsfelder umfassen die Forschung und Entwicklung in den Schwerpunktthemen Datenmodellierung, Semantic-Web-Technologien und Cyber Physical Systems.

Kevin Krüger, M.Sc.

hat Maschinenbau an der Leibniz Universität Hannover studiert. Seit 2017 ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Labor für Feinsystemtechnik an der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe angestellt. Weiterführend erfolgt nun die Promotion in Kooperation mit der Universität Duisburg-Essen.

Markus Kuller, M.Eng.

Markus Kuller ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kommunikationstechnik der FH Dortmund und mitverantwortlich für das Forschungsprojekt Guided Autonomous Locations. Seine Tätigkeitsfelder umfassen die Koordination von Forschungsprojekten des IKT sowie die Entwicklung im Bereich Cyber-Physical Systems.

Daniela Ridder, M.Sc.

Daniela Ridder ist wissenschaftliche Mitarbeiterin des Lehr- und Forschungsgebiets Architektur + Metallbau an der Fachhochschule Dortmund. Seit 2017 koordiniert sie das Forschungsprojekt „Solare Stahlsandwichelemente“. Sie ist auch Doktorandin an der Universität Siegen am Lehrstuhl für Tragkonstruktion in Kooperation mit der Fachhochschule Dortmund am Fachbereich Architektur. Ihr Forschungsschwerpunkt liegt im Bereich der ressourcenschonenden und materialeffizienten Ausführung von Fassadenunterkonstruktion aus feuerverzinktem Stahl.

Matthias Schlegel

Als Senior Projektleiter bei Fichtner GmbH & Co. KG berät Matthias Schlegel Unternehmen von der Entwicklung von Geschäftsmodellen bis zur Abwicklung konkreter Vorhaben im Bereich Wasserstoff.

Reiner Johannes Schütt, Prof. Dr.-Ing.

Reiner Schütt ist seit 1998 Professor für Steuerungen/Elektrische Antriebe an der Fachhochschule Westküste und Leiter der Arbeitsgruppe Netzintegration / Automatisierung von Energienetzen am Institut für die Transformation des Energiesystems (ITE) der Fachhochschule Westküste. Er arbeitet seit mehr als 20 Jahren in zahlreichen Gremien und Vereinigungen für den Umbau der Energieversorgung.

Christian Schweitzer

Christian Schweitzer absolvierte sein Ingenieurstudium an der Fachhochschule Aachen. Weiterhin erhielt er 1999 seinen Bachelor of Business Administration vom St. Gallen Management Institute, Schweiz. Seit 1995 ist Herr Schweitzer Geschäftsführer der bse Engineering Leipzig GmbH, ein im Großanlagenbau tätiges unabhängiges Planungsunternehmen für Neu- sowie Ersatz- und Instandhaltungsinvestitionen. Im Rahmen der Geschäftsführung beschäftigt sich Herr Schweitzer seit 2001 mit Biokraftstoffen und dort mit der technischen, technologischen, normativen und wirtschaftlichen Beratung mit seinem interdisziplinären Team. Biomethanol ist seit 2008 ein Thema in der Anlagenplanung und -errichtung und Methanol als Projekt für die Kohlenstoffabscheidung und -nutzung seit 2013. Hier hat Herr Schweitzer auf die Anlagenintegration ein Gebrauchsmuster und Patente erhalten.

Jian Song, Dr.-Ing.

ist Professor an der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe und leitet den dortigen Forschungsschwerpunkt „Innovative Werkstoffe“ sowie das Labor für Feinsystemtechnik.

Matthias Wendel

Diplom-Ingenieur (Anlagenbetriebstechnik), Diplom-Wirtschaftsingenieur und MBA; Regionaldirektor/Senior Vice President bei der E.ON Energie Deutschland, verantwortlich für den Verkauf von Energielösungen. Zuvor Mitglied der Geschäftsleitung bei Spilling Technologies GmbH (Hamburg) sowie Vorstand bei der BTO Management Consulting AG (Berlin) und Gesellschafter der em.e Beratungs- und Beteiligungsgesellschaft mbH (Jesteburg); zuvor Vorstand und Geschäftsführer in unterschiedlichen Energieversorgungsunternehmen in Deutschland.

Felix Wentzel

Student an der Hochschule Hamm-Lippstadt im Studiengang Biomedizinische Technologie mit dem Studienschwerpunkt Informatik.

Ursel Willrett

Frau Willrett studierte Elektrotechnik, Fachrichtung Nachrichtentechnik, in Stuttgart. Sie arbeitete 22 Jahre in der Telekommunikationsbranche in verschiedenen Projekten für moderne Mobilfunksysteme. Seit April 2008 ist Frau Willrett bei der IAV GmbH tätig. Insgesamt fünf Jahre bearbeitete sie in E-Mobilitätsprojekten die HV-Sicherheit. Seit vier Jahren ist sie verantwortlich für alle Fachthemen zu Infrastruktursystemen E-Mobilität. Sie vertritt das Thema intern, aber auch extern, bei Kunden und in Gremien.

Hendrik Wöhrle, Prof. Dr.

studierte Bioinformatik sowie Elektro- und Informationstechnik an der FU Berlin und der Fernuni Hagen. Nach Tätigkeit in der Industrie wechselte er an das Robotics Innovation Center des Deutschen Forschungszentrums für Künstliche Intelligenz und promovierte über spezialisierte Rechnerarchitekturen für die Robotik an der Universität Bremen. Seit 2019 ist er Professor für Intelligente Autonome Sensor- und Aktor-Systeme an der Fachhochschule Dortmund.

Seine Forschungsgebiete sind die Entwicklung von Rechnerarchitekturen für das maschinelle Lernen in miniaturisierten und eingebetteten Systemen, Robotik und Biomedizintechnik sowie die Entwicklung und Anwendung von maschinellen Lernverfahren für die Signalverarbeitung, den Entwurf von Hardware-Architekturen und robotischen Systemen. Hendrik Wöhrle ist Reviewer zahlreicher internationaler Zeitschriften und Konferenzen.

Haomiao Yuan, M.Sc.

hat Metallurgical Engineering an der RWTH Aachen studiert. Seit 2015 ist sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin im Labor für Feinsystemtechnik an der Technischen Hochschule Ostwestfalen-Lippe angestellt. Weiterführend erfolgt nun die Promotion in Kooperation mit der RWTH Aachen.

Nikolaos Zacharias, Dipl.-Ing. (FH)

studierte Elektrotechnik mit Schwerpunkt Automatisierungstechnik. Als Leiter der Business Unit Smart Building Solutions verantwortet er die zukunftsweisenden Gebäudeautomationslösungen der MICROSENS GmbH & Co. KG.

Die Herausgeber

Prof. Dr. Uwe Großmann



Prof. Dr. Großmann war von 1987 bis 2015 Professor für Mathematik und Datenverarbeitung an der Fachhochschule Dortmund. Seit 2015 ist er Seniorprofessor für Wirtschaftsinformatik am Fachbereich Wirtschaft und Mitglied des Instituts für Digitalisierung der Lebens- und Arbeitswelt (IDiAL) der FH Dortmund. Er ist InnovationsPartner der InnovationsAllianz der NRW-Hochschulen e.V. und war Sprecher des Forschungsschwerpunktes „Mobile Business – Mobile Systems“ der FH Dortmund. Prof. Großmann ist als Gutachter für nationale Förderprogramme und internationale Fachjournale tätig sowie Mitglied in Programmbeiräten und Lenkungskreisen nationaler und internationaler Fachkongresse. Prof. Großmann leitete und leitet nationale und internationale Drittmittelprojekte. Seine Forschungsinteressen liegen im Bereich neuer kooperativer Geschäftsmodelle für digitalisierte Service-Netzwerke.

Prof. Dr. Ingo Kunold



Ingo Kunold erhielt 1992 den Ruf an die FH Dortmund und vertritt dort das Lehrgebiet Kommunikationssysteme und -netze. Er leitet seit der Gründung im Jahr 2001 das Institut für Kommunikationstechnik sowie seit 1995 den gleichnamigen Forschungsschwerpunkt und ist seit 2003 Sprecher der von der Landesregierung Nordrhein-Westfalen eingerichteten Kompetenzplattform Kommunikationstechnik und Angewandte Signalverarbeitung NRW. Schwerpunkte seiner Arbeiten in Forschung und Entwicklung sind Analyse- und Syntheseverfahren in der digitalen Signalverarbeitung, NGN-Kommunikations-Energieinformations- sowie Smart-Home- und Smart-Building-Systeme im Internet der Dinge. Wesentlicher Teil der letztgenannten Arbeiten sind ebenfalls semantische Datenmodelle und interoperable intelligente Systeme, die zumindest teilautonom in vertraulichen Umgebungen interagieren. Als Projektleiter führte er mehrere Forschungs- und Lehrprojekte auf nationaler und europäischer Ebene in den vorgenannten Bereichen in Zusammenarbeit mit Industriepartnern durch, wobei der Schwerpunkt der Arbeiten aktuell bei seman-

tisch interoperablen Smart-Home- und Smart-Building-Systemen mit den Schwerpunkten Energiemanagement, Komfort und Sicherheit liegt. In der akademischen Selbstverwaltung der FH Dortmund war er als Prorektor für Forschung und Entwicklung sowie als Dekan des Fachbereichs Informations- und Elektrotechnik (IET) tätig. Er ist Vorsitzender der Akkreditierungskommission und Studiengangsleiter für den Masterstudiengang Informationstechnik sowie Koordinator für Internationales des Fachbereichs Informationstechnik. Im Jahr 2013 wurde er zum Direktor der Ruhr Master School of Applied Engineering berufen, die die Masterstudienangebote der Fachhochschulen im Ruhrgebiet koordiniert. Ingo Kunold ist auf der nationalen sowie internationalen Ebene als Fach- und Hauptgutachter im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik sowie der digitalen Signalverarbeitung tätig. Er ist seit 1982 Mitglied im VDE und im IEEE.

Programmbeirat der Konferenz „Smart Energy and Systems“ 2019

Herr Prof. Dr. A. Becker (Ruhr Master School, FH Dortmund)

Herr Dipl.-Ing. M. Doster (DEKRA SE)

Herr Prof. Dr. U. Großmann (IDiAL FH Dortmund)

Herr Prof. Dr.-Ing. R. Holzhauer (Westfälische Hochschule, Zentrum für Recyclingtechnik; VDI GEU)

Frau Dr. B. Horster (VIVAI Software AG)

Herr Prof. Dr. P. J. Kühn (IKR Uni Stuttgart)

Herr Prof. Dr. I. Kunold (Direktor Ruhr Master School, IKT FH Dortmund)

Herr Prof. Dr. C. Rehtanz (TU Dortmund)

Herr Dr. J. F. Rettberg (Stadt Dortmund)

Herr Prof. Dr. E. Zielinski (Beauftragter der Alcatel-Lucent-Stiftung)

Weitere Titel aus dem vwh-Verlagsprogramm (Auszug)

Tagungsbände „Smart Energy“

U. Großmann/I. Kunold (Hg.): Smart Energy 2010 Innovative, IKT-orientierte Konzepte für den Energiesektor der Zukunft 2010, 24,50 €, ISBN 978-3-940317-79-7

U. Großmann/I. Kunold (Hg.): Smart Energy 2011 Smart Grid oder die Zukunft der Energiewirtschaft 2011, 23,50 €, ISBN 978-3-86488-004-9

U. Großmann/I. Kunold (Hg.):

Smart Energy 2012

Wie smart ist der Weg zur Energiewende? 2012, 27,50 €, ISBN 978-3-86488-030-8

U. Großmann/I. Kunold/C. Engels (Hg.):

Smart Energy 2013 Wie smart ist Deutschland im europäischen Kontext? 2013, 24,50 €, ISBN 978-3-86488-055-1

U. Großmann/I. Kunold/C. Engels (Hg.):

Smart Energy 2014 Energiewende quer gedacht 2014, 25,80 €, ISBN 978-3-86488-073-5

U. Großmann/I. Kunold/C. Engels (Hg.):

Smart Energy 2015 Energiewende regional – Trends, Treiber, Allianzen 2015, 26,80 €, ISBN 978-3-86488-093-3

U. Großmann/I. Kunold/C. Engels (Hg.):

Smart Energy 2016 Digitalisierung der Energieversorgung – Treiber und Getriebene 2016, 24,80 €, ISBN 978-3-86488-112-1

U. Großmann/I. Kunold/C. Engels (Hg.):

Smart Energy 2017 Dezentrale Systeme – Wie smart ist die schöne neue Energiewelt? 2017, 27,50 €, ISBN 978-3-86488-125-1

U. Großmann/I. Kunold/C. Engels (Hg.):

Smart Energy 2018 Vom Smart Home bis zur Smart City – Aspekte der Digitalisierung 2018, 28,90 €, ISBN 978-3-86488-144-2

U. Großmann/I. Kunold/C. Engels (Hg.):

Smart Energy 2018 Vom Smart Home bis zur Smart City – Aspekte der Digitalisierung 2018, 28,90 €, ISBN 978-3-86488-144-2

U. Großmann/I. Kunold/C. Engels (Hg.):

Smart Energy 2018 Vom Smart Home bis zur Smart City – Aspekte der Digitalisierung 2018, 28,90 €, ISBN 978-3-86488-144-2

Reihe „Multimedia“

J. Sieck (Hg.): Wireless Communication and Information „Car to Car, Sensor Networks and Location Based Services“

2010, UVP 9,80 €, ISBN 978-3-940317-81-0

J. Sieck (Hg.): Wireless

Communication and Information

„Digital Divide and Mobile Applications“

2011, UVP 10,80 €, ISBN 978-3-86488-000-1

R. Franken-Wendelstorf/E. Lindinger/

J. Sieck (Hg.): Kultur und Informatik

„Reality & Virtuality“ (Tagung Berlin, Mai

2014) 2014, 27,50 €, ISBN 978-3-86488-064-3

J. Sieck (Hg.): Wireless Communica-

tion and Information „Digitale Gesell-

schaft“ (Tagung Berlin, Okt. 2014)

2014, 26,90 €, ISBN 978-3-86488-071-1

C. Busch/J. Sieck (Hg.): Kultur

und Informatik „Augmented Reality“

2016, 29,80 €, ISBN 978-3-86488-103-9

C. Busch/C. Kassung/J. Sieck (Hg.):

Kultur und Informatik „Mixed Reality“

2017, 29,80 €, ISBN 978-3-86488-119-0

C. Busch/C. Kassung/J. Sieck (Hg.):

Kultur und Informatik „Hybrid Systems“

2018, 28,50 €, ISBN 978-3-86488-128-2

C. Busch/C. Kassung/J. Sieck (Hg.):

Kultur und Informatik

„Virtual History and Augmented Present“

2019, 28,50 €, ISBN 978-3-86488-147-3

Reihe „Schriften zur

Informationswissenschaft“

A. Warta: Kollaboratives Wissens-

management in Unternehmen

2011, 30,90 €, ISBN 978-3-940317-90-2

M. Görtz: Social Software as a Source

of Information in the Workplace

2011, 31,90 €, ISBN 978-3-86488-006-3

B. Heuwing: Usability-Ergebnisse als

Wissensressource in Organisationen

2015, 35,80 €, ISBN 978-3-86488-084-1

Reihe „Medienwirtschaft“

J.-F. Schrape: Open-Source-Projekte als

Utopie, Methode und Innovationsstra-

ategie Historische Entwicklung – sozio-

ökonomische Kontexte – Typologie

2016, 17,90 €, ISBN 978-3-86488-089-6

weitere Schriftenreihen des vwh-Verlages

(s. www.vwh-verlag.de):

E-Humanities · E-Learning · Web 2.0/

Webwissenschaft · E-Collaboration ·

AV-Medien · Typo|Druck · Game Stu-

dies · Medientheorie · Kleine Schriften

· Schriften des Innovators Club

vwh

Aktuelle Ankündigungen, Inhaltsverzeichnisse und Rezensionen finden Sie im vwh-Blog unter www.vwh-verlag.de/.

Das komplette Verlagsprogramm mit Buchbeschreibungen sowie eine direkte Bestellmöglichkeit im vwh-Shop finden Sie unter www.vwh-verlag-shop.de.

Am 4.–5.11.2019 fand die 10. Smart Energy Conference unter dem diesjährigen Titel „Digitalisierung – Anwendungen in Technik und Industriegesellschaft“ statt.

Im Verlauf der Tagung wurde dargestellt, wie stark die Digitalisierung mittlerweile unsere Lebens- und Wirtschaftsbereiche durchdringt. Vom Smart Home über das Smart Grid bis zur Smart City werden zunehmend Daten analysiert und Prozesse digitalisiert, um neue Wertschöpfungsketten zu schaffen und komplexe Anwendungsfälle umzusetzen.

Im vorliegenden Konferenzband berichten namhafte Autoren aus Wirtschaftsunternehmen sowie Hochschulen und Forschungseinrichtungen über ihre Arbeiten in den Bereichen „Digitalisierung und autonome Systeme“, „Intelligente Energiesysteme“, „Connected, Safe and Green Mobility“ sowie „Energie und Umwelt“.

Die Zielgruppen der Tagung stellen leitende Mitarbeiter und Fachleute aus den technischen Bereichen Energie und Umwelt, Automotive, Smart Home sowie Unternehmen der IKT-Branche, Wissenschaft und Forschung sowie junge Ingenieure und Studierende dar. Neue Ansätze und Impulse im Bereich der Digitalisierung und Vernetzung in den genannten Themenbereichen wurden in den Vorträgen und Podiumsdiskussionen erörtert und engagiert diskutiert.



In der Ruhr Master School (RMS) bündeln die Hochschule Bochum, die Fachhochschule Dortmund und die Westfälische Hochschule ihre Kompetenzen in den Bereichen Ingenieurwissenschaft, Informatik, Nachhaltigkeit und Wirtschaft. Sie bietet den Studierenden die Möglichkeit, interdisziplinär, vernetzt und praxisnah zu studieren. Gefördert wird die RMS durch die Stiftung Mercator.

Die Stiftung Mercator ist eine private Stiftung, die Wissenschaft, Bildung und internationale Verständigung fördert. Sie verfolgt klar definierte gesellschaftspolitische Ziele in ihren Clusterthemen Europa, Integration, Klimawandel und kulturelle Bildung. Als eine führende Stiftung in Deutschland mit Sitz im Ruhrgebiet ist die Stiftung Mercator sowohl regional, national als auch international tätig.

Die Fachhochschule Dortmund bietet ein Forschungsumfeld, das häufig interdisziplinäre Arbeiten und innovative Ergebnisse hervorbringt. Neue politische und technische Entwicklungen in der Digitalisierung insbesondere in den Bereichen Intelligenter Energieinformationssysteme, Wohnungen, Gebäude und Quartiere führten zu einer Kooperation des Institutes für Digitalisierung von Arbeits- und Lebenswelten mit dem Institut für Kommunikationstechnik der FH Dortmund.

www.vwh-verlag.de

28,90 € (D)
29,71 € (A)
35,80 CHF

ISBN: 978-3-86488-159-6

