



KIT SCIENTIFIC REPORTS 7736

# **Jahresbericht 2016**

Institut für Angewandte Informatik

Rainer Weidemann (Hrsg.)



Rainer Weidemann (Hrsg.)

**Jahresbericht 2016**

Institut für Angewandte Informatik

Karlsruhe Institute of Technology  
**KIT SCIENTIFIC REPORTS 7736**

# Jahresbericht 2016

Institut für Angewandte Informatik

Herausgegeben von  
Rainer Weidemann

**Impressum**



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
KIT Scientific Publishing  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark  
of Karlsruhe Institute of Technology.  
Reprint using the book cover is not allowed.

[www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu)



*This document – excluding the cover, pictures and graphs – is licensed  
under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License  
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons  
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2017 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 1869-9669

DOI 10.5445/KSP/1000069249





# Inhaltsverzeichnis

<b>Einführung</b> .....	<b>1</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>3</b>
Programm SCI .....	3
Programm EMR .....	4
Programm RE .....	5
Programm TIS .....	5
Programm BIFTM .....	6
Programm STN.....	6
Programm SBD.....	7
<b>Programm SCI: Storage and Cross-linked Infrastructures</b> .....	<b>9</b>
Networks and Storage Integration .....	9
Energy Lab 2.0 .....	16
Energy System 2050 .....	23
<b>Programm EMR: Energy Efficiency, Materials and Resources</b> .....	<b>31</b>
Vergasung .....	31
Mineralische Konstruktionsmaterialien .....	37
<b>Programm RE: Renewable Energies</b> .....	<b>43</b>
Effiziente Nutzung geothermischer Energie .....	43
Konversion.....	49
<b>Programm TIS-E: Technology, Innovation and Society / Energy</b> .....	<b>53</b>
Energy – Resources, Technologies, Systems.....	53
<b>Programm TIS-KT: Technology, Innovation and Society / Key Technologies</b> .....	<b>57</b>
Innovation Processes and Impacts of Technology .....	57
<b>Programm BIFTM: BioInterfaces in Technology and Medicine</b> .....	<b>61</b>
Biologische Netzwerke und Synthetische Regulatoren.....	61
<b>Programm STN: Science and Technology of Nanosystems</b> .....	<b>65</b>
Systemintegration .....	65
<b>Programm SBD: Supercomputing &amp; Big Data</b> .....	<b>77</b>
Data Life Cycle Labs.....	77
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>79</b>
Publikationen, die in Web of Science oder Scopus verzeichnet sind.....	79
Sonstige Publikationen, die in schriftlicher Form vorliegen .....	84
Vorträge, die nicht in schriftlicher Form vorliegen .....	89
Poster und sonstige Publikationen .....	94



# Einführung

Das Institut für Angewandte Informatik (IAI) ist ein Forschungsinstitut des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) in der Helmholtz-Gemeinschaft (HGF). Es betreibt Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet innovativer, anwendungsorientierter Informations-, Automatisierungs- und Systemtechnik für zukunftsfähige Energiesysteme sowie komplexe Industrie- und Laborprozesse.

Im Institut werden im Rahmen der programmorientierten Förderung (PoF) Systemlösungen für Aufgabenstellungen aus den HGF-Programmen Storage and Cross-linked Infrastructures (SCI), Energy Efficiency, Materials and Resources (EMR), Renewable Energies (RE), Technology, Innovation and Society (TIS), BioInterfaces in Technology and Medicine (BIFTM), Science and Technology of Nanosystems (STN) und Supercomputing & Big Data (SBD) erarbeitet. Die FuE-Vorhaben umfassen alle Entwicklungsphasen vom Konzeptentwurf bis zur Prototypenherstellung und praktischen Erprobung und beinhalten neben der Systemrealisierung auch die Entwicklung neuartiger Informatik- und Automatisierungsmethoden und -werkzeuge, die im Rahmen der Systemerstellung eingesetzt und weiterentwickelt werden.

Die Vorhaben werden in interdisziplinärer Kooperation mit Partnern aus Industrie, Verwaltung und anderen Forschungseinrichtungen im In- und Ausland bearbeitet. Das Institut ist u.a. an Projekten der EU, des BMBF, des Landes, der DFG, der AiF und der Industrie beteiligt. Die Mitarbeiter des Instituts sind vielseitig in Normungsgremien, Fach- und Gutachtergremien sowie Programmkomitees aktiv.

Das IAI ist maßgeblich an Planung und Aufbau der Forschungsinfrastruktur „Energy Lab 2.0“ beteiligt, mit der Wechselwirkungen verschiedener Komponenten zukünftiger Energiesysteme untersucht werden sollen. Diese Aufgaben werden programm- und arbeitsgruppenübergreifend koordiniert und bearbeitet, ebenso wie weitere in diesem Umfeld angesiedelte Großprojekte, an denen das Institut mitwirkt. Dazu gehören die HGF-Initiative Energy System 2050 (ES 2050), das BMBF-Vorhaben Kopernikus ENSURE (Neue EnergieNetzStruktURen für die Energiewende) und das Campus Living Lab Energy, als Infrastrukturmaßnahme für ein nachhaltiges lokales Energiesystem auf der Basis dezentralisierter und erneuerbarer Energien.

Das IAI wird von Herrn Prof. Dr. Veit Hagenmeyer geleitet. Herr Prof. Hagenmeyer hat auch einen Lehrstuhl für Energieinformatik am Institut für Telematik (TM) der Fakultät für Informatik des Campus Süd inne. In der Fakultät für Maschinenbau werden in Nachfolge des ehemaligen Institutsleiters Prof. Dr.-Ing. Georg Brettbauer von weiteren Mitarbeitern des Instituts die Themenbereiche Automatisierungstechnik und Mechatronik in der Lehre vertreten.

Am 31.12.2016 waren am Institut für Angewandte Informatik 72 wissenschaftliche Mitarbeiter, 6 sonstige Mitarbeiter, 10 Doktoranden, 15 DHBW-Studenten und 11 Auszubildende beschäftigt.

Nach einem kurzen Überblick über die Arbeiten des Instituts wird über die Ergebnisse im Jahre 2016 berichtet, die Einordnung erfolgt entsprechend der Zuordnung der Vorhaben zu den HGF-Programmen. Es schließt sich ein Verzeichnis der im Berichtszeitraum erschienenen Publikationen des Instituts an.



# Kurzfassung

## Programm SCI

Die topologische Modellierung und Visualisierung der Stromnetze „KIT Campus Nord (KIT-CN) Mittelspannungsnetz“, „Karlsruhe und Baden-Württemberg“, „Transport- und 110 kV-Netze Deutschland“ und „Transportnetz Europa“ in Google-Earth ist weitgehend abgeschlossen. Die Netzmodelle KIT-CN, Karlsruhe und Deutschland sind auch in der institutseigenen Software eASiMOV (MATLAB/Matpower) und in PowerFactory (DIgSILENT) parametrisiert verfügbar. Neben der bereits für GPU-Computerarchitekturen verfügbaren Solver-Software für Lastfluss-Berechnungen wurde ein neues Simulations-Modul für den massiv-parallelen Supercomputer ForHLR-2 entwickelt. Die eASiMOV-Solver wurden auf ForHLR-2 portiert und mit dem IEEE 9241-Bus European Test Model und 6-wöchigen Last-Zeitreihen getestet. Ergebnis: Der Solver skaliert sehr gut auf ForHLR-2. Das E.DR-Strommesssystem für zeitsynchrone, hochfrequente Datenerfassung im Nieder- und Mittelspannungsnetz wurde – auch im Hinblick auf den Einsatz im Energy Lab 2.0 – grundlegend überarbeitet und erfolgreich getestet.

Im Rahmen der Arbeiten zu neuen Methoden der Regelungstechnik und Systemtheorie mit Anwendungen in den Bereichen Energiesysteme, Mechatronik und Verfahrenstechnik werden Verfahren zur optimierungs-basierten und nichtlinearen Regelung multi-modaler Energiesysteme entwickelt. Von zentraler Bedeutung ist hierbei die strukturierte Berücksichtigung nicht-konvexer Problemformulierungen und nichtlinearer Dynamik von Komponenten, Beschränkungen der Stell- und Zustandsgrößen, Modell- und Prognoseunsicherheiten (in Bezug auf Verbrauch und Erzeugung) sowie Ausnutzung und Berücksichtigung der realen Systemtopologie im Kontext verteilter und dezentraler Umsetzung.

Das Kopernikus-Projekt ENSURE verfolgt mit einem ganzheitlichen systemischen Ansatz das Ziel, neue Energienetzstrukturen für die Energiewende zu erforschen und bereitzustellen. Das Projekt, an dem über 20 Institutionen beteiligt sind, u.a. die Firmen E.ON, ABB, Siemens und TenneT, wurde Ende 2016 begonnen. Das IAI ist an vier Arbeitspaketen beteiligt.

Im Bereich der Sicherheit von Energienetzen wurden eine Analyse typischer Angriffsszenarien sowie die Definition einer zugrunde liegenden beispielhaften Systemstruktur von Energiesystemkomponenten mit entsprechenden Kommunikationsbeziehungen begonnen.

## Energy Lab 2.0

Im Rahmen von „Energy Lab 2.0“ ist das IAI für die Konzeption und den Aufbau des „Smart Energy System Simulation and Control Center (SEnSSiCC)“ zuständig. In SEnSSiCC sind die IT-technischen Arbeiten und Forschungsaspekte des Energy Lab 2.0 gebündelt. SEnSSiCC besteht aus den drei Kernkomponenten Smart Energy System Control Laboratory (SESCL), Energy Grids Simulation and Analysis Laboratory und Control, Monitoring and Visualization Center (CMVC).

Ziel der Arbeiten zum CMVC des Energy Lab 2.0 ist der Aufbau einer kommerziellen SCADA-Kommunikationsinfrastruktur und kommerziellen Leitwarte für das Energy Lab 2.0 sowie einer dieser ergänzenden Forschungs-IT-Infrastruktur zur Erforschung von intelligenten Energiesystemlösungen. Es wurde ein grundlegendes Konzept für den Aufbau der SCADA-Kommunikationsinfrastruktur auf Basis von Kommunikationsgateways und des IEC 61850 Standards erstellt und auf dem Campus Nord des KIT verifiziert. Insgesamt haben die durchgeführten Feldversuche bewiesen, dass sich mit dieser Technologie die Stromnetz-relevanten Daten für das Energy Lab 2.0 sehr gut erfassen lassen und der Gateway-Ansatz sinnvoll ist.

Alleinstellungsmerkmale des SESCL-Experimentierfelds sind eine Schaltmatrix zur Konfiguration einer Versuchstopologie und die Anlagensoftware für einen sicheren automatisierten oder fernbedienten Betrieb. Die Schaltmatrix mit circa 250 Schützen wird Versuchsauf- und -umbauten auf Knopfdruck ohne fehleranfällige manuelle Neuverdrahtung der rund 40 verschiedenen elektrischen Geräte und Anlagen ermöglichen. Vorinstallierte Messtechnik zeichnet zur Versuchslaufzeit automatisch alle wichtigen Daten auf. Die Software unterstützt die Versuchsplanung mit grafischen Konfigurationstools. Sie stellt zur Versuchslaufzeit eine Bedien- und Beobachtungsschnittstelle bereit. Bedienereingriffe zur Versuchslaufzeit werden wie Editorbefehle der Eventsteuerung behandelt. Die sorgt für eine lückenlose Dokumentation der Eingriffe und ermöglicht eine exakte Wiederholung des Versuchs. Nach Versuchsende stehen alle Messwerte zur Dokumentation bereit. Fortgeschrittenen Nutzern werden schnelle Schnittstellen zu MATLAB und C++ sowie

Power-Hardware-in-the-Loop-Systeme (PHIL-Systeme) angeboten. Die Lastenhefte für die Schaltmatrix, die Programmierung der Anlagensoftware sowie einige Komponenten sind fertiggestellt.

Sicherheitsaspekte haben für zukünftige Energiesysteme eine hohe Bedeutung. Es wurden Tools zur Intrusion Detection und Intrusion Generation untersucht. Zur syntaktischen und semantischen Analyse von Binärdaten in der Kommunikation zwischen Energiesystemkomponenten wurde eine XML-Beschreibungssprache prototypisch entwickelt und beispielhaft validiert.

## **Energy System 2050**

Energy System 2050 (ES 2050) ist eine gemeinsame Initiative des Forschungsbereichs Energie der Helmholtz-Gemeinschaft und adressiert in fünf ausgewählten Forschungsthemen wesentliche Herausforderungen der Energiewende. Das IAI leitet vier Arbeitspakete im Forschungsthema „Toolbox mit Datenbanken“.

Für den Teilbereich Datenmanagement wurden generische Datenservices definiert, die als Microservices nahtlos in die vorgesehene Architektur der Forschungs-IT-Infrastruktur integriert werden können. Für diese IT-Plattform wurde eine grundlegende Systemarchitektur auf Basis von Clustercomputing-Laufzeitumgebungen, Big Data-Werkzeugen sowie der Nutzung von Konzepten einer serviceorientierten Architektur auf Basis von Microservices entworfen. Als Grundlage für den weiteren Projektverlauf wurden Verfahren weiterentwickelt, um Gebäudemodelle einer Liegenschaft automatisiert aus dem Datenaustauschformat CityGML zu erzeugen. In Bezug auf die Realisierung der agentenbasierten Co-Simulationsplattform wurde das grundlegende serviceorientierte Konzept erarbeitet und eine erste prototypische Implementierung zur erfolgreichen Verifikation des Konzeptes durchgeführt.

Zur Erweiterung der methodischen Grundlagen wurden verschiedene Arbeiten zur Prognose unter Unsicherheiten sowie bei teilweise fehlenden Wetterdaten durchgeführt. In einem ersten Schritt zur Optimierung von Struktur und Dimensionierung von Energiesystemen wurden unterschiedliche Optimierungsansätze hinsichtlich ihrer Eignung für die zu untersuchenden Fragestellungen bewertet. Für die Validierung der Entwicklungen von Regelungsverfahren für multi-modale Energiesysteme wird ein Benchmark-Beispiel entwickelt, welches in Zukunft auf die Campusgelände des Forschungszentrums Jülich (FZJ) und des KIT ausgedehnt werden kann.

## **Programm EMR**

Die Entwicklung der Hochdrucksonde zum Einsatz einer Hochgeschwindigkeitskamera im Bioliq-Flugstromvergaser ist abgeschlossen. Erste Messungen mit der High-Dynamic-Range-Kamera und nachfolgend mit der Hochgeschwindigkeitskamera verliefen erfolgreich und lieferten erste Bildsequenzen. Grundlegende Bildverarbeitungsalgorithmen zur Auswertung wurden entwickelt.

Für die online Bestimmung der Qualitätsparameter im Celiment-Prozess (Hydratation) wurde für die NIR-Spektrometer-basierte Kenngrößenberechnung ein automatisch bestimmtes Kalibriermodell entwickelt und validiert. Darauf aufbauend wurde ein Konzept für die später vorgesehene Regelung entwickelt.

Bei BRENDA wurde eine mehrtägige Messkampagne zur Untersuchung der Lastflexibilität mit der High-Dynamic-Range Kamera ausgewertet. Hierzu wurde ein modifiziertes Flammendetektionsverfahren entwickelt und die Flammenstabilität als Grundlage einer späteren Regelung berechnet.

Für die Fusion wurde aus verschiedenen Messexperimenten die Abhängigkeit der Frequenz der Tröpfchenbildung vom Betriebsdruck untersucht. Hierzu wurden Bildfolgen mit einer Aufnahme Frequenz von 3500 Bildern pro Sekunde ausgewertet.

Im Rahmen des Projekts KASTEL (Kompetenzzentrum für angewandte Sicherheitstechnologie) wurden im Themenbereich „Sichere und beherrschbare Energiesysteme“ an zwei Beispielsystemen Angriffsziele und die Auswirkungen auf die betrachteten Systeme untersucht. Hierzu wurden die Beispielsysteme Windpark und Solaranlage modelliert und die Auswirkungen auf verschiedene Parameter erforscht.

Anhand verschiedener Messkampagnen wurde im KIC InnoEnergy Projekt ComFeb ein Verfahren zur Flugbahndetektion von Ersatzbrennstoff-Partikeln entwickelt und validiert. Die insgesamt im Projekt entwickelten Bildverarbeitungsalgorithmen wurden in das inspect pro control System der Firma ci-Tec integriert und online an der Anlage der Firma Opterra in Wössingen im experimentellen Dauerbetrieb zur Anwendung gebracht.

Zur Erkennung von Schädigungen an Brücken (Projekt iBridge) wurde ein Algorithmus zur Erkennung von Ereignissen entwickelt. Auf dessen Basis wurde untersucht, inwieweit eine Schädigung bei der Überfahrt eines LKW erkannt werden kann. Mit der Kenngröße Dehnung kann zwischen einer unbeschädigten Brücke und einer beschädigten Brücke diskriminiert werden. Mit den im Projekt AGaMon entwickelten Verfahren konnte erfolgreich ein Feldtest durchgeführt werden. Außerdem konnten die wissenschaftlichen Ergebnisse der Arbeitsgruppe in mehreren Industrieprojekten wie BASF, Schwenk etc. umgesetzt werden.

## Programm RE

Der Untergrund hat - sei es als Speicher, Wärmelieferant oder als Lieferant fossiler Energie - großes Potential, einen bedeutenden Beitrag zur Energiewende zu leisten. Die Nutzung erfordert eine positive Grundhaltung der Bevölkerung. Ein Baustein dafür ist eine Qualitätsinitiative durch die Nutzung innovativer Bohrlochwerkzeuge. Das Institut arbeitete im Jahr 2016 an den Baukastenmodulen Datenübertragung, aktives Kühlsystem, Dämmung mit Dewar-Gefäßen und Metall-Keramik-Verbindungen für mechanisch und thermisch stark belastete Gehäusebauteile. Nach der „Erstanwendung“ des Baukastensystems für die Videoinspektionssonde GeoKam wird jetzt der Wasserprobensammler WASAM entwickelt. Ziel sind völlig unverfälschte Wasserproben aus tiefen Bohrlöchern, die noch mit Originaltemperatur und Originaldruck das Labor erreichen. Das dafür benötigte Hydraulikmodul wurde konzipiert und konstruiert. Die Teilebeschaffung ist erfolgt bzw. eingeleitet.

Das IAI beteiligt sich mit einem modernen Leitsystem an der Automatisierung der Pilotanlage bioliq® zur Kraftstoffsynthese aus Restbiomasse. Im Bereich der Prozessautomation bringt das IAI seine Kompetenzen in den Phasen Planung, Projektierung, Erstellung, Inbetriebnahme, Forschungsbetrieb und Weiterentwicklung ein. 2016 lagen die Arbeitsschwerpunkte in der Ausweitung des Leitsystems auf die Versuchsanlage BRENDA zur Verbrennung staubförmiger, gasförmiger und flüssiger Brennstoffe, in der Entwicklung einer neuen Sicherheitssteuerung für die Brenner dieser Anlage und in der Vorbereitung und der Durchführung von Versuchsprogrammen für die Pilotanlage. Außerdem wurden die Arbeiten zur modellgestützten Regelung und Prozesssimulation fortgeführt.

## Programm TIS

Die CityGML Energy Application Domain Extension (ADE), eine Erweiterung des semantischen 3D Stadtmodells CityGML um Konzepte für thermische Simulationen von Gebäuden, wurde im Rahmen einer internationalen Arbeitsgruppe zur Prototypenreife entwickelt. Zur Prüfung und Anwendung von ADE wurden die am Institut entwickelten Applikationen GML-Toolbox und IFCEXplorer um entsprechende Funktionen erweitert. Die Integration unterschiedlicher Gebäudemodelle in verschiedenen Detaillierungsstufen (vom detaillierten Architekturmodell bis zur approximierten Außenhülle) wurde so ausgebaut, dass alle georeferenzierten Gebäudemodelle und alle Infrastrukturmodelle in einer einzigen Szene dargestellt werden können. Hiermit wurde die Grundlage für modellübergreifende Simulationen geschaffen.

Im EU-Projekt STREAMER wurde der Early Design Configurator, eine Software zur Erzeugung von Raumlayout-Alternativen auf der Basis eines Raumbuchs, so weiterentwickelt, dass Raumlayouts über mehrere Stockwerke möglich sind und zusätzliche Designregeln berücksichtigt werden.

Die elektrische Lastflexibilität von Gebäuden als Power-to-Heat Speicher (P2H, Bereiche Wohnen und GHD) wurde aus deutschlandweit verfügbaren Bestandsdaten der Heizungs- und Klimatechnik sowie morphologischen Bebauungsparametern mit Hilfe geschlossener Formeln abgeleitet („top-down“-Ansatz). Die für einen Vergleich mit Stromspeichern zentralen Kriterien der Speicherkapazität und Regelleistung sind durch das Ausmaß definiert, von der Referenzlast abweichen zu können, die durch die Wärmegewinne und -verluste zur Umgebung bestimmt wird. Die Abschätzung der technischen Potenziale respektiert alle Temperaturvorgaben der Wärme- oder Kälteanwendungen und erfasst alle thermisch nutzbaren Gebäudemassen als Speicherkapazität.

Ziel der FuE-Arbeiten zum Thema „IT-Komponenten für die Energiewende“ ist die Entwicklung und Nutzung innovativer Internettechnologie-basierter Datenverarbeitungs- und Informationsmanagement-Methoden für die Konzeption, Analyse und Bereitstellung von Energieinformationssystem-Komponenten als Planungs- und Visualisierungsinstrumente zur Steuerung innovativer Smart-Grid-Lösungen sowie als Grundlage für die Interaktion und den Dialog mit Bürgern über Fragen zur Energiewende.

Ein Arbeitsschwerpunkt 2016 war die Konzeption und Realisierung einer Microservice-basierten generischen Datenhaltungsplattform zur Speicherung von Informationen und Daten als Grundlage für webbasierte Anwendungen für intelligente Energiesystem- und Umweltsystemanwendungen für den Zugang von Dritten zu den Daten. In einer ersten Version wurde diese Datenhaltungsplattform als „Webcache“ in Form einer Mischung von Cloud-basierten Diensten (z.B. Google Maps Engine, Google App Engine, Cloud SQL, Google Compute Engine, CARTO) implementiert. Die hierbei gewonnenen Erfahrungen mündeten in die Konzeption und den Entwurf einer generischen Datenplattform (generisches Microservice-Backend, kurz GMB), in welche die bisherigen und künftigen Anforderungen (vor allem aus dem Bereich der Energiesysteme) eingeflossen sind. Die Implementierung des „Webcache“ wurde in verschiedenen webbasierten Umweltsystemanwendungen (den Landesumweltportalen verschiedener Länder) als Hintergrunddienst für die Daten- und Informationsbereitstellung mit Erfolg erprobt und befindet sich im Dauereinsatz. Die hiermit bereitgestellte Backend-Dateninfrastruktur wird daneben auch von mobilen Anwendungen, wie „Meine Umwelt“ oder „Meine Pegel“ als zentrale Datenquelle genutzt.

## **Programm BIFTM**

Viele moderne biologische Experimente sind Big-Data-Probleme, z.B. die automatische Bestimmung von Zellformigenschaften und -änderungen in Fruchtfliegen-, Zebrafisch- und Mausembryos. Zusammen mit Kollegen des Janelia Research Campus (USA) und aus Brasilien wurden neue Algorithmen und Tools (Open Source Software RACE und XPIWIT) entwickelt, um quantitative Zellforminformationen aus 3D-Bildern in Echtzeit zu berechnen. Ähnliche Bildverarbeitungsketten wurden für die Analyse von Muskelreparaturvorgängen, von neuromuskulären Endplatten, Pigmenten und von Droplet-Microarrays entwickelt. Außerdem startete das vom BMBF geförderte Drittmittelprojekt I-CARE, in dem gemeinsam mit der Universität Bremen sowie weiteren Partnern ein technisches System für Tablet-PCs entwickelt wird.

## **Programm STN**

Das IAI widmet sich im Programm STN der Systemintegration und verfolgt dabei einen ganzheitlichen Ansatz ausgehend vom Design von Bauteilen und Systemen über die Entwicklung und Optimierung von Prozessen und Fertigungsgeräten bis zur Inspektion und Qualitätssicherung. Auf der Grundlage der Methoden und unter Anwendung von Verfahren der angewandten Informatik werden mechatronische Nanosysteme sowie Verfahren und Fertigungsmittel für die Nanotechnologie entwickelt. Neben den Arbeiten in der programmorientierten Forschungsförderung werden auf denselben Grundlagen auch Drittmittelprojekte zu komplementären Themen bearbeitet.

Der Fokus der Arbeiten im Schwerpunkt „Systemintegration – Modellbildung, Simulation“ liegt auf der Konzeption und Umsetzung einer druckbaren Zoomoptik, welche vollständig aus varifokalen Freiformoptiken besteht. Dies ermöglicht eine kompaktere Bauweise, mit dem Potenzial einer Anwendung im Smartphone-Segment. Im Berichtszeitraum wurde die mathematische Beschreibung der Rotationsoptik, einer Entwicklung des IAI, hinsichtlich einer Einbindung der Flächenbeschreibung in das kommerzielle Simulationswerkzeug ZEMAX mit dem Ziel einer Optimierung der Abbildungseigenschaften weiterentwickelt. Ferner wurde eine Erweiterung der am IAI entwickelten umfassenden Modellierungsumgebung bezüglich der Einbindung von Messdaten in das Simulationsmodell erfolgreich umgesetzt und anhand von varifokalen Freiformoptiken evaluiert. So ist die Möglichkeit gegeben, den Druckprozess optischer Flächen mit anderen Fertigungsprozessen für Kunststoffoptiken zu vergleichen.

Im Schwerpunkt „Systemintegration – Prozessoptimierung, Informationsmanagement und Anwendungen“ wurden insbesondere im Themengebiet „Generative Fertigung“ neue Forschungsfelder erschlossen und bestehende Erkenntnisse vertieft. Durch den Einsatz neuartiger Materialien werden dabei die Möglichkeiten des 3D-Drucks erweitert und neue Anwendungsbereiche geschaffen. Daneben konnten im Bereich Prozessoptimierung erfolgreich Projekte abgeschlossen werden, in denen Technologien zur Fertigung komplexer, hochpräziser Mikrosysteme Gegenstand der Forschung war.

Die Hard- und Software-Infrastruktur für die Systemintegration wurde im Schwerpunkt „Systemintegration – Gedruckte Materialien und Systeme“ weiterentwickelt und ein durchgängiger, automatisierter Workflow etabliert. Ferner wurde das Extrusionsdruckverfahren weiterentwickelt und damit wurden für das NMR-Projekt des Instituts für Mikrostrukturtechnik (IMT) mit einer hochviskosen Silberleitpaste erste Spulen mit unterschiedlichen Geometrien auf Glaskapillaren gedruckt. Das im Vorjahr entwickelte Konzept einer

gedruckten Testschaltung zur Demonstration der Intralayer-Integration wurde in einer ersten Stufe umgesetzt. Für einen vollständigen Druck der Testschaltung wurde ein Spice-Simulationsmodell zur Schaltungssimulation und -auslegung entwickelt. Im Rahmen der HEiKA-Kooperation mit der Arbeitsgruppe von Prof. Rasmus Schröder (BioQuant/CAM, Universität Heidelberg) zur Automatisierung der Probenhandhabung für die Correlative Array Tomography wurde die Prozessanalyse abgeschlossen, umfangreiche Lösungskataloge für die Automatisierung der einzelnen Prozessschritte erstellt und eine ausgewählte Lösung als Laboraufbau realisiert. Damit wurde in ersten Versuchen nachgewiesen, dass sich mehrere Schnittbänder von wenigen 10 nm Dicke reproduzierbar auf einem Substrat ablegen lassen. Mittels Ultramikrotomie konnten interessante Einblicke in den Aufbau von gedruckten Strukturen und das Interface zwischen Silbernanopartikelintinte und Substrat gewonnen werden.

Zur Montage großflächiger Röntgengitter mittels kachelförmig angeordneter Einzelkacheln wurde das Verfahren, das auf der im Jahr 2015 am IMT in Betrieb genommenen Röntgengitter-Montageplattform zum Einsatz kommt, auch für andere Einsatzzwecke wie zum Aufbau von Mastern für die Galvanoformung zur Herstellung von Formeinsätzen etabliert. In weiteren Arbeiten wurde die 2015 erstellte Steuersoftware für die Gittermontageplattform angepasst und im Hinblick auf einen zukünftigen automatisierten Betrieb erweitert.

Im Rahmen der Realisierung der Prozesskette zur Herstellung Photonischer Wirebonds in Stückzahlen wurde ein Verfahren zur lokalisierten, sauber abgegrenzten Überschichtung von Wirebonds entwickelt. Im ZIM-KF-Projekt Optimat wird ein Konzept zur Aufbereitung von Metallpulver für das Additive Manufacturing Verfahren Selective Laser Melting (SLM) entwickelt. Im ZIM-KF-Projekt APOSTL werden Konzepte erarbeitet, wie anhand unstrukturierter Massendaten über Textextraktion Begriffe gelernt werden können.

Zur Prüfung der Planarität von Folien wurde im Schwerpunkt „Systemintegration – Optische Inspektion und digitale Bildverarbeitung“ ein Stereo-Deflektometrie-Messstand aufgebaut und es wurde ein geeignetes Kalibrierverfahren für diesen Aufbau entwickelt. Mit einem modifizierten Bündelausgleichsverfahren können alle unbekannt Parameter in einem Prozess mit einem planen Oberflächenspiegel ermittelt werden. Darüber hinaus wurde zur Analyse von gedruckten Leiterbahnen eine Bildverarbeitungssoftware zur automatischen Bestimmung der Stegbreiten implementiert die auch Unterbrechungen in den Leiterbahnen erkennt.

Im Rahmen eines Drittmittelauftrags wurde ein System zur großflächigen in-vivo Abbildung von Nervenfasern in der menschlichen Augenhornhaut entwickelt. Dabei wird die Blickrichtung rechnergesteuert über ein Display geführt, das vor dem nicht untersuchten Auge angeordnet ist. Die Ergebnisse sind erfolgversprechend und das System wird aktuell im Rahmen einer klinischen Studie getestet.

## **Programm SBD**

Das DLCL Energy entwickelt Lösungen für das Datenmanagement im Energiebereich und kooperiert dabei mit dem Smart Energy System Simulation and Control Center (SEnSSiCC) des Energy Lab 2.0, mit der Helmholtz-Initiative Energie System 2050 und dem Forschungsprogramm SCI.

Gegenstand der Arbeiten an Generischen Datenservices waren die Entwicklung von Lösungen für die Zeitreihenspeicherung sowie Untersuchungen und Entwicklungen zum Einsatz des *Common Information Model* (CIM) als Ontologie für Stromnetze. Neben weiteren Anforderungsanalysen im Umfeld des Energy Lab 2.0 wurden Untersuchungen zur Entwicklung einer Optimierungstoolbox durchgeführt, um komplexe Schedulingaufgaben für die Kraftwerkseinsatzplanung und für weitere Planungsaufgaben im Bereich der elektrischen Energieversorgung zu bewältigen.



# FORSCHUNGSERGEBNISSE IM JAHR 2016

## Programm SCI: Storage and Cross-linked Infrastructures

### Networks and Storage Integration

#### Energiesystem-Modellierung, -Simulation, -Analyse und -Regelung

Ziel dieser Arbeiten ist die Entwicklung von IT-Methoden für die Modellierung, Simulation, Analyse und Regelung von Energie-Verbundsystemen mit dem Schwerpunkt Stromnetze.

Im Arbeitsschwerpunkt „Netzmodellierung“ wurden als Basis für weitere Arbeiten in den Projekten Energy Lab 2.0 und ES 2050, sowie für die Forschungsthemen innerhalb der PoF, die umfangreichen Arbeiten zur europaweiten, topologischen Modellierung des Drehstromverbundnetzes fortgesetzt. Dazu wurden Umspannanlagen, Stromtrassen/-kreise und Erdkabel ab der Hochspannungsebene (110 kV Hochspannung (HS) bis 380 kV Höchstspannung (HöS), 450 kV Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ)) systematisch erfasst und als geographisches Datenmodell realisiert (Abb. 1). Die Visualisierung erfolgt hier in *Google-Earth* (GE). Für die Netzmodelle „Deutschland“ (einschl. 110 kV) und KIT-CN wurden die Modelle entsprechend dem aktuellen Netzausbau (2016) ergänzt, weitergepflegt und weiter detailliert.

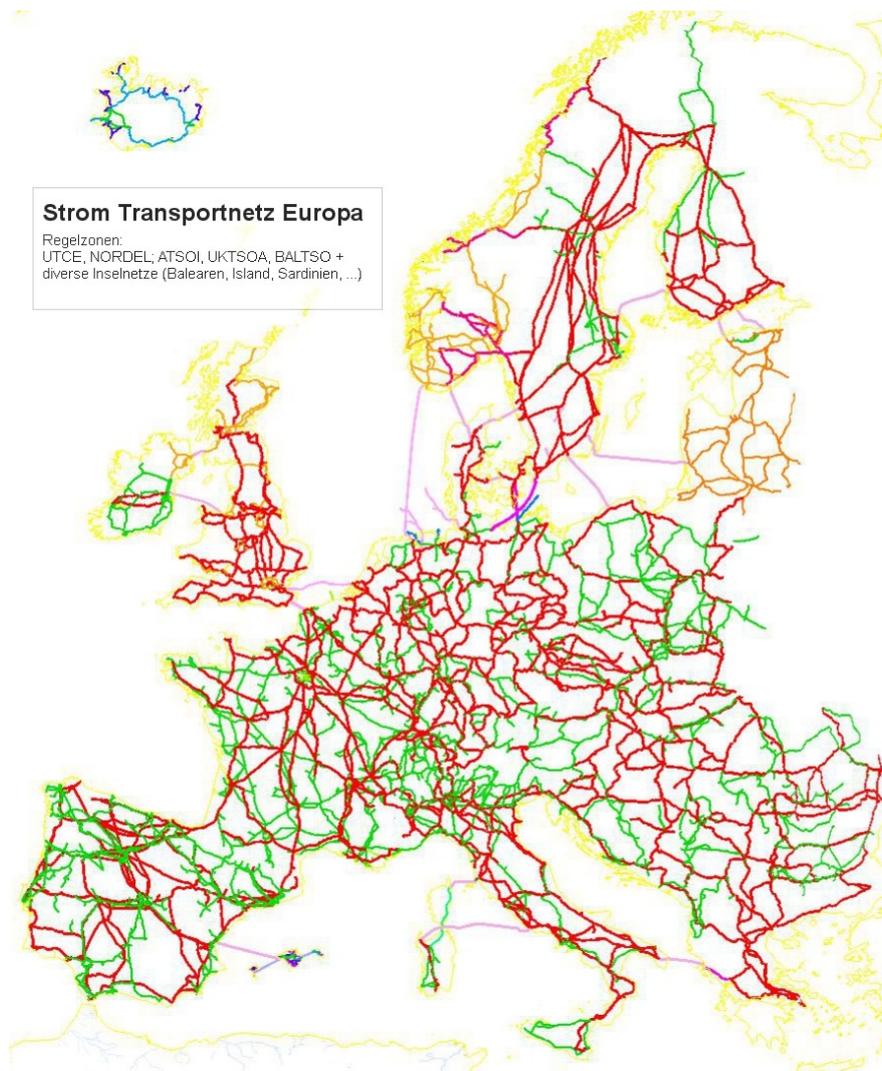


Abb. 1: Übertragungsnetz Europa. Hier dargestellt sind die HöS-Freileitungen und -Erdkabel  $\geq 220$  kV

Das topologische *Netzmodell Deutschland* (HöS- und HS-Spannungsebenen) wurde mit einem Last- und Erzeugermodell ergänzt (Abb. 2). Ziel ist die knotengenaue Zuordnung von Last und Erzeugung im Netz für die Lastflussrechnung, wobei zu jedem Zeitpunkt ein Gleichgewicht zwischen Erzeugung, Last und Verlusten herrscht. Zu den Lasten zählen Industrie, Haushalte und der Sektor Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD), sowie die öffentlichen Verbraucher. Außer der Industrie (~48% der Gesamtlast) sind die anderen Lasten (private Haushalte ~25%, GHD ~22%, Öffentliche Verbraucher ~5%) direkt mit der Bevölkerungsdichte (nach Statistischem Bundesamt) korreliert und lassen sich sehr gut über stochastische Zeitreihen gemäß dem Modell des Bundesverbands der Energie- und Wasserwirtschaft beschreiben. Die Industrielasten (Quelle: Umweltbundesamt) wurden nach Sektoren sortiert ausgewertet und geographisch zugeordnet (Abb. 2, unten-Mitte).

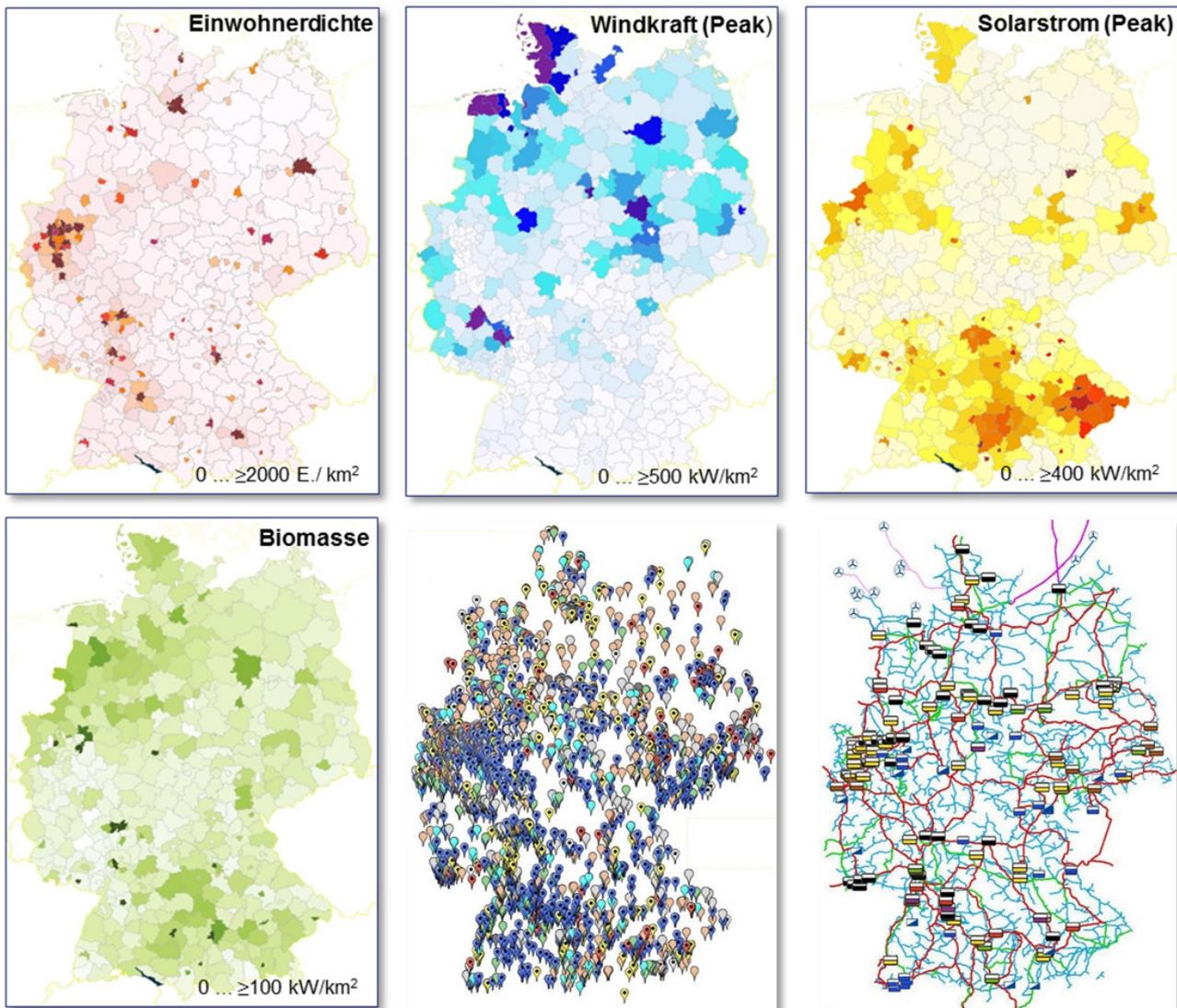


Abb. 2: Last-/KW-/Netzmodell. Dargestellt sind die Bevölkerungsdichte und EE-Generatoren (installierte Peak-Leistungen, kW) in Deutschland, bezogen auf NUTS-3 Räume (Kreise und kreisfreie Städte, Daten: Mitte 2016). In Kombination mit Industrielasten, statistischen Lastzeitreihen, der BNA-Kraftwerksliste und dem Wettermodell für Wind und Solarstrahlung lässt sich daraus die momentane EE-Einspeisung in das Stromnetz knotengenau berechnen.

Für die Erzeuger (Generatoren) wurden die Kraftwerksliste (konventionelle Kraftwerke (KW)) und das Anlagenregister für Erneuerbare-Energien-Anlagen (EE-Anlagen) der Bundesnetzagentur (BNA) ausgewertet und geographisch zugeordnet (~1.6 Mio Einzelanlagen). Die EE-Anlagen (Bio-Anlagen, Solar- und Windkraftanlagen) wurden nach Gemeindekennziffer sortiert und lassen sich daher – entsprechend aufsummiert – einzelnen Erzeugergebieten und daher Netzknoten zuordnen. Die geographische Zuordnung der EE-Anlagen ist – nach jeweiliger Problemstellung – Gebieten zuordenbar (hier: LAU-1 = Verbandsgemeinden, NUTS-3 = Kreise, NUTS-1 = Bundesländer).

Die tagesaktuelle Erzeugung aus Wind- und Solaranlagen berechnet sich dann aus der installierten Peak-Leistung der Einzelanlagen aus der Co-Simulation mit einem Wettermodell (geographische Windstärke, solare Einstrahlung) und Netzleitmodellen der Netzbetreiber (Übertragungsnetz und Verteilnetz). Letzteres ist Gegenstand der aktuellen und zukünftigen F&E-Arbeiten im Institut.

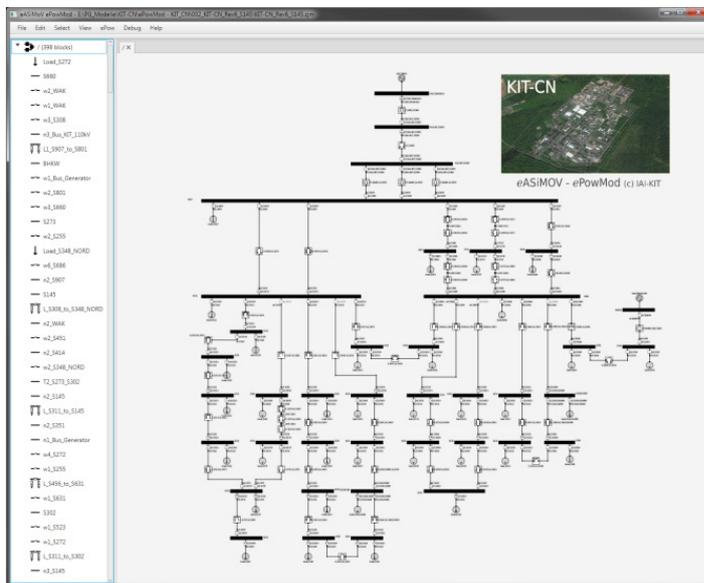


Abb. 3: Stromnetzmodell des KIT Campus Nord in ePowMod für die Lastfluss-Simulation

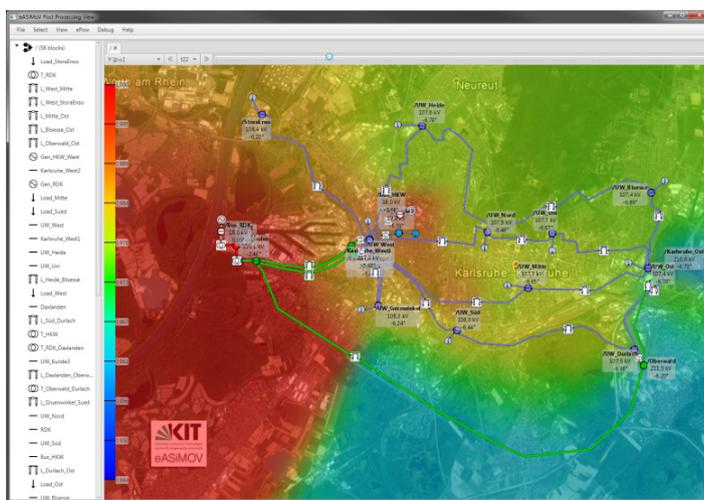


Abb. 4: Simulation des Karlsruher 110 kV Stromnetzes in ePowMod mit zeitlich variierenden Lasten

(rechts, v.o.n.u.). Abb. 6 zeigt das KIT-CN 20 kV-Netz in DlgSILENT Powerfactory, die Richtungen der Lastflüsse sind durch Pfeile gekennzeichnet.

Die oben vorgestellten Modelle wurden manuell als Referenzmodelle erstellt. Für die Nutzbarkeit kommerzieller und frei verfügbarer Simulatoren bei gleichzeitiger Reduktion des Modellieraufwands setzt eASiMOV auf direkte Modellübersetzer zwischen dem proprietären Format und der jeweiligen Software. Bisher wurden Modellkonverter für ePowMod-Modelle für Excel, MatPower und OpenDSS vollständig implementiert. Modelle können von ePowMod via Python API in das PowerFactory-Format überführt und eine Offline Lastfluss-Simulation durchgeführt werden. Im Rahmen der Arbeiten zur automatisierten Modellerstellung des deutschen Übertragungsnetzes wurden MATLAB-Module für die Verarbeitung von Netzdaten, Daten zu Erneuerbaren Energien sowie Verbrauchsdaten anhand statistischer Datenquellen erstellt.

Hinsichtlich der Verkürzung der Simulationszeiten großer Simulationsmodelle mit vielen Lastzuständen wurde untersucht, wie sich die Zeit für die numerische Lösung des Lastflussproblems durch geeignete

Im Bereich Modellierwerkzeuge und Netzsimulation wurde das eASiMOV-Framework (electrical grid Analysis, Simulation, Modeling, Optimization and Visualization) - bestehend aus der Modelliersoftware ePowMod, der Simulationssoftware ePowSim und der web-basierten Visualisierungs- und Datenmanagement-Software ePowVis - prototypisch entwickelt und vorgestellt. Es wurden das KIT-CN 20 kV- sowie das Karlsruher 110 kV-Stromnetz modelliert und zeitvariable Lastflüsse anhand realer Verbrauchsdaten durchgeführt. Das Softwaremodul für die Aggregation der Smartmeter-Daten anhand der Netztopologie des KIT-CN wurde überarbeitet und liefert nun in einem Streaming-Modus Daten an eine kontinuierlich durchgeführte Lastfluss- oder Netzdynamik-Simulation. Abb. 3 zeigt das KIT-CN 20 kV-Netz in ePowMod. In Abb. 4 ist das Karlsruher 110 kV-Stromnetz dargestellt. Mit einer sog. heatmap sind die Spannungswerte an den Netzknoten für einen Lastfall dargestellt, wobei die zeitliche Lastvariation und die entsprechenden Lastflüsse interaktiv visualisiert werden können.

Das KIT-CN 20 kV-Stromnetz wurde für die dynamische Netzsimulation ferner in DlgSILENT Powerfactory, Simulink und OpenModelica erstellt und evaluiert. In Simulink wurde das Netzmodell anhand von Detailplänen um das 400 V-Verteilnetz erweitert. Abb. 5 zeigt das aktualisierte KIT-Modell (links) mit dem Detailmodell eines Blockheizkraftwerks, der Simulation der Frequenzregelung nach einem Störfall und dem Detailmodell einer Station

Initialisierung der Modellparameter optimieren lässt. Betrachtet wurden alle in Matpower vorhandenen Lastflussalgorithmen hinsichtlich der Lastvariation zwischen zwei Lastzuständen.

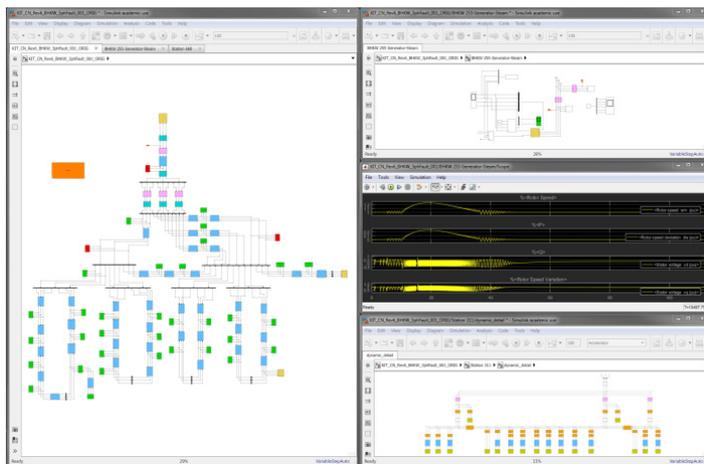


Abb. 5: Stromnetzmodell des KIT Campus Nord in Simulink für die 3-Phasen Dynamiksimulation

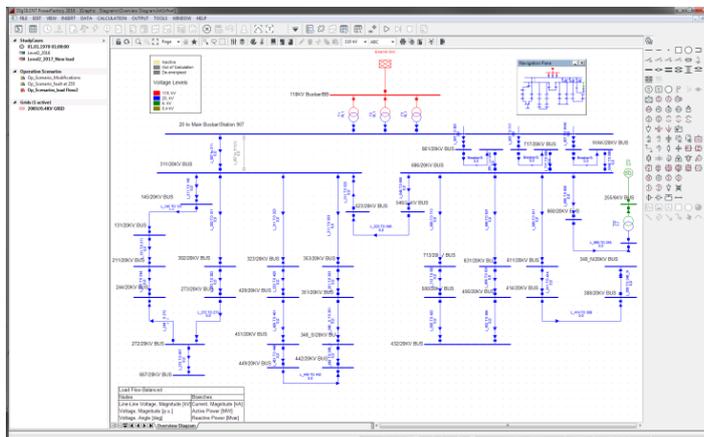


Abb. 6: Lastfluss-Simulation des KIT-CN Stromnetzes in DigSILENT PowerFactory

Abb. 7 zeigt, dass durch die Optimierung der Parameterinitialisierung die Anzahl der nötigen Iterationen um mehr als die Hälfte reduziert werden kann. Der Einsatz von weiteren Rechenkernen reduziert die Iterationszahl nicht. Vielmehr wird durch die Aufteilung des Problems auf mehrere Rechenkern jeweils eine vollständige Lösung mit Initialparametern und somit voller Iterationszahl benötigt. Durch den Einsatz von mehreren Rechenkernen sinkt jedoch die benötigte Rechen- und Gesamtzeit deutlich. Dies wird dadurch verstärkt, dass Ergebnisse eines Simulationslaufs im Speicher gehalten und für die Initialisierung des nächsten Laufs wiederverwendet werden. Es erübrigt sich dadurch - wie im Falle der sequenziellen Methode - ein erneutes Einlesen des Simulationsmodells.

Das *IEEE 9.241 Bus European Test Model* wurde in 2.880 Zeitschritten ( $T=30$  Tage,  $\Delta t=15$  Minuten) mit einem Zufallsanteil der Lastvariation von 15% simuliert. Die Laufzeiten wurden auf einer Workstation mit zwei Intel Xeon E5472@3GHz CPU unter Win7 ermittelt. Die gemessenen Laufzeiten und Optimierungsraten sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

Die sequenzielle Simulation aller Lastzustände mit der Standardinitialisierung der Spannungswerte und -phasen an den Verteilschienen benötigt 17.280 Iterationen bei 2.961 Sekunden Rechenzeit für die Lastflüsse. Die Gesamtzeit mit 18.293 Sekunden berücksichtigt auch die Ein- und Ausgabe auf das Dateisystem. Die sequentielle, optimierte Simulation - durch geeignete Parameterinitialisierung anhand vorangegangener Berechnungen - verkürzt die Anzahl benötigter Iterationen in der numerischen Berechnung um den Faktor 2,219, die Rechenzeit wird um den Faktor 2,428 und die Gesamtdauer um den Faktor 6,733 verkürzt (siehe Abb. 7). Die Optimierungsraten sinken bei sprunghafter, großer Veränderung der Lastzustände. Die beste Performance liefert der Newton-Raphson (NR) Algorithmus gegenüber der Gauss-Seidel (GS) und der Decoupled-NR Methode.

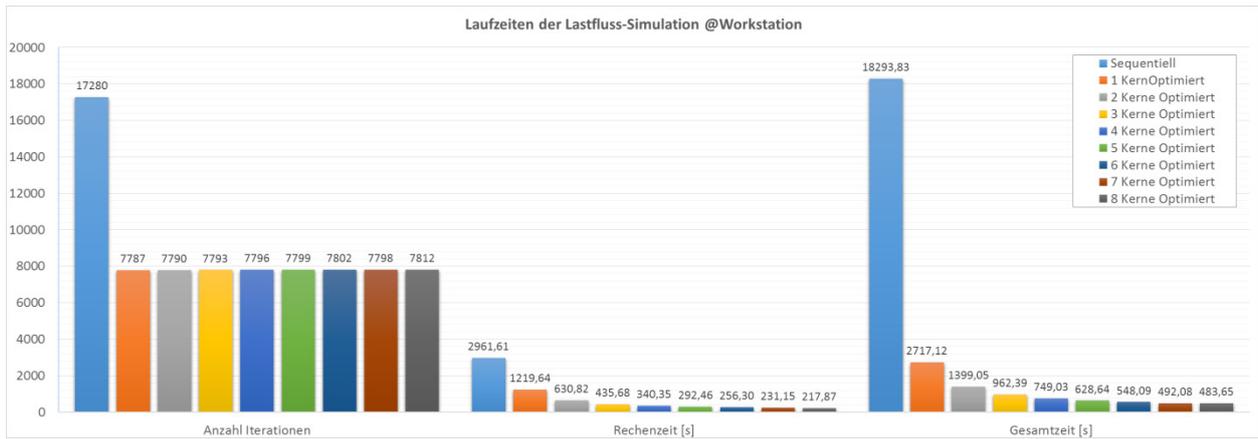


Abb. 7: Optimierung der Anzahl der numerischen Iterationen für 2.880 Lastfälle und Reduktion der Rechen- und Gesamtzeit bei Einsatz von mehreren Rechenkernen

Abb. 8 stellt die Optimierungsraten bei Einsatz von mehreren Rechenkernen gegenüber der sequentiellen Berechnung ohne Optimierung dar. Bei Einsatz von acht Rechenkernen lässt sich die benötigte Rechenzeit um den Faktor 13,593 reduzieren, die benötigte Gesamtzeit sogar um den Faktor 37,825. Die Anzahl der benötigten Iterationen für die numerische Lösung bleibt mit 2,2 nahezu konstant. In enger Kooperation mit dem Steinbuch Centre for Computing (SCC) des KIT wird an der Portierung des Optimierungsverfahrens auf den Forschungshochleistungsrechner ForHLR II mit mehr als 24.000 Kernen gearbeitet.

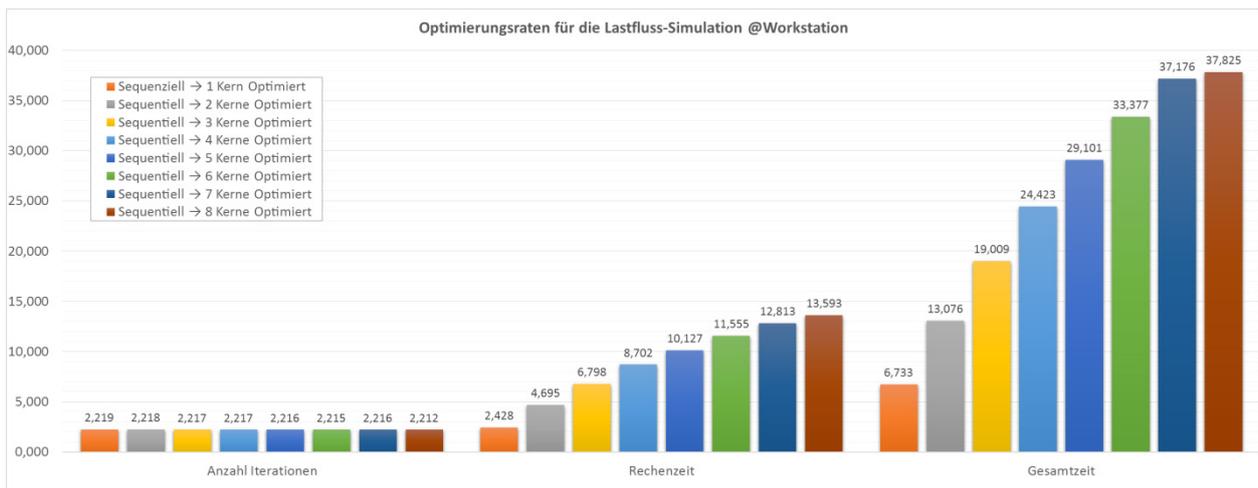


Abb. 8: Optimierungsraten für die Lastflussrechnung durch geeignete Modellinitialisierung und den Einsatz von mehreren Rechenkernen

Weiterhin wurde ein neuer, „portabler“ Electrical Data Recorder (E.DR) mit Touch-Screen-Monitor zur graphischen und interaktiven Messwertdarstellung entwickelt und gebaut (s. Abb. 9). Das Messgerät ist in einem tragbaren Gehäuse untergebracht und kann mit jeweils einem fünfpoligen 400 V, 32 A CEE Stecker und einer entsprechenden Kupplung vor einen dreiphasigen Verbraucher geschaltet werden. Dazu wurde auch ein schaltungstechnisches Re-Design für die Messwernerfassung von Strömen mit Stromwandlern vorgenommen. Der neue, portable E.DR kann GPS-synchronisiert drei Phasen Spannungen ( $U_{\text{eff}} < 337 \text{ V}$ ) und vier Stromkanäle ( $3P+N$ ,  $I_{\text{eff}} < 40 \text{ A}$ ) mit einer Rate von bis zu 50 kHz erfassen, darstellen und bei Bedarf auch speichern.

Für eine wirtschaftlichere Gestaltung der Stromerfassung von E.DR-Messeinheiten wurden Rogowskispulen selbst gewickelt und untersucht. Die Eigenschaften der selbst hergestellten Wandler wurden ermittelt und mit handelsüblichen Rogowskispulen von Fluke verglichen (s. Abb. 10). Die Empfindlichkeit des Eigenbaus zeigte sich als höher, das Frequenzverhalten als besser, die Messwertabweichung als ähnlich, und die Materialkosten als erheblich geringer im Vergleich zu der Spule von Fluke. Allerdings waren die selbst gewickelten Rogowskispulen mechanisch weniger flexibel und deutlich empfindlicher gegenüber der Leiterpositionierung im Spulenring.



Abb. 9: Portabler E.DR mit Touch-Screen Monitor

Für eine effektive Auswertung und verbesserte Übersicht der bereits seit 2012 in der Large-Scale Data Facility des KIT gespeicherten Messdaten wurde eine Software entwickelt, die fehlende Daten von Messausfällen interpoliert, Zeitstempelfehler korrigiert und in unterschiedlicher Aggregation (Tages-, Stunden-, 10/15-Minutenraster, Mittelwertkurven) als CSV-Dateien inklusive jeweiliger Standardabweichung, Minimal- und Maximalwerte zur Verfügung stellt (s. Abb. 11). Dadurch konnten Jahresauswertungen erstellt und Ereignisse im Stromnetz detailliert untersucht werden.

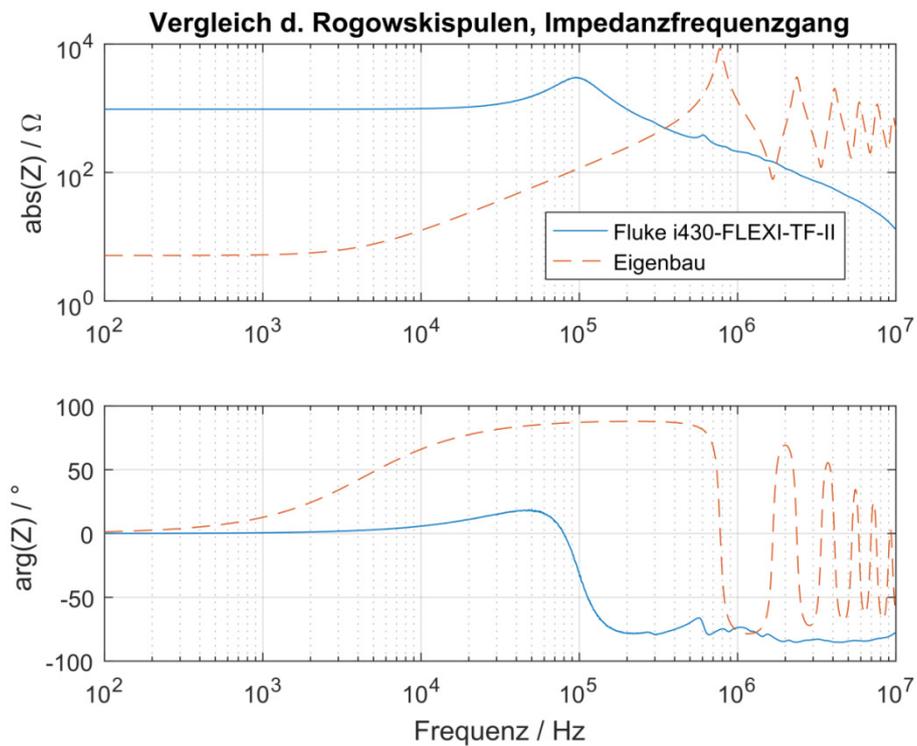


Abb. 10: Vergleich von Rogowskispulen (Impedanz-Frequenzgang) Fluke vs. Eigenbau

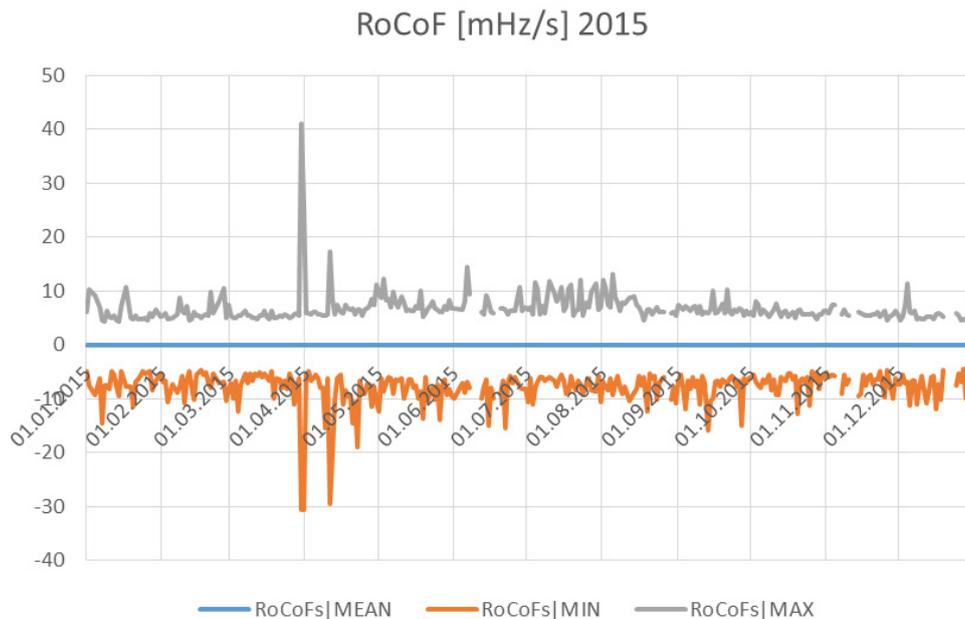


Abb. 11: Rate of Change of Frequency (RoCoF) über das Jahr 2015, 31.3.15: Stromausfall in Türkei

Die Gruppe Advanced Control des IAI entwickelt Verfahren zur optimierungsbasierten und nichtlinearen Regelung multi-modaler Energiesysteme. Von zentraler Bedeutung ist hierbei die strukturierte Berücksichtigung nicht-konvexer Problemformulierungen und nichtlinearer Dynamik von Komponenten, Beschränkungen der Stell- und Zustandsgrößen, Modell- und Prognoseunsicherheiten (in Bezug auf Verbrauch und Erzeugung) sowie Ausnutzung und Berücksichtigung der realen Systemtopologie im Kontext verteilter und dezentraler Umsetzung. In diesem Kontext konnten im Jahr 2016 wesentliche Ergebnisse und wissenschaftliche Fortschritte zu verschiedenen methodischen Fragestellungen erzielt werden.

Im Themenbereich „Berücksichtigung stochastischer Unsicherheiten in Lastflussproblemen“ wurden neue Ansätze zur Lösung von Problemen der Lastflussrechnung unter expliziter Berücksichtigung stochastischer Unsicherheiten untersucht. Die Berücksichtigung von stochastischer Unsicherheiten ist im Kontext der aktuellen Zunahme der Einspeisung volatiler erneuerbarer Energien von großer Bedeutung für den Betrieb multi-modaler Energienetze. Der Stand der Forschung in diesem Bereich konzentriert sich im Wesentlichen auf zwei Ansätze: die Berücksichtigung nicht-Gauss'scher Unsicherheiten mit Hilfe von Monte-Carlo-Methoden und die Berücksichtigung Gauss'scher Unsicherheiten mit Hilfe analytischer Umformulierungen.

Komplementär zu diesen Ansätzen wurde untersucht, inwieweit sich Polynomiales Chaos effizient zur Lösung stochastischer Lastflussprobleme einsetzen lässt. Es konnte in einer ersten Arbeit gezeigt werden, dass dies prinzipiell sehr erfolgversprechend ist [36]. Die Arbeiten zu diesem Themenkomplex werden im Jahr 2017 zusammen mit internationalen Partnern fortgeführt werden.

Im Kontext optimaler Lastflussrechnung für elektrische Netze werden in der Literatur seit einigen Jahren vermehrt verteilte numerische Ansätze untersucht. Dabei wird auf netztopologie-abhängige semi-definite Relaxationen und etablierte verteilte Optimierungsalgorithmen zurückgegriffen. Insbesondere ist hier die Alternating Direction of Multipliers Method (ADMM) zu nennen. Im Rahmen einer in der Gruppe durchgeführten Masterarbeit konnte gezeigt werden, dass diese Ansätze nicht in der Lage sind, optimale AC-Lastflussprobleme unter expliziter Berücksichtigung von Leistungsbeschränkungen zu lösen. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die Augmented Lagrangian Alternating Direction Inexact Newton method (ALADIN) zuverlässiger und schneller konvergiert als ADMM. Diese Ergebnisse sollen in Zukunft auf ein realitätsnahes Modell des deutschen Übertragungsnetzes übertragen werden.

In einer in Kooperation mit dem Laboratoire d'Automatique der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne durchgeführten Masterarbeit wurde die regelungstechnische Modellierung der Dynamik von Redox-Flow-Batterien untersucht. Es wurde ein differential-algebraisches Modell entwickelt, parametrisiert und validiert. Es wurde gezeigt, dass dieses Modell prinzipiell für die numerische Optimierung der Ladetrajektorien nutzbar ist. Erste Teilergebnisse wurden auf einer internationalen Fachtagung vorgestellt [178].

Weiterhin wurden neue Ansätze zur Echtzeitoptimierung der Betriebspunkte verfahrenstechnischer Anlagen entwickelt und sowohl auf internationalen Fachtagungen in Form begutachteter Beiträge als auch in Journalartikeln veröffentlicht [30, 51, 91]. Zusätzlich wurden neue Ansätze zur prädiktiven Regelung nichtlinearer Systeme unter Berücksichtigung von Beschränkungen publiziert [9, 10].

## **Kopernikus ENSURE**

Das Kopernikus-Projekt ENSURE verfolgt mit einem ganzheitlichen systemischen Ansatz das Ziel, neue Energienetzstrukturen für die Energiewende zu erforschen und bereitzustellen. Das Projekt, an dem über 20 Institutionen beteiligt sind, u.a. die Firmen E.ON, ABB, Siemens und TenneT, wurde Ende 2016 begonnen. Das IAI ist an vier Arbeitspaketen beteiligt.

Erste Arbeiten erfolgten im Arbeitspaket „Intelligentes Energieinformationssystem“, in dem die Architektur eines Energieinformationssystems und dessen Schnittstellen zu Komponenten des Energiesystems entwickelt werden sollen. Darüber hinaus wird das Sicherheitsrisiko bewertet, welches ein intelligentes Energieinformationssystem bergen könnte. Zudem werden Maßnahmen identifiziert um die Versorgungssicherheit zu maximieren. Im Einzelnen werden folgende Themen angegangen: Bedrohungsanalyse, Identifizierung kritischer Ziele mit Schutzbedürftigkeit, Maßnahmen und Gegenstrategien für Cyberangriffe (kryptographische Protokolle, Angriffserkennung und Rückfallmaßnahmen).

Eine Analyse der am meisten auftretenden Angriffe auf die verschiedenen Ebenen des Smart Grids wurde begonnen. Dabei werden Angriffe hinsichtlich Vertraulichkeit, Integrität und Verfügbarkeit betrachtet. Eine Literaturanalyse bezüglich Intrusion Detection und Intrusion Prevention wurde ebenfalls gestartet.

## **Energy Lab 2.0**

Im Rahmen von „Energy Lab 2.0“ ist das IAI für die Konzeption und den Aufbau des „Smart Energy System Simulation and Control Center (SEnSSiCC)“ zuständig. In SEnSSiCC sind die IT-technischen Arbeiten und Forschungsaspekte des Energy Lab 2.0 gebündelt. SEnSSiCC besteht aus den drei Kernkomponenten Smart Energy System Control Laboratory (SESCL), Energy Grids Simulation and Analysis Laboratory und Control, Monitoring and Visualization Center (CMVC).

Das SESCL-Experimentierfeld ist eine Schnittstelle zwischen der realen Welt öffentlicher Strom- und Wärmenetze und der virtuellen Welt in der Simulation. Einerseits kann die Modellbildung für die Simulation profitieren, wenn reale Maschinen leicht zugänglich sind und untersucht werden können, andererseits können Simulationsergebnisse, z.B. das Verhalten einer Strecke mit einem neuen Regelalgorithmus unter Einbeziehung realer Maschinen validiert werden.

Das SESCL-Experimentierfeld wird mehrere Alleinstellungsmerkmale aufweisen:

1. Eine Schaltmatrix mit circa 250 Schützen (s. Abb. 12) ermöglicht Versuchsauf- und Umbauten auf Knopfdruck ohne fehleranfällige manuelle Neuverdrahtung der rund 40 verschiedenen elektrischen Geräte und Anlagen. Die automatisierte und fernbediente Konfiguration der Versuchstopologie ermöglicht einen sicheren, automatisierten oder fernbedienbaren Betrieb, was insbesondere bei Experimenten im Grenzbereich der Stabilität von großer Bedeutung ist.
2. Die Anlagensoftware (s. Abb. 13) wird die Benutzung des Experimentierfelds sehr einfach machen. Schon am ersten Tag soll ein Benutzer in der Lage sein, einen einfachen Versuch zu konfigurieren, durchzuführen und die Ergebnisse zu dokumentieren (siehe Abb. 13, links oben, „Beobachtende Versuche“). Die Software unterstützt die Versuchsplanung mit grafischen Konfigurationstools. Sie stellt zur Versuchslaufzeit eine Bedien- und Beobachtungsschnittstelle bereit. Bedienereingriffe zur Versuchslaufzeit werden wie Editorbefehle der Eventsteuerung behandelt. Das sorgt für eine lückenlose Dokumentation der Eingriffe und ermöglicht eine exakte Wiederholung des Versuchs.
3. Vorinstallierte Messtechnik zeichnet zur Versuchslaufzeit automatisch alle wichtigen Strom-, Spannungs-, Temperatur- und daraus abgeleitete Daten auf. Nach Versuchsende stehen alle Messwerte zur Dokumentation bereit. Standardtools werden die Auswertung der Daten unterstützen. Auch die Installation weiterer Messstellen und die Integration von deren Daten wird unterstützt.
4. Fortgeschrittenen Nutzern werden schnelle Schnittstellen zu MATLAB- und C++ sowie PHIL-Systemen angeboten. Beispielprogramme werden auch dabei einen einfachen Zugang ermöglichen, wengleich dafür natürlich Kenntnisse der benutzten Werkzeuge (z.B. MATLAB/Simulink) und Pro-

grammierkenntnisse unabdingbar sind. MATLAB-Programme werden z.B. auf eigenen Prozessoren der Master-Steuerung ablaufen.

5. Durch die Kombination des Experimentierfelds, das schwerpunktmäßig mit Komponenten des elektrischen Smart Grids ausgestattet ist, mit Gebäuden, die Bilanzräume für Heizungsanlagen bilden, werden Experimente an der Schnittstelle zwischen Wärme und Strom möglich sein.

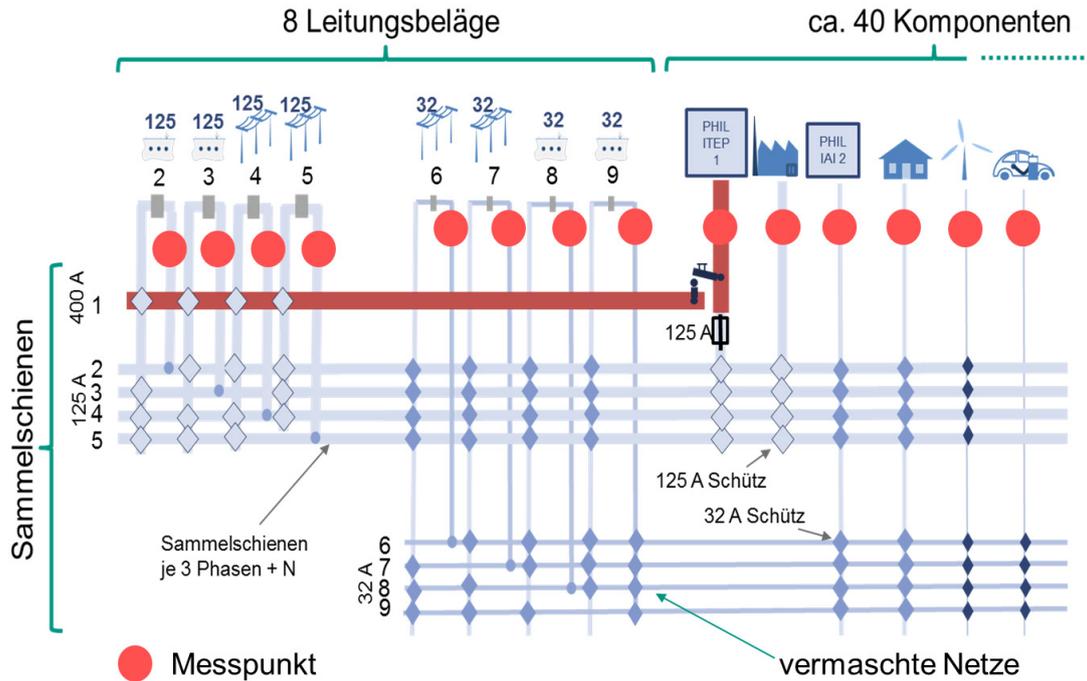


Abb. 12: Prinzipdarstellung der Schaltmatrix des Experimentierfelds

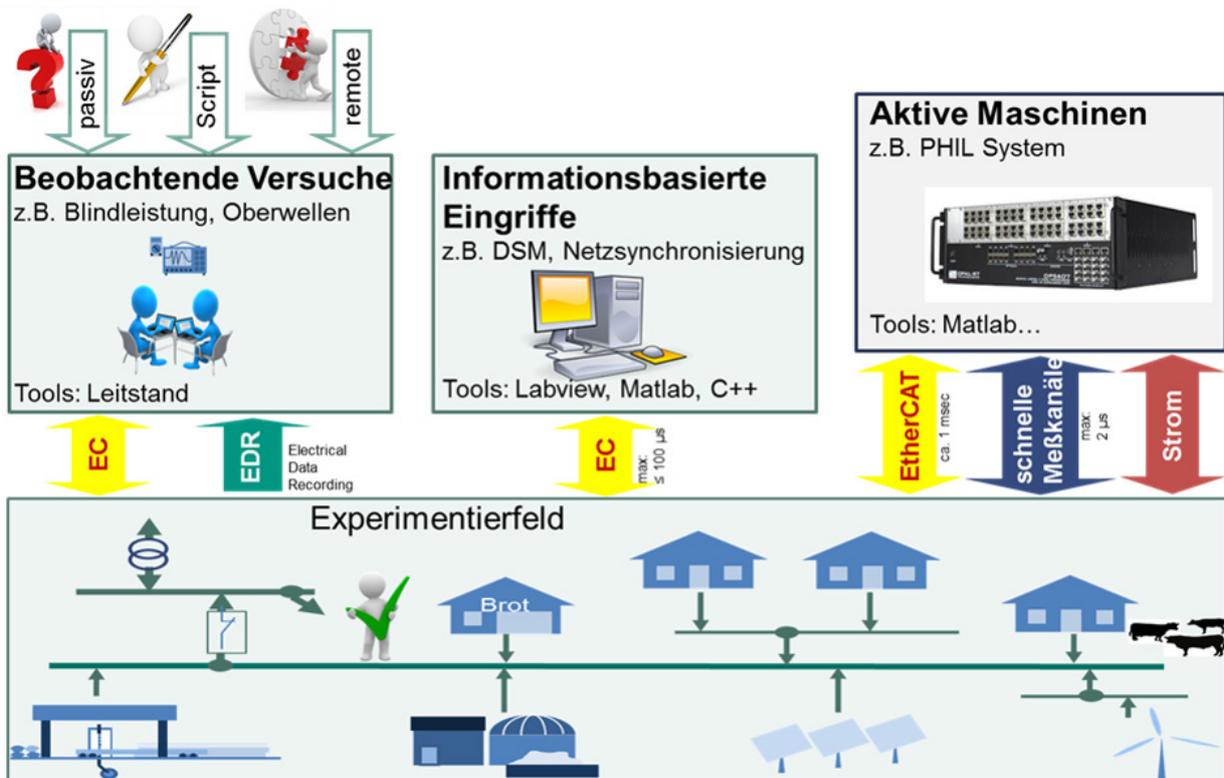


Abb. 13: Vom Experimentierfeld und seiner Anlagensoftware unterstützte Versuchskategorien

Die Lastenhefte für die Schaltmatrix und die Programmierung der Anlagensoftware sind fertiggestellt, ebenso wie einige erste Komponenten.

Neben verschiedenen Geräten, wie z.B. einer Ladestation für ein Elektroauto, die einen gerätespezifischen Verbrauch und gerätespezifische Blindleistung mitbringen, soll das Experimentierfeld einstellbare ohmsche, induktive und kapazitive Lasten anbieten. Mit R-, L- und C-Lasten werden auch die Leitungsbeläge der Kabelnachbildungen realisiert. Deshalb erhielt das Thema große Aufmerksamkeit. So wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit ein Schaltschrank mit RLC-Lasten entwickelt (s. Abb. 14). Außerdem wurde ein Auftrag für eine ferngesteuert umschaltbare Anlage vergeben.

Als Vorversuch für das Experimentierfeld wurde das Systemverhalten eines Inselnetzes aus Notstromaggregat und RLC-Lasten untersucht. Mit einem E.DR (Electrical Data Recorder) und einem Messsystem der Firma Beckhoff wurden Größen wie Spannung, Strom und Phasenlagen analysiert. Als Energiequelle diente ein Notstromaggregat (Inselnetz) sowie das öffentliche Stromnetz (Verbundnetz), um zum einen die Messsysteme zu validieren und zum anderen das Systemverhalten vergleichen zu können. Als Last wurde am IAI ein Schaltschrank entworfen, mit dem unterschiedliche Lasten für jede einzelne Phase realisiert werden können. Mit Hilfe beider hochauflösender Messmittel wurden erste Versuche über das Systemverhalten, insbesondere beim Zuschalten der Last (Sprungantwort) aufgezeichnet, analysiert und grafisch aufbereitet.

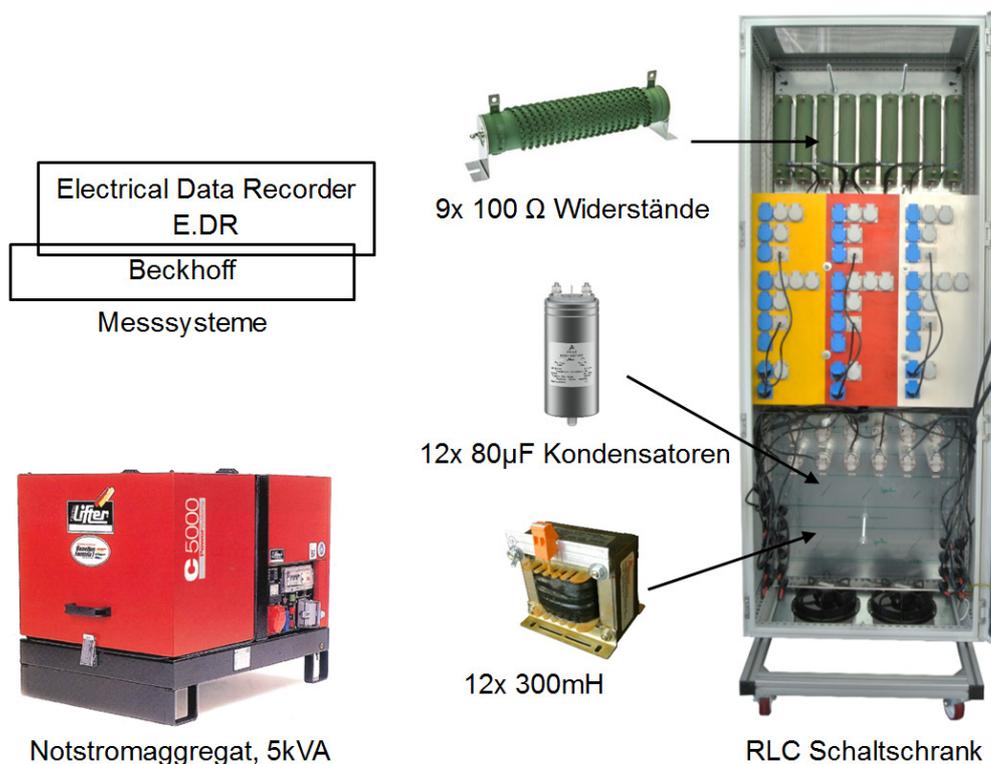


Abb. 14: Komponenten eines Vorversuchs incl. RLC-Schaltschrank

Für die Messungen von Strom- und Spannungsverläufen wurden erste Erfahrungen mit einer Leistungsmessklemme der Firma Beckhoff (EL3773) und einem Leistungsmesser der Firma Janitza (UMG604) gesammelt. Bei der Leistungsmessklemme von Beckhoff hat sich gezeigt, dass die theoretisch mögliche Messfrequenz von 10 kHz mit einer kleinen SPS (Beckhoff CX9020) nicht erreicht wird. Hier sind weitere Versuche mit einem größeren Prozessor notwendig. Hingegen gelang es mit Unterstützung der Firma Janitza, die Rohwerte der Strom- und Spannungswerte, die mit 20 kHz abgetastet werden, im 200 msec-Rhythmus auszulesen.

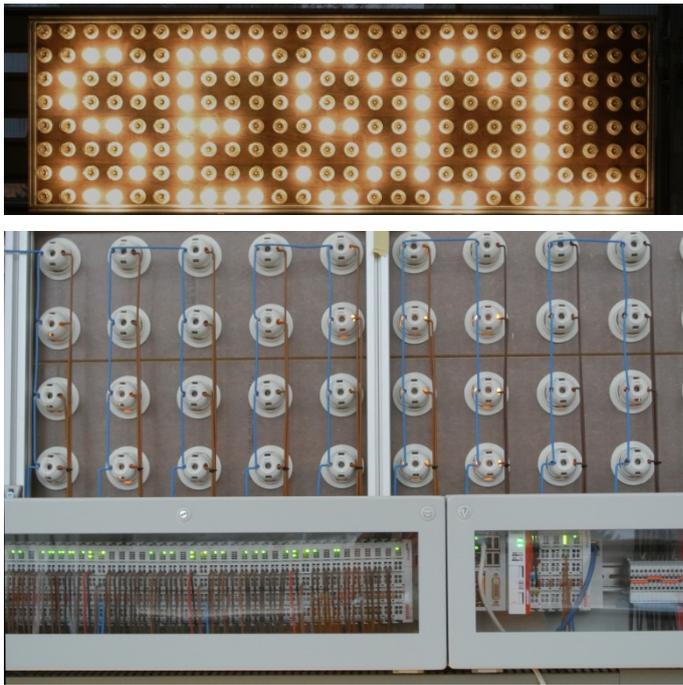


Abb. 15: Erste fertige Komponente für das Experimentierfeld ist eine Laufschriftwand

Als Steuerungshardware werden im Experimentierfeld Steuerungen der Firma Beckhoff und dazugehörige Busklemmen eingesetzt. Als Übungsbeispiel dient eine Tafel mit 208 einzeln ansteuerbaren Glühlampen, die aus drei Phasen des Netzes Strom entnehmen können (s. Abb. 15). Eine Laufschrift darzustellen bedeutet dabei häufiges Ein- und Ausschalten von Verbrauchern mit gewollten oder ungewollten Asymmetrien im Verbrauch der einzelnen Phasen. Gleichzeitig ergibt sich ein optischer Effekt in einem vornehmlich mit Schaltschränken gefüllten Labor. Durch den Einsatz von 100 Watt Glühlampen kann eine Spitzenleistung von über 20 kW erreicht werden. Das ist gewollt, weil zum Studium des Effektes auf die Spannungsversorgung ein deutlich erkennbares Signal benötigt wird.

Um den Nutzern eine Möglichkeit zur Realisierung eigener Steuerungs- und Regelungsmechanismen zu geben, sollen standardisierte Entwicklungswerkzeuge im Rahmen des Experimentierfelds unterstützt werden. Hierfür sollen unter anderem MATLAB-/Simulink-Anwendungen auf den Komponenten des Experimentierfelds ausgeführt werden bzw. mit diesen interagieren. Auch sollen Beispielanwendungen, welche die dafür notwendigen Abläufe erklären, bereitgestellt werden. In diesem Zusammenhang wurden einige diesbezüglich notwendige Komponenten zusammengestellt, entsprechende Software eingerichtet und in Betrieb genommen. Auch ein Teil der dafür notwendigen Simulink-Anwendung wurde erstellt, woraus anschließend ein auf der Beckhoff-Steuerung lauffähiges TcCOM-Modul generiert wurde (s. Abb. 16).

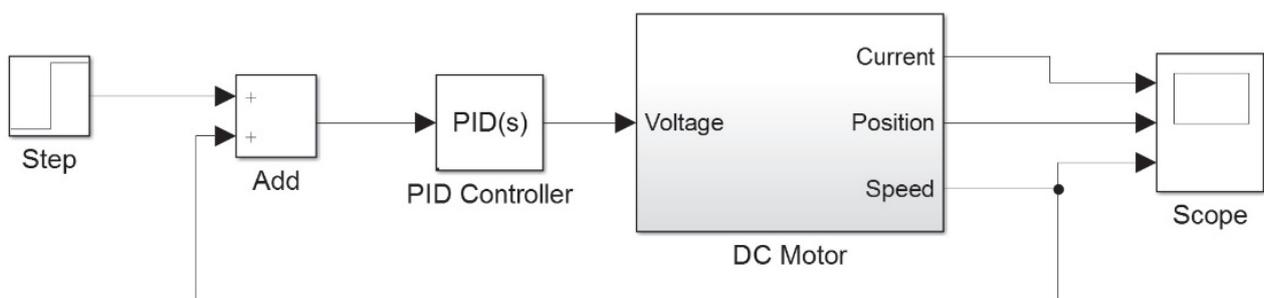


Abb. 16: Simulink-Model eines PID-Reglers für einen Gleichstrommotor

In Vorbereitung für die Bau- und Instrumentierungsphase des Experimentierfeldes im Energy Lab 2.0 wurde das Konzept Nachbarschaftsnetzwerk im Wärmesektor hinsichtlich Wärmequellen und Heizsysteme konkretisiert (s. Abb. 17). Zur Kostenabschätzung wurden hierzu Angebote für Heizungssysteme sowie zur Erschließung von Wärmequellen eingeholt. In Verbindung dazu wurde eine Zusammenstellung wichtiger Maßnahmen zur sinnvollen Integration der unterschiedlichen Heizungssysteme, die eine Einbeziehung bereits in der Bauphase der geplanten Demonstrationsgebäude bedürfen, erarbeitet. Dazu gehören u.A. die Integration von strombasierten Flächenheizungen in Wände sowie Fußboden- und Deckenheizungswärmetauscher.

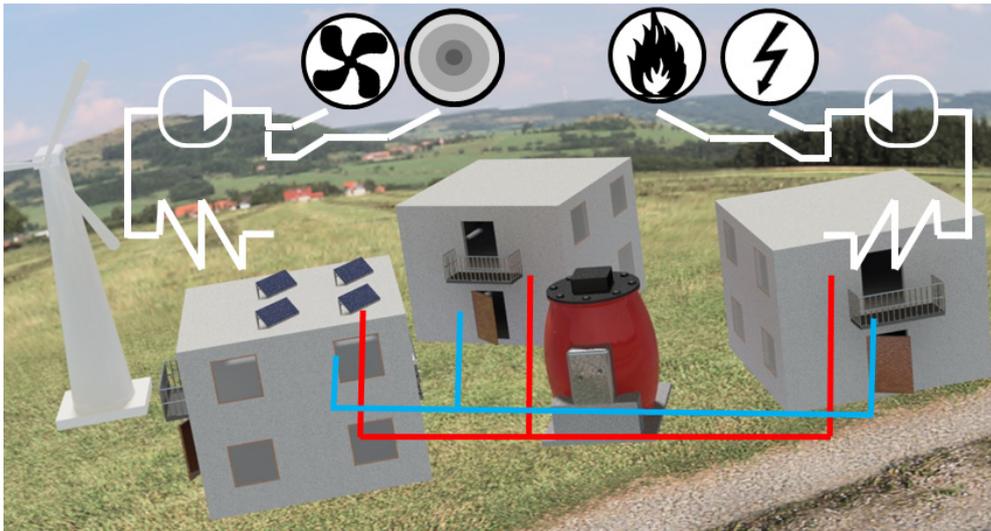


Abb. 17: Nachbarschafts-Wärme-Netzwerk mit verschiedenen Heizungssystemen und „shared heat storage“

In bestimmten Wireless Sensor and Actuator Networks (WSANs) sowie Energy Management Systems (EMSs) des Smart Grids wird das Netzwerk durch HF-Interferenzen oder auch selektive Störungen übermäßig belastet. Auch der physikalische Aufbau der Umgebung, z.B. abschirmende Wände und Decken, Stahlbeton oder Metallbauten, machen Teile des Netzwerkes für Funksysteme unerreichbar. Diese Einflüsse können die komplette oder zeitweise Unerreichbarkeit bestimmter Knoten verursachen oder einfach einen Abschnitt eines vordefinierten bzw. vorberechneten Übertragungsweges soweit stören, dass ein alternatives Routing notwendig ist oder gar die ganze Netztopologie geändert werden muss.

Um diese Problematik so weit wie möglich minimieren zu können, ohne gleichzeitig eine Steigerung der Kosten durch die Verlegung von zusätzlichen Leitungen zu verursachen, wird im Rahmen einer Dissertation die Möglichkeit einer Realisierung von Meshnetzwerken zwischen Schmalband-PLC und energiesparenden kabellosen Kommunikationstechniken basierend auf dem IEEE 802.15.4 Standard untersucht und umgesetzt. Diese Arbeiten sollen die Realisierung von weit skalierbaren, selbstheilenden und Physical Link Layer übergreifenden WSANs und EMSs ermöglichen, die als ein wichtiger Bestandteil des Smart Grids angesehen werden (s. Abb. 18).

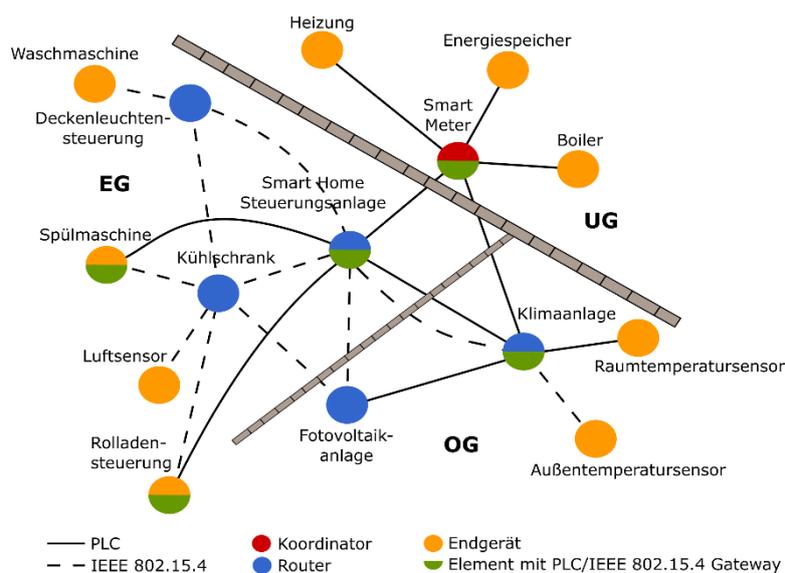


Abb. 18: Übertragungsmediumübergreifendes Meshnetzwerkes innerhalb eines Home Area Networks (HAN)

Zur Realisierung eines ZigBee/NB-PLC-Gateways wurden unterschiedliche auf dem Markt verfügbare IEEE 802.15.4 und NB-PLC Transceiver sowie Mikroprozessoren zur Steuerung des Informationsflusses miteinander verglichen und bewertet. Es wurden mehrere Angebote von Atmel, Texas Instruments, Analog

Devices usw. eingeholt. Die Entscheidung fiel zum Schluss auf die Elemente von Atmel (PLC: ATPL250A, IEEE 802.15.4: AT86RF230, µProcessor: SAM4C16C) und Semitech Semiconductors (PLC: SM2400), da diese das beste Gesamtpaket bezüglich Hard- und Software sowie Preis und Verfügbarkeit versprechen (s. Abb. 19).

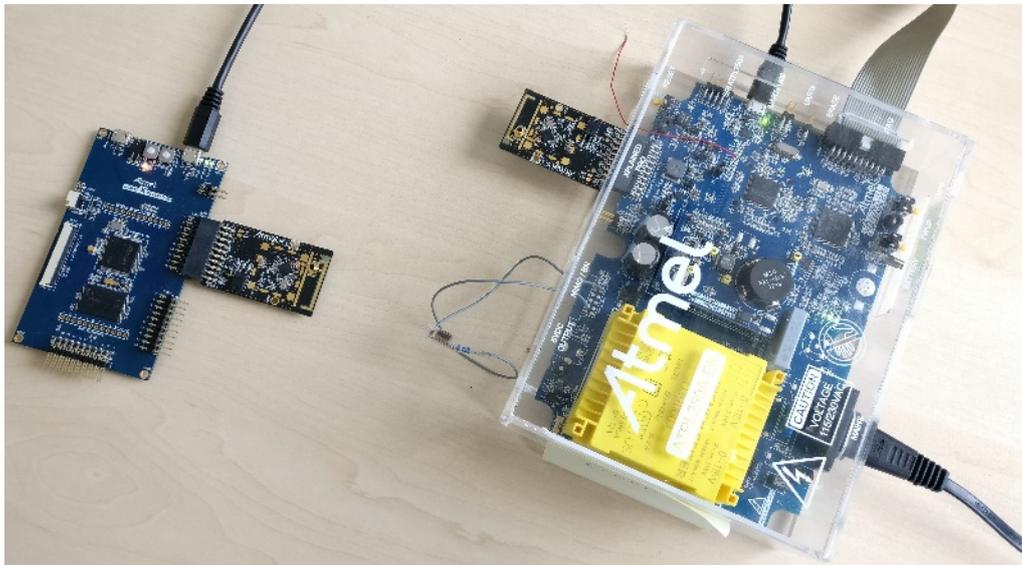


Abb. 19: ATPL250A Dev-Kit mit AT86RF230 Transceiver als Gateway-Prototyp

Im ersten Schritt der Prototypentwicklung erfolgte die Portierung sowie Inbetriebnahme der notwendigen Stacks (G3-PLC sowie IEEE 802.15.4) auf die verwendete Hardware. Anschließend wurden die beiden Stacks soweit verändert und modifiziert, dass diese layerunabhängig verwendet werden können (Abb. 20). Teile des CSMA/CA- sowie Beacon-Algorithmus, welche in dem IEEE 802.15.4 Stack in Hardware - anstatt wie von dem Standard vorgeschrieben im MAC-Layer - umgesetzt sind, wurden wieder im MAC-Layer implementiert. Die zur Kommunikation mit der MAC-Schicht des IEEE 802.15.4 Stacks notwendigen Primitives im G3-PLC Stack wurden erweitert und modifiziert.

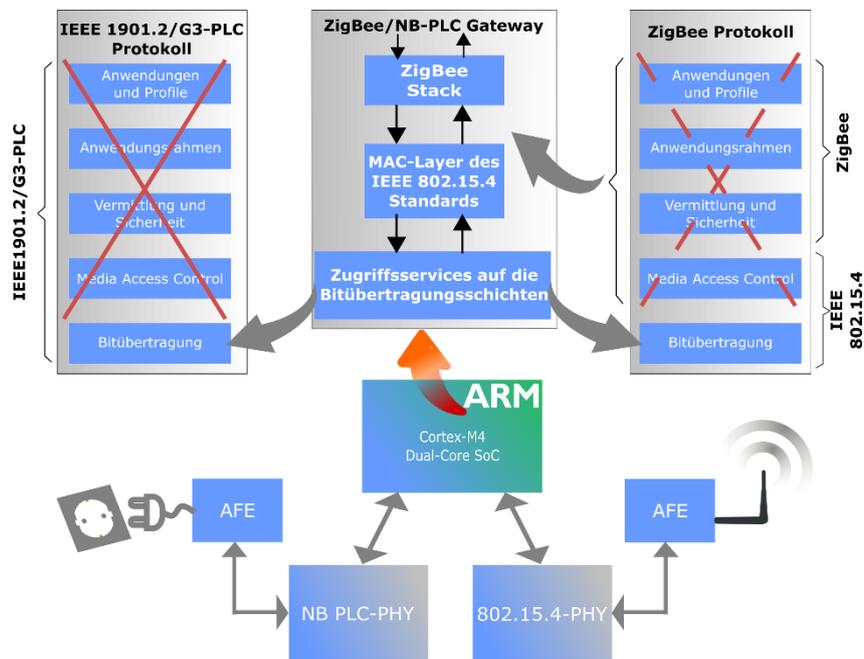


Abb. 20: Blockschaubild sowie Layerübersicht des ZigBee/NB-PLC-Gateways

Ziel der Arbeiten zum Microgrid Control, Monitoring and Visualization Center (CMVC) des Energy Lab 2.0 ist der Aufbau einer kommerziellen SCADA-Kommunikationsinfrastruktur und kommerziellen Leitwarte sowie

einer dieser ergänzenden Forschungs-IT-Infrastruktur zur Erforschung von intelligenten Energiesystemlösungen. Die Arbeiten zu der Forschungs-IT-Infrastruktur erfolgen im Kontext der F+E-Arbeiten zur programmorientierten Förderung (PoF III) sowie der das Energy Lab begleitenden Forschungsprojekte, wie ES 2050.

Bereits im 4. Quartal 2015 wurde mit einer Anforderungsanalyse begonnen, um die datentechnischen Anforderungen des Monitoring der einzelnen energietechnischen Anlagen des Energy Lab 2.0 zu erfassen. Anfang 2016 wurde dann ein grundlegendes Konzept für den Aufbau der SCADA-Kommunikationsinfrastruktur auf Basis von Kommunikationsgateways und des IEC 61850 Standards erstellt. Zur Umsetzung dieses Konzeptes lassen sich bei vielen energietechnischen Anlagen direkt kommerziell verfügbare Gateways (z.B. die HMS Anyway SG Gateways) nutzen, um die Daten von Feldbusgeräten über verschiedene Feldbusvarianten (z.B. M-Bus oder Modbus) zu erfassen und an die Leitwarte im IEC 61850 Format weiterzuleiten. Im Fall größerer Anlagen, die über ein eigenes Prozessautomatisierungssystem verfügen (z.B. Siemens S7), gibt es von den Herstellern entsprechende Gateway-Produkte (für die Siemens S7 Systeme sogenannte Station-Controller), über die eine IEC 61850 konforme Anbindung an die zentrale Leitwarte stattfinden kann.

Der Ansatz, IEC 61850 konforme Gateways als Vermittler zwischen Feldbusebene und Leitwarte einzusetzen, wurde 2016 durch Installation und Test einer konkreten Gebäudeanbindung für das neue IAI-Gebäude 449 auf dem Campus Nord des KIT verifiziert. Hierbei wurde der Stromverteiler des Gebäudes mit einem Elektrizitäts-Qualitätsmonitor der Firma Janitza zum Monitoring des Elektrizitätsverbrauchs sowie zur Beurteilung der Spannungs- und Stromqualität im Gebäude und mit einem IEC 61850 Gateway versehen. Die beschriebene Kommunikationsinfrastruktur läuft seit Installation ohne Probleme. Ausführliche Tests und Analysen der erfassten Daten ergaben, dass die getestete Geräteklasse auch eine sehr gute Lösung für die Instrumentierung der Verteilnetzknoten des „Campus Nord“-Netzes für das Energy Lab 2.0 darstellt. Für eine weitere Instrumentierung des Stromnetzes, z.B. innerhalb von Gebäuden oder technischen Anlagen, eignet sich die Geräteklasse ebenfalls sehr gut, allerdings sind für die reine Gebäudeinstrumentierung kleinere Varianten mit weniger Funktionalitäten ausreichend, da nicht alle Datengrößen, die die leistungsfähigeren Varianten der Geräteklasse erfassen, für die Erfassung der Stromverbräuche und Netzsituation in verschiedenen Bereichen eines Gebäudes notwendig sind. Insgesamt haben die durchgeführten Feldversuche bewiesen, dass sich mit dieser Technologie die Stromnetz-relevanten Daten für das Energy Lab 2.0 sehr gut erfassen lassen und der Gateway-Ansatz sinnvoll ist. Dieser Ansatz wird nun zur Instrumentierung der Gebäude und technischen Anlagen im Energy Lab sowie des elektrischen Netzes vom KIT Campus Nord im Jahr 2017 weiter detailliert und anschließend umgesetzt.

Als weitere wesentliche Ergebnisse zum Energy Lab 2.0 Projekte wurden im Kontext der Forschungsarbeiten zum HGF-Projekt Energy System 2050 die grundlegende Architektur der Forschungs-IT-Infrastruktur detailliert und erste Funktionalitäten dieser Plattform implementiert. 2016 konzentrierten sich die Arbeiten zur Forschungs-IT-Plattform auf die Konzeption und Implementierung einer ersten Version der generischen Datendienste (GDS) sowie einer ersten Version der „Serviceinfrastruktur für Smart Grid-Simulation“ und Anwendungsintegration. Bei den GDS wurden ein Stammdatenservice, womit im Wesentlichen Instanzen semantischer Modelle gemeint sind, ein Zeitreihenservice auf Basis von OpenTSDB und Services für Digital Assets, das sind Dateien mit Dokumenten zu den Objekten des semantischen Modells, definiert. Die Anforderungsanalysen wurden vor allem in Richtung PHIL mit dem Institut für Technische Physik (ITEP), bioliq mit dem Institut für Technische Chemie (ITC) und Experimentierfeld (SESCL) weitergeführt.

Des Weiteren wurden die Arbeiten zur Bereitstellung eines universell nutzbaren Visualisierungsframeworks mit Anzeigekomponenten für die Darstellung von Stammdatenobjekten als „Assets“ (Komponenten) einer intelligenten Energiesystemlösung, Messdaten sowie zugehörigen Dokumentationen, Grafiken und von Netzdarstellungen fortgesetzt. 2016 wurde hier mit „FlexVis – Flexibles Visualisierungsframework“ ein modulares, auf Microservices und Web-Komponenten basierendes Visualisierungsframework implementiert, das direkt mit der generischen Datenplattform des Energy Lab 2.0 kommunizieren kann und u.a. Funktionalitäten zur Visualisierung von Messdaten über Web-Komponenten bereithält. Zusätzlich wurde eine Dashboard-Lösung für Web-Portale entwickelt, die FlexVis-Komponenten nutzen kann und einem System-Konfigurator erlaubt, verschiedene Visualisierungen in einer Webseite auf einem Dashboard zusammenzufassen (s. Abb. 21).

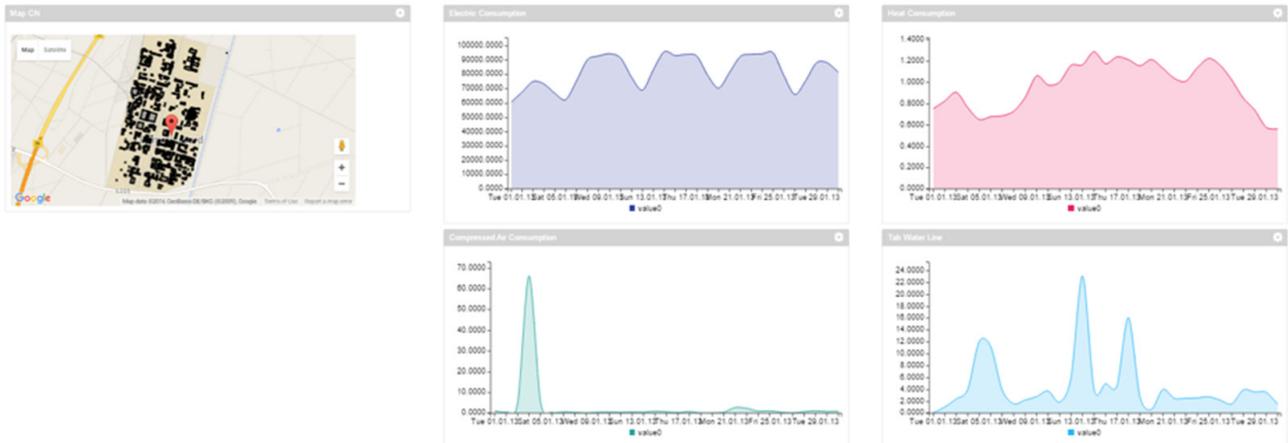


Abb. 21: Dashboard zur Anzeige von Energieverbrauchsdaten von Gebäuden (Prinzipbild)

Im Querschnittsthema sichere (safe&secure) Software des Energy Lab 2.0 in Verbindung mit ES 2050 werden für die Komponenten des Energiesystems der Zukunft verschiedene Security-Szenarien betrachtet. Das Szenario 1 (Angriff) geht von der Manipulation von Daten im Sinne „handcrafted“ aus, um Schwachstellen zur Übernahme von Systemen auszunutzen. Szenario 2 (Schädigung) betrachtet die Kommunikation manipulierter Daten von übernommenen Systemen zur Manipulation von Steuer- und Regelkreisen. Szenario 3 (Übernahme Komponente) schließlich untersucht die Ausnutzung von Schwachstellen der Implementierung von Gerätebetriebssystemen, Treibern, BIOS, Applikationen, VMs, VPNs etc.

Hierzu werden im Verbund von KASTEL und Kopernikus ENSURE folgende Methoden und Ansätze untersucht:

- Semantische und syntaktische Verifikation der Kommunikation zwischen Komponenten des Energiesystems
- Modellbasierte Plausibilitätschecks in vernetzten Systemen mit Anomalie-Erkennung trotz regulärem Kommunikationsverhalten
- Software Engineering für sichere Software

2016 wurden diverse reale Angriffe sowie die (Open Source) Werkzeuge zur Intrusion Generation untersucht. Die Werkzeuge mutieren gegebene korrekte und inkorrekte Eingaben einer Software und testen diese gegen die mutierten Eingaben. Hierbei wird nicht zufällig der komplette Eingaberaum abgedeckt, sondern durch eine Branchinganalyse die Codecoverage bei gleichzeitiger Minimierung der Eingabe maximiert. Derartige Intrusion Generation ist nicht deterministisch und terminiert nie, führt jedoch in realer Software mit Bugs schnell zu einem Eingabebeispiel, das den Bug reproduziert. Es werden weiter Untersuchungen zu Software, die auf bidirektionaler Kommunikation beruht, durchgeführt.

Existierende Protokoll- und Datenbeschreibungssprachen für Binärdaten wurden untersucht. Auf Basis klassischer Beschreibungssprachen wie ASN.1 und Typsystemen verschiedener Programmiersprachen wurde eine prototypische XML-Beschreibungssprache in den Grundzügen entworfen.

## Energy System 2050

Energy System 2050 (ES 2050) ist eine gemeinsame Initiative des Forschungsbereichs Energie der Helmholtz-Gemeinschaft und adressiert in fünf ausgewählten Forschungsthemen wesentliche Herausforderungen der Energiewende. Das IAI leitet vier Arbeitspakete im Forschungsthema 5 „Toolbox mit Datenbanken“ und ist am Forschungsthema 1 „Speicher und Netze“ beteiligt.

Im Rahmen des Forschungsthemas 5 spielen gemeinsame Standards für den Datenaustausch zwischen den Netzknoten eine wichtige Rolle, da diese zu den Grundlagen eines zukünftigen intelligenten Energiesystems gehören. Diese Standards müssen eine allgemein verständliche Sprache definieren, in der eine Kommunikation zwischen den maschinellen und/oder menschlichen Akteuren des Smart Grids stattfinden kann. Auf diesem Gebiet ist mit dem IEC Common Information Model (CIM) ein umfassendes semantisches Datenmodell entstanden, das in den IEC Standards 61970, 61968 und 62325 beschrieben ist. In Form von

UML (Unified Modeling Language) definiert CIM eine sehr detaillierte Ontologie der Elektroenergiebranche mit über mehreren Tausend Klassen, Attributen und Assoziationen. Eine konsequente Anwendung der CIM-Standards bei der Datenerfassung im Smart-Grid-Umfeld ist eine Voraussetzung für Datenintegration und -interoperabilität. Eine Besonderheit ist dabei die Erfassung von Daten im Kontext weiterer Daten. Die Semantik von Daten, insbesondere Sensordaten, wird so explizit gemacht. Dies ermöglicht neue Ansätze für die Datenexploration und -analyse sowie in der Entwicklung von Software-Agenten, die datengetriebene Aufgaben im Smart Grid automatisieren können.

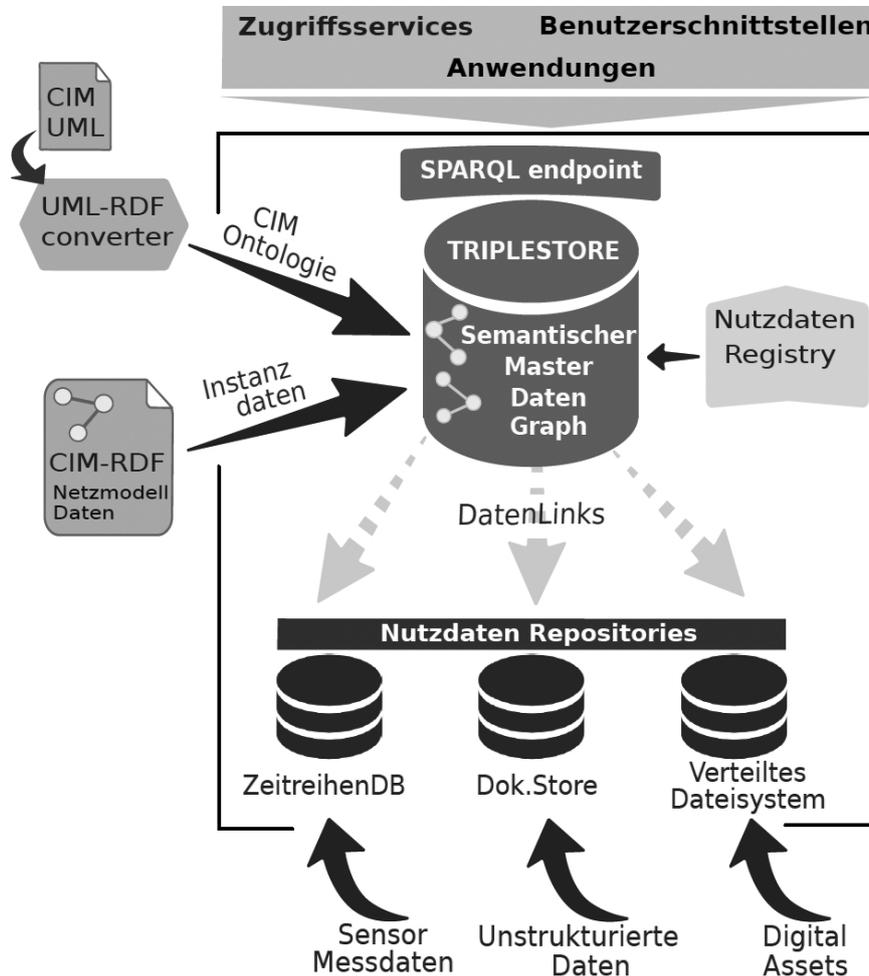


Abb. 22: Nutzung semantischer Technologien für die Datenhaltung in Projekten der Helmholtz-Initiative Energie System 2050 und im Smart Grid

Ein wesentliches Ziel im Forschungsthema „Toolbox mit Datenbanken“ ist die Nutzung semantischer Technologien für das Datenmanagement. Abb. 22 zeigt eine entsprechende Architektur. Die Konzeption und erste Realisierungen für das elektrische Energiesystem auf CIM-Basis sind das Ergebnis der Arbeiten im Jahr 2016. Ein Konverter wandelt die UML-Daten des CIM entsprechend dem IEC 61970-501 Standard in ein graphenbasiertes Datenformat - RDF-Schema (Resource Description Framework) - um. Die Datenspeicherung erfolgt in einem Triplestore (Apache Jena TDB). Aus diesem Schema lassen sich sogenannte Profile erzeugen und bei Bedarf modifizieren, um Modellobjekte eines gegebenen elektrischen Netzes zu beschreiben. Diese Instanzenmodelle werden ebenfalls als RDF-Triple gespeichert. Semantische Datenmodelle unterscheiden sich von Netzmodellen, wie sie etwa im Forschungsprogramm SCI für physikalische bzw. elektrische Berechnungen verwendet werden. Sie stellen Stammdaten dar, welche die Komponenten des Stromnetzes beschreiben und sind Einstiegspunkte, auf die sich Nutzeranfragen beziehen. Die Metadaten zur Verlinkung von semantischen Daten und Nutzdaten (Zeitreihen, Digital Assets und weitere unstrukturierte Daten) sind ebenfalls im Triplestore abgelegt. Das graphenbasierte Format erlaubt schnelle Datenzugriffe. Es werden erste Nutzdaten aus dem KIT Campus Nord in InfluxDB überführt. Aktuell steht die Modellierung von Teilen des Stromnetzes im KIT Campus Nord an, um einen ersten realen Use Case zu erzeugen.

Eine Vision ist die Modellierung einer einheitlichen Ontologie für das gesamte Energiesystem. So kommen z.B. 3D-Gebäudemodelle als Ergänzung zu bisherigen CIM-Modellen in Betracht, sowie Wärme- und Kältenetze und die Gasversorgung. Dazu wurden als Grundlage für den weiteren Projektverlauf Verfahren weiterentwickelt, um Gebäudemodelle einer Liegenschaft automatisiert aus dem Datenaustauschformat CityGML zu erzeugen. Für den Testfall eines Gebäudes auf dem Gelände des KIT Campus Nord konnte dieser Ansatz erfolgreich demonstriert werden.

Im Arbeitspaket 5.3 soll eine grundlegende, modulare IT-Systemarchitektur als Toolbox zum Aufbau eines „Internet der Energie“ konzipiert und in ausgewählten Teilbereichen bzw. für ausgewählte Anwendungsszenarien (z.B. Messdatenmanagement, Monitoring, Energiemanagement; Co-Simulation von smarten Energielösungen) prototypisch realisiert werden. Im Rahmen von Voruntersuchungen wurden 2015 erste Anforderungen aus ES 2050 und Anwendungsprojekten, wie dem Energy Lab 2.0 des KIT, an eine solche IT-Architektur analysiert und bereits existierende generische Ansätze zum Aufbau modularer Internet-gestützter IT-Systemarchitekturen für ein „Internet der Energie“ oder „Internet of Things“ (z.B. FIWARE) auf ihre Eignung für ES 2050 untersucht. Dabei zeigte sich generell, dass eine Cloud- und Big-Data-Technologie-basierte Laufzeitumgebung sowie ein darauf aufsetzender Microservice-basierter Systemarchitekturansatz eine gute Grundlage für die grundlegende, modulare IT-Systemarchitektur der ES 2050-Toolbox sein könnte, bestehende Plattformen (wie FIWARE) diesen Ansatz aber nicht optimal umsetzen. Daher wurde ein eigener Ansatz entwickelt (siehe Abb. 23) und mit dessen Umsetzung im Jahre 2016 begonnen.

Auf der Laufzeitinfrastrukturebene (Hardware-nahe Ebene) erlaubt das Konzept der „Internet der Energie“-Infrastruktur den Einsatz von Rechnerclustern (wie sie zum Beispiel in lokalen Rechenzentren oder auch durch Cloudanbieter bereitgestellt werden), die eine vereinheitlichte, verteilte und horizontal skalierbare rechnerübergreifende Betriebsumgebung für Anwendungen bereitstellen. Ein darüber liegendes Cluster-Betriebssystem auf Basis von aufkommenden Technologien und Standards automatisiert den Betrieb des Clusters und schafft für Anwendungen eine abstrakte, rechnerübergreifende und verteilte Betriebssystem-Laufzeitumgebung, die auch wichtige Grundframeworks zum Datenmanagement und Datenanalyse (Big Data Tools) sowie Werkzeuge zum automatisierten Management von Microservices (Containervirtualisierung) enthält. Oberhalb einer solchen Grundinfrastruktur können dann modulare, hochverteilbare Microservices für ein „Internet der Energie“ konzipiert und realisiert werden.

Als grundlegende Elemente der „Internet der Energie“-Diensteschicht wurden dabei zunächst ein Konzept für (generische) Datendienste zur Speicherung von Mess- und Logdaten (Time Series Data), zum Management von technischen Metadatenobjekten (formale Beschreibung von Gebäuden, technischen Anlagen, Messequipment, etc., Object Data Service), zur Speicherung von digitalen Asset Informationen (Digital Asset Service) sowie zur formalen Beschreibung der Semantik von Metadaten-, Assetobjekten und Messdatenreihen über einen Schema-Dienst zusammen mit deren Beziehungen (in einem Link Service) entwickelt (siehe Abb. 24). Erste Versionen des Time Series Service und des Object Data Services wurden 2016 detailliert und implementiert. Die Implementierung der weiteren Services wird im Jahr 2017 folgen.

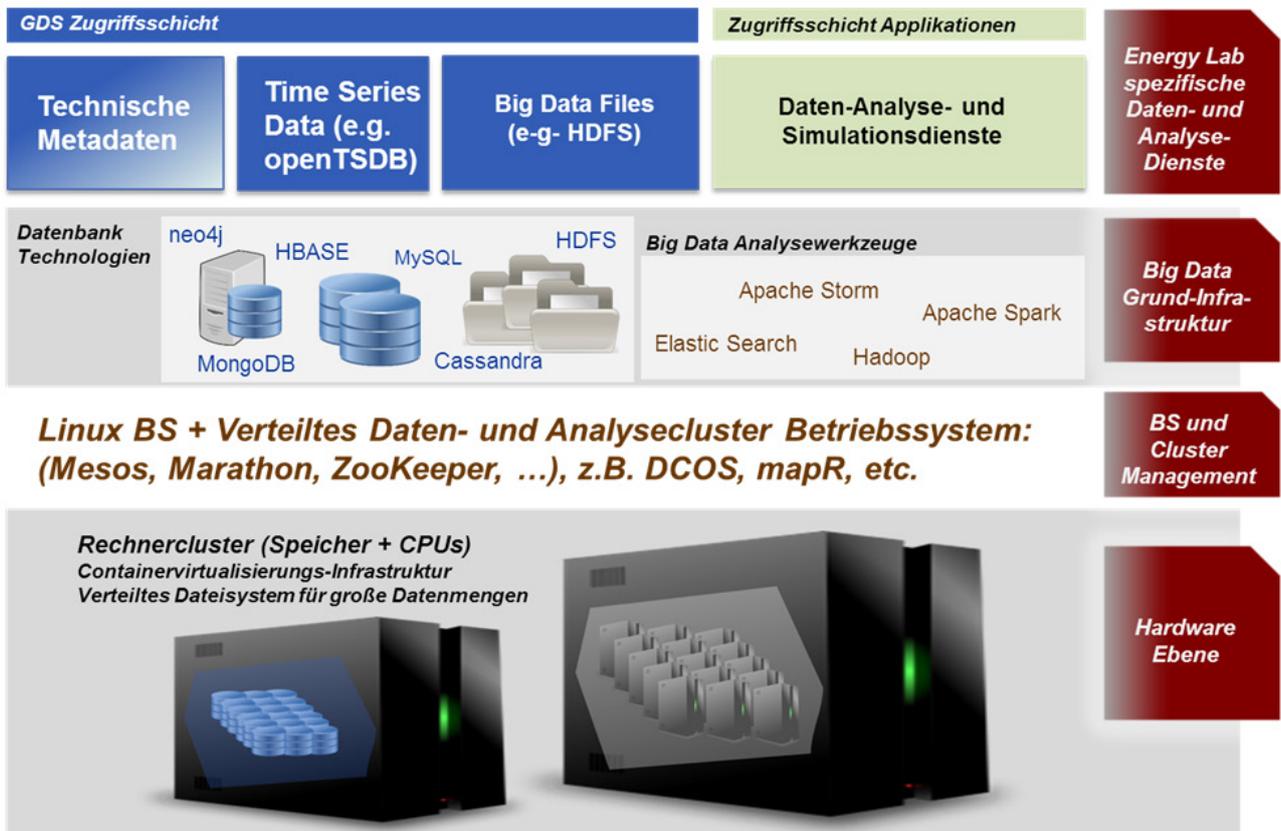


Abb. 23: Laufzeitsystem und grundlegende Systemarchitektur für eine „Internet der Energie“-Toolbox

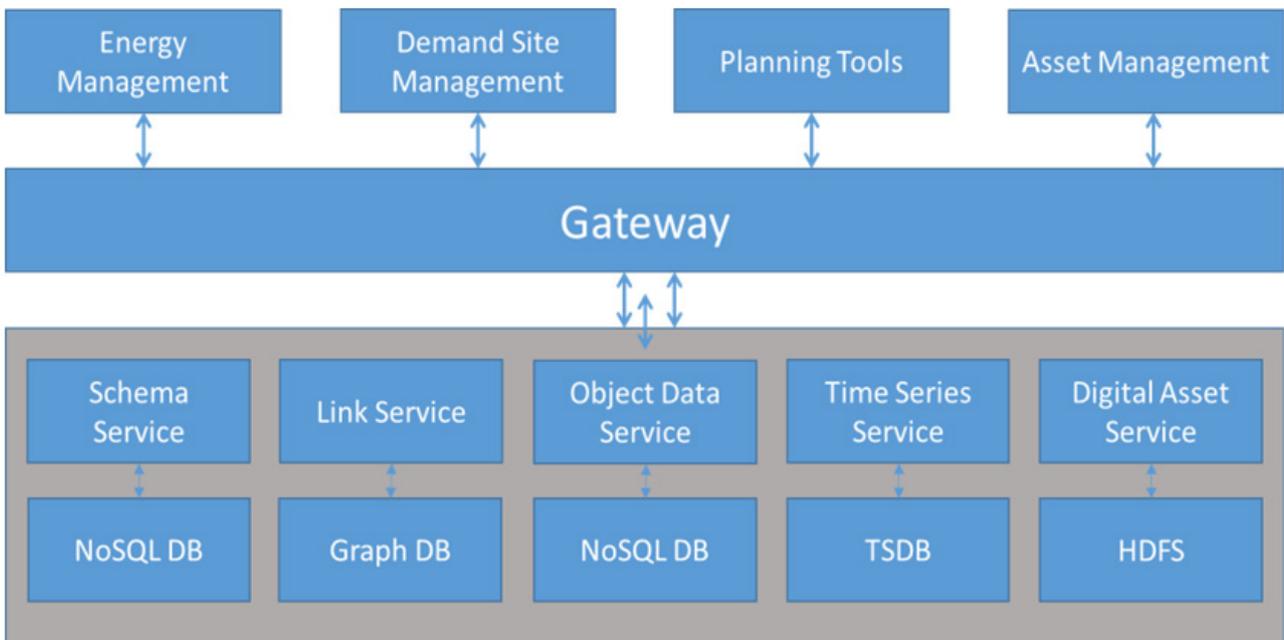


Abb. 24: Architektur und Aufteilung der Datenmanagement-Infrastruktur in einzelne Microservices

Des Weiteren wurde ein erstes Konzept für eine agentenbasierte Co-Simulationsplattform in 2016 konzipiert und anschließend in einer prototypischen Version umgesetzt. Die Co-Simulationsplattform soll dabei nicht nur für die Simulation reiner Elektrizitätsnetze sondern für die Co-Simulation intelligenter Energiesystemlösungen eingesetzt werden, die neben einem elektrischen Netzmodell auch weitere Modelle, z.B. eines Wärmenetzes, oder physikalischer Modelle verschiedenen technischer Anlagen, wie regenerative Erzeuger oder Energiespeicher, sowie von Gebäuden als Verbraucher, enthalten können.

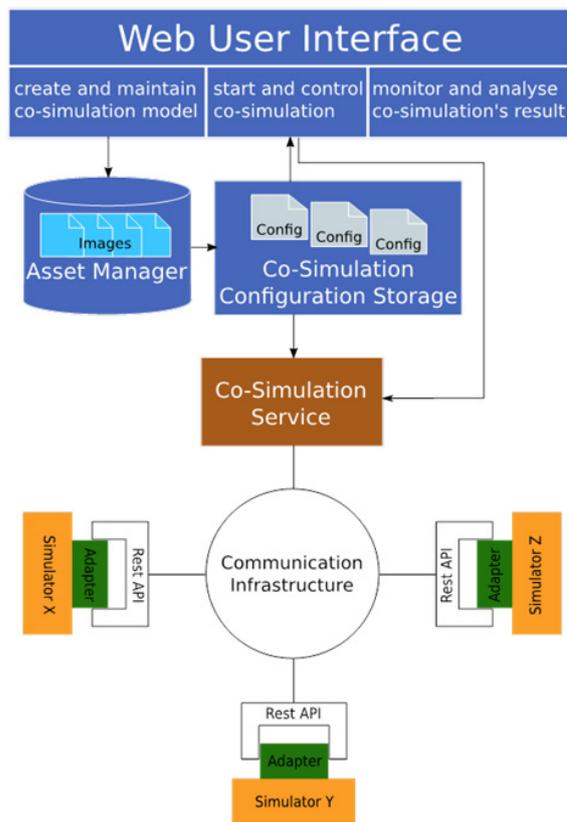


Abb. 25: Architektur der Co-Simulationsumgebung

Die grundsätzliche Architektur der Co-Simulationsplattform basiert auf den Konzepten zur Containervirtualisierung, über die beliebige Anwendungen automatisiert auf Rechnerknoten mit dem entsprechenden Grundbetriebssystem (Linux oder Windows) im Cluster ausgeführt werden können. Hiermit ist es möglich, ganz unterschiedliche Simulatoren (MATLAB, Modelica-Varianten, AnyLogic, Digsilent, usw.) mit auszuführenden Modellen auf der Clusterumgebung des Energy Lab 2.0 zu starten. Damit die Simulatoren untereinander Daten austauschen können, enthält die Co-Simulationsplattform eine auf Clustern lauffähige, hoch-skalierbare Nachrichten-basierte Kommunikationsinfrastruktur (auf Basis von Apache Kafka), die den schnellen Austausch von Daten zwischen den Simulatoren ermöglicht. Spezifische Adapter für unterschiedliche Simulationstools binden den Simulator an die Co-Simulationsumgebung an und ermöglichen den Datentransfer und die Steuerung der einzelnen Simulationsknoten (siehe Abb. 25).

Zur Erweiterung der methodischen Grundlagen wurden Arbeiten zur Prognose unter Unsicherheiten sowie bei teilweise fehlenden Wetterdaten durchgeführt. Hierzu wurde die frei verfügbare MATLAB-Toolbox GaitCAD erweitert. Außerdem laufen begleitende Fallstudien zur Analyse des Energiebedarfs im KIT Campus Nord auf Basis der Smart-Meter-Daten seit 2006 für Stromverbrauch und Wärme in einer Auflösung von 15 Minuten sowie zur Prognose des Fernwärmebedarfs der Stadt Karlsruhe.

Im Bereich der Regelung und Steuerung steht die Entwicklung von Regelungsverfahren für multi-modale Energiesysteme im Mittelpunkt. Aufgrund der Tatsache, dass diese durch eine große Anzahl von Stellgrößen und Beschränkungen der Stell- und Zustandsgrößen gekennzeichnet sind, liegt der Fokus auf optimierungsbasierten Verfahren. Es wird ein Benchmark-Beispiel entwickelt, welches in Zukunft auf die Campusgelände des FZJ und des KIT ausgedehnt werden kann und zur Validierung der verschiedenen Ansätze dienen wird.

Ziel der Arbeiten des IAI im Forschungsthema „Speicher und Netze“ ist die Analyse des transienten Netzverhaltens bei Störungen oder plötzlichen Laständerungen sowie die Simulation der Auswirkungen auf den Frequenzgang und die Spannungen an den Netzknoten. Daraus können geeignete Strategien und neuartige Methoden für die Netz-Primärregelung entwickelt werden.

Die Dimension und Komplexität des Netzanalyseproblems hat sich aufgrund der Einführung der dezentralen Energieversorgung, der zunehmenden Durchdringung der erneuerbaren Energiequellen und der Netzerweiterungen in Form von großen Netzverbindungen, erhöht. Diese Änderungen in der Netzstruktur fordern strengere dynamische Studien und Analysen, um einen kontinuierlichen und zuverlässigen Betrieb des Netzes zu gewährleisten.

Es wurde eine Überprüfung des aktuellen Stands der Technik und der bestehenden Technologien für die Analyse der Stromnetzodynamik durchgeführt, um die technologischen Lücken zu identifizieren. Verschiedene kommerzielle und Open-Source-Netzberechnungssoftware-Pakete wurden bezüglich ihrer Erweiterbarkeit analysiert. Für die nähere Untersuchung wurde die OpenSource-Software OpenModelica aufgrund der folgenden Eigenschaften ausgewählt: 1) Nicht-kausale Modellierung basierend auf differentialen und algebraischen Gleichungen: Die gleichungsbasierte Modellierung ermöglicht einen schnellen Modellierungsprozess und ergibt wiederverwendbare Modelle. 2) Multi-Domain Modellierung: d.h. es ist möglich, elektrische,

mechanische, thermodynamische und hydraulische Modellkomponenten innerhalb eines Applikationsmodells zu kombinieren, was für eine zukünftige Co-Simulation von Bedeutung ist.

In einem weiteren Schritt wurde ein neues Generator-Subsystemmodell in OpenModelica entwickelt. Der Dampfturbine-Regler wurde aus Komponenten der Bibliotheken iPSL (*iTesla Power Systems Library*), ThermoPower Library und Standard Modelica Library erstellt. Das neue Generator-Subsystem wurde mit IEEE-Standard Netzmodellen (IEEE-9 und IEEE-14) sowie dem KIT-CN-20 kV getestet. Das KIT-Modell in OpenModelica ist in Abb. 26 und das Generator-Subsystem mit der Frequenzregelung in Abb. 27 dargestellt.

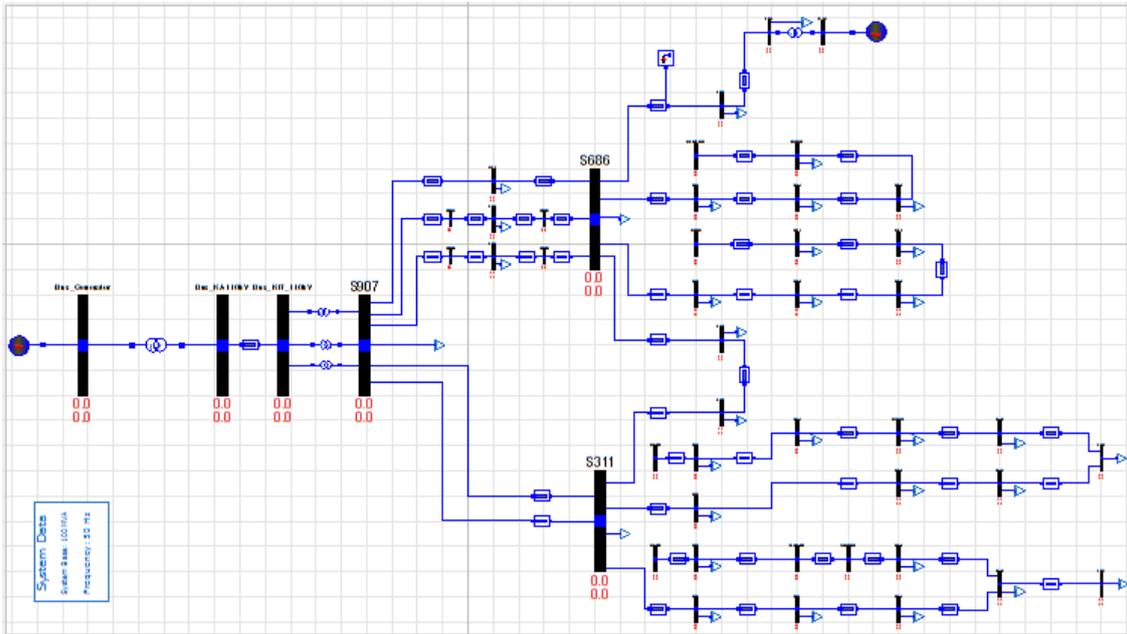


Abb. 26: 20 kV-Stromnetzmodell des KIT Campus Nord in OpenModelica

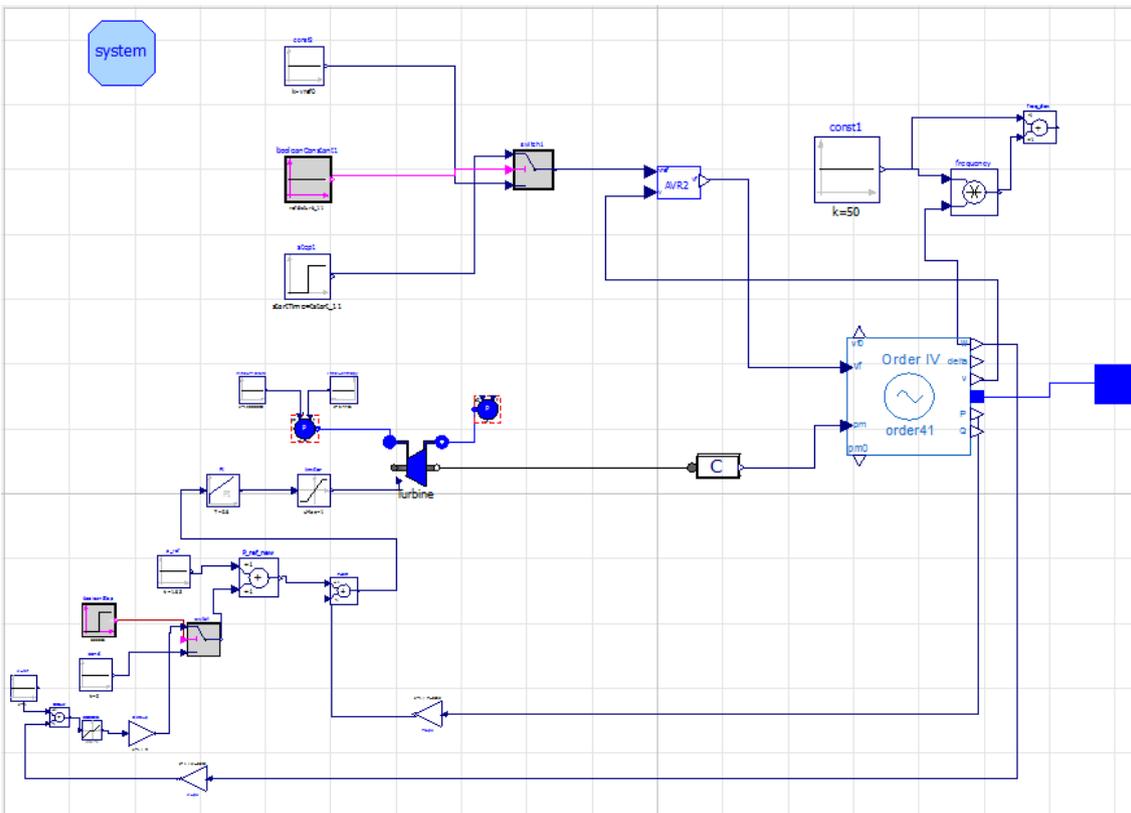


Abb. 27: Das Generator-Subsystem für die Frequenzregelung in OpenModelica

Das Ansprechverhalten des neuen Generator-Subsystems auf Netzstörungen wurde mit den bestehenden OpenModelica-Generatormodellen verglichen. In Abb. 28 ist das Ansprechverhalten des Generators auf einen Kurzschlussfehler in iPSL und in Abb. 29 mit dem neuen Generatormodell dargestellt. Die Analyse der Ergebnisse zeigt, dass das Netz mit dem neuen Generatormodell ein besseres Stabilitäts-Ansprechverhalten aufweist. Dies ist auf die Wirkung des integrierten Reglers zurückzuführen, mit der Fähigkeit auf Frequenzabweichungen zu reagieren und somit die mechanische Leistung der Dampfturbine einzustellen.

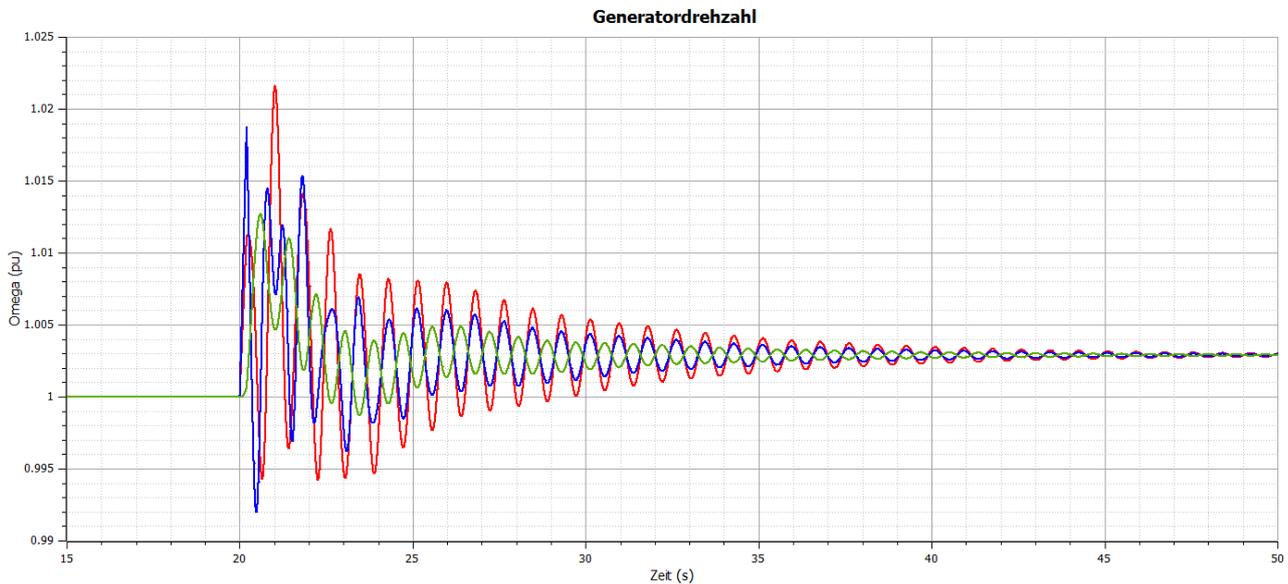


Abb. 28: Drehzahlverhalten des bestehenden OpenModelica-Generatormodells in iPSL nach einem Kurzschlussfehler

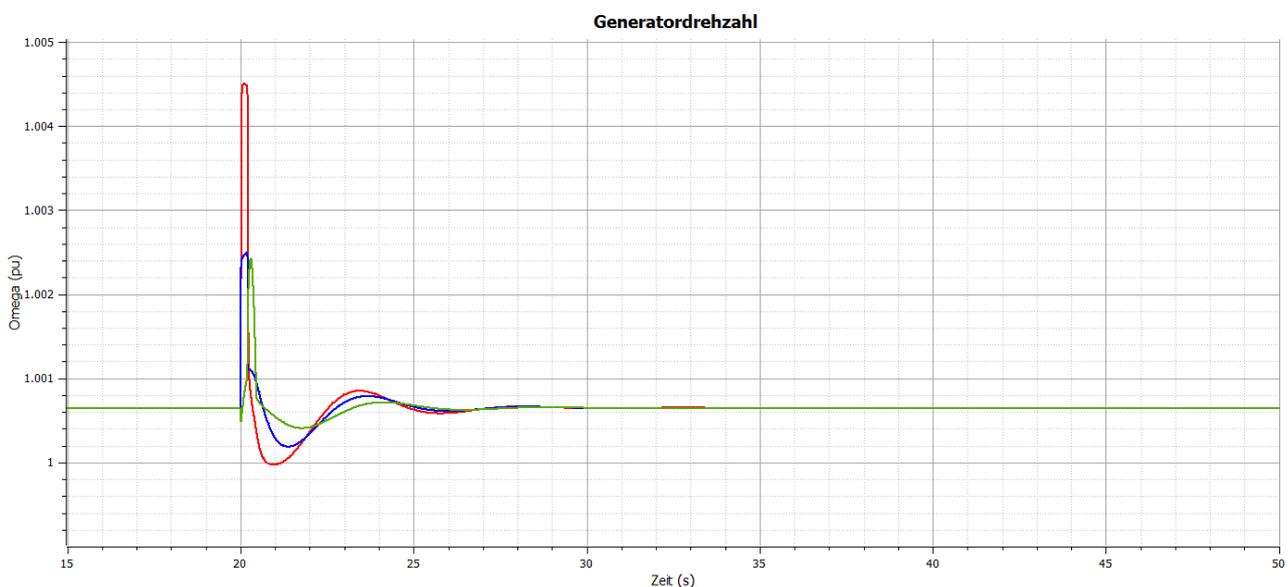


Abb. 29: Drehzahlverhalten des neuen Generatormodells nach einem Kurzschlussfehler

Allerdings ist OpenModelica relativ langsam bei der Simulation großer Stromnetze mit einem hohen Detailgrad. Daher wurde die Umsetzung der mathematischen Modelle in eigene Algorithmen initiiert, um einen skalierbaren dynamischen Simulationsalgorithmus zu entwickeln, der unabhängig von OpenModelica ausgeführt werden kann. MatDyn wurde als Basis für einen dynamischen MATLAB-Simulator ausgewählt, da dieser auch die Matpower-Netzdefinition unterstützt und grundlegende numerische Algorithmen beinhaltet. Das neue Generatormodell wurde von der OpenModelica-basierten, mathematischen Definition auf einen MATLAB-basierten Algorithmus übertragen. Das neue Generator-Subsystem wurde mit Standardnetzmodellen getestet. Das Systemverhalten auf Netzstörungen war ähnlich wie in OpenModelica.

Für den Einsatz der MATLAB-basierten Algorithmen auf einer Hochleistungsrechenplattform wie etwa der FORHLR II am KIT-SCC wurde Julia ausgewählt. Julia ist eine höhere Programmiersprache für numerisches und wissenschaftliches Rechnen, die paralleles und verteiltes Ausführen von Programmen und den direkten Aufruf von C- und Fortran-Bibliotheken ermöglicht. Sie besitzt eine ähnliche Syntax wie MATLAB und andere technische Programmiersprachen. Erste Tests mit Lastfluss-Berechnungen von IEEE-Standard-Netzmodellen wurden in Julia bereits erfolgreich durchgeführt. Die Portierung der entwickelten Algorithmen für die Dynamiksimulation auf die Julia-Plattform ist in Bearbeitung.

# Programm EMR: Energy Efficiency, Materials and Resources

## Vergasung

### Kamerabasierte Optimierung von Hochtemperaturprozessen (KaPro)

Die Optimierung von energetischen Prozessen erfordert eine örtlich und zeitlich aufgelöste Kenntnis der Vorgänge, eine Beschreibung durch charakteristische Kenngrößen mit Analyse in Verbindung mit Offline-Daten, eine dedizierte Modellierung sowie nachfolgend eine regelungstechnische Umsetzung. Die Umsetzung der Algorithmen in echtzeitfähige, zuverlässige und sichere Softwaresysteme und -werkzeuge sind weitere Ziele der Arbeiten. Forschungsthemen sind BioLiq und Brenda sowie begleitend die Fusion und Drittmittelprojekte (COMFEB).

2016 erfolgte die Inbetriebnahme der Hochdruck-Kamerasonde am bioliq-Hochdruckvergaser. Hierbei wurde zunächst die High-Dynamic-Range-Kamera (HDR-Kamera) eingesetzt. Mithilfe der Hochdrucksonde ist es erstmals möglich, Bilder aus dem laufenden Betrieb des Brenners im Hochdruckvergaser bei 40 bzw. 80 bar zu erfassen. Die speziell ausgelegte Stickstoffspülung erlaubt eine gute Sicht auf die Brennerflamme über mehrere Tage, ohne ein signifikantes Verschmutzen der Optik durch Ruß. Es wurden exemplarische Datenaufnahmen mit der HDR-Kamera durchgeführt.

Nach Herunterfahren der Anlage erfolgte der Umbau auf die High-Speed-Kamera (HS-Kamera). Wegen eines anlagenseitigen Ausfalls der Stickstoffspülung verschmutzte die Optik schnell, weswegen im laufenden Betrieb keine Aufnahmen mit der HS-Kamera durchgeführt werden konnten.

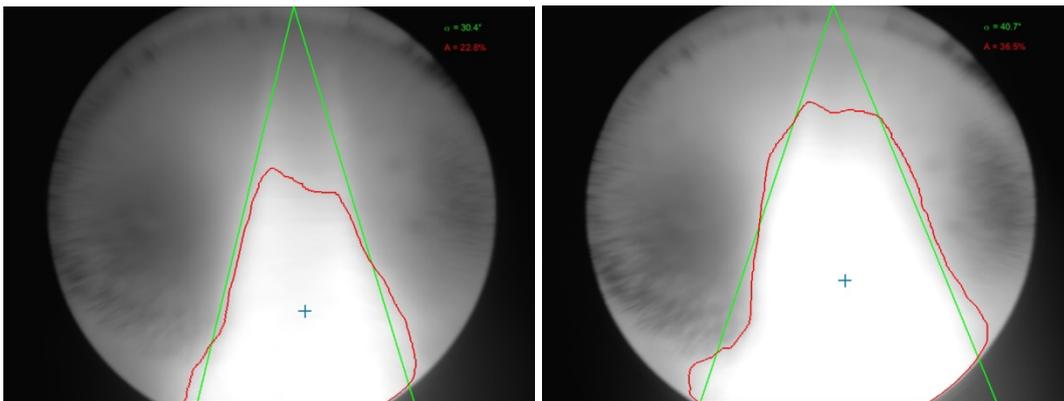


Abb. 30: Auswertung der Bilddaten hinsichtlich Flammenfläche (rot), Öffnungswinkel der Flamme (grün) und Flammenschwerpunkt (blau) bei zwei unterschiedlichen Prozesssituationen

Auf Basis der Bilddaten der HDR-Kamera wurden grundlegende Bildverarbeitungsalgorithmen entwickelt, die eine erste Analyse verschiedener Brennereinstellungen auf die Flamme ermöglichen. Für zwei verschiedene Brennereinstellungen ist in Abb. 30 der Öffnungswinkel der Flamme (grün), der heiße Verbrennungsbereich (rot) mit dessen Flächenanteil im Brennraum sowie der Flammenschwerpunkt (blau) eingezeichnet. In der folgenden Abb. 31 sind dann Bereiche mit starken zeitlichen Schwankungen der Grauwerte hell hervorgehoben, stabile Bereiche (und Bereiche in denen die Sättigungswerte dauerhaft erreicht wurden) besitzen niedrigere Grauwerte.

An der BRENDA-Anlage wurde eine mehrtägige Messkampagne in Zusammenarbeit mit dem ITC durchgeführt. Dabei wurde ein HDR-Kamerasystem in der Nachbrennkammer zur Analyse der Mehrstoffbrennerflamme eingesetzt. Ziel war die Untersuchung der Lastflexibilität des Brennersystems bei Mitverbrennung alternativer Brennstoffe. Hierzu wurden Lastrampen gefahren, die durch den sukzessiven Wechsel der Brennstoffzusammensetzung eingestellt wurden. Zum Einsatz kamen, neben der Steinkohle, torrefizierte Biokohle sowie Stroh.

Um bei verschiedenen Last- und Brennkammersituationen eine zuverlässige automatische Flammenerkennung in den Videobildern zu erzielen, wurde das bestehende Detektionsverfahren um eine referenzmessungsbasierte Korrektur erweitert.

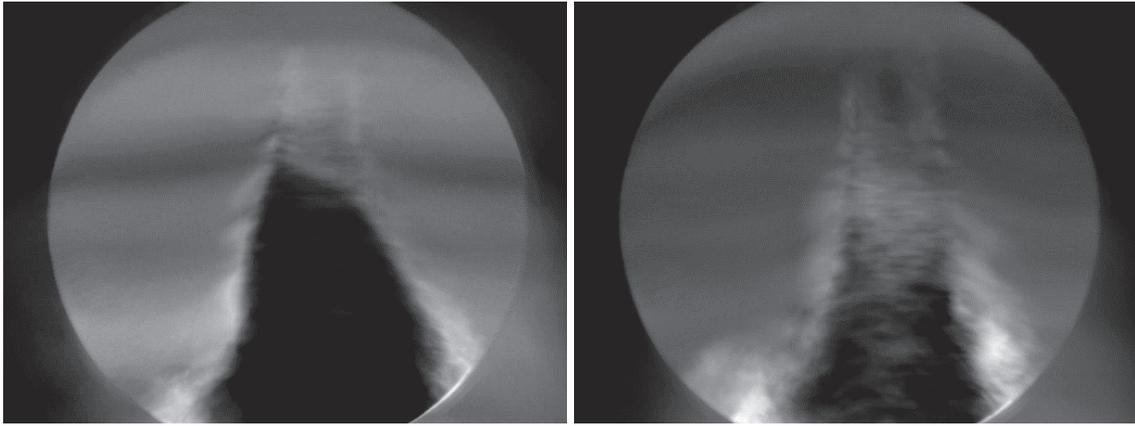


Abb. 31: Hervorhebung von Bildbereichen mit starken zeitlichen Schwankungen bei zwei unterschiedlichen Prozesssituationen

Beim bisherigen Verfahren werden bei sehr heißen Bedingungen in der Brennkammer (Hochlastbetrieb) tendenziell zu kleine Flammen detektiert, bei kühleren Bedingungen (Niedriglastbetrieb) zu große Flammen (Abb. 32).

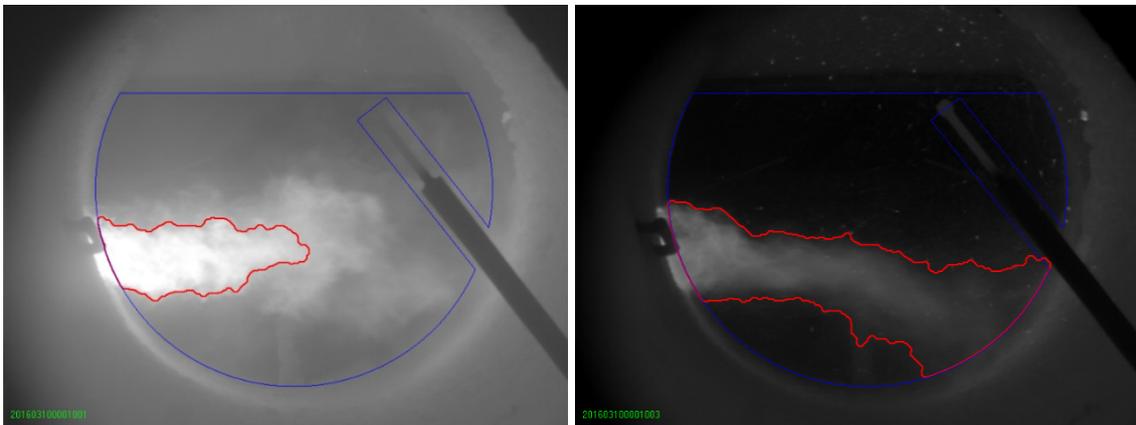


Abb. 32: Detektion von zu kleinen Flammen bei Hochlastbetrieb und von zu großen Flammen bei Niedriglastbetrieb mit dem bisherigen Verfahren.

Beim neuen Verfahren erfolgt eine Referenzmessung außerhalb des Flammengebiets. Aus der Messung wird ein modifizierter Schwellwert für die Flammendetektion ermittelt und angewendet (Abb. 33)

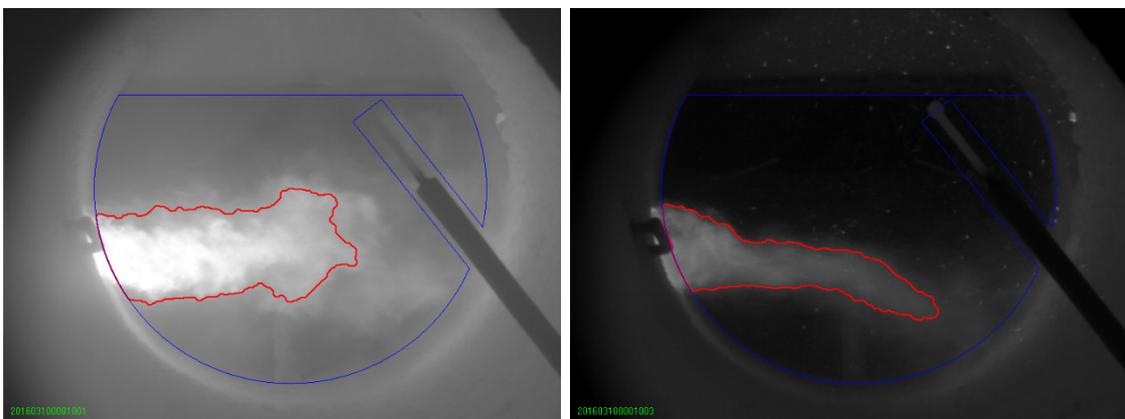


Abb. 33: Detektion von sinnvollen Flammenbereichen mit dem neuen Detektionsverfahren für die gleichen Flammenaufnahmen wie in Abb. 32.

Auf Basis des modifizierten Flammendetektionsverfahrens konnten für die durchgeführten Experimente quantitative Untersuchungen zum Verhalten der Flammen durchgeführt werden. Nachfolgend werden die Ergebnisse eines Experiments exemplarisch vorgestellt.

In Experiment 1 wurde die Mitverbrennung von Stroh untersucht. Abb. 34 zeigt die zeitlichen Verläufe der Brennstoffmengen von Steinkohle (schwarz) und Stroh (grün) sowie den Verlauf der berechneten thermischen Leistung (gelb).

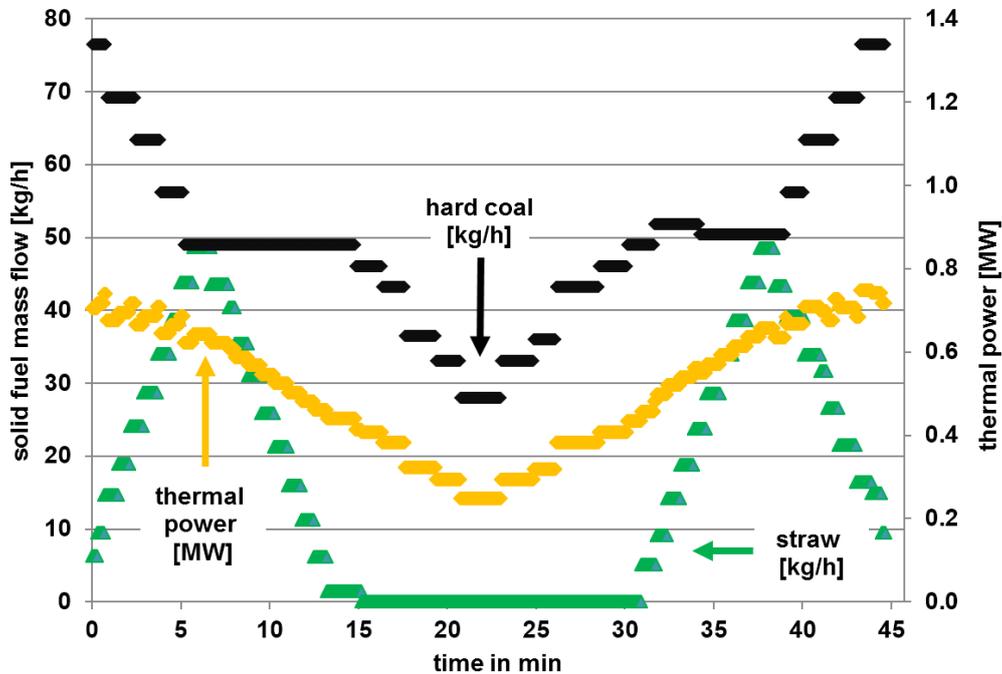


Abb. 34: Brennstoffmengen für Steinkohle und Stroh sowie berechnete thermische Leistung

Abb. 35 zeigt die Flammenbilder zu den Zeitpunkten 0 min (Hochlast), 5 min (Mittellast) und 22 min (Niedriglast). Die rot umrandete Region gibt die im aktuellen Frame detektierte Flammenregion an. Die grün umrandete Region den stabilen Flammenanteil, also die Region die über eine Sekunde lang immer in der Flammenregion liegt.

Für das Experiment wurden die relative Fläche der Flammenfläche bezogen auf den Brennkammerquerschnitt, die mittlere Helligkeit der Flamme sowie die Flammenstabilität anhand der Bilddaten berechnet. Die Flammenstabilität ergibt sich dabei aus dem Verhältnis der stabilen Flammenfläche zur aktuellen Flammenfläche. Abb. 36 zeigt die Verläufe der bildbasiert ermittelten Flammengrößen. Wie erwartet, sinkt die Flammenfläche und -helligkeit bei Lastabsenkung ab. Ab einem bestimmten Punkt nimmt auch die Flammenstabilität rapide ab.

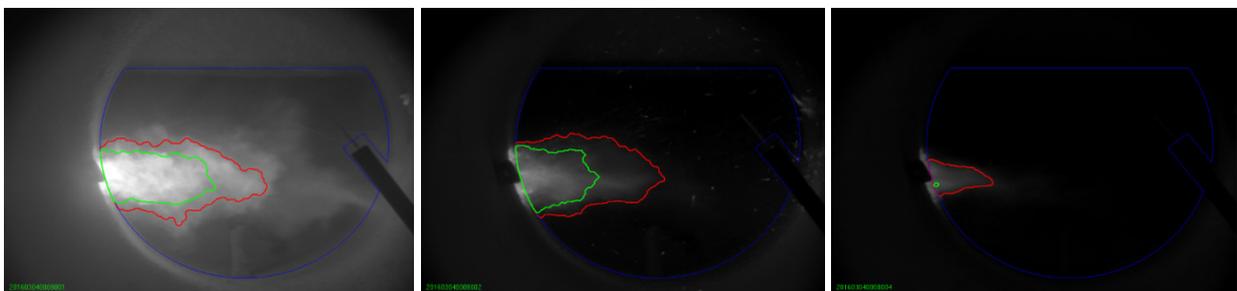


Abb. 35: Flammenbilder an den Zeitpunkten 0 min (Hochlast), 5 min (Mittellast) und 22 min (Niedriglast).

Für die später geplante kamerabasierte Flammenüberwachung und -regelung sind geeignete untere Schwellwerte für die Flammenstabilität zu definieren. Bei Unterschreitung ist über die Brennersteuerung einzugreifen, um die Flamme zu stabilisieren. Welche Stellgrößen hierfür am geeignetsten sind (Drall, Luftmengen, usw.), soll in der Messkampagne 2017 näher untersucht werden.

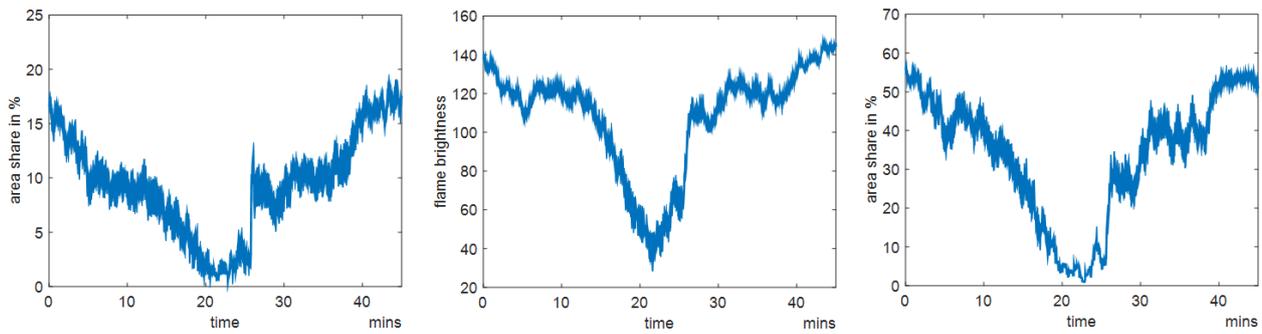


Abb. 36: Ergebnisse der quantitativen bildbasierten Flammenanalyse für das beschriebene Experiment: relative Flammenfläche (links), -helligkeit (Mitte) und -stabilität (rechts)

Für zukünftige Fusionsreaktoren werden lithiumreiche Keramikugeln als Tritiumquelle benötigt, damit der Reaktor seinen eigenen Brennstoff vor Ort erzeugen kann. Im Rahmen von FUSION wurde unter Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera die Wirkung des Betriebsdrucks auf die Dynamik der Tröpfchenbildung des geschmolzenen laminaren Lithium-Keramik-Strahls untersucht. Die Lithium-Keramik wird bei ca. 1400°C in einem Platin-Ofen geschmolzen. Bei Erreichen der Zieltemperatur wird ein Druck auf das System aufgebracht, um über eine 300 µm-Düse einen Strahl zu bilden. Der geschmolzene Strahl zerfällt, wie durch die Plateau-Rayleigh-Theorie beschrieben, in Tröpfchen, die dann unter Verwendung von flüssigem Stickstoff zu kleinen Keramikugeln verfestigt werden. Eine Hochgeschwindigkeitskamera wurde direkt unter der Düse positioniert, um diesen Zerfall-Prozess für einen großen Bereich von Betriebsdrücken mit 3500 Bildern pro Sekunde zu erfassen (s. Abb. 37). Unter Verwendung von Bildverarbeitungsmethoden wurden aus diesen Bilddaten Kenngrößen berechnet, die sich zur Analyse des Prozesses eignen (s. Abb. 38). Ziel ist es, Erkenntnisse über den Einfluss des Betriebsdrucks zu erhalten, um letztlich eine hohe Ausbeute bei der Lithiumkeramik-Herstellung, d.h. eine homogene Größenverteilung der Kugeln zu erreichen.

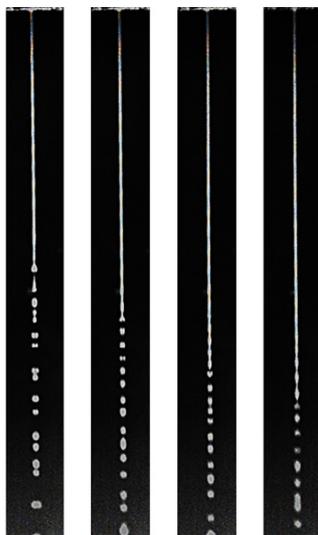


Abb. 37: Strahl bei verschiedenen Betriebsdrücken

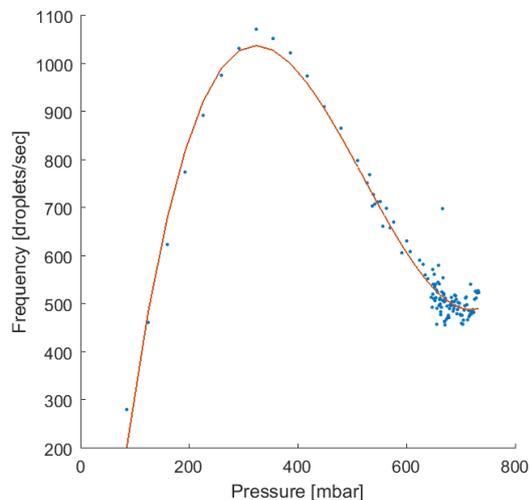


Abb. 38: Einfluss des Betriebsdrucks auf die Frequenz der Tröpfchenbildung

In der energieintensiven Branche industrieller Verbrennungsprozesse stellt die Energiekostenminimierung und die Reduktion der Umweltbelastung unter anderem durch ausgestoßenes CO<sub>2</sub> eine große Herausforderung für Anlagenbetreiber dar. Ein wichtiger Schritt um diese Herausforderungen zu meistern, ist die Substitution primärer, fossiler Brennstoffe wie etwa Braun- oder Steinkohle durch sogenannte alternative Brennstoffe wie etwa Kunststoffabfälle oder Reifenflusen. Die Bereitstellung der Energie durch diese alternativen Brennstoffe trägt zum einen durch die von Kohle abweichende Zusammensetzung aber auch durch den Wegfall der Beseitigung durch Müllverbrennungsanlagen zur Reduktion klimarelevanter CO<sub>2</sub>-Emissionen bei. Ein Blick auf die schwindende Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe im Vergleich zu den in großen Mengen verfügbaren alternativen Brennstoffen zeigt zudem auch ein für die Zukunft großes Kosteneinsparpotential. Ein wichtiger Bestandteil dieser Substitution fossiler Brennstoffe stellt die Verwendung von

Mehrstoffbrennern dar. Diese ermöglichen über mehrere Zuleitungen verschiedene Arten an alternativen Brennstoffen in vorgegebenen Anteilen zu fossilen Brennstoffen mit zu verbrennen. Eine vollständige Substitution, d.h. ein Betrieb mit 100% alternativem Brennstoff, ist aufgrund der schwankenden Qualität (Feuchtigkeit, Partikelgröße, etc.) der alternativen Brennstoffe und dem damit einhergehenden schwankenden Verbrennungsverhalten bisher nicht dauerhaft möglich. Um den Anteil weiter erhöhen zu können, ist eine kontinuierliche Überwachung des Verbrennungsverhaltens des alternativen Brennstoffes notwendig, die mit den bisherigen vorhandenen Messsystemen nicht gewährleistet werden kann.

Das Ziel des COMFEB-Projektes ist es, diese Überwachung des alternativen Brennstoffes mit Hilfe einer geeigneten Sensorik (IR-Kamera) und einer anschließenden Bildverarbeitung, die Kenngrößen zum Verbrennungsverhalten des Brennstoffes bereitstellt, zu ermöglichen.

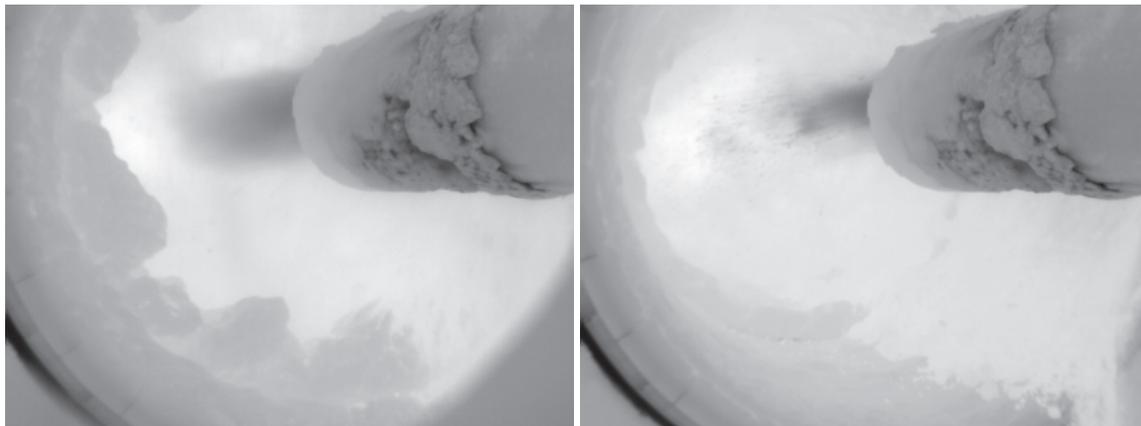


Abb. 39: Vergleich Petrolkoksgemisch (links) und Braunkohlestaub (rechts).

Im Rahmen des Projektes wurde 2016 eine Messkampagne bei einer Zementanlage in Wössingen durchgeführt. In dieser Messkampagne wurde der Einfluss auf die Sichtbarkeit der Brennstoffe bei Einsatz eines Petrolkoksgemisches anstelle des bisher verwendeten Braunkohlestaubes als alternativen Brennstoff untersucht (Abb. 39). Das Petrolkoksgemisch zeigt hierbei eine wesentlich stärkere Überdeckung des alternativen Brennstoffes als der Braunkohlestaub.

Des Weiteren wurde die Bildverarbeitungskette (Abb. 40) um zwei Vorverarbeitungsverfahren erweitert, welche die Robustheit der bisherigen Detektion der Flugbahn des alternativen Brennstoffes steigern. Zum einen wird die Brennerposition überprüft (Abb. 41 links), um zu verhindern, dass beim Ausbau der Kamera oder des Brenners Änderungen in der Aufnahmekonstellation auftreten. Zum anderen werden Anbackungen detektiert (Abb. 41 rechts), die aufgrund ihres ähnlichen Grauwertes bei Nichtbeachtung zu Fehldetektionen des Brennstoffes führen würden.

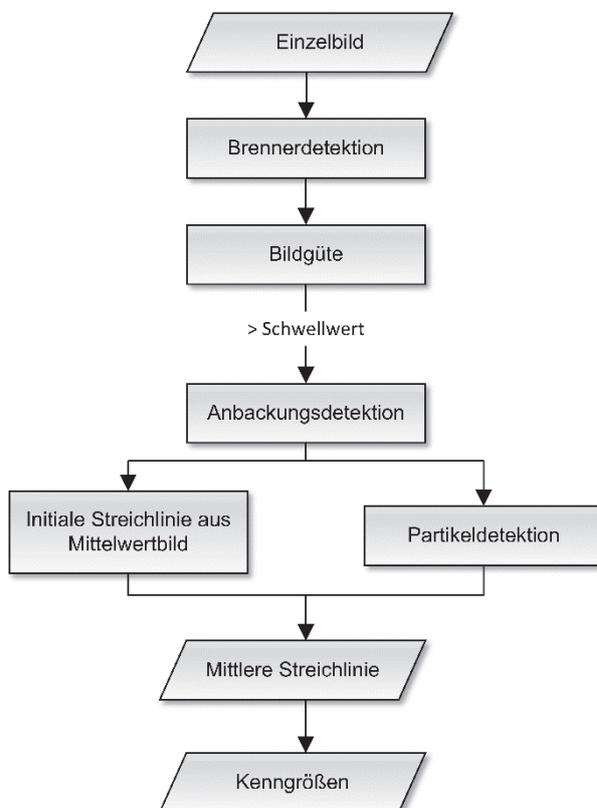


Abb. 40: Bildverarbeitungskette zur Überwachung von Mehrstoffbrennern

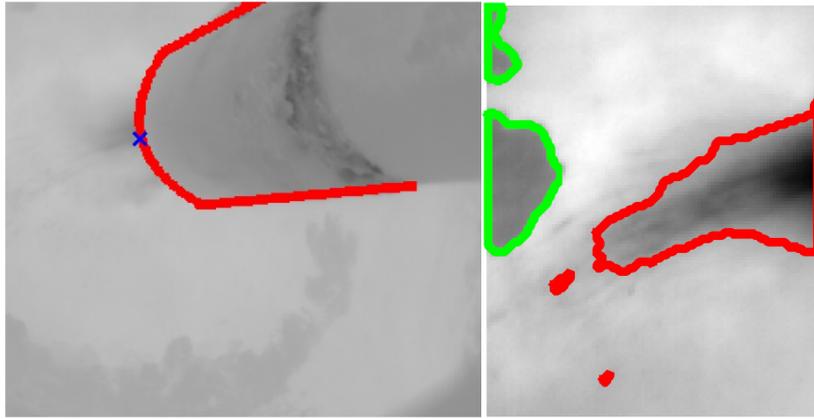


Abb. 41: Bildvorverarbeitung. Links: Überprüfung der Brennerposition. Rechts: Detektion von Anbackungen

Die entwickelten Bildverarbeitungsverfahren wurden außerdem in einen ersten Prototyp der „Inspect pro control“-Prozessoptimierungssoftware der Firma ci-Tec integriert und befindet sich im 24h-Testeinsatz an der Zementanlage in Wössingen (Abb. 42).

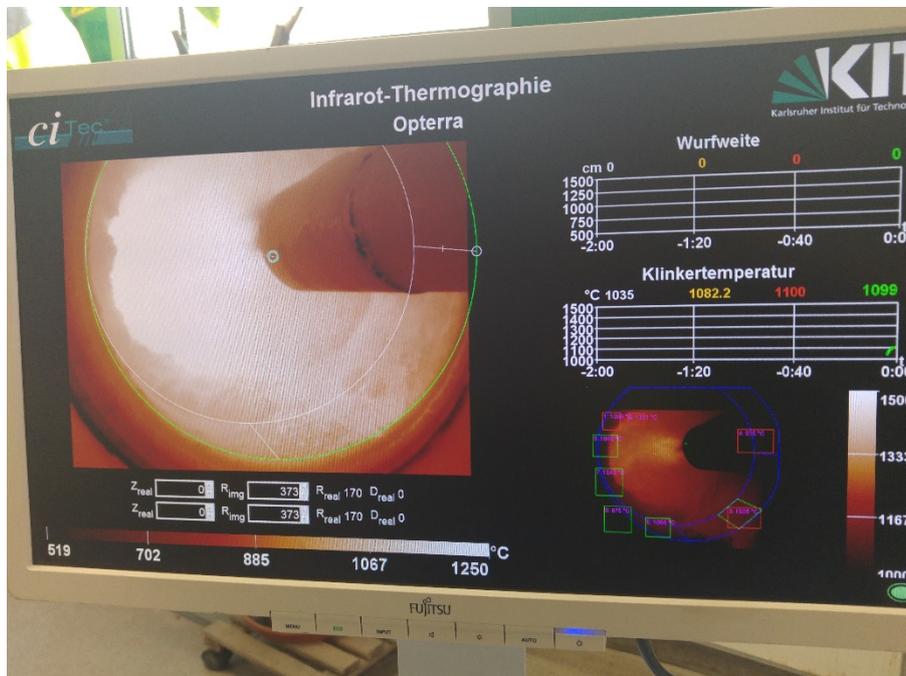


Abb. 42: Inspect pro control Prototyp im Einsatz an der Zementanlage in Wössingen

# Mineralische Konstruktionsmaterialien

## Innovative Prozessführung (InPro)

Die energetische Optimierung von verfahrenstechnischen Prozessen erfordert eine detaillierte Kenntnis der jeweiligen Vorgänge, die Ableitung von und die Beschreibung durch charakteristische Kenngrößen und Analyse in Verbindung mit Offline-Daten, eine dedizierte Modellierung sowie die regelungstechnische Umsetzung zur eigentlichen Optimierung. Die Umsetzung der Algorithmen in echtzeitfähige, zuverlässige und sichere Softwaresysteme und -werkzeuge mit dem angestrebten Transfer in die industrielle Anwendung sind weitere Ziele der Arbeiten. Prozessschritte bei Celitement wie die Entsäuerung, der Hydrothermalprozess im Autoklaven und die Mahlung sind durch neuartige Messtechniken zu erfassen, zu analysieren und modellmäßig durch charakteristische Kenngrößen zu beschreiben. Darauf aufbauend können diese Prozessschritte regelungstechnisch mit softwarebasierten Werkzeugen beherrscht werden. Die Arbeiten werden ergänzt durch die Drittmittelprojekte i.Bridge, AGaMon und HySeP.

Zement ist der weltweit meistverbrauchtete Werkstoff mit sehr hohem Verbrauch an Primär- und Sekundär-energie und hohem Kohlenstoffdioxidausstoß. Das Celitement-Verfahren für die Herstellung eines neuartigen hydraulischen Bindemittels wird im Rahmen verschiedener Untersuchungen an einer Pilotanlage weiterentwickelt und optimiert (Abb. 43). Um möglichst effiziente Fahrweisen realisieren zu können, ist es wichtig, die verschiedenen Zwischenprodukte und auch das Endprodukt überwachen zu können. Derzeit ist eine Messung der Produktqualität von Celitement mit Hilfe verschiedener Analyseverfahren, wie Röntgenbeugungsdiffraktometrie (XRD) mit der Rietveld-Methode, thermogravimetrischer Analyse oder Bestimmung der Druckfestigkeit nach der Hydratisierung, noch sehr aufwändig. Eine Online-Messung und-Bewertung der Produktqualität im Herstellungsverfahren auf Basis der Online-Nah-Infrarot (NIR)-Spektroskopie wird vom IAI entwickelt. NIR-Spektroskopie wurde wegen seiner Einfachheit, seiner Leistung und Robustheit ausgewählt. Chemometrische Methoden für die Berechnung physikalischer und chemischer Parameter aus NIR-Spektren sind bisher nicht für hydraulische Bindemittel etabliert und sollen für die Berechnung qualitätsrelevanter Größen von Celitement eingesetzt werden.

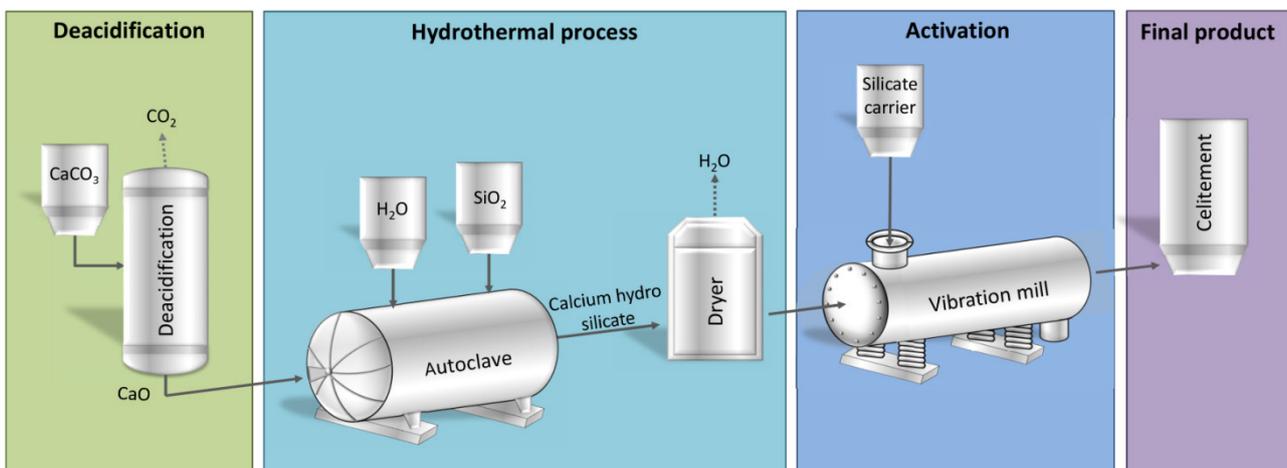


Abb. 43: Überblick über den Celitement-Produktionsprozess

Abb. 44 zeigt das Konzept für die NIR-Spektroskopie-basierte Online-Qualitätsüberwachung im Celitement-Prozess am Beispiel des Ausgangs des Reaktionsmahlungsprozesses. Die notwendigen Kalibriermodelle basieren auf Labormessung durch Thermogravimetrie, Röntgenbeugungsdiffraktometrie sowie Festigkeitsanalysen. Für die Ermittlungen des optimalen Kalibriermodells werden verschiedene Datenvorverarbeitungsmethoden und deren Kombinationen systematisch angewendet und das entstehende Kalibriermodell über eine Kreuzvalidierung auf seine Güte hin untersucht. Zudem wurden verschiedene Modellordnungen des Kalibriermodells untersucht und diejenige Modellordnung gewählt, die die letzte signifikante Güteverbesserung gegenüber der nächst niedrigeren Modellordnung erzielt. Weiterhin lassen sich verschiedene Kombinationen von Teilen des Gesamt-NIR-Spektrums untersuchen. Die Teilung kann in gleich große spektrale Bereiche, unterschiedlich große spektrale Bereiche und explizit ausgewählte spektrale Bereiche erfolgen (s. Abb. 45).

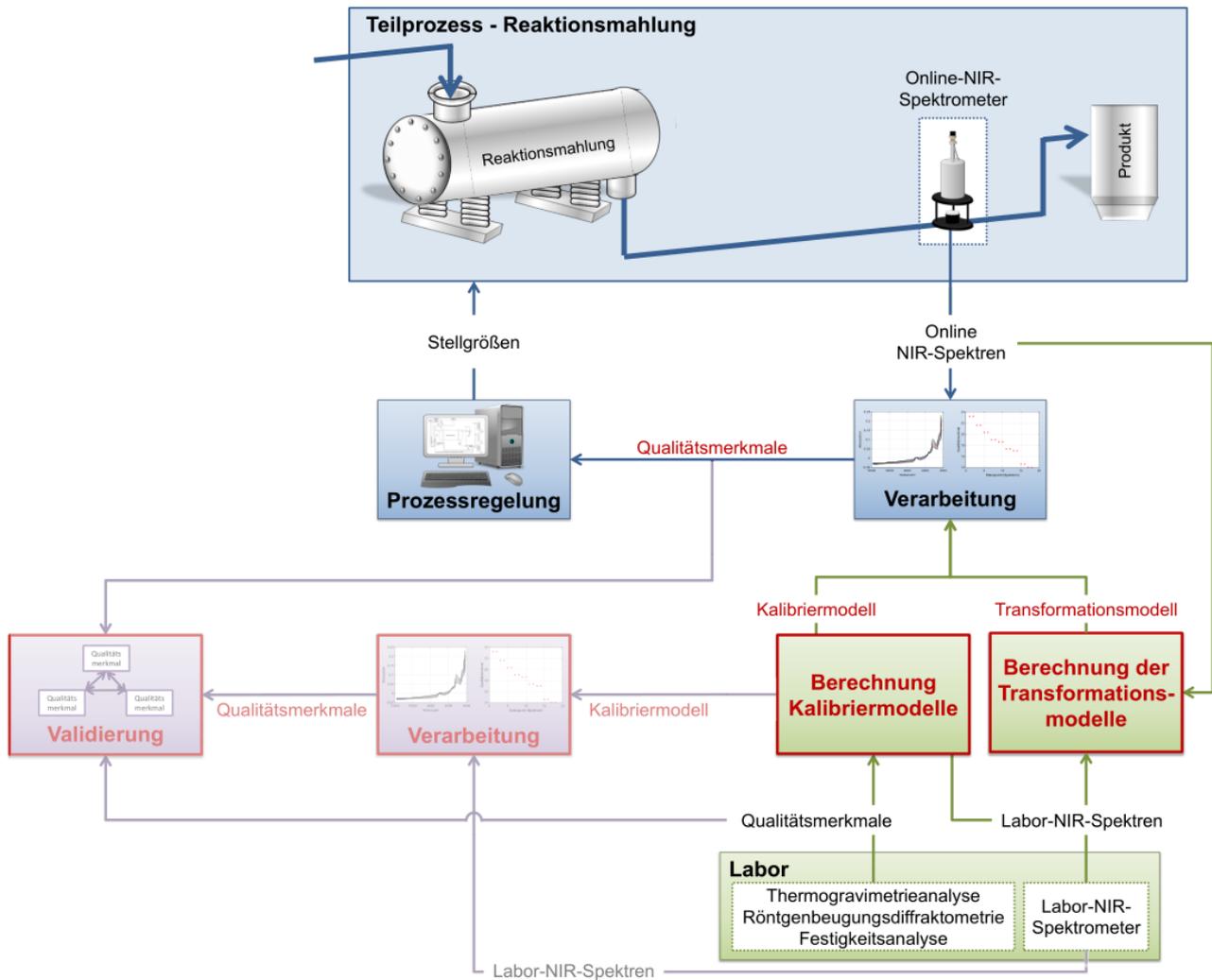


Abb. 44: Konzept für die NIR-Spektroskopie-basierte Online-Qualitätsüberwachung im Celiment-Prozess am Ausgang des Reaktionsmahlungsprozesses

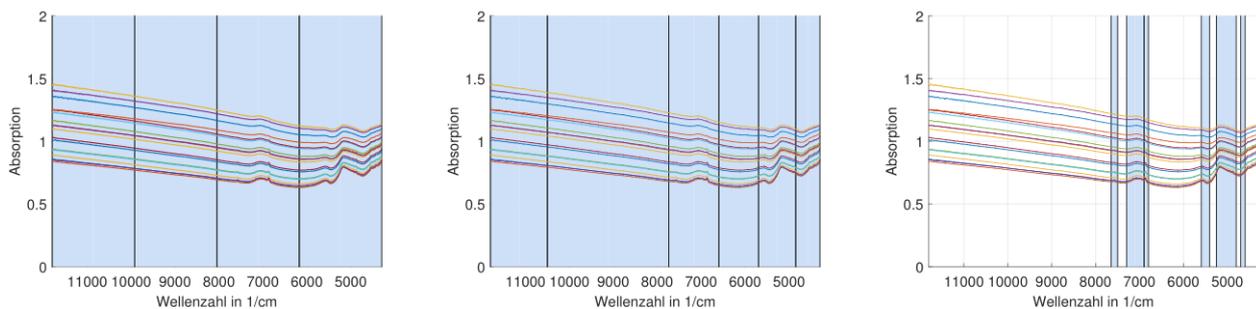


Abb. 45: Unterschiedliche Möglichkeiten der Einteilung des Spektrums in spektrale Bereiche; links: gleich große spektrale Bereiche, Mitte: unterschiedlich große spektrale Bereiche, rechts: explizite Auswahl der spektralen Bereiche

Die Bestimmung des optimalen Kalibriermodells (optimale Datenvorverarbeitungskombination und optimale Modellordnung) über die Partial-Least-Squares-Regression erfolgt vollautomatisch in einem selbst entwickelten MATLAB-Tool. Es besitzt eine grafische Benutzerschnittstelle zur komfortablen Erstellung und Untersuchung der Kalibriermodelle.

Abb. 46 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der Anwendung eines automatisch bestimmten Kalibriermodells für die NIR-Spektrometer-basierte Berechnung der Hydratationswärme beim Abbinden des Celitement. Es ist zu erkennen, dass die NIR-basierte Bestimmung, die online im Produktionsprozess erfolgt, eine sehr gute Vorhersage (Bestimmtheitsmaß 96.6) für die Hydratationswärme liefert.

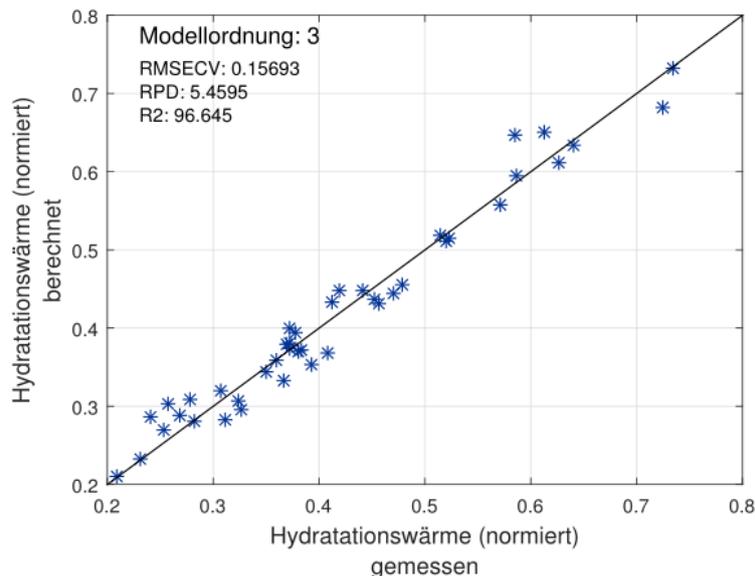


Abb. 46: Ergebnisse der Anwendung eines automatisch bestimmten Kalibriermodells für die NIR-Spektrometer-basierte Berechnung der Hydratationswärme

Im Projekt i-Bridge werden intelligente Auswerteverfahren zur Fusion verteilter Sensorsysteme entwickelt, um Schädigungen an Brückenbauwerken rechtzeitig erkennen zu können. Es wurde ein Algorithmus zur Detektion auswertbarer Events auf Basis einer Magnetfeld-Sensorik entwickelt. Dabei werden Events erkannt, die einzelne und zeitlich isolierte Fahrzeuge auf der Brücke darstellen. Diese Events erlauben auch die Berücksichtigung des Ausschwingverhaltens der Brücke.

Auf Basis simulierter Datensätze von Events (d.h. ein Modell der Brücke mit/ohne Schädigung sowie unterschiedliche Fahrzeugmodelle) wurden die entwickelten Auswertelgorithmen auf ihre Anwendbarkeit hin untersucht (Anhand realer Brückendaten ist die Validierung der Algorithmen hinsichtlich der Erkennung von Brückenschäden aufgrund nicht vorhandener Schäden nicht möglich). Es wurden mehrere Datenvorverarbeitungsschritte untersucht, um eine möglichst hohe Erkennungsrate zu erzielen.

Die Erkennungsrate von Brückenschäden ist pro LKW-Überfahrt auf 60% gestiegen, allerdings war der existierende Algorithmus nicht geeignet um LKW und PKW parallel zu erkennen. Ein neuer Algorithmus wurde entworfen, der unabhängig von der Masse des anregenden Fahrzeuges funktioniert.

Wie in Abb. 47 erkennbar, ist die Anregung der beschädigten Brücke (rot) kaum von der Anregung der unbeschädigten Brücke zu unterscheiden. Der neue Algorithmus nutzt das abweichende Verhalten der positiven und negativen Dehnung. Hiermit genügen 1000 Simulationsüberfahrten einer unbeschädigten Brücke um ein Maß zu berechnen, das bereits bei 100 Simulationsüberfahrten der gleichen (aber beschädigten) Brücke eine klare statistische Abweichung zum berechneten Maß der unbeschädigten Brücke zeigt. Das neue Maß setzt keinerlei Vorwissen über Sensorlokation oder Masse des anregenden Fahrzeuges voraus. Einzig notwendig ist die Annahme, dass das Fahrzeug während der Überfahrt seine Geschwindigkeit wenig verändert. In Abb. 48 sind die Verteilungen des berechneten Maßes bei unterschiedlichen Schädigungsgraden und Schadensarten aufgezeichnet.

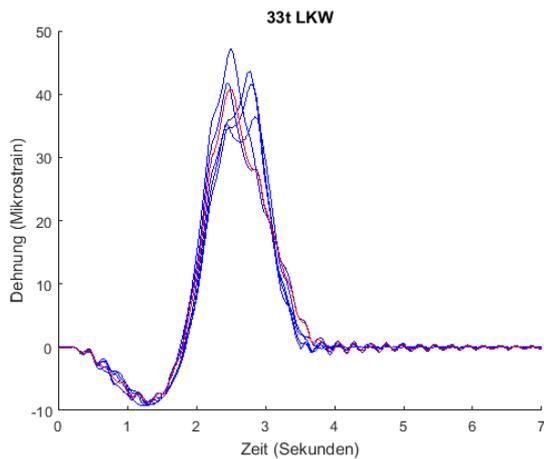


Abb. 47: Anregung der beschädigten Brücke (rot), Anregung der unbeschädigten Brücke (blau)

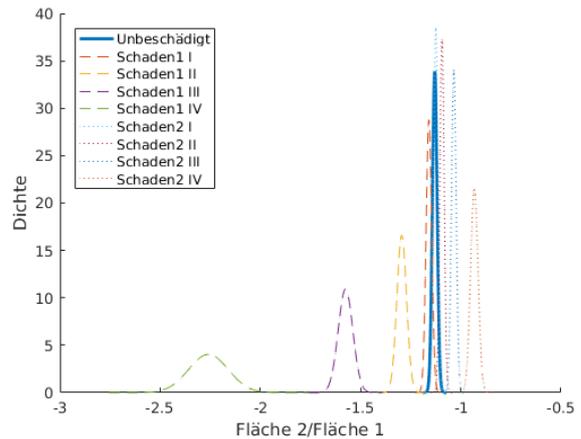


Abb. 48: Verteilungen des berechneten Maßes bei unterschiedlichen Schädigungsgraden und Schadensarten

Einzelne Fahrzeuge mit Geschwindigkeitsveränderungen während der Überfahrt können durch Ausreißererkennung bzw. durch die statistische Mittelung entfernt oder gedämpft werden. Das neue Maß erlaubt zudem eine enorme Datenreduktion, da je Sensor nur wenige Daten nach der Vorverarbeitung übrigbleiben. Es ist nicht notwendig, vollständige Zeitreihen abzuspeichern.

Das Projekt AGaMon zur Atemluftüberwachung mit dem Industriepartner 3S in Saarbrücken wurde erfolgreich abgeschlossen. Spezielles Anwendungsgebiet ist dabei die Alkoholkontrolle in der Atemluft. In dieser Applikation ist Ethanol die Zielkomponente. Da aber auch andere Gase wie  $H_2$  oder Aceton in der Atemluft vorhanden sind, die die Messergebnisse beeinflussen, müssen Mehrstoff-Gemische untersucht werden.

Mit dem weiterentwickelten Kalibrier- und Auswerteverfahren ProSens2.0 gelang es, sowohl ein Zwei-Stoff-Gemisch Ethanol- $H_2$  als auch ein Zwei-Stoff-Gemisch Ethanol-Aceton zu analysieren. In beiden Untersuchungen konnte eine gute Stoffidentifikation erzielt werden. Dies ist wichtig, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Für das binäre Ethanol- $H_2$ -Gemisch konnten für beide Komponenten gute Konzentrationsbestimmungen erzielt werden. Beim Ethanol-Aceton-Gemisch konnten nur für den Zielstoff Ethanol gute Analyseergebnisse erzielt werden. Die schlechten Analyseergebnisse für Aceton spielen jedoch keine Rolle, da es nur auf eine gute Bestimmung der Ethanol-Komponente ankommt.

Mit dem weiterentwickelten Kalibrier- und Auswerteverfahren ProSens3.0 gelang es, ein ternäres Ethanol- $H_2$ -Aceton-Gemisch erfolgreich zu analysieren. Auch hier wurden eine sehr gute Stoffidentifikation und für den Zielstoff Ethanol gute Analyseergebnisse erzielt.

Zur Reduzierung des Kalibrieraufwands wurde das Verfahren ProCal2.0 entwickelt und mit Modelldaten erfolgreich getestet. Mit ProCal2.0 ist eine Reduzierung des zeitaufwändigen und kostspieligen Kalibrierprozesses um den Faktor 3 möglich.

In diesem Projekt liegt der Fokus auf den Einsatz des AGaMon-Systems für die Überwachung des Alkoholgehalts in der Atemluft. Prinzipiell und zukünftig ist auch ein Einsatz des Sensorsystems für andere Anwendungen bei der Überwachung der Atemluft geplant. Unter anderem ist dabei an die Überwachung von Verdauungsstörungen mit  $H_2$  als Zielstoff und von Diabetes mit Aceton als Zielstoff gedacht. Das bedeutet, dass mit einer Messung des Sensorsystems gleichzeitig und unabhängig voneinander diese Zielstoffe erkannt werden können. Hierzu wurde das Kalibrier- und Auswerteverfahren SimPlus entwickelt, das simultan diese Stoffe identifizieren und analysieren kann. Die Analyseergebnisse belegen, dass eine sehr gute simultane Stoffidentifikation erreicht werden konnte und auch die jeweiligen Konzentrationsbestimmungen mit relativen Analysefehlern von weniger als 8% sehr gut waren.

Ein erster Feldtest mit dem AGaMon-System mit 7 Probanden wurde durchgeführt. Dabei konnten erfolgsversprechende Analyseergebnisse erzielt werden. Für die Weiterentwicklung des Prototyps zum marktfähigen Sensorsystem müssen allerdings noch weitere Entwicklungsschritte unternommen werden.

Im Projekt KASTEL (Kompetenzzentrum für angewandte Sicherheitstechnologie) arbeitet das IAI an der Analyse der Anforderungen zur Erkennung und Charakterisierung von IT-Angriffen auf sicherheitskritische

Infrastrukturen, dem Entwurf von Modellierungssprachen für Komponenten und Komponentenverbände, der Entwicklung der Modellierungstools und des Verifikationstools sowie der Integration der ermittelten Konzepte und Lösungen.

2016 wurde mit der Analyse der existierenden Situation begonnen. In kritischen Infrastrukturen kam es in den vergangenen Jahren zunehmend häufiger zu Bedrohungssituationen durch verschiedene Terrorgruppen, Einzelpersonen oder auch staatliche Akteure, die durch ihre zunehmend bessere Ausrüstung zu immer komplexeren Sabotageaktionen fähig sind. Gleichzeitig führt der Umbau auf erneuerbare Energien zu einer steigenden Anzahl an miteinander kommunizierenden stromerzeugenden Anlagen, die die klassischen Großanlagen ersetzen. Die unregelmäßige Verfügbarkeit der Energiequellen erfordert außerdem umfangreiche Regelungsmöglichkeiten auch auf Mittel- und Niederspannungsebene des Stromnetzes. Wegen der großen Zahl und der räumlichen Verteilung sowohl der Anlagen als auch der regelbaren Umspannwerke, muss die Überwachung und Steuerung von mehreren dezentralen Werten aus erfolgen, was die Nutzung eines Kommunikationsnetzwerks erfordert. Der Umstieg führt also dazu, dass die Zahl möglicher Angriffspunkte im Stromnetz erheblich angestiegen ist.

Die Anlagen verfügen über Sicherungen, die sie vor Zerstörung durch Betriebszustände bewahren, die aufgrund von äußeren Bedingungen oder durch Defekte entstehen können. Anders als beispielsweise bei Kernkraftwerken werden die Betriebszustände bei den erneuerbaren Energien auch nicht redundant vermessen, sondern aus Kostengründen mit möglichst wenigen Sensoren erfasst. Das eröffnet einem Angreifer Möglichkeiten die Anlagen zu beschädigen. Aber auch bei einer ausreichenden Sensorausstattung kann das Manipulieren von Messwerten in der Steuerungssoftware fatale Folgen haben, wie der Stuxnet-Virus gezeigt hat. Gleichzeitig eröffnen die vorhandenen Sicherungssysteme die Möglichkeit, durch ein vorgetäushtes oder tatsächliches Anfahren eines verbotenen Betriebszustandes, die Anlage vom Netz zu nehmen.

Ziel ist es, ein Verfahren zu entwickeln, um Manipulationen innerhalb des Kraftwerks frühzeitig und sicher zu erkennen und somit die Anlage zu schützen. Zur Detektion von Angriffen sollen die Regelkreise der Anlage durchgehend auf Verhaltensanomalien geprüft werden. Eine solche Sicherungseinrichtung erfordert Messungen, die gegen Manipulationen aus der Ferne abgesichert sind sowie Unabhängigkeit von der Anlagensteuerung. Eine zusätzliche Klassifikation der unbekanntenen Manipulation könnte helfen das Netz zu schützen, indem betroffene Anlagen vom Netz getrennt werden könnten, und sie würde die Suche nach der Ursache beschleunigen.

Die bestehenden Methoden zur Fehlerdetektion konzentrieren sich auf die Identifikation bekannter Fehler. Anhand von Regeln oder Modellen oder durch das Anlernen normaler und fehlerbehafteter Datensätze wird der auftretende Fehler möglichst genau bestimmt. Der bisherige Einsatz beschränkt sich daher im Wesentlichen auf bekannte Fehler wie den Verschleißgrad von Bauteilen oder Sensordrifts. Dennoch eignen sich einige der recherchierten Methoden auch als Ansatz zur Erkennung eines unbekanntenen Fehlers, wie eine Manipulation ihn darstellen würde. Beispiele dafür sind Parameterschätzung bzw. -identifikation oder Paritätsgleichungen. Bei beiden handelt es sich um eine modellbasierte Betrachtung von Stell- und Messgrößen.

Durch redundante Messungen kann der Zustand der Anlage ebenfalls mit höherer Sicherheit bestimmt werden. Für die Fusion der dabei gewonnenen Daten gibt es Methoden, die als data reconciliation zusammengefasst werden. Mit ihrer Hilfe lässt sich auch bestimmen, wie vollständig und mit welcher Redundanz der Anlagenzustand erfasst wird. Die statistischen Verfahren zur Identifikation von defekten Sensoren können teilweise auch für die Detektion von manipulierten Sensoren verwendet werden, sind aber vermutlich nicht hinreichend. Zusätzlich registrieren sie Abweichungen erst, wenn für einen neu aufgetretenen Fehler ausreichend Statistik vorhanden ist, sind also für eine Echtzeitüberwachung ungeeignet.

Die folgende Aufstellung enthält mögliche Fehler in verschiedenen Kraftwerken, wobei unterschieden wird, ob die Anlagen in der Folge teilweise bzw. vollständige Leistungseinbrüche aufweisen könnten oder ob auch das Potential einer Beschädigung besteht. Leistungseinbrüche können beispielsweise verursacht werden durch

1. Drosselung der Anlage
2. fehlende/falsche Informationen über den Anlagenzustand (z.B. falsche Ist- oder Sollwerte, falsche Stellwerte)
3. Ansprechen der Anlagensicherung durch echte Störungen (Netzstörungen oder innere Fehlfunktionen der Anlage)
4. Ansprechen der Anlagensicherung durch vorgetäuschte Störungen

Beschädigungen können entstehen durch

5. Thermische Belastungen (hoher Wärmeeintrag, geringe Kühlung, hohe Ströme, Spannungsspitzen, Reibung, Einfrieren)
6. Mechanische Belastungen (Zentrifugalkräfte, Drücke, Resonanzkatastrophen)
7. Chemische Prozesse (falsche Mischungsverhältnisse, Produktion von Prozessgiften)

Um ein möglichst facettenreiches Bild von den Auswirkungen von Manipulationen zu erhalten, wurden zwei unterschiedliche Beispielsysteme betrachtet, die mit Hilfe der Simulationssoftware Simulink untersucht wurden. Ein Windpark stellt ein einfaches Kraftwerk auf Basis eines rotierenden Generators dar, eine Solaranlage ein Kraftwerk, das über einen Wechselrichter in das Stromnetz einspeist.

Die Untersuchung der Beispiele zeigte, dass stromproduzierende Anlagen durch Manipulationen, deren Umsetzung realistisch erscheint, relativ schnell zu einer Abschaltung veranlasst werden können. Zusätzlich besteht durch einen Teil der Manipulationen trotz bestehender Sicherungseinrichtungen das Potential einer Beschädigung. Es gibt also zusätzlichen Bedarf, Manipulationen frühzeitig und sicher zu erkennen und sie für weitere Maßnahmen zu klassifizieren. Mit Hilfe der bestehenden Modelle und Methoden zur Fehleranalyse und Datenfusion soll auch ein Verfahren zur Identifikation und Klassifikation der möglichen Fehlerquellen entwickelt werden. Dafür soll die für die Analyse minimal notwendige Menge sicherer Information identifiziert werden, die in einer realen Anwendung durch unabhängige, einfache Messung elementarer Größen gewonnen werden kann.

# Programm RE: Renewable Energies

## Effiziente Nutzung geothermischer Energie

### Systemplattform für Bohrlochtools

Der geologische Untergrund hat großes Potential, einen bedeutenden Beitrag zur Energiewende zu leisten, sei es als Speicher für CO<sub>2</sub>, Erdgas oder Druckluft, als Wärmelieferant in Geothermianlagen oder als Lieferant fossiler Energie (Kohle, Öl, Gas). Die Nutzung erfordert jedoch eine deutlich positivere Grundhaltung der Bevölkerung, als dies derzeit beobachtet werden kann. Ein Baustein für eine Verbesserung dieses Zustands ist eine Qualitätsoffensive Geothermie. Die Nutzung innovativer Bohrlochwerkzeuge wird dafür viele Möglichkeiten und Chancen eröffnen. Nach einer genauen Inspektion der Bohrungen müssen künftig auch Werkzeuge existieren, um festgestellte Fehler beheben zu können. Der ingenieurmäßige Umgang mit Problemen und Fehlern soll Vertrauen zurückbringen. Es wird darauf ankommen, den Menschen zu vermitteln, dass die Fachleute ein Engineered Geothermal System (EGS) beherrschen oder doch zumindest Strategien entwickelt haben, um mit Fehlern professionell umzugehen.

Im Jahr 2016 wurde weiter an den ZWERG-Baukastenmodulen Aktives Kühlsystem, Metall-Keramik-Verbindungen für mechanisch und thermisch stark belastete Gehäusebauteile, Dämmung mit Dewar-Gefäßen sowie Datenübertragung gearbeitet.

Nach der Erstanwendung des Baukastensystems für die Videoinspektionssonde GeoKam wird jetzt der Wasserprobensammler WASAM entwickelt. Ziel ist, völlig unverfälschte Wasserproben aus tiefen Bohrlochern zu entnehmen, die noch mit Originaltemperatur und Originaldruck das Labor erreichen.

Die Bestrebungen, eine Kältemaschine zur Kühlung hitzeempfindlicher Bauteile in Bohrloch-Tools für die Tiefengeothermie als ein wichtiges Modul in der Systemplattform zu entwickeln, wurden vorangetrieben.

Untersuchungen des thermodynamischen Kühlkreislaufes bei 200°C Umgebungstemperatur zeigten die Eignung von Wasser als Kältemittel. Die im Hubkolbenverdichter eingesetzten Spezialdichtungen aus beschichtetem Polytetrafluorethylen (PTFE) bewiesen Lebensdauern von bis zu 6 Tagen bei Dauerbetrieb.

Neben der Zerstörung der Dichtungen offenbarten die Versuche signifikante Auswirkungen der Wärmeausdehnung von Verdichter-Komponenten, welche zu einer Absenkung des Totpunkts und damit des Verdichtungsdrucks führten. Resultierend daraus wird der notwendige Kondensationsdruck unterschritten, die Bildung des Kondensats verhindert und der Kühlkreislauf unterbrochen. In Folge steigt die Temperatur im Kühlraum (Abb. 49).

Das erarbeitete Bohrloch-Verdichter-Konzept (s. Abb. 50) basiert auf Leistungsdaten verfügbarer Servomotoren für eine Umgebungstemperatur von 200°C. Die nötigen Prozessdrücke erfordern eine Getriebeuntersetzung, die mit einer Reduktion der Hubfrequenz einhergeht. Das Konzept sieht ein gegenüber Ausdehnungsgradienten tolerantes, einstufiges Getriebe vor. Das Konzept genügt den gegebenen Bauraumverhältnissen. Im Rahmen einer Masterarbeit wurde mit der Konzeptionierung eines Teststandes zur Ermittlung auftretender Verluste im Verdichtungsprozess und zur Evaluierung unterschiedlicher Kolbendichtungen begonnen.

Für die Untersuchung zukünftiger Bohrlochsonden unter realitätsnahen Bedingungen wurde ein Autoklav beschafft. Mit diesem können Drücke bis 600 bar (entsprechen ca. 5 km Bohrlochtiefe) und Temperaturen bis 200°C stufenlos erzeugt und folglich die thermisch sensiblen und mechanisch hochbelasteten Komponenten auf ihre Funktion und Zuverlässigkeit hin geprüft werden. Erste Untersuchungen wurden am Gehäuse der Videoinspektionssonde GeoKam durchgeführt, bei dem die Druckbeständigkeit des Gehäuses und vor allem der Dichtungen im Vordergrund standen (s. Abb. 51). Das Gehäuse aus Inconel 718 und die dazugehörigen Dichtungen hielten den Testbedingungen stand, lediglich der Gehäuseteil, der aus einem Metall-Keramik-Verbund besteht, ging zu Bruch. Die Testergebnisse machten deutlich, dass bezüglich des Metall-Keramik-Verbundes weiterer Forschungsaufwand erforderlich ist.

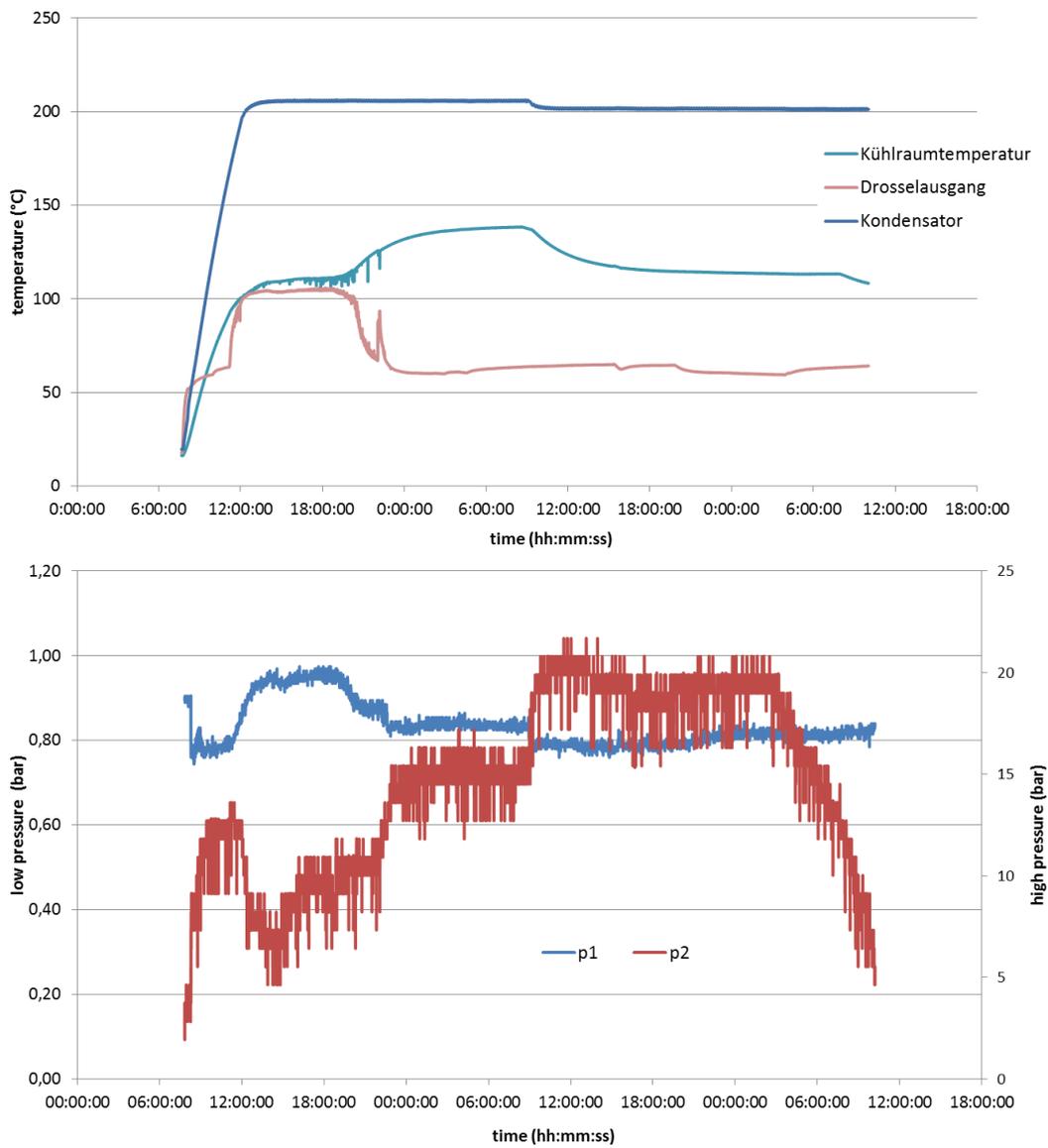


Abb. 49: Temperatur- und Druckverlauf; Kühlkreislauf mit H<sub>2</sub>O; 200°C Außentemperatur; 70W Wärmelast

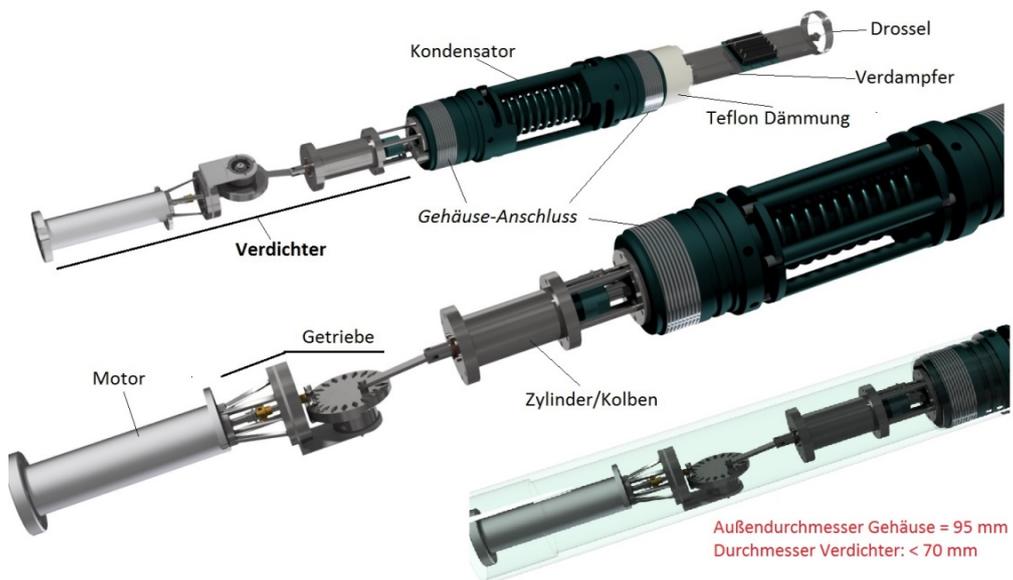


Abb. 50: Kompaktes Kältemaschinen-Konzept mit Getriebeverdichter

Eine der kritischen Komponenten des Sondengehäuses der Videoinspektionssonde GeoKam ist demnach der Metall-Keramik-Verbund im Bereich der Kamera. Die unterschiedlichen thermo-physikalischen Eigenschaften der beiden Werkstoffe sowie die hohe thermo-mechanische Belastung auf den Verbund sind dafür verantwortlich, dass keine aktuell gängige Verbindungstechnologie zuverlässig und sicher angewandt werden kann. Gemeinsam mit der Firma CeramTec ETEC GmbH, die das entsprechende Expertenwissen im Bereich Keramik einbringt, konnte ein erster Verbund im Jahr 2015 hergestellt und getestet werden. Getestet wurde das komplette Gehäuse der Kameraeinheit, bestehend aus zwei Keramikzylindern für die Seitenkameras und einer Keramikrunde für die Frontkamera, die in einen Rahmen aus Inconel 718 eingeklebt wurden. Beide Keramikzylinder gingen bei dem Test im Autoklaven bei einem Druck von 600 bar zu Bruch. Die Keramikrunde hielt den Bedingungen stand. Nach erneuter Analyse und Durchführung einer FE-Simulation seitens der Firma CeramTec wurde der Verbund in 2016 weiter optimiert und für weitere Untersuchungen freigegeben. Auch dieser Verbund hielt den Anforderungen nicht stand, sodass ein neuer Ansatz zur Problemlösung beschlossen wurde. Mit Hilfe einer FE-Analyse (preprocessing), gekoppelt mit einem probabilistischen Ansatz (postprocessing) zur Berechnung der Ausfallwahrscheinlichkeit des Verbundes, wird der Verbund hinsichtlich seines Einsatzes optimiert. Ein geeignetes Postprocessing-Programm wurde im heutigen Institut für Angewandte Materialien - Werkstoff- und Biomechanik (IAM-WBM) entwickelt und dem IAI zur Verfügung gestellt. Die letzte Aktualisierung dieses Programms erfolgte 2010. Kompatibilitätsprobleme mit der aktuellen FE-Software werden schrittweise ausgeräumt.

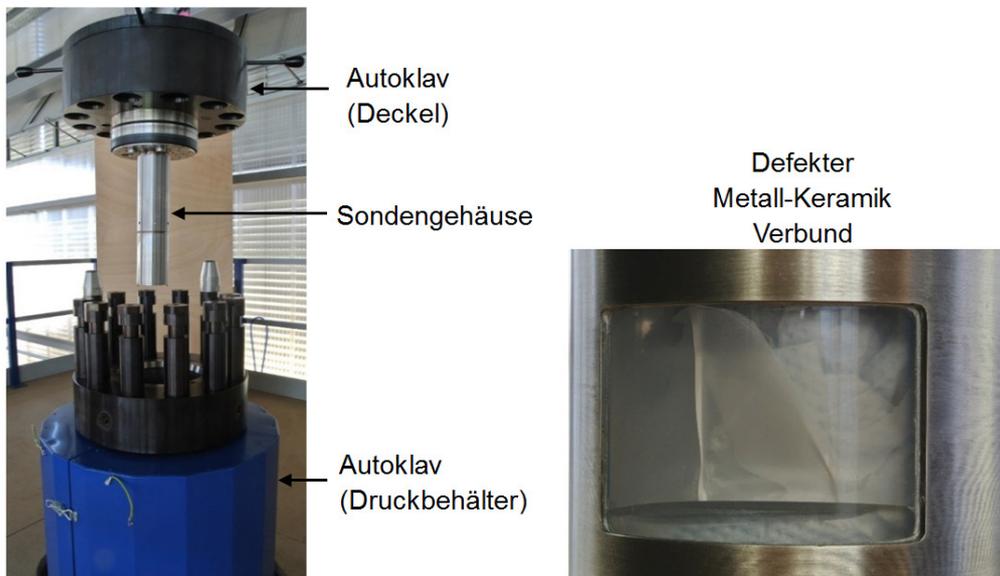


Abb. 51: Sondengehäuse beim Einbau in den Autoklaven (links) und durch Zugspannungen zerstörtes Keramikfenster nach einem Druckversuch (rechts)

Alle Sonden basierend auf dem ZWERG-Baukasten sollen bei hohen Temperaturen (bis 200°C) eingesetzt werden können. Die temperatur-sensitiven Komponenten einer Sonde, die nicht für die genannten Bedingungen ausgelegt sind, werden durch ein Kühlsystem und eine Dämmung geschützt. Die Dämmung erfolgt durch ein Stahl-Dewar-Gefäß, da dieses bei geringer Wandstärke relativ hohe Dämmeigenschaften aufweist und konstruktiv sehr gut ins ZWERG-Baukasten-Konzept passt. Aus Voruntersuchungen ging hervor, dass besondere Werkstoffe und Fertigungstechnologien für den Bau eines Stahl-Dewar-Gefäßes benötigt werden (s. Abb. 52). Gemeinsam mit dem Institut für Technische Physik (ITEP) und dem Technik-Haus (TEC) konnte ein Prototyp zum Teil fertiggestellt werden. Am ITEP, das über eine spezielle Ausstattung verfügt, erfolgt in einem weiteren Fertigungsschritt die thermische Behandlung.



Laborausstattung ITEP



Vakuum Verschluss



Metall/Kupfer  
Kompensator

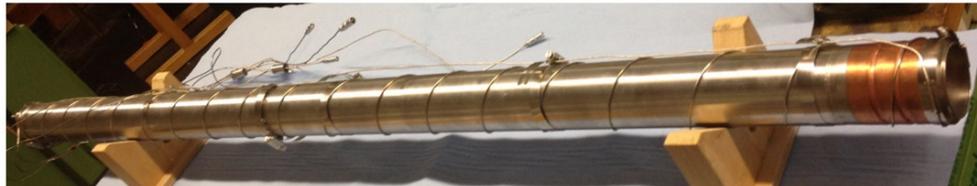


Abb. 52: Im Uhrzeigersinn: Verschlussdeckel einer Vakuumkammer zur Reinigung von Bauteilen für Vakuumanwendungen, Konstruktionsdetails und komplettes Dewar mit montierter Heizung für den Reinigungsprozess

In Kooperation mit dem Fraunhofer Institut HHI erfolgte im GeoKam-Projekt die Entwicklung zweier Modems für die Datenübertragung zwischen Bohrlochsonden und Leitstand über einen weit verbreiteten Typ sogenannten Wirelinekabels. Dieses Kabel besteht aus einem Koaxialkabel im Innern und zwei gegenläufig aufgewickelten Stahlarmlungen als Schutz und als Trageseil für die Sonde. Die drei daraus resultierenden Leiter sollen drei Aufgaben erfüllen: (1) Up-Kanal zur Übertragung von Videosignalen aus der Sonde zum Leitstand mit großer Bandbreite, (2) Down-Kanal für die Übertragung von Kommandos aus dem Leitstand mit geringer Übertragungsleistung, (3) Stromversorgung der Sonde.

Letztendlich muss das Koaxialkabel alle Aufgaben übernehmen. Der Schirm des Koaxialkabels wird im Cablehead (Stecker auf der SONDENSEITE des Wireline) bauartbedingt mit der Stahlarmlung verbunden. Die Länge des Wireline beträgt etwas mehr als 4000 m.

Die Realisierung dieser Datenübertragung erfolgte in verschiedenen Teilprojekten wie z.B. die Entwicklung der Modemhardware (HiTES-Modul), die Kommunikation zwischen mehreren Prozessorplatinen innerhalb der Sonde, zahlreiche Softwarekomponenten für die Datenübertragung oder die Darstellung der Videobilder und erweiterte Rekorderfunktionen.

Das erste Entwicklungsziel für den Up-Kanal mit Streckenemulation war folgendes Szenario: Die Kamerabilder der Front-Kamera und sensorische Daten werden nach dem Einschalten des Geräts (PowerUp) via Koaxkabel an die Oberfläche in den Leitstand (Host) übertragen.

Ein angestrebtes Zwischenziel war dabei eine funktionierende Kanalcodierung. Eine Kanalcodierung ist eine mathematische Methode, die gesendeten Daten mit Zusatzinformation anzureichern, mit deren Hilfe zahlreiche Übertragungsfehler erkannt und korrigiert werden können. Die vom IAI implementierte (Open Source) Reed Solomon Kanalkodierung im Modulator / Demodulator der Up-Kanals wies noch Fehlfunktionen im Ablauf auf und hatte Deadlocks. Für eine fehlerfreie Funktion wird jetzt, wenn die Dekodierung nicht erfolgreich war, ein Retry gestartet, d.h. die Daten werden erneut zugeführt.

Zum Zeitpunkt der GeoKam-Abschlussdemo (s. Abb. 53) gab es einen nicht behebbaren Fehler beim Empfang großen Datenmengen über die Ethernet-Verbindung (Phy-Chip) der beiden HiTES-Module in der Geokam. Die nach der Komprimierung vom ersten Modul verschickten Daten konnten im zweiten Modul, dem Kabelmodem, nicht korrekt interpretiert werden. Deswegen wurde zwischen den FPGAs (Field Programmable Gate Array) eine Paralleldatenverbindung mit SoftCore-Schnittstellen zur jeweiligen CPU implementiert. (Ein SoftCore ist ein vorgefertigter Funktionsblock für einen FPGA.) Damit wurde für die Abschlussdemo eine erfolgreiche Up-Kanal-Übertragung mit Streckenemulation (Nachbildung der Übertragungseigenschaften des Wirelines) der Kamerabilder demonstriert. Der nächste Entwicklungsschritt war ein funktionierender Up-Kanal unter realistischen Bedingungen, d.h. einschließlich der Stromversorgung und

Störquellen unter Laborbedingungen. Der Versuchsaufbau für den Übertragungstest enthielt die Powerlineversorgung (130 V), DCDC-Netzteile, LED-Schaltwandler etc. Für den Betrieb der Geokam mit Cablehead, was zunächst im Autoklaven vorgesehen ist, wurden Platinen mit Entstörfiltern und Koppelementen zur Ein-/Auskopplung der DC-Powerline zur Streckenemulation entwickelt.



Abb. 53: Bedienoberfläche und GeoKam Sonde

Zur Fortentwicklung und Anpassung von Up- und Down-Kanal wird die Software des Fraunhofer Instituts HHI modifiziert werden müssen. HHI benutzte eine MATLAB-/Simulink-Entwicklungsumgebung und den Xilinx-System-Generator für die Modementwicklung. Die erfolgreiche Generierung der VHDL-Sourcen des Up-Kanal-Modulators belegt die gelungene Einarbeitung in diese Tools. Im Bemühen in der Sonde möglichst mit einer HiTES-Platine auszukommen, wurde ein Up-Kanal-Modulator mit DSP-Verwendung generiert, der dadurch viel ressourcensparender im FPGA implementiert wird.

Bezüglich der Aufzeichnung der Daten/Bilder mit der GeoGUI (Graphical User Interface) wurden bestehende Widgets (Bedienelemente der Benutzeroberfläche) optisch verbessert. Neue Komponenten wurden implementiert. Beispielsweise blitzt jetzt ein Button beim Verschicken eines Kommandos kurz auf. Wegen mangelndem Support wurde die Datenbankfunktionalität der Software seit 2014 nicht mehr verwendet und musste wieder in Betrieb genommen werden. Dabei wurde eine Verbesserung der gleichzeitig zur Aufnahme erfolgenden Wiedergabe von Sensordaten und Video-Stream erreicht. Außerdem wurden Funktionen für Slow Motion, für Fast Forward und für die Wiedergabe ab einem bestimmten Zeitpunkt implementiert.

Die HiTES-Firmware und die Softcore-Komponenten wurden verbessert und optimiert, z.B. indem bei den Geokam-Kameras, deren Video-Stream aktuell nicht abgefragt wird, die wichtigen Kamera-Chip-Temperaturen erfasst werden. Weiterhin wurde über dem IP-basierten (eigenen) UMSG-Protokoll für Sensordaten und Kommandos eine ObjectDirectory genannte Softwarebibliothek erstellt, um das Setzen von Firmware-Variablen und -Funktionen sowie das Erfassen und Senden von Sensordaten zu vereinheitlichen und zu vereinfachen. Durch die Zusammenfassung der SoftCore-Komponenten und der Firmware entstand ein HiTES-Modul für die GeoKam-Sonde, das die Bildverarbeitung und die Datenübertragung via Wireline alleine übernimmt. Dieses sendet Bilder umschaltbar via Modulator oder via Ethernet und lässt sich via Ethernet vollständig bedienen. Das eine HiTES-Modul wird via Powerline versorgt und lieferte trotz Störungen erfolgreich die Übertragung des Kamera-Streams.

Daneben wurde zum einen eine Machbarkeitsanalyse eines einzelnen Host-HiTES-Moduls mit Up-Kanal-Empfänger und Down-Kanal-Sender durchgeführt. Obwohl der Down-Kanal noch nicht richtig funktioniert, wurden die SoftCores zusammen implementiert und der Up-Kanal-Empfang erfolgreich getestet. Zum anderen wurde auch eine Machbarkeitsanalyse eines einzelnen Sonden-HiTES-Moduls mit Up-Kanal-Sender und Down-Kanal Empfänger erstellt. Leider hatte das Kamerabild dabei immer Bildfehler (Timing-

probleme). Mit der Aussicht, dass der Up-Kanal-Demodulator etwas weniger aufwändig in der finalen Implementierung wird, kann die komplette Funktionalität mit einem HiTES-Modul geschehen.

Entwicklungsziel in der gegenwärtigen PoF-Periode ist eine Sonde für die Entnahme von ungestörten Wasserproben (WASAM-Sonde zur isothermen und isobaren Probenentnahme). Im Rahmen mehrerer vorausgegangener Diplom- und Masterarbeiten wurden Realisierungsideen entwickelt und Konstruktionsvorschläge erarbeitet. Daraus wurde das endgültige Konzept für die Sonde abgeleitet. Dieses unterscheidet sich von existierenden Probenehmern in wesentlichen Punkten. Durch die Ausstattung mit einem leistungsfähigen Kommunikations- und Rechnersystem kann eine Interaktion der Sonde mit der Umgebung durch Sensoren und mit der Leitwarte stattfinden. Die Auslösung der Probenahme muss nicht nach einer voreingestellten Zeit oder einem vordefinierten Außendruck erfolgen. Außerdem wird die Probe in einem Dewargefäß gespeichert. Eventuelle Wärmeverluste werden durch eine Heizung kontinuierlich kompensiert. Damit kann der Druck auf dem Niveau bei der Probeentnahme verbleiben. Schließlich erfolgt der Antrieb des Hydraulikkolbens durch eine aktive Hydraulik. Damit wird zur Entnahme der Probe außerhalb des Bohrlochs keine Hilfseinrichtung außer dem Transportgefäß benötigt. Allerdings wird nach Fertigstellung der Hydraulik zu prüfen sein, wie das System reagiert, wenn in großen Tiefen (bzw. bei großem Druck der Probe) der Antrieb quasi von außen erfolgt. Werden Elektromotor und Hydraulikpumpe in der Lage sein, die Kolbenbewegung zu regeln oder benötigt das System dazu die Unterstützung eines Drosselventils?

Die Herausforderungen bei der Entwicklung dieser Hydraulik liegen in der Verfügbarkeit von Komponenten für die gegebenen Umgebungsbedingungen. Die hohe Temperatur und das geringe Platzangebot sind ausschlaggebende Faktoren. Immerhin konnte ein Motor und eine dazu passende Hydraulikpumpe gefunden und erworben werden. Leider muss ein Ventil benutzt werden, das im Vergleich zur Pumpe und zum Durchfluss sehr groß ist (s. Abb. 54).

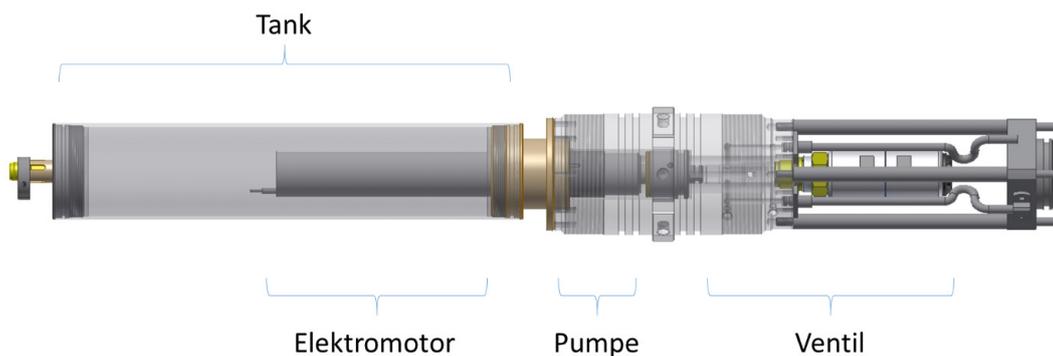


Abb. 54: Mechanischer Entwurf des Hydraulikmoduls

Die nächsten Schritte werden der Aufbau und die Inbetriebnahme des Hydraulikaggregats sowie die Erweiterung um Hydraulik- und Probenahmezylinder sein.

# Konversion

## Modellgestützte Prozessautomation

Das am KIT entwickelte vierstufige Verfahren bioliq® (Biomass to Liquid) erlaubt die Herstellung umweltfreundlicher Kraftstoffe aus Restbiomasse in einem industrienahen Betrieb.



Abb. 55: Pilotanlage bioliq®  
Rechts im Bild die N<sub>2</sub>- und O<sub>2</sub>-Hochdruckbehälter,  
links die Anlage zur Kraftstoffsynthese

In der ersten Verfahrensstufe wird die trockene Restbiomasse, die räumlich verteilt anfällt und einen niedrigen Energiegehalt hat, durch Schnellpyrolyse in ein rohölartiges, feststoffhaltiges und hochenergetisches Zwischenprodukt umgewandelt. In der zweiten Prozessstufe setzt der Hochdruck-Flugstromvergaser den konditionierten Einsatzstoff bei Temperaturen über 1200°C und Drücken bis zu 80 bar zu einem Synthesegas mit den Hauptbestandteilen Kohlenmonoxid und Wasserstoff um. Bei der anschließenden Heißgasreinigung werden Störstoffe aus dem Rohsynthesegas ausgefiltert. In der letzten Prozessstufe wird das gereinigte Synthesegas im katalytischen Verfahren zu maßgeschneiderten Kraftstoffen zusammengesetzt (Abb. 55). Die extremen Bedingungen des Verfahrens stellen hohe Anforderungen an die Prozessführung.

Zur Unterstützung der Prozessführung ist die Pilotanlage bioliq® mit einem modernen Prozessleitsystem, das vom IAI betreut wird, ausgestattet. Das IAI bringt im Bereich der Prozessautomation seine Kompetenzen in den Phasen Planung, Projektierung, Erstellung, Inbetriebnahme, Forschungsbetrieb und Weiterentwicklung ein. 2016 wurde das Leitsystem auf die Versuchsanlage BRENDA zur Verbrennung staubförmiger, gasförmiger und flüssiger Brennstoffe ausgeweitet.

An der Versuchsanlage BRENDA (vormals THERESA) wird das Verbrennungs- und Emissionsverhalten konventioneller und alternativer Brennstoffe beim Einsatz in Kraftwerken untersucht. Das Leitsystem dieser Anlage - Siemens Teleperm XP - wurde im vergangenen Jahr durch das moderne Nachfolgesystem Siemens SPPA T3000 ersetzt. Das IAI hat bei der Software-Migration und bei der Einbindung der neuen Leittechnik in die bioliq-Infrastruktur mitgewirkt. Die Hauptaufgabe des IAI bestand in der Programmierung einer neuen Sicherheitssteuerung für die Brenner der Anlage.

Die Versuchsanlage BRENDA verfügt insgesamt über vier Erdgasbrenner. Die Nachbrennkammer ist mit zwei Brennern ausgestattet, dem Brenner D4.1 zur Mitverbrennung von Kohlestaub und Biomasse und dem Brenner D4.2 zur Mitverbrennung von Heizöl mit Dampf als Zerstäubungsmittel.

Der Drehrohrofen verfügt über einen Brenner (Brenner D12 zur Mitverbrennung von Heizöl mit Dampf als Zerstäubungsmittel) und eine Brennerlanze (Brennerlanze D12.21 zur Mitverbrennung von wässrigen Lösungen und nicht brennbaren Rückständen). Die Anbindung der Brenner an das Leitsystem erfolgte über eine dezentrale Simatic ET200M-Station mit fehlersicheren und teilweise redundanten Baugruppen (Abb. 56 und Abb. 57).

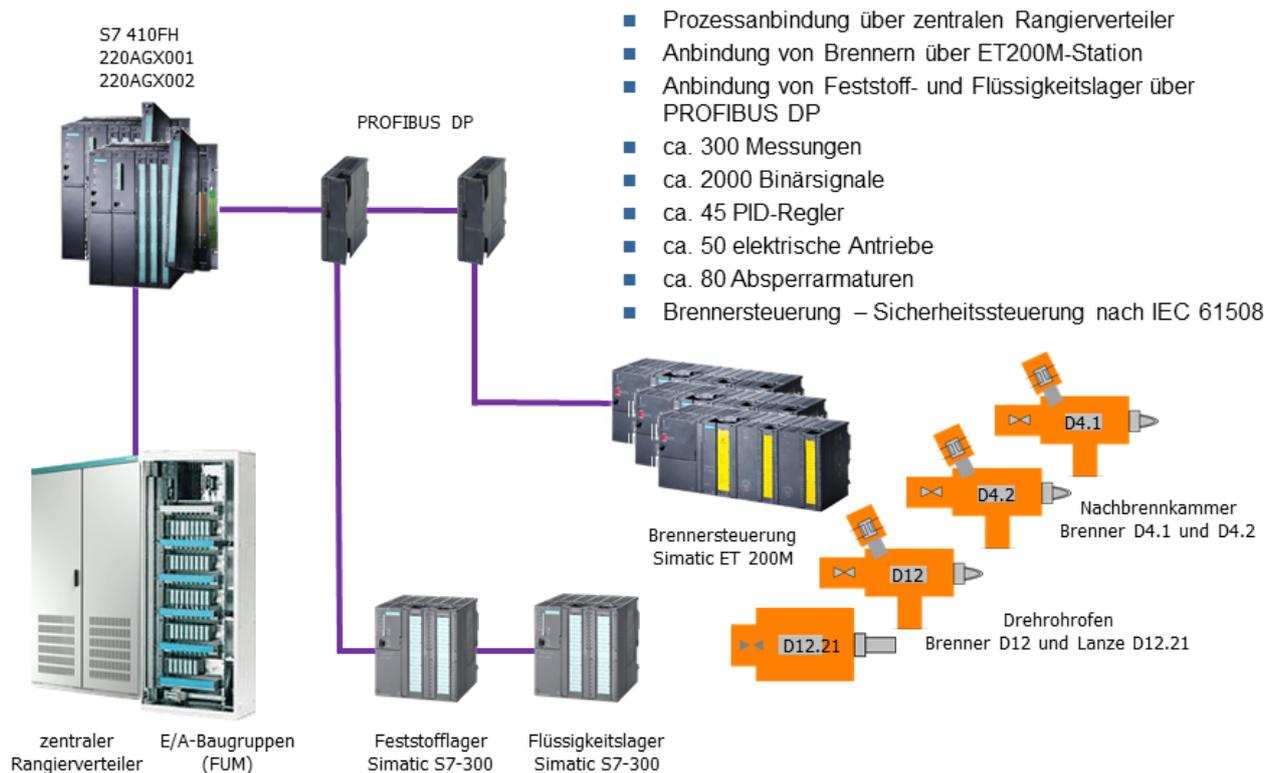
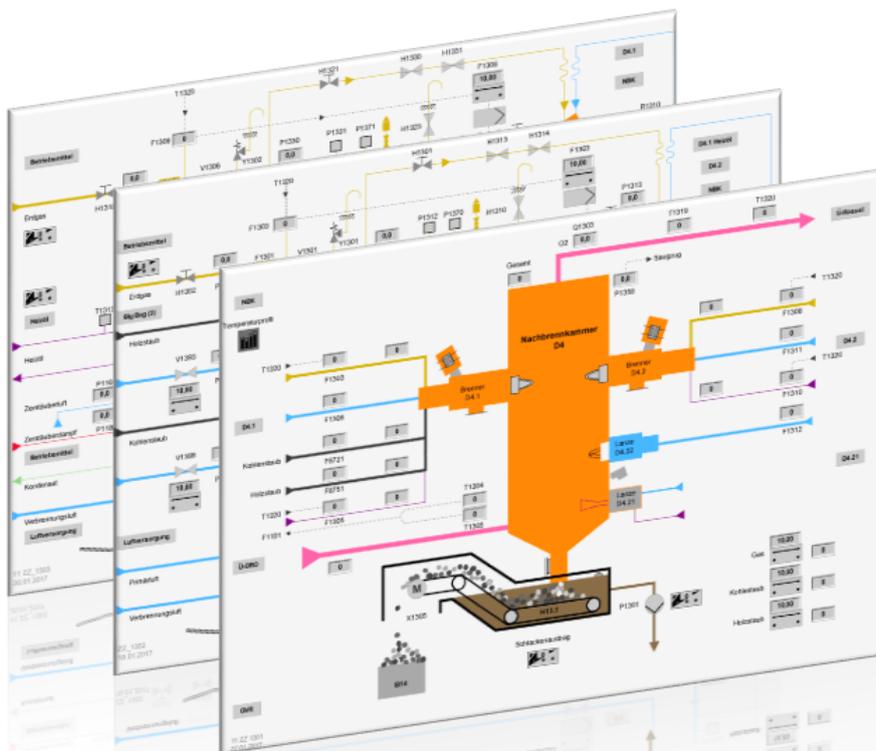


Abb. 56: Leitsystem BRENDA - Systemkonfiguration



- Nachbrennkammer: D4.1 Erdgasbrenner zum Mitverbrennen von Kohlestaub und Biomasse
- Nachbrennkammer: D4.2 Erdgasbrenner zum Mitverbrennen von Heizöl mit Dampf als Zerstäubungsmittel
- Drehrohrofen: D.12 Erdgasbrenner zum Mitverbrennen von Heizöl mit Dampf als Zerstäubungsmittel
- Drehrohrofen: D12.21 Brennerlanze für nicht brennbare flüssige Rückstände
- Hohe Sicherheitsanforderungen für den Brennerbetrieb: ca. 70 Schutzfunktionen mit SIL 1

Abb. 57: Leitsystem BRENDA - Brennersteuerung

In der Sicherheitssteuerung wurden ca. 70 Schutzfunktionen SIL 1 (Safety Integrity Level) nach der funktionalen Sicherheit IEC 61508 realisiert. Neben den sicherheitsrelevanten Funktionen wurden Ablaufsteuerungen zum Zünden und Abfahren der Brenner programmiert. Die Anlage BRENDA ist nach der BetrSichV (Betriebssicherheitsverordnung) prüfpflichtig. Das IAI wird sich an der Prüfung der funktionalen Sicherheit und der anschließenden heißen Inbetriebnahme Anfang 2017 beteiligen.

Das IA1 wirkte auch im vergangenen Jahr am Versuchsprogramm der Pilotanlage bioliq® mit. Mitte des Jahres fand eine kurze Pyrolyse-Versuchskampagne statt, in der 10 t trockene Biomasse umgesetzt wurde. Am Hochdruckvergaser wurden zwei Versuchskampagnen (mit 50 t und 80 t Einsatzstoff) durchgeführt. Zum Jahresende konnte in einer langen 40 bar-Verbundkampagne mit biogenem Einsatzstoff ein Dauerbetrieb des Hochdruckvergasers von 96 h nachgewiesen werden.

In den Steuerungen und Regelungen wurden zahlreiche Verbesserungen vorgenommen z.B. eine geänderte Temperaturregelung von Anlagenkühlwasser (3-stufiger Luftkühler) und von Syntheserohgas (2-stufiger Luftkühler) des Hochdruckvergasers, eine geänderte Füllstandsregelung am Kondensatabscheider mit kombinierten Stellgliedern (Mengeneinstellung über Regelventil und Kondensat-Rückförhpumpe) sowie eine neue Zwei-Punkt-Füllstandsregelung am Synthesegas-Separator als Alternative zur bestehenden kontinuierlichen PI-Regelung.

Eine weitere Aufgabe war die leittechnische Anbindung einer Bildaufnahmeverrichtung am Deckel des Hochdruckvergasers. Die Bildaufnahmeverrichtung ermöglicht Hochgeschwindigkeitsaufnahmen an der Brennerspitze und der Flammenwurzel bei hohem Druck und hoher Temperatur (siehe auch Programm EMR, Arbeiten zur Kamerabasierten Optimierung von Hochtemperaturprozessen – KaPro).

Aus einer Risikoanalyse ergaben sich sicherheitsrelevante Funktionen, wie die Abschaltung der Spannungsversorgung für die Bildaufnahmeverrichtung bei Druck- oder Temperaturüberschreitung, das Aktivieren der Stickstoffnotspülung bei Schutzglasbruch erkannt als Druck- oder Temperaturanstieg, die Abschaltung der Stickstoffspülung für das Quarzglas an der Lanzenspitze beim Ausfall vom Stickstoffversorgungssystem sowie die Abschaltung des Hochdruckvergasers bei Schutzglasbruch oder beim Ausfall vom Kühlsystem für die Bildaufnahmeverrichtung.

In der Sicherheitssteuerung werden folgende Prozessgrößen auf Grenzwertverletzung überwacht: Temperatur von Kühlwasser für die Bildaufnahmeverrichtung (Abb. 58), Temperatur im Kamerabehälter, Temperatur an der Boroskopspitze, Vorlaufmenge und Durchflussdifferenz Vorlauf-Rücklauf von Kühlwasser, Stickstoffdruck in der Zuleitung und Druck im Kamerabehälter. Die sicherheitsrelevanten Funktionen wurden nach IEC 61508 programmiert und vom TÜV geprüft.

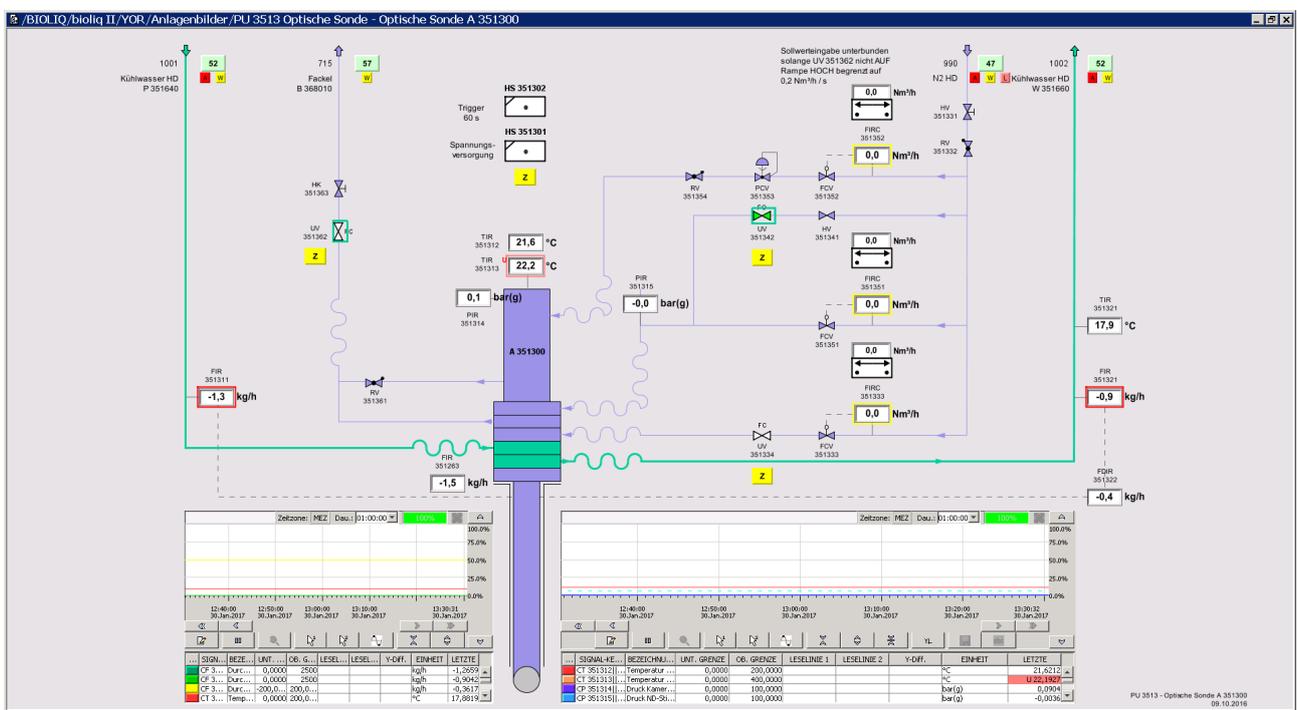


Abb. 58: Anlagenbild Bildaufnahmeverrichtung am Hochdruckvergaser

Aus Leistungsgründen wurde das Prozessleitsystem um ein zweites, hochverfügbares und fehlertolerantes Automatisierungssystem Simatic S7 410 FH für den Hochdruckvergaser erweitert. Das neue Automatisierungssystem erlaubt die Anbindung zukünftiger Energy Lab-Anlagen an die Leittechnik bioliq.

Die aktuelle Systemkonfiguration des Prozessleitsystems nach den letzten Erweiterungen ist in Abb. 59 dargestellt.

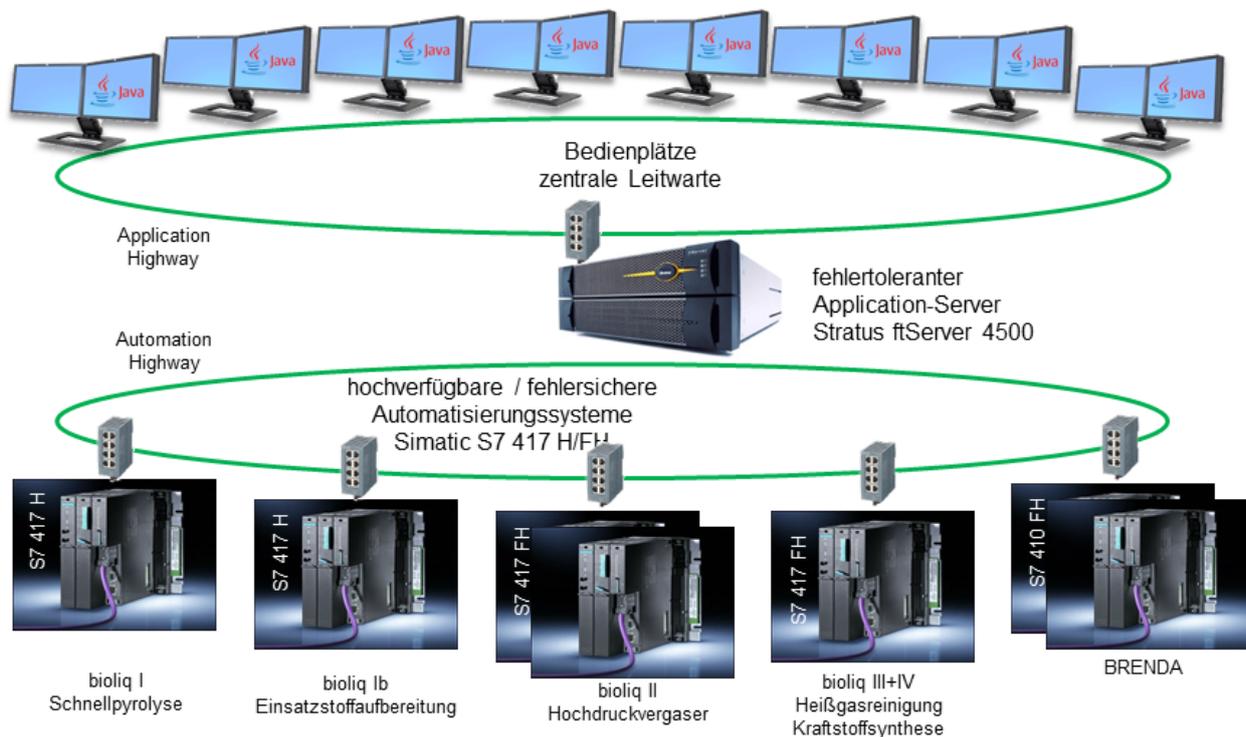


Abb. 59: Prozessleitsystem bioliq – aktuelle Systemkonfiguration

Die Arbeiten zur modellgestützten Regelung von mehrstufigen Luftkühlern wurden im vergangenen Jahr fortgesetzt. Ein indirekter Kreuzstromwärmeübertrager für das Anlagenkühlwasser im sekundären Kühlwasserkreislauf des Hochdruckvergasers wurde mathematisch modelliert. Das Ziel der Modellierung war ein lineares Zustandsraummodell niedriger Ordnung für den nachfolgenden Entwurf einer SISO-Regelung.

Die Modellbildung umfasste die Schritte Modellierung der Wärmeübertragung mittels PDE, Darstellung des Modells im Zustandsraum, Linearisierung des Modells am gewählten Arbeitspunkt, Modellreduktion mit der Methode des balancierten Abschneidens sowie Aufstellung eines Störgrößenmodells mit messbaren Störgrößen. Bei der Modellbildung wurden die Software MATLAB und Simulink sowie das Tool „Parameter Estimation“ von Simulink „Design Optimization“ verwendet.

# Programm TIS-E: Technology, Innovation and Society / Energy

## Energy – Resources, Technologies, Systems

### Informatik für die Energiesystemanalyse

Ein Schwerpunkt der Arbeiten im Jahr 2016 waren die Konsolidierung und Umsetzung des Datenmodells CityGML Energy ADE, mit dem das international standardisierte 3D-Stadtmodell CityGML um Konzepte für thermische Simulationen auf Einzelgebäude-, Quartiers- und Stadtebene ergänzt wird. Die Energy ADE erweitert die CityGML-Gebäudeklasse (*\_AbstractBuilding*) um Klassen zur Modellierung des Nutzerverhaltens (*UsageZone*) und der thermodynamischen Gebäudeeigenschaften (*ThermalZone*). Weiterhin wird die CityGML-Basisklasse (*\_CityObject*) so erweitert, dass jedem Objekt des 3D-Stadtmodells Wetterdaten (*WeatherData*) und berechnete oder gemessene Zeitreihen von Energiebedarfen (*EnergyDemand*) zugeordnet werden können.

Zur thermodynamischen Modellierung wird ein Gebäude in ein oder mehrere isotherme Zonen (*ThermalZone*) eingeteilt, die über thermische Grenzflächen (*ThermalBoundary*) untereinander sowie mit der Außenwelt Energie austauschen. Berücksichtigt wird dabei sowohl Wärmediffusion als auch der Austausch von Strahlungsenergie, für die jede thermische Grenzfläche auf thermische Öffnungen (*ThermalOpening*, z.B. *Fenster*) referenzieren kann. Die Berechnung der Wärme- und Strahlungswiderstände erfolgt auf Basis eines Materialmodells (*AbstractConstruction*), das sowohl homogene als auch geschichtete Wandaufbauten und Gefache unterstützt.

Zur Modellierung des Nutzerverhaltens kann jeder thermischen Zone eine Nutzungszone zugewiesen werden, über die tages- und jahreszeitabhängige Solltemperaturen für Heizung, Kühlung und Belüftung vorgegeben, sowie verschiedene Parameter zur Abschätzung der thermischen Gewinne bzw. Lasten durch Personen und Anlagen spezifiziert werden können.

Aus dem konzeptionellen Datenmodell, das in Form von UML-Diagrammen realisiert ist, wurde mittels semantischer Transformationen, unter Benutzung der Abbildungsregeln der ISO 19136, ein XML-Schema sowie ein interaktiver Objektartenkatalog abgeleitet. Um CityGML Energy ADE praktisch erproben und für reale Gebäude einsetzen zu können, wurde die am Institut entwickelte Software GML-Toolbox um einen Anreicherungs-Assistenten erweitert. Dieser gestattet es, in verschiedenen Schritten aus einem öffentlich verfügbaren LoD2-Gebäudemodell (LoD2 = 3D-Modell der Außenhülle und Dachstrukturen und einfachen Texturen) ein vollständig attribuiertes CityGML Energy ADE Modell zu generieren.

Zur Verwendung der CityGML Energy ADE für die Gebäudesimulation wurde die am Institut entwickelte Anwendung IFCExplorer um eine entsprechende Importfunktion ergänzt. Neben den geometrischen Gebäudedaten sind insbesondere die Materialdefinitionen der Begrenzungsflächen (*ThermalBoundary*) für eine energetische Gebäudesimulation relevant. Diese werden vollständig importiert und für die Simulation des thermischen Verhaltens eines Einzonen-Modells an das Simulationsmodul übergeben. Die Simulationsergebnisse werden im IFCExplorer visualisiert, können als entsprechende Zeitreihen in das CityGML Energy ADE Datenmodell überführt werden und sind somit für weitere Anwendungen verfügbar. Zurzeit werden die berechneten Heiz- und Kühlungsbedarfe, die solaren Gewinne, der Beleuchtungsbedarf und die meteorologischen Eingangsparameter als Ergebnisse exportiert.

Die Integration von verschiedenen Datenmodellen in der Anwendung IFCExplorer wurde so erweitert, dass alle georeferenzierten Daten in einer Szene dargestellt werden können. Die Georeferenzierung der Daten kann sowohl in geographischen (geographische Breite und Länge) als auch in projizierten Koordinatensystemen (z.B. Gauß-Krüger) erfolgen. Liegen die Daten in unterschiedlichen Koordinatensystemen vor, werden alle Daten in das Koordinatensystem des initialen Datensatzes transformiert. Abb. 60 zeigt die Integration eines detaillierten Gebäudemodells (Building Information Model im IFC-Standard), das durch die Angaben von Länge, Breite, Höhenlage und Nordrichtung georeferenziert ist, in ein 3D-Stadtmodell (Gebäudehüllen im CityGML Standard), das in Gauß-Krüger Koordinaten vorliegt. Ergänzt wurde die Szene mit der Geometrie der Fernwärmeleitungen, inklusive der Schachtbauwerke, und mit Kartenmaterial von OpenStreetMap.

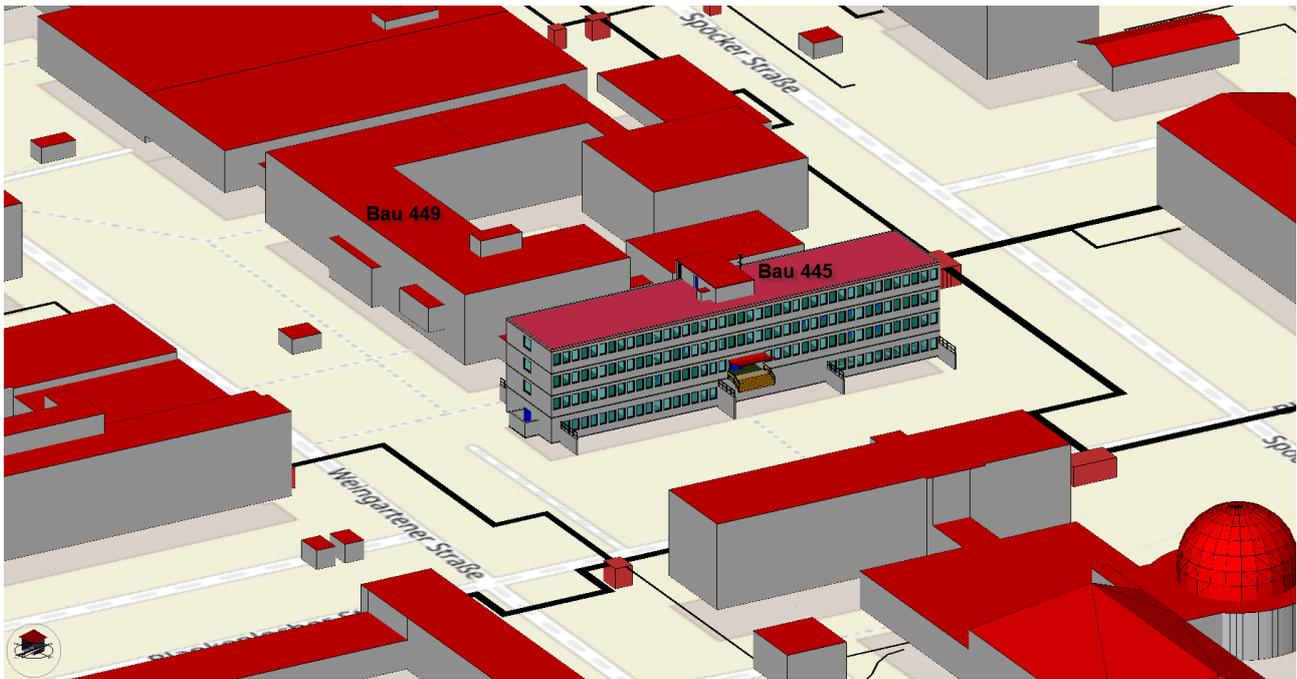


Abb. 60: Szene, bestehend aus einem Building Information Model (BIM im IFC-Standard, Bau 445) und mehreren aus Befliegungsdaten abgeleiteten Gebäudehüllen (Geodaten im CityGML-Standard, Bau 449)

Da bei der Modellierung von Gebäuden und Infrastrukturen unterschiedliche Modellierungseinheiten und Modellierungsgenauigkeiten genutzt werden, müssen diese bei der Integration berücksichtigt werden. Ein Sonderfall stellt die Modellierung von Versorgungsinfrastrukturen dar, wobei z.B. Rohrlängen in Meter und Rohrdurchmesser in Millimeter oder Zentimeter angegeben werden.

Zur Unterstützung der konzeptionellen Designphase von Gebäuden wurde im Rahmen des EU-Projekts STREAMER eine prototypische Softwareapplikation entwickelt, die auf Basis eines Raumbuchs (mit projekt-spezifischen Attributen) und einer vorgegebenen Außenhülle Vorschläge für die Raumaufteilung erzeugt. Abb. 61 zeigt die erzeugte Raumaufteilung eines sechsstöckigen Gebäudes.

Zurzeit werden bei der Generierung der Raumaufteilung die Zugänglichkeit der Räume und das Längen-/Breiten-Verhältnis der Räume berücksichtigt. Um die Zugänglichkeit zu gewährleisten, ist die Software in der Lage, verschiedene Korridorkonfigurationen zu erzeugen. Weitere Designregeln, wie zum Beispiel Raumgruppierungen, Fluchtweglängen und Treppenhäuser, werden zurzeit nicht berücksichtigt.

Das oben diskutierte semantische Datenmodell CityGML Energy ADE kann, neben einer energetischen Gebäudesimulation, auch zur Untersuchung der elektrischen Lastflexibilität klimatisierter Gebäude als Power-to-Heat-Komponenten im Smart Grid dienen. Mit der Konvertierung von CityGML Energy ADE Instanzendokumenten in eine MATLAB-Datenstruktur wurde begonnen. MATLAB bietet viele mathematische Hilfsmittel und numerische Lösungsmethoden / Bibliotheken, um thermische oder thermo-elektrische Modelle zu generieren und auszuführen, welche auf einfache Weise in die Co-Simulationsplattform des Energy Lab integriert werden können. Ergebnisvergleiche mit dem oben erwähnten, in IFCEXplorer integrierten, kommerziellen Simulationsmodul werden so möglich.

CityGML Energy ADE repräsentiert alle wesentlichen Eingaben für Gebäudesimulationen gegliedert in die Elemente Lage, Geometrie und Topologie, Materialbeschreibung, Gebäudetechnik mit Schwerpunkt Klimatisierung, Gebäudenutzung (thermische Zonen, zeitliche Anwesenheit und Temperaturvorgaben) sowie Wettereinflüsse. Eine solch detaillierte Beschreibung bildet den Startpunkt für die systematische Erstellung schrittweise vergrößerter Rechenmodelle, etwa thermischer Ersatzmodelle für große Gebäude-Ensembles. Ein wichtiges Ersatzmodell ist die Thermostat-geregelte thermo-elektrische Last (TCL), die einen innerhalb bestimmter Temperaturgrenzwerte geregelten thermischen Speicher konzeptionell durch eine Zweipunktregelung (Thermostat) approximiert.

Große TCL-Populationen mit ihrer aggregierten Stromlast und dem aggregiertem (Temperatur-) Füllstand werden durch partielle Differentialgleichungen (Fokker-Planck) der Zustands-WS-Dichten beschrieben.

Numerisch skalieren solche Modelle sehr gut, da der Rechenaufwand unabhängig von der Zahl der Komponenten ist. Jedoch verfälscht die verbreitete Quantisierung des Zustandsraums über äquidistante Temperaturhistogramme die transiente Dynamik, z.B. das stochastische Resonanzverhalten (Oszillation), erheblich. Daher wurde eine fehlerärmere Methode der direkten Transformation stückweise linearer WS-Dichtefunktionen entwickelt, welche die Dichten unter der zeitdiskreten Wärme Gleichung mit Berücksichtigung der Thermostat- Umkehrpunkte propagiert. Dieses Rechenmodell bietet eine gute Grundlage, um Strategien zur Lastbeeinflussung zu untersuchen.

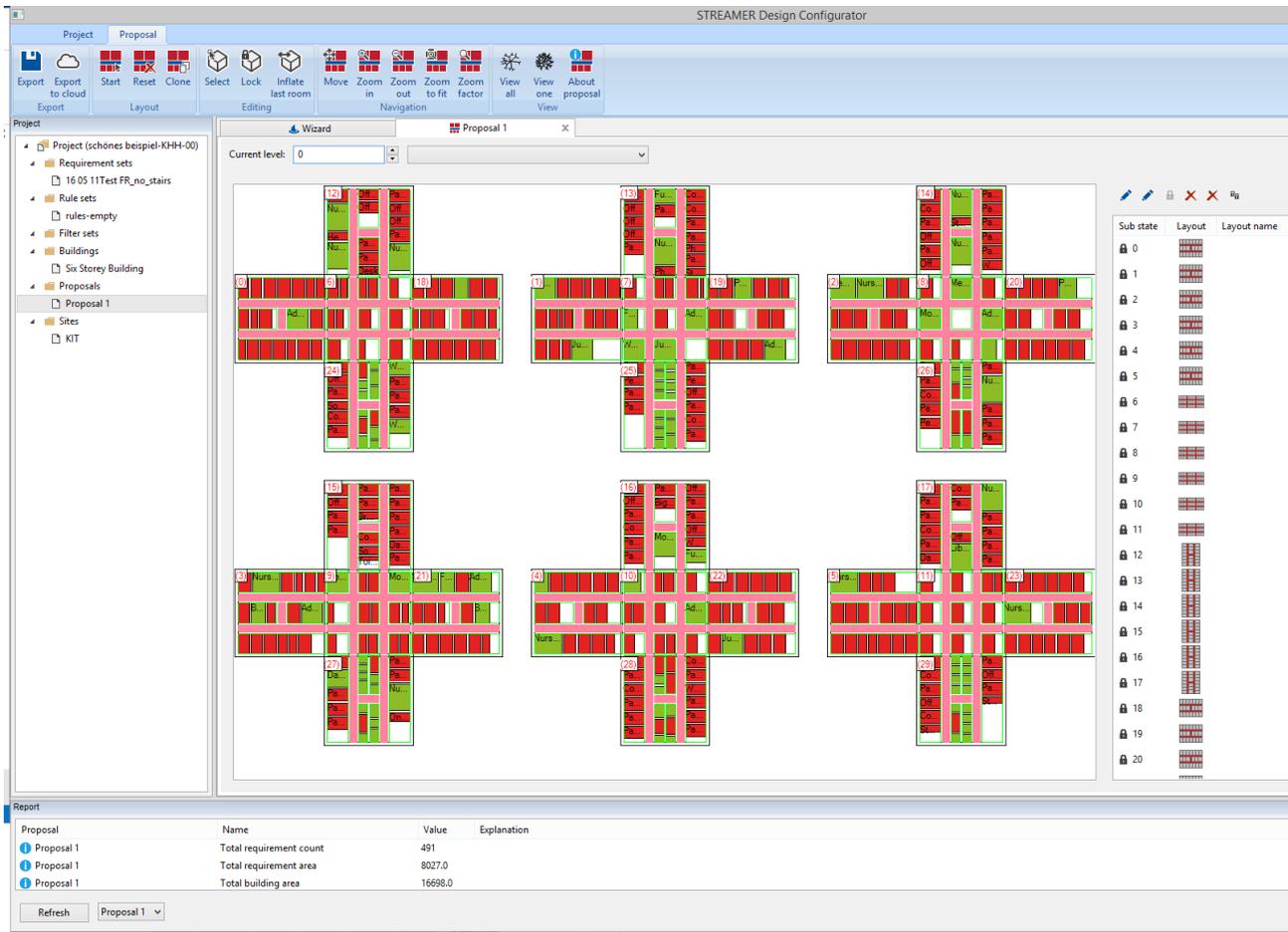


Abb. 61: Vorschlag für eine Raumaufteilung eines sechsstöckigen Gebäudes

Die 2015 begonnene und 2016 fortgeführte Abschätzung der Lastflexibilität beheizter / klimatisierter Gebäude als Power-to-Heat Speicher (P2H, Bereiche Wohnen und GHD deutschlandweit) brachte konkrete neue Ergebnisse zur Speicherkapazität und Regelleistung. Diese für den Vergleich mit Stromspeichern zentralen Kriterien sind definiert als Grad an Flexibilität, von der elektrischen Referenzlast nach unten oder oben abzuweichen. Die Referenzlast entspricht - über einen P2H-Umrechnungsfaktor - der Heiz- oder Kühllast, um einen Sollzustand des thermischen Speichers, z.B. Gebäudes, gegen Wärmegewinne oder Verluste der Umgebung herzustellen bzw. zu halten; sie variiert zwischen Null und der Maximal- oder Nennleistung (P2H werden als reine Stromverbraucher gesehen). Die Flexibilität ist durch die Toleranz der Temperaturvorgaben der Endanwendung (thermischer Komfort, Hygiene etc.) und durch Materialeigenschaften der thermischen Speicher (Masse, spezifische Wärmekapazität, Wärmeströme des Füllens und Leerens) gegeben. Die flexible Speicherkapazität entspricht Zeit-integrierter flexibler Regelleistung und ist per se unabhängig von Wärmeverlusten oder Jahresverbräuchen an Wärme. Die realisierte Methode der Potenzialabschätzung zeichnet sich durch folgende Merkmale aus:

- Fokus auf technische Potenziale: die Vorgaben des Betriebs und der Wärme-Endanwendung sind strikte Beschränkungen.
- Zur Kapazität (siehe Abb. 62) zählen alle Gebäudemassen im Rahmen der nutzbaren und zulässigen Temperaturbereiche, egal ob der Wärmetransport selbst elektrisch erfolgt.

- Die Regelleistung (Abb. 63) wird unter der Abstraktion Thermostat-gesteuerter elektrischer Wärme- oder Kälteüberträger oder -Erzeuger (TCL) abgeschätzt, wobei der statistische Gleichzeitigkeitsfaktor und die Haltedauer der Regelleistung berücksichtigt werden.

Alle Potenziale werden aus für Deutschland verfügbaren Bestandsdaten zur Gebäudeklimatisierung sowie morphologischen Bebauungsparameter und Verhältniszahlen „top-down“ mit geschlossenen Formeln geschätzt. Weder Simulation / Optimierung im Zeitbereich noch GIS-basierte Erhebung des realen Gebäudebestands in Modellregionen („bottom-up“) sind erforderlich.

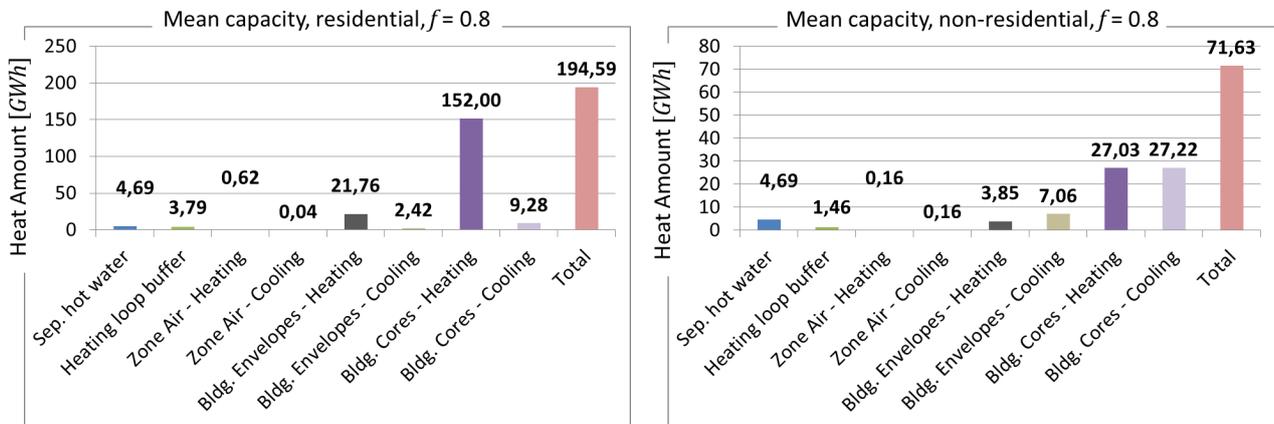


Abb. 62: Elektrisch wirksame flexible Speicherkapazität verschiedener Wärmeträger für ein P2H-Lastmanagement, links für Wohngebäude und rechts für den GHD-Bereich. In den Szenarien wurden über die Unsicherheitsintervalle gemittelte Eingangswerte sowie ein hoher Nutzungsgrad des Bestandes ( $f = 0.8$ ) für das Lastmanagement angenommen (Kohlhepp, P.; Hagenmeyer, V.: Technical potential of buildings in Germany as flexible power-to-heat storages for smart grid operation [in press].2017. Energy technology, Fig. 6).

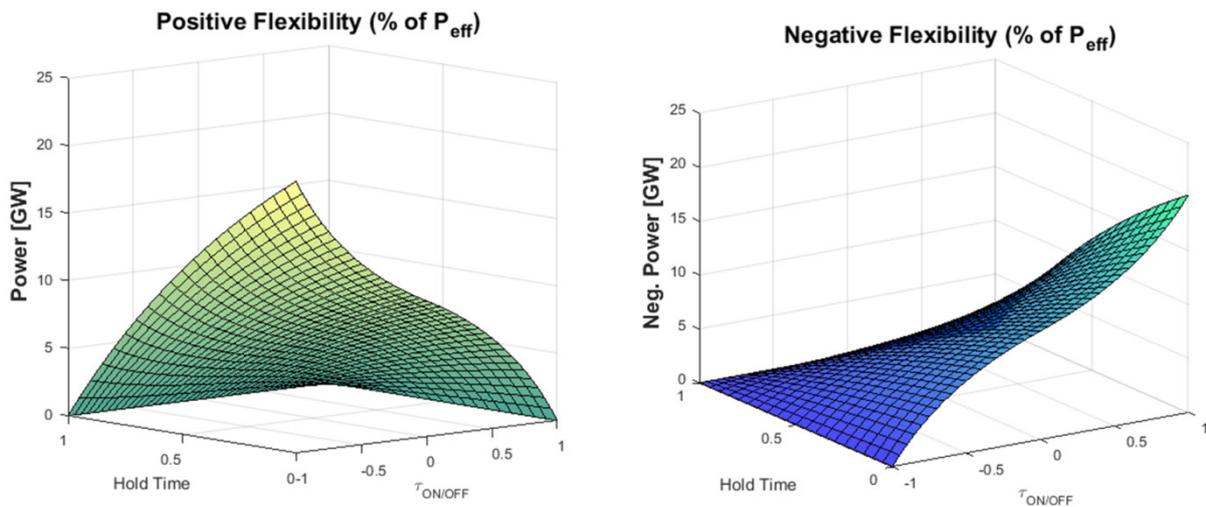


Abb. 63: Aggregierte erwartete positive (links) bzw. negative (rechts) Regelleistung (Flexibilität) bezogen auf eine Nennleistung bzw. aktive Leistung von 20 GW für Deutschland, unter der Modellannahme Thermostat-gesteuerter Heiz- bzw. Kühlsysteme, dargestellt als Funktion einer Verhältniszahl  $\tau_{ON/OFF}$  der Dauer aktiver zu passiver Betriebsphasen sowie der normalisierten Haltedauer der Regelleistung.

Mit Hilfe neuer Studien zur Heizungs- und Klimatechnik in Deutschland wurde die Datengrundlage erhärtet und verbessert. Bei der Regelleistung wurden Vergleichsrechnungen für exponentiellen Temperaturverlauf, neben linearem, der TCL durchgeführt. Eine technische Einschränkung der TCL-Modelle wurde mit Betriebsphasen-übergreifender Haltedauer der Regelleistung überwunden. Statt der elektrischen Nennleistung, die über mehrere Sektoren wie alle verbrennungsbasierten Heizungen inklusive Fernwärme, Elektro-Direktheizungen, Wärmepumpen-Klimatisierung, Gebäude- und Warenkühlung sowie separate Warmwasserbereitung aggregiert wird, dient als Bezugsgröße nun die saisonale, Außentemperatur-abhängige aktive Heiz-/Kühlleistung. Dies hat jedoch zur Folge, dass in Jahreszeiten ohne Heiz- und ohne Kühlbedarf die entsprechenden Potenziale nun sehr klein werden.

# Programm TIS-KT: Technology, Innovation and Society / Key Technologies

## Innovation Processes and Impacts of Technology

### IT-Komponenten für die Energiewende

Ziel der FuE-Arbeiten der Forschungsgruppe „Webbasierte Informationssysteme“ ist die Entwicklung und Nutzung innovativer Internettechnologie-basierter Datenverarbeitungs- und Informationsmanagement-Methoden für die Konzeption, Analyse und Bereitstellung von Energieinformationssystem-Komponenten als Planungs- und Visualisierungsinstrumente zur Steuerung innovativer Smart-Grid-Lösungen sowie als Grundlage für die Interaktion und den Dialog mit Bürgern über Fragen zur Energiewende. Bei den Arbeiten sollen dabei nicht nur technische Lösungen entwickelt sondern auch deren Implikationen für die Gesellschaft in Kooperation mit anderen Partnern des Forschungsprogramms TIS eingehend analysiert werden.

Ein Arbeitsschwerpunkt war 2016 die Konzeption und Realisierung einer Microservice-basierten generischen Datenhaltungsplattform zur Speicherung von Informationen und Daten als Grundlage für webbasierte Anwendungen für intelligente Energiesystem- und Umweltanwendungen für den Zugang von Dritten zu den Daten. Hierbei spielen u.a. auch der Datenschutz sowie der Aspekt der Datensparsamkeit eine Rolle. Wenn Informationen über zentrale Einstiegspunkte wie Webportale und mobile Anwendungen zur Verfügung gestellt werden sollen, müssen die Inhalte, auf denen diese Anwendungen basieren, häufig auf Basisdaten zurückgreifen, die zu anderen Zwecken und in anderen Kontexten entstanden sind bzw. erhoben wurden. Der primäre Zweck dieser (ursprünglichen) Daten widerspricht daher häufig dem Zweck der Nachnutzung und stellt eventuell auch ein rechtliches Problem bzgl. des Datenschutzes dar. Zum Beispiel enthalten Informationen oft personenbezogene Daten, sind Lizenzen unterworfen, bestehen aus großen Informationsmengen, von denen nur Teile für eine Applikation relevant sind, oder sind primär nur Nutzergruppen mit entsprechenden Benutzerrechten zugänglich. Des Weiteren werden die Daten in Fachsystemen oft in speziellen Datenformaten gespeichert, sind nicht über das Internet zugänglich, nicht rund um die Uhr verfügbar, oder für Laien ohne Aufbereitung unverständlich.

Eine der zentralen Ideen der entwickelten Datenplattform ist die „Webcache“ genannte abstrahierte Schnittstelle zum Zugriff auf die Daten durch Dritte (s. Abb. 64). Hierbei erhalten Dritte nicht direkt Zugriff auf die Originaldaten in den Fachinformationssystemen, sondern der „Webcache“ stellt bereinigte und für die Drittnutzer optimierte Daten über einfach zu nutzende technische Schnittstellen bereit. Die Informationen werden dabei automatisch aus den ursprünglichen Systemen (Datenquellen) extrahiert, z.B. Datenbanken und Fachanwendungen, dabei aufbereitet (Datenaufnahme, „Data Ingestion“) und in der Datenplattform zum Zugriff über Internet-basierte Schnittstellen zur Verfügung gestellt. Die Vermeidung des direkten Durchgriffs auf die originalen Datenquellen ermöglicht eine bessere Verfügbarkeit und nutzungsbasierte Skalierung von Diensten (Datendienste und Datenmanagement) und bietet Sicherheitsvorteile durch strikte Trennung von internem und externem/öffentlichem Zugang.

Der Datenfluss ist dabei aus Sicht der Nutzer zunächst einmal unidirektional von den Datenquellen (Data Sources) hin zum Webcache konzipiert. So stellt der Webcache eine schreibgeschützte Kopie der Daten dar. Konsistenz- oder Kohärenz-Bedingungen werden für jeden Datentyp und jede Datenquelle festgelegt und beeinflussen die Art und Häufigkeit der Synchronisation zwischen Datenquelle und Webcache. Begrenzt auf unidirektionale Datenflüsse stellt der Webcache nur eine vereinfachte Anwendung dar. Im Allgemeinen bietet er jedoch die volle Funktionalität des Datenmanagements, d.h. auch Funktionen zum Hinzufügen, Aktualisieren und Löschen von Daten stehen zur Verfügung, einschließlich Mechanismen für Authentifizierung und Autorisierung.

In einer ersten Version wurde der Webcache als Mischung Cloud-basierter Dienste (z.B. Google Maps Engine, Google App Engine, Cloud SQL, Google Compute Engine, CARTO) implementiert. Die hierbei gewonnenen Erfahrungen mündeten in die Konzeption und den Entwurf einer Sammlung generischer Dienste, in welche die bisherigen und künftigen Anforderungen (vor allem aus dem Bereich der Energiesysteme) eingeflossen sind: Das generische Microservice Backend (GMB).

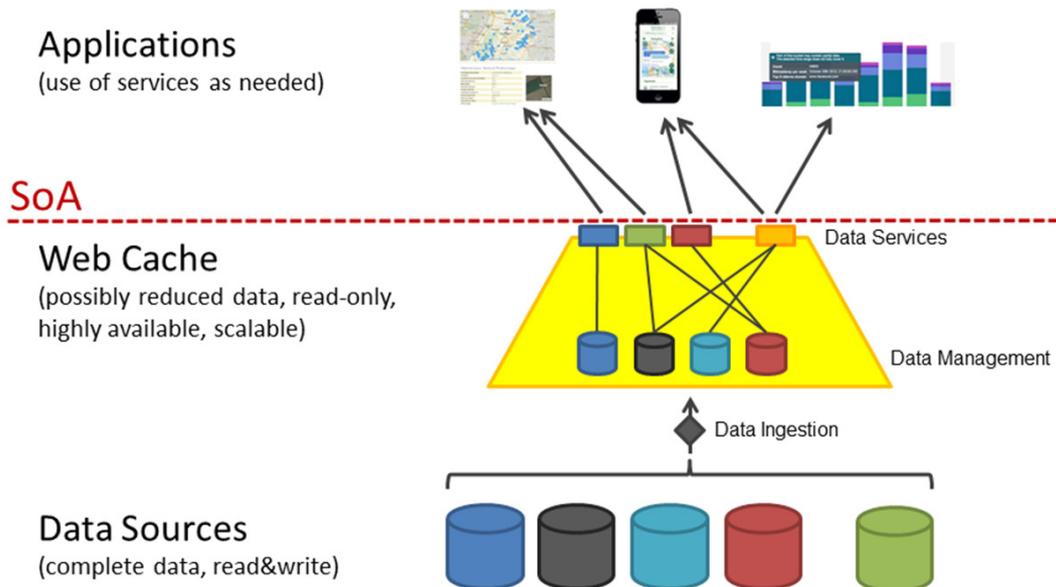


Abb. 64: Übersicht über den Webcache mit Datenquellen (Data Sources) und der Datenaufnahme (Data Ingestion) unten, dem Service-orientierten Webcache inklusive Backend-Systemen für das Datenmanagement in der Mitte sowie den konsumierenden Anwendungen (Applications) oben

Um den Aufwand zur Einrichtung und zum Betrieb des Webcaches auf einem akzeptablen Niveau zu halten, ist es ein wesentliches Ziel, die gesamte Information durch eine begrenzte Anzahl von generischen Diensten bereitzustellen. Dazu müssen die notwendigen Daten und Funktionalitäten definiert werden. Je nach Anwendung ist neben speziell entwickelten generischen Diensten auch der Einsatz von Cloud-Services „von der Stange“ möglich.

Zunächst wird die Transformation der Originaldaten in ihre generische Darstellung (und ggf. ein entsprechendes Datenschema für das syntaktische und semantische Verständnis) definiert. Dies kann eine Verarbeitung wie Auswahl, Filterung, Aggregation etc. (Datenaufnahme) beinhalten. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass nur zulässige „internetfähige“ Daten den Webcache erreichen können, z.B. ohne personenbezogene Daten, unter Verwendung aggregierter Werte, Filterung, usw.

Für die Anforderungen im Energie- und Umweltbereich wurden insgesamt acht generische Dienste identifiziert: Stammdatendienst, Schemadienst, Zeitreihendienst, Mediendienst, (Volltext-) Suchdienst, Geodaten-dienst, Metadatendienst und Verknüpfungsdienst. Diese acht Kerndienste werden durch zwei weitere Dienste ergänzt, die konsumierende Anwendungen unterstützen: Anwendungskonfigurationsdienst und Discovery-Dienst.

Diese Dienste sind weitgehend voneinander unabhängig, was dem Konzept von Microservices entspricht. Daher ist eine Implementierung unter Verwendung von Microservices naheliegend. In Laufzeitcontainern wie Docker verpackt, können diese ohne zusätzlichen Aufwand an einer Vielzahl von möglichen Infrastrukturen wie dedizierten Servern, Clustern oder in der Cloud betrieben werden. Unter Einsatz von Laufzeitinfrastrukturen wie Kubernetes sind operative Aspekte wie Rolling-Updates, Monitoring, Skalierbarkeit und Load-Balancing nur eine Frage der Konfiguration - geeignete Computerinfrastruktur und passendes Software-Design vorausgesetzt.

Alle Dienste nutzen Backend-Systeme, die insbesondere die Persistenz der Daten sicherstellen. Auch hier wird in der Architektur von konkreten Systemen abstrahiert, so dass diese Backend-Systeme problemlos ausgetauscht oder gleichzeitig unterschiedliche Backend-Systeme genutzt werden können. Die Auswahl geeigneter Backend-Systeme, z.B. verschiedene NoSQL-Technologien, sichert auch dynamische Eigenschaften wie Lastverteilung, Skalierbarkeit usw. auf dieser Ebene.

Alle Services bieten ihre Funktionalität durch versionierte RESTful-Interfaces per Content-Negotiation an. Dies erleichtert die Entwicklung, Wartung und den Austausch einzelner Dienste.

Passend zum Portfolio der Dienste aus dem GMB werden für die Präsentation von Daten und Inhalten in Nutzer-Frontends, z.B. Web-Portalen, Websites oder mobilen Anwendungen, entsprechende Frontend-

Komponenten entwickelt, etwa zur Anzeige von Objektdaten (z.B. als Einzelansicht, als Liste oder als Tabelle), Diagrammen (z.B. Zeitreihen, Tortengrafiken), Geoinformationen auf einer Karte, Auswahllisten (z.B. zur Nachfilterung anhand von Facetten), Formularen, etc.

Insbesondere innerhalb von Portalen, die per se Daten aus verschiedenen Quellen darstellen sollen, ist es sinnvoll, diese Komponenten ebenfalls generisch, d.h. hochkonfigurierbar und damit nutzbar für verschiedene Anwendungsfälle, anzulegen. Das bedeutet, dass z.B. die Datenquelle (Schnittstelle, Format), das Ausgabeformat (z.B. in Form von Templates), spezifische Styling-Formate und weitere Einstellungen per Konfiguration für eine spezifische Instanz der Komponente festgelegt werden können. Generische Frontend-Komponenten sollten darüber hinaus flexibel in verschiedene Basissysteme integrierbar sein, zum Beispiel Content-Management-Systeme oder Enterprise Portal-Systeme.

Das Flexvis-Framework für die Konfiguration und Bereitstellung von Diagrammen wurde zunächst im Rahmen einer Masterarbeit entwickelt und anschließend für konkrete Anforderungen aus dem Energie- und Umweltbereich erweitert. Es bietet Möglichkeiten zur Definition von Visualisierungen (in der Regel Diagrammen) durch Einbindung beliebiger Visualisierung-Bibliotheken wie Highcharts oder C3.js.

Ein erster Dienst dient dabei der Definition konkreter Visualisierungstypen (z.B. Linien-, Balken-, Tortendiagramme), und damit der Einbindung der konkreten Implementierungen von Visualisierungen. Für die Beschreibung von Datenquellen steht ein zweiter Dienst zur Verfügung. Diese Datenquellen können z.B. REST-Services (z.B. aus dem GMB-Portfolio), Datenbankabfragen oder statische Dateien sein. Die Datenquellen können parametrisiert werden, z.B. um die Daten einer konkreten Messstelle oder Komponente in einem bestimmten Zeitraum anzusprechen. Der dritte Dienst dient der Verknüpfung von Visualisierungstypen mit Datenquellen. Resultat ist jeweils eine konkrete Visualisierung inklusive der zugehörigen Daten.

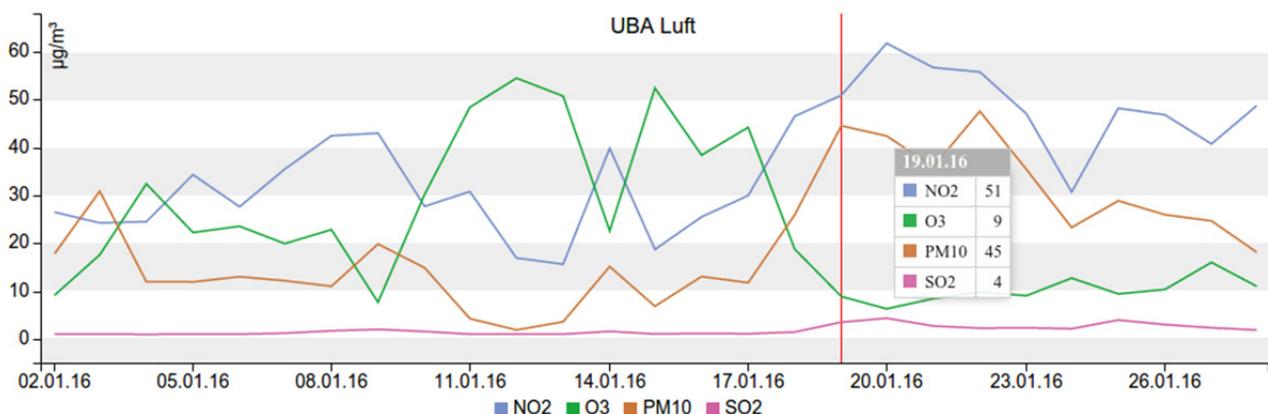


Abb. 65: Liniendiagramm zur Darstellung von Luftmesswerten (Komponenten NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, Feinstaub PM10 und SO<sub>2</sub>) über einen Zeitraum von einem Monat. Ein Inline-Popup an der Cursorposition zeigt dynamisch die numerischen Werte.

Die in Anwendungen eingebundenen Visualisierungen können (z.B. Event-basiert) mit ihrer Umgebung, etwa weiteren Komponenten auf derselben HTML-Seite, interagieren. So führt beispielsweise die Auswahl einer anderen Messstelle durch den Nutzer zu einer Aktualisierung der Diagrammdarstellung(en) mit den passenden Werten der ausgewählten Station (s. Abb. 65). Aber auch das Vorliegen neuer Daten oder zeitgesteuerte Ereignisse („alle 5 Sekunden“) können zur Aktualisierung der Darstellung führen.

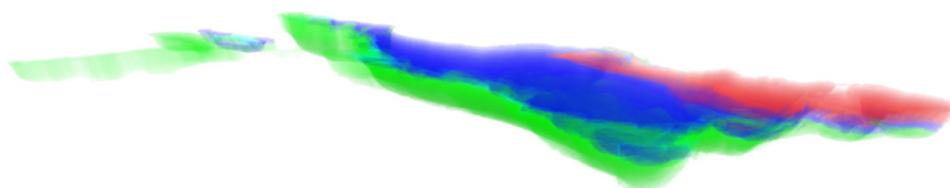


Abb. 66: 3D-Visualisierung von Temperaturdaten des Bodensees mit Hilfe des Flexvis-Frameworks

Die Flexibilität und Leistungsfähigkeit des Flexvis-Frameworks sowie den hohen Abstraktionsgrad bei der Einbindung von Visualisierungstypen demonstriert die 3D-Darstellung von Modelldaten des Bodensees (s. Abb. 66). Neben den üblichen 3D-Interaktionen wie Drehen oder Zoomen stellt das Framework interaktiv Parameter zur Einfärbung der konkreten Daten, hier z.B. von Temperaturverläufen, zur Verfügung. Daneben demonstriert dieses Beispiel auch die Anbindung umfangreicher komplexer (in diesem Fall binärer) Datenquellen an eine komplexe Visualisierung auf Basis von Web-Technologie.

Die serviceorientierte Datenplattform des „Webcache“ bildet in Anwendungsprojekten auch die Grundlage für die Nutzung der bereitgestellten Daten und Funktionen in weiteren Anwendungen, z.B. in Form von mobilen Apps für Smartphones oder Tablets. Die App „Meine Umwelt“ ist seit dem Jahr 2013 verfügbar. Nachdem zunächst nur Daten und Funktionen für Baden-Württemberg verfügbar waren, sind seit dem Jahr 2016 auch Ausprägungen für Sachsen-Anhalt und Thüringen enthalten, weitere länderspezifische Ausprägungen sowie eine Basisversion für ganz Deutschland sind in Planung bzw. in Arbeit. Bei „Meine Umwelt“ handelt es sich um eine hybride App, die im Kern auf HTML5-Technologien beruht, und durch die Nutzung entsprechender Frameworks (Apache Cordova) in plattformspezifische native Container verpackt wird, so dass die App für Android, iOS und Windows Phone in den jeweiligen entsprechenden App-Stores zur Verfügung steht. Das technische Konzept hierfür wurde am IAI entwickelt, die weitere Implementierung und Wartung ist aber inzwischen an eine externe Firma übergeben worden. Die Leistungsfähigkeit der technischen Plattform demonstriert die App „Meine Pegel“, die auf den Services von „Meine Umwelt“ aufsetzt, um Nutzern aktuelle Informationen zu Pegelständen zu liefern. „Meine Pegel“ bietet darüber hinaus erstmals die aktive Benachrichtigung von Nutzern, die sich z.B. für einen kritischen Wert eines oder mehrerer Pegel registrieren können, per Push-Notification an. Die dafür benötigte Funktionalität und Service-Infrastruktur wurde anschließend in „Meine Umwelt“ wiederverwendet, eine erste Warn-Funktionalität informiert interessierte Nutzer direkt über den Status des Feinstaubalarms in Stuttgart (s. Abb. 67).

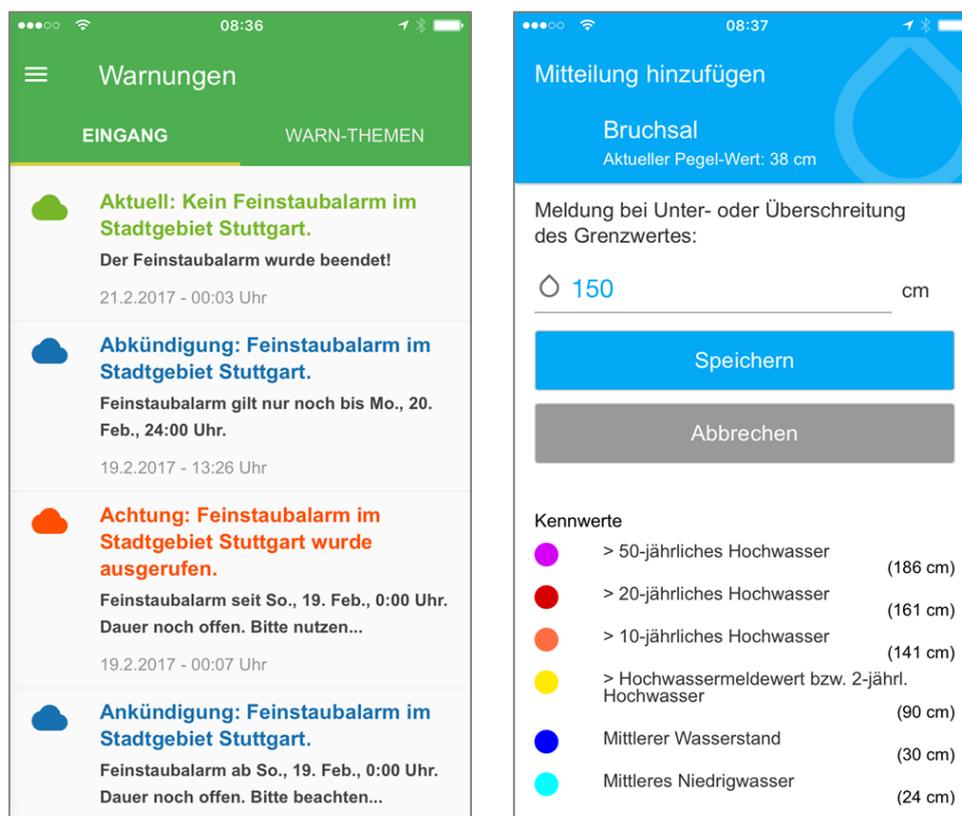


Abb. 67: Warnungen zur Situation des Feinstaubalarms in Stuttgart (App „Meine Umwelt“, links) und die Möglichkeit zur Einrichtung einer individuellen Warnung für den Saalbach-Pegel in Bruchsal bei einem Stand von 150 cm (App „Meine Pegel“, rechts)

# Programm BIFTM: BioInterfaces in Technology and Medicine

## Biologische Netzwerke und Synthetische Regulatoren

### Automatisierte Bild- und Datenanalyse

Viele moderne biologische Experimente sind nur noch mit einer automatisierten Durchführung und Analyse sinnvoll zu bewältigen. Die anfallenden Datenmengen, bei denen z.B. einzelne Experimente routinemäßig mehrere Terabyte an Bilddaten generieren, können jedoch kaum manuell ausgewertet werden, ohne Monate oder sogar Jahre mit der manuellen Analyse zu verbringen. Solche Probleme werden deshalb als Big-Data-Probleme bezeichnet. Es ist unabdingbar, spezielle automatisierte Bildanalyseverfahren einzusetzen, um eine quantitative Analyse der Daten ausführen zu können.

Ein Beispiel ist die automatische Bestimmung von Zellformigenschaften und -änderungen in kompletten Fruchtfliegen-, Zebrafisch- und Mausembryos. Zellbewegungsmuster, Zellabstammung sowie zeitliche Zellformänderungen im kompletten Embryo liefern detaillierte Informationen über entwicklungsbiologische Vorgänge, wie die Formation von Körperachsen oder die Entwicklung einzelner Organe. Somit können unter anderem Unterschiede zwischen Wildtyp- und Mutantenembryos aufgedeckt und charakterisiert werden. Mit fluoreszierenden Proteinen werden dabei spezifische Strukturen (z.B. Zellkerne oder Zellmembranen) innerhalb eines Embryos sichtbar gemacht. Zusammen mit Kollegen des Janelia Research Campus (Virginia, USA) und der Universität von Brasilia (Brasilien) wurden neue Algorithmen und Tools entwickelt, um quantitative Zellforminformationen aus 3D-Bildern von fluoreszenzmarkierten Zellmembranen in kompletten Embryos in Echtzeitgeschwindigkeit zu berechnen (Abb. 68).

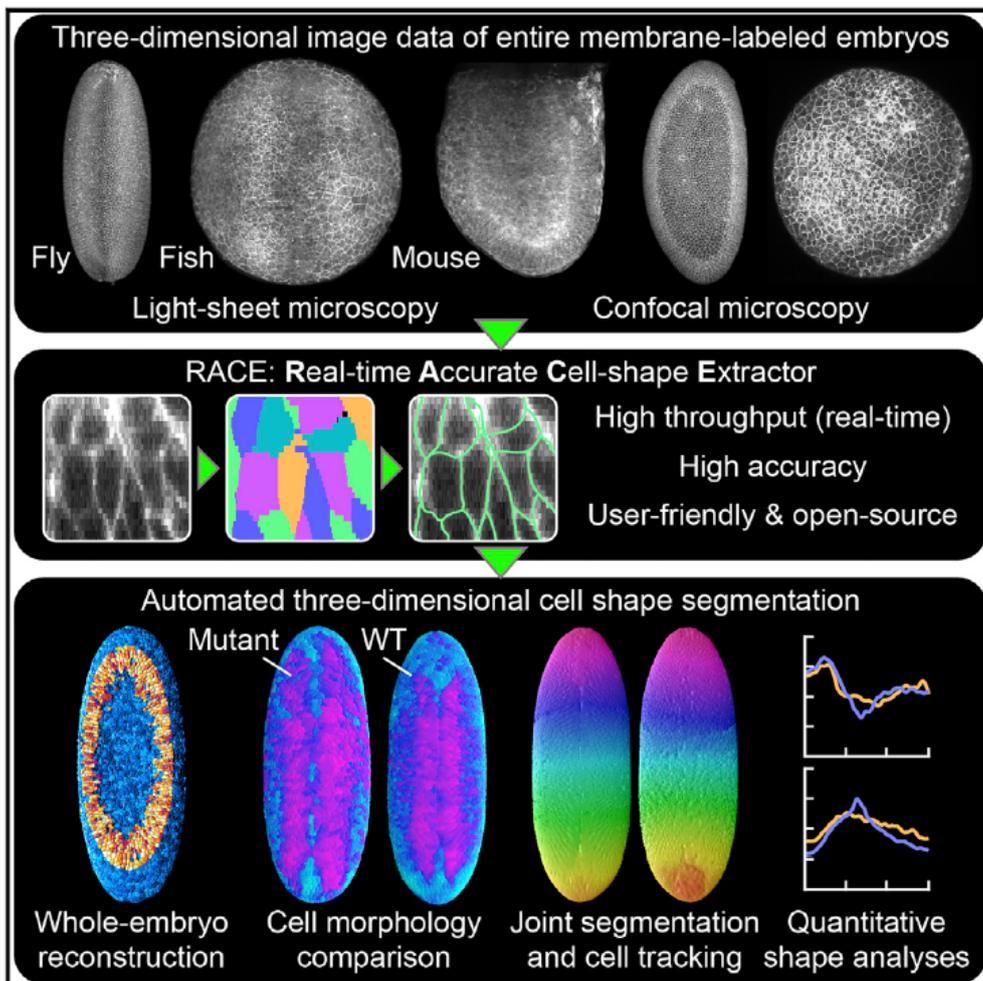


Abb. 68: Ablauf bei der Analyse von Zellmembranen auf der Basis von Bilddaten aus der Lichtscheibenmikroskopie und konfokalen Mikroskopen (Bildquelle: [52])

Die entwickelte Verarbeitungskette verwendet ausschließlich effiziente Bildverarbeitungsoperatoren, die beispielsweise Zellmembransignale hervorheben, 2D-Zellsegmente identifizieren und schließlich auch 3D-Rekonstruktionen aller Zellen eines Embryos erstellen können. Die Implementierung des Verfahrens wurde systematisch optimiert und aufwändige Bildverarbeitungsfilter wurden mithilfe von Grafikkarten und Mehrkernprozessoren beschleunigt. Dies ermöglichte erstmals eine Echtzeitbildverarbeitung der mehrdimensionalen Daten – die für die Datenaufnahme benötigte Zeit war also größer als die der anschließenden Datenverarbeitung und -analyse. Mittels eines einzigen Workstation-Rechners war es somit erstmals möglich, detaillierte Analysen von zeitlichen Zellformänderungen in gesamten Embryos innerhalb weniger Stunden zu erstellen.

Ähnliche Bildverarbeitungsketten wurden für eine Reihe verschiedener Experimente entwickelt, wie z.B. die Analyse von Muskelreparaturvorgängen, von neuromuskulären Endplatten, Pigmenten und von Droplet-Microarrays. Diese Entwicklungen erfordern stets eine enge Kooperation von Arbeitsgruppen aus der Biologie, Chemie, Physik und Informatik, z.B. mit den Arbeitsgruppen Strähle, Rudolf, Nienhaus, Levkin, Peravali, Dickmeis, Mione und Streit. Die Ergebnisse wurden in international führenden Fachzeitschriften wie Nature Communications, Developmental Cell, Proceedings of the National Academy of Sciences und Scientific Reports publiziert.

Eine wesentliche Herausforderung ist die schnelle und recheneffiziente Implementierung und Optimierung der entwickelten Algorithmen. Die von uns entwickelte Open-Source-Software XPIWIT basiert auf der Open-Source-Software ITK (Abb. 69).

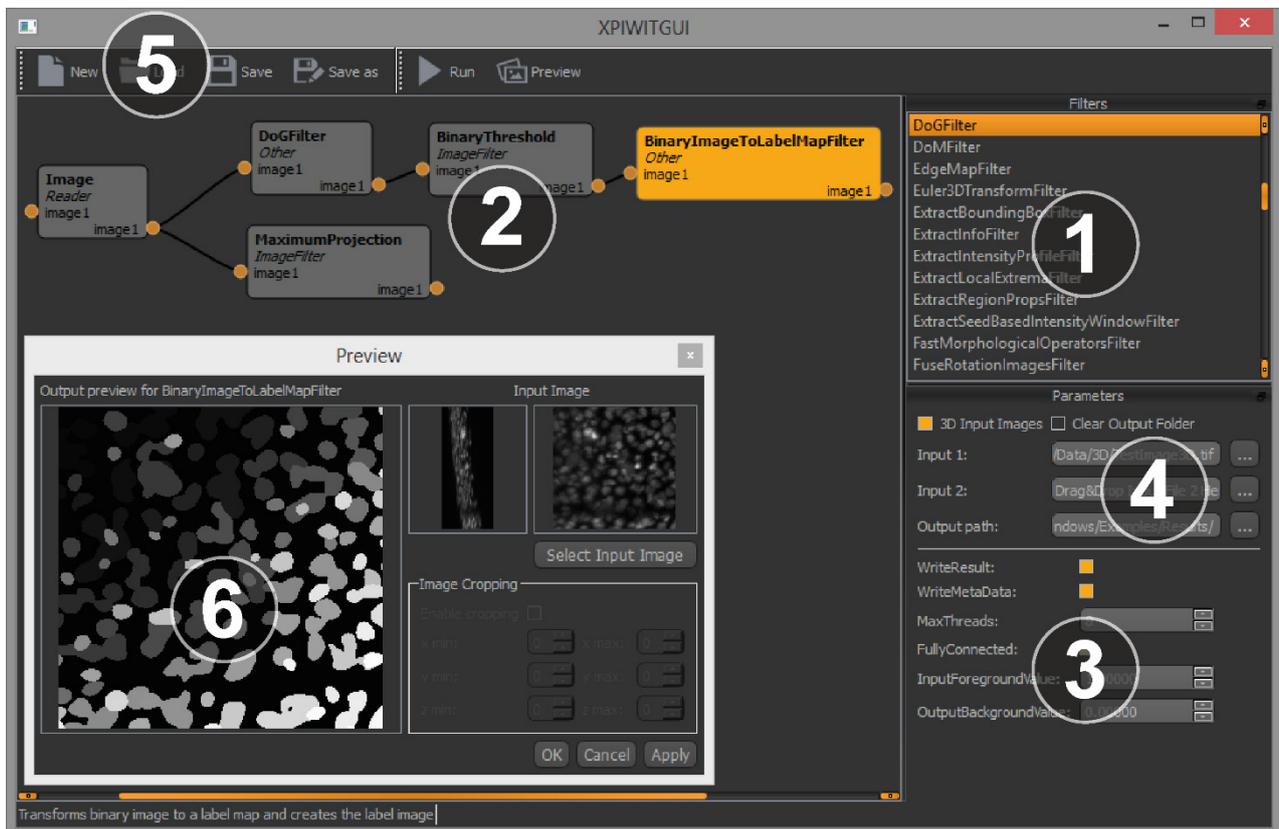


Abb. 69: Screenshot der Software XPIWIT mit Filterlisten (1), Designbereich für Pipelines (2), Bereichen zum Einstellen von Parametern (3), Ein- und Ausgabebereichen für Testläufe (4), Befehlen zur Pipelineausführung (5) und Ergebnisanzeigen (6) (Bildquelle: [54])

In den DFG-Projekten „3D+ Terabyte Bildanalyse“ (gemeinsam mit AG Sanders/KIT, assoziiert zu DFG-Schwerpunktprogramm 1736 „Algorithms for Big Data“) und „Automatisiertes Verfahren zur großflächigen Abbildung des subbasalen Nervenplexus der Kornea als Grundlage für einen zuverlässigen Biomarker zur Beurteilung der diabetischen Neuropathie“ (gemeinsam mit AG Köhler/IAI und AG Stachs/Universität Rostock) wurden neue Methoden zur Analyse biomedizinischer Bilder entwickelt und publiziert.

Experimente mit Bilddaten sind nicht das einzige Beispiel für automatisierte Analysen. Andere Experimente erfordern die Analyse von strukturierten Daten wie Zeitreihen oder Aminosäuresequenzen wie bei Peptiden. Antibakterielle Peptide sind mittel- und langfristig ein vielversprechender Ansatz zur Behandlung von Bakterien, die gegen herkömmliche Antibiotika resistent sind. Gemeinsam mit Arbeitsgruppen der St. George's University of London, des Universitätsklinikum Charité in Berlin und des KIT gelang es mit einer der weltweit größten Studien mit 3000 Peptiden nachzuweisen, dass modellgestützte Verfahren die Suche nach wirksamen Peptiden wesentlich beschleunigen können.

2016 startete das neu angeworbene und vom BMBF geförderte Drittmittelprojekt I-CARE. Gemeinsam mit der Universität Bremen sowie weiteren Partnern aus der Wissenschaft und Industrie wird ein technisches System für Tablet-PCs entwickelt, das die persönlichen Bedürfnisse und Kompetenzen von demenzkranken Personen erfasst und auf dieser Basis den Betroffenen, ihren Angehörigen und professionell Pflegenden Aktivierungsinhalte wie z.B. Musikvideos zum Mitsingen, biografische Fotografien und Ratespiele zu verschiedenen Interessensgebieten zur Verfügung stellt. Die wissenschaftliche Evaluierung erfolgt auf Basis der Daten, die vom System aufgezeichnet werden. Sie beinhaltet die datengetriebene Modellierung mit dem Ziel der Quantifizierung der Aktivierungserfolge, die statistische Datenkompression relevanter Verlaufsänderungen sowie den Entwurf und die Anwendung von Algorithmen zur Langzeitmodellierung.



# Programm STN: Science and Technology of Nanosystems

## Systemintegration

Im Programm Science and Technology of Nanosystems widmet sich das IAI in Topic 2.3 „Printed materials and systems“, in Topic 3.2 „X-Ray-Optics“ und in Topic 3.3 „Teratronics“ der Systemintegration. Das IAI verfolgt in der Systemintegration einen ganzheitlichen Ansatz ausgehend vom Design von Bauteilen und Systemen über die Entwicklung und Optimierung von Prozessen und Fertigungsgeräten bis zur Inspektion und Qualitätssicherung. Zur Umsetzung dieses Ansatzes kommt themenübergreifend ein einheitlicher Satz von Methoden zum Einsatz:

- Systematische Produktgestaltung und -entwicklung
- Modellbildung und Simulation
- Prozessoptimierung und Entscheidungsunterstützung
- Handhabungs- und Dosiertechnik
- Optische Inspektion und Bildverarbeitung.

Auf Grundlage der Methoden und unter Anwendung von Verfahren der angewandten Informatik werden mechatronische Nanosysteme sowie Verfahren und Fertigungsmittel für die Nanotechnologie entwickelt. Neben den Arbeiten in der programmorientierten Forschungsförderung werden auf denselben Grundlagen auch Drittmittelprojekte zu komplementären Themen bearbeitet.

### Systemintegration – Modellbildung, Simulation

Der Fokus der Arbeiten im Schwerpunkt „Systemintegration: Modellbildung, Simulation“ liegt auf der Konzeption und Umsetzung einer druckbaren Zoomoptik, welche vollständig aus varifokalen Freiformoptiken besteht. Der Druckprozess bietet das Potenzial einer vollständigen Integration der optischen Komponenten mit Halte-, Führungs- und Getriebestrukturen. Diese Integration der optisch funktionalen mit den mechanischen Strukturen zu einem Bauteil vermeidet aufwändige Montagetagearbeiten und die damit einhergehenden Toleranzen. Bei herkömmlichen Zoomsystemen findet die Einstellung des erwünschten Zoombereiches durch eine gegenseitige axiale Verschiebung mehrerer Linsengruppen statt. Dies resultiert in einem zusätzlichen axialen Bauraumbedarf. Der Einsatz varifokaler Optiken erlaubt eine Brennweiteinstellung ohne axiale Verschiebung von Zoomgruppen. Aus diesem Grund wird kein zusätzlicher axialer Bauraumbedarf benötigt, was dazu führt, dass solche Zoomsysteme kompakter gebaut werden können. Durch die kompakte Bauweise besteht das Potenzial, Einsatzbereiche für optische Zoomsysteme zu erschließen, denen der Zugang bisher aufgrund des hohen Bauraumbedarfs verschlossen blieb, wie zum Beispiel das Smartphone-Segment. Für die varifokalen Optiken werden zwei unterschiedliche Wirkprinzipien auf Basis optischer Freiformflächen auf ihre Eignung für ein Zoomsystem untersucht: Zum einen das von Alvarez und Humphrey entwickelte Prinzip, bei welchem eine Brennweiteinstellung durch eine laterale Verschiebung (Verschiebung senkrecht zur optischen Achse) von mindestens zwei Linsenkörpern vorgenommen wird und zum anderen eine am IAI entwickelte und zum Patent angemeldete Rotationsoptik, welche eine Brennweiteinstellung durch eine gegenseitige Rotation zweier Linsenkörper durchführt (s. Abb. 70). Die Linsenkörper der Rotationsoptiken bestehen aus wendelförmigen Oberflächen, deren Krümmungsradius sich mit dem Polariswinkel ändert. Die Kombination zweier solcher Linsenkörper resultiert in einer Optik einstellbarer Brennweite, deren Einstellung durch eine gegenseitige Verdrehung der Freiformflächen erreicht wird. Solchen Optiken ist eine Bifokalität inhärent. Um eine monofokale Optik zu erhalten, muss die Abschattung des Sektors vorgenommen werden, welcher zu einer unerwünschten Brennweiteinstellung führt.

Im laufenden Jahr wurde die mathematische Beschreibung der Rotationsoptik hinsichtlich einer Einbindung der Flächenbeschreibung in das kommerzielle Simulationswerkzeug ZEMAX weiterentwickelt. Damit ist die simulative Evaluierung der Abbildungseigenschaften dieser varifokalen Optiken möglich und die Grundlage für die weiterführenden Arbeiten hinsichtlich einer Optimierung der Abbildungseigenschaften geschaffen. Ferner wurde eine Erweiterung der am IAI entwickelten umfassenden Modellierungsumgebung bezüglich der Einbindung von Messdaten in das Simulationsmodell erfolgreich umgesetzt und an Hand von Alvarez-Humphrey-Freifformoptiken evaluiert [49]. Die Einbindung von Messdaten in die Modellierungsumgebung erlaubt die simulative Untersuchung der Auswirkungen fertigungsbedingter Abweichungen von der Normgeometrie bei Freiformflächen auf die optischen Leistungsparameter (Performance). Damit ist ein Verfahren

etabliert, Freiformoptiken, welche mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren hergestellt wurden, gegenseitig zu evaluieren und den geeigneten Fertigungsprozess zu bestimmen. So ist die Möglichkeit gegeben, den Druckprozess optischer Flächen mit anderen Fertigungsverfahren für Kunststoffoptiken zu vergleichen. Zur Identifikation geeigneter Partner für den Druck optischer Komponenten wurde eine Firmenrecherche und Kontaktaufnahme durchgeführt sowie notwendiges Fertigungswissen akquiriert. Das Einbinden des Fertigungswissens (wie z.B. Entwurfsregeln, Fertigungstoleranzen, Materialparameter) in die Modellierung stellt einen fertigen und fertigungsgerechten Entwurf der optischen Freiformflächen sicher. Des Weiteren kann auf Basis der Toleranzinformationen mittels des am IAI entwickelten Konzeptes der robusten Entwurfsauslegung eine Toleranzkompensation basierend auf dem optisch-funktionalen Entwurf durchgeführt werden.

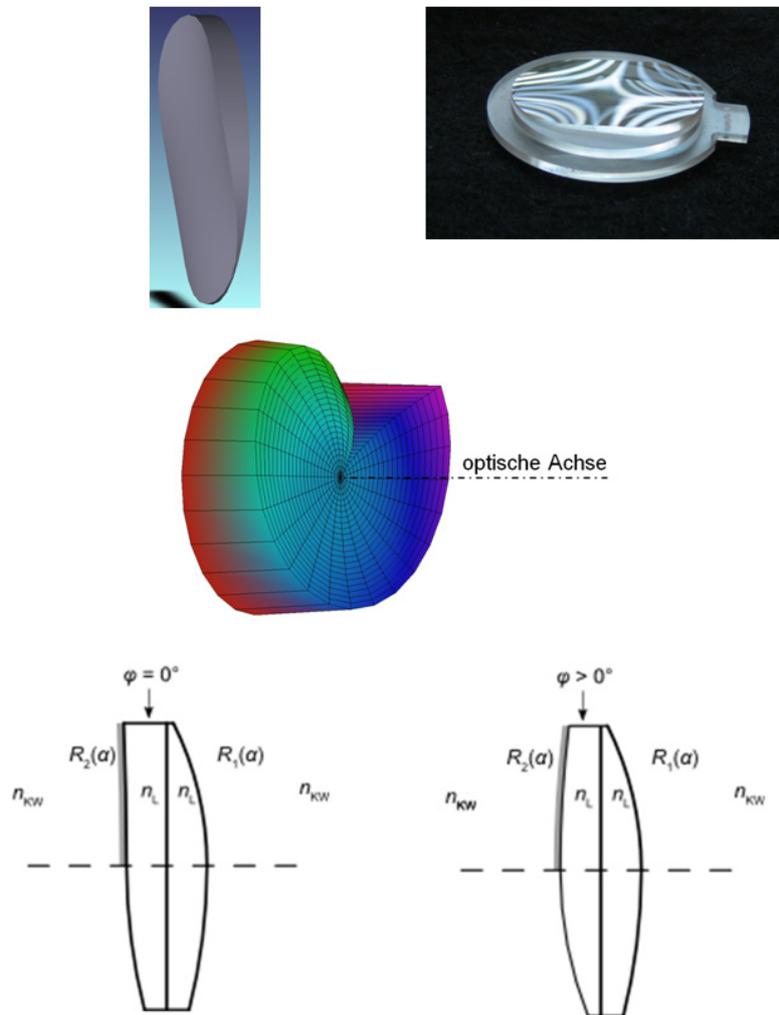


Abb. 70: Von links oben nach rechts unten: Simulationsmodell eines Linsenkörpers nach dem Alvarez-Humphrey (AH) Prinzip; gefertigter AH-Linsenkörper; überhöhte Darstellung eines Linsenkörpers der Rotationsoptik; Schnitt durch eine Rotationsoptik, bestehend aus zwei Linsenkörpern in zwei verschiedenen Verdrehzuständen. Die gegenüberliegenden gekrümmten Flächenschnitte ergeben jeweils die gleiche Brennweite.

### Systemintegration – Optimierung, Interfaces und Entscheidungsunterstützungssysteme

Die Gruppe „Prozessoptimierung, Informationsmanagement und Anwendungen (PIA)“ ist stark in europäische und nationale Verbundprojekte involviert. Daher werden die im Bereich „Printed materials“ der programmorientierten Förderung vertretenen Themengebiete auch im Rahmen dieser Gemeinschaftsprojekte repräsentiert und weiterentwickelt.

Die Aktivitäten zum Thema generative Fertigung wurden im Jahr 2016 durch die Anschaffung weiterer 3D-Drucker verstärkt (Abb. 71, links). Die neuen Geräte ermöglichen höchste Auflösung, die Herstellung mehrkomponentiger Bauteile sowie durch eine offene Softwarestruktur den Einsatz im wissenschaftlichen Umfeld. Die Arbeiten der Gruppe PIA umfassen dabei sowohl die Optimierung der Fertigungsprozesse im Bereich der Fused Filament Fabrication (FFF) als auch, in Zusammenarbeit mit weiteren Instituten des KIT, die

Entwicklung und Prozessierung von maßgeschneiderten Materialien, die zusätzlich die Implementierung von Funktionen (elektrische/thermische Leitfähigkeit, Flexibilität, mechanische Eigenschaften) ermöglichen. Durch den ebenfalls im Jahr 2016 erfolgten Einstieg in das Thema „3D-Scan“ (Abb. 71, rechts) sollen zukünftig Kompetenzen geschaffen werden, die ein Reverse Engineering von Produkten zur Optimierung für die additive Fertigung inklusive einer entsprechenden Topologieoptimierung ermöglichen.

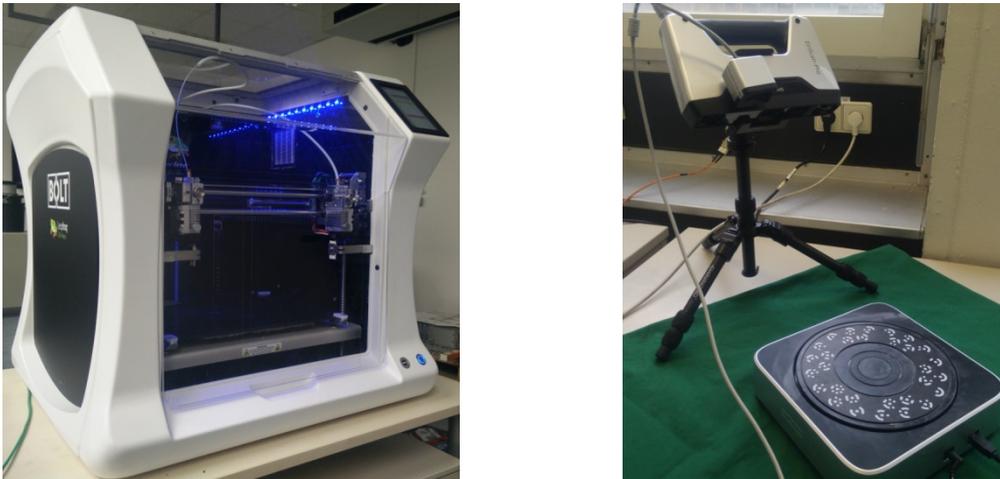


Abb. 71: 3D-Drucker und 3D-Scanner der Gruppe PIA

Im Oktober 2016 wurde das EU-Projekt HINMICO („High throughput integrated technologies for multimaterial functional Micro Components“) erfolgreich beendet. In diesem Projekt wurden flexible Prozessketten zur Herstellung hochpräziser, mehrkomponentiger Bauteile aus den Anwendungsbereichen Medizin, Kommunikationstechnik, Automotive und Unterhaltungselektronik durch eine Kombination aus Kunststoffspritzguss und zu Handlings- und Nachbearbeitungsverfahren entwickelt. Die Rolle des IAI/PIA umfasste dabei die Optimierung der Replikationsschritte durch den Einsatz von Methoden aus der statistischen Versuchsplanung. Dabei konnte für alle untersuchten Beispielbauteile ein Prozessfenster identifiziert und realisiert werden, das die Fertigung in der angestrebten Qualität (mindestens äquivalent zu teils existierenden Fertigungsprozessen) ermöglicht und gleichzeitig hilft, Produktionskosten und schädliche Umwelteinflüsse zu senken. Abb. 72 zeigt eine Übersicht der realisierten Demonstratoren, wie sie zum Ende des Projektes dargestellt werden konnten.

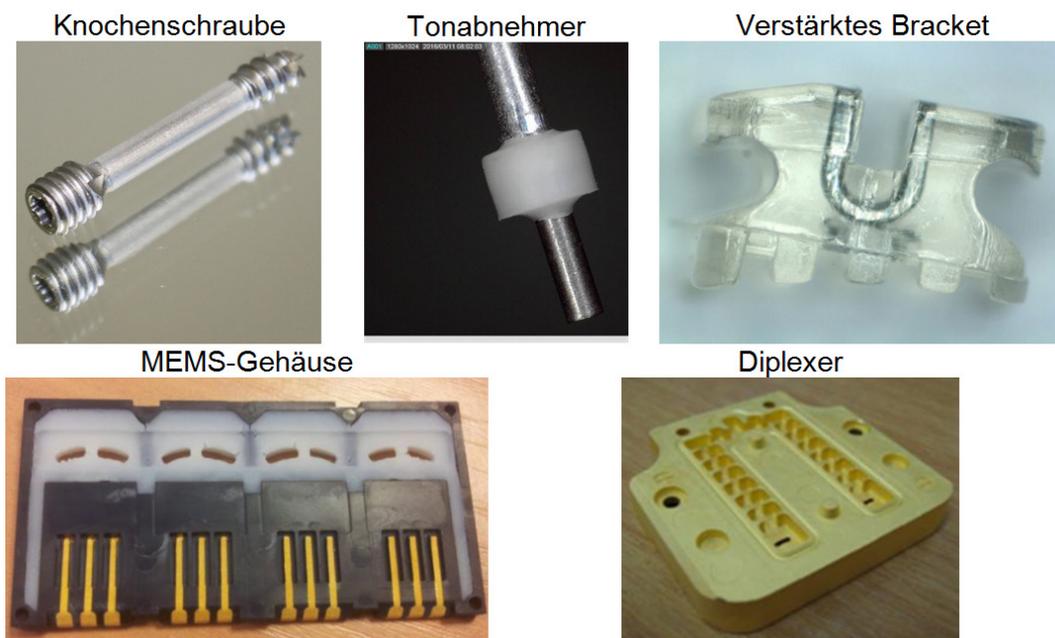


Abb. 72: Demonstratoren, hergestellt mit den in HINMICO entwickelten Prozessketten (Fotos: HINMICO-Konsortium)

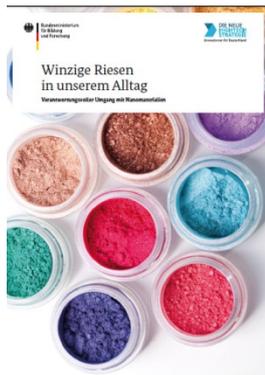


Abb. 73: BMBF-Broschüre „Winzige Riesen in unserem Alltag“

Im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt DaNa2.0 (Daten und Wissen zu Nanomaterialien) werden in einem interdisziplinären Ansatz mit Wissenschaftlern aus Humantoxikologie, Ökotoxikologie, Biologie, Physik, Chemie und Pharmazie Forschungsergebnisse zu Nanomaterialien und deren Auswirkungen auf den Menschen und die Umwelt auf der Grundlage sorgfältiger wissenschaftlicher Vorgehensweise für interessierte Laien verständlich aufbereitet. Diese können sich auf der zugehörigen Internetplattform informieren ([www.nanopartikel.info](http://www.nanopartikel.info)). Weiterhin werden die Forschungsergebnisse durch andere Medien und durch direkte Gespräche wie z.B. in Bürgerdialogen der Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

Das IAI ist dabei für die informationstechnische Aufbereitung und zusammen mit der DECHEMA auch für die Koordination der inhaltlichen Arbeiten zuständig. Im Jahr 2016 kann die DaNa-Webseite mehr als 130 Tausend Besucher und 252 Tausend Seitenaufrufe verzeichnen. Im Mai 2016 wurde die im Rahmen des Projekts erstellte BMBF-Broschüre „Winzige Riesen in unserem Alltag“ (s. Abb. 73) veröffentlicht. Sie kann über ein Online-Formular (<https://www.bmbf.de/publikationen/basket.php?CMD=add&ID=1979>) als Print-Version bestellt werden:

Im EU-Projekt DIMAP (Novel nanoparticle enhanced Digital Materials for 3D Printing and their application shown for the robotic and electronic industry, Projektstart 10/2015) ist das KIT durch das IAI und das Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffkunde (IAM-WK) vertreten, wobei das IAI für die Arbeitspakete „Application requirements“ und „Nano-Safety“ verantwortlich ist. 2016 wurde das erste Arbeitspaket erfolgreich erfüllt und die in diesem beschriebenen Anwendungsfälle (Robotik und Luminaire) in Hinblick auf die kundenspezifischen, materialtechnischen Anforderungen sowie von prozesstechnischer Seite definiert. Die entsprechende Koordination der Arbeiten erfolgte durch das IAI und bildet innerhalb des Projektes die Grundlage für alle weiterführenden Prozessschritte. Aufbauend auf den Kompetenzen im Bereich Nanomaterialsicherheitsforschung (DaNa, DaNa 2.0) werden sämtliche Arbeiten zur Sicherheitsforschung im Umgang mit nanopartikulären Druckmaterialien am IAI durchgeführt. Dazu gehörten im abgelaufenen Berichtszeitraum die Implementierung eines Berichtswesens, die Erstellung von Sicherheitsdatenblättern sowie die Erarbeitung eines Konzepts zur Quantifizierung der Partikelemissionen im Prozessablauf. Durch die Beschaffung eines Nanopartikelsammlers (s. Abb. 74) und erste Messungen in Büro- und Laborumgebungen wurden Vergleichsbedingungen festgehalten, die eine Einordnung der Messwerte im weiteren Projektverlauf ermöglichen. Zum Jahreswechsel wurden weiterhin erste Messwerte mit den am IAI vorhandenen 3D-Druckern generiert, die einen Vergleich verschiedener Drucktechnologien ermöglichen.

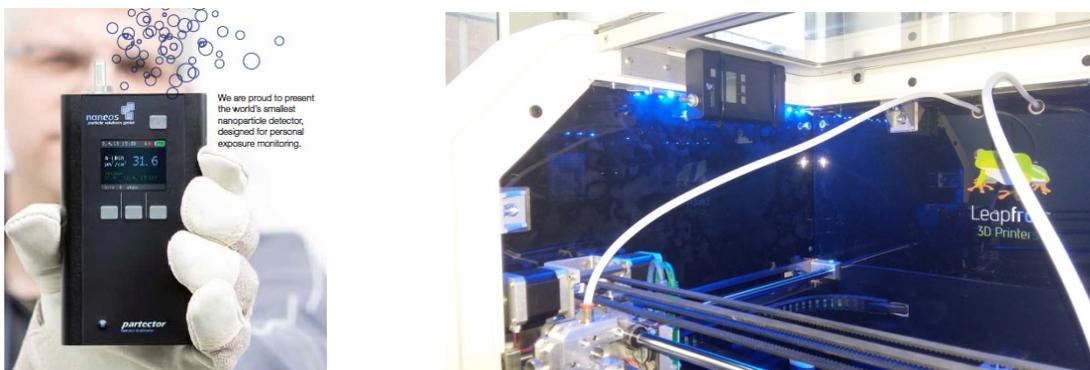


Abb. 74: Partector Nanopartikelsammler und im Einsatz bei ersten Messkampagnen im 3D-Drucklabor des IAI (Bildquellen: naneos und KIT)

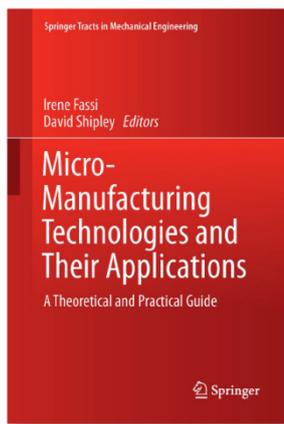


Abb. 75: Englischsprachige Version des Begleitbuches zum Projekt MIMAN-T

Einen Beitrag zum „life-long learning“ Konzept der EU hat das IAI durch die Mitarbeit in einem Projekt geleistet, das insbesondere kleinen und mittelständischen Unternehmen Methoden aus der Mikrofertigung näherbringen soll. MIMAN-T („Micromanufacturing training system for SMEs“) hat dabei eine Online-Lernplattform aufgebaut, auf der sich Interessierte durch verschiedene Präsentationen über den aktuellen Stand der Technik, zukünftige Entwicklungen und mögliche Anwendungsgebiete informieren und in einem dazugehörigen Test prüfen lassen können. Zu allen Themengebieten wurden jeweils ausführliche Texte verfasst und in Buchform (s. Abb. 75), dessen deutsche Fassung ab 2017 über den KIT-Verlag erhältlich sein wird, veröffentlicht. Das IAI war dabei für das Thema Moulded Interconnect Devices (MIDs) innerhalb des Lernprogramms sowie die Übersetzung der Buchkapitel ins Deutsche und die deutsche Version des Buches insgesamt verantwortlich

Ebenfalls zum Abschluss kam das durch das IAI koordinierte EU-Projekt SMARTLAM („Smart Manufacturing of Microsystems based on laminated polymer films“). Die vor Ort am KIT stattfindende Abschlussveranstaltung inklusive Präsentation der innerhalb von SMARTLAM entwickelten Prozesskette zur Herstellung dreidimensionaler, funktionaler Bauteile durch Laminations-, Laser- und Drucktechnologien konnte den Vertretern der EU sowie interessierten Kollegen einen Eindruck der Technologie vermitteln. In Abb. 76 sind die einzelnen Module abgebildet, die während der Projektlaufzeit entwickelt wurden. Neben der Koordination war das IAI wesentlich an der Auslegung der Einzelmodule und des Steuerungssystems sowie der Entwicklung einer Datenbank und Kontrollsoftware für die Prozesskette beteiligt.



Abb. 76: Einzelmodule in der SMARTLAM Prozesskette (Fotos: KIT)

### Systemintegration – System-, Prozess- und Geräteentwicklung

In Topic 2.4 „Gedruckte Materialien und Systeme“ wurde die Hard- und Software-Infrastruktur für die Systemintegration weiterentwickelt. Die Tintenzuführung zum Piezo-Druckkopf wurde überarbeitet und damit eine deutliche Verbesserung des Druckprozesses erzielt. Weiterhin wurde auf der Namose-Plattform eine geregelte Substratheizung integriert, die ebenfalls zu einer deutlichen Verbesserung der Druckqualität führte. Die MIMOSE-Plattform wurde zur Bestückung von gedruckten Substraten mit SMD-Bausteinen (Surface-Mount Device) mit einer Kamera zur Referenzierung, einem Dispenser für Leitkleber und einem Sauggreifer zur Manipulation der SMD-Bausteine ausgerüstet. Weiterhin wurden ein durchgängiger, automatisierter

Workflow etabliert und die zugehörigen Softwarewerkzeuge entwickelt, um ausgehend vom CAD-Design Daten für das Drucksystem zum Druck der Leiterbahnen, zur Inspektion der gedruckten Leiterbahnen mittels Bildverarbeitung (siehe auch Absatz „Systemintegration – Optische Inspektion und digitale Bildverarbeitung“), zur Dosierung von Leitkleber sowie zur Bestückung des Substrats mit SMD-Bauteilen abzuleiten (s. Abb. 77).

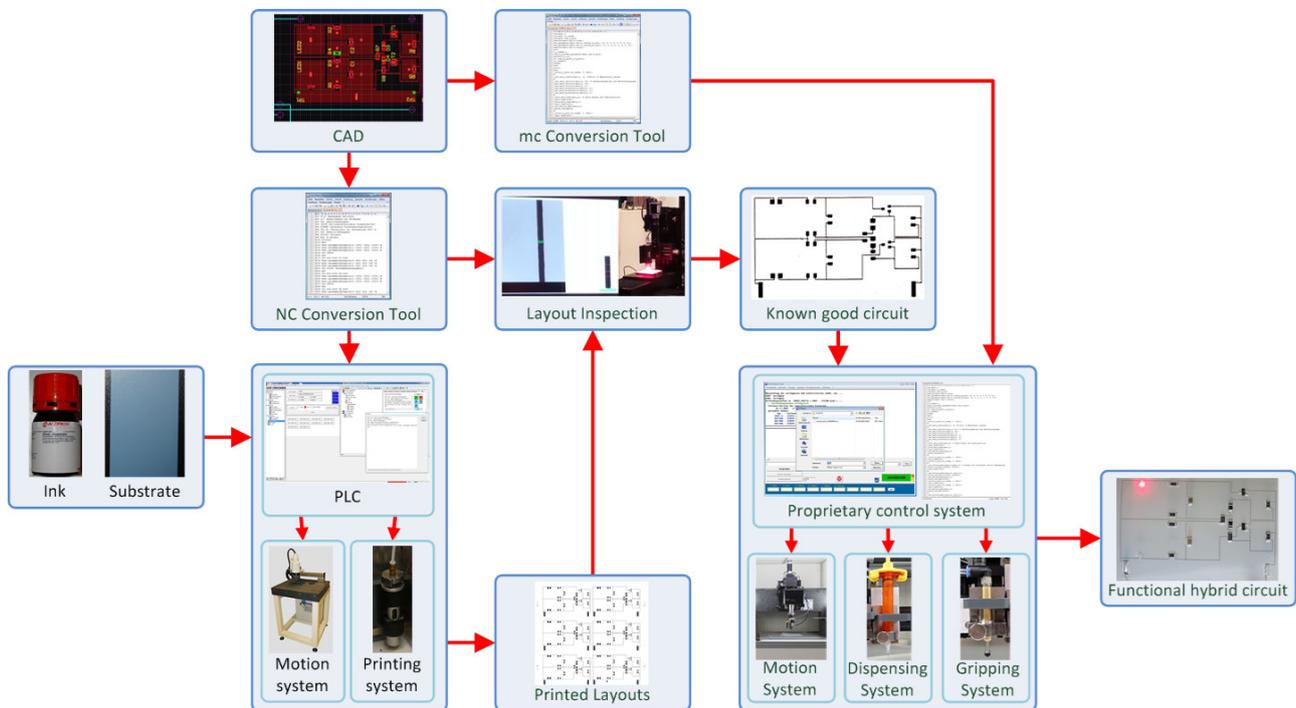


Abb. 77: Software-Workflow zur Erzeugung hybrider gedruckter elektronischer Systeme

Ferner wurde das Extrusionsdruckverfahren weiterentwickelt und in einen modularen Achsaufbau integriert (s. Abb. 78). Damit wurden für das NMR-Projekt des IMT mit einer hochviskosen Silberleitpaste erste Spulen mit unterschiedlichen Geometrien auf Glaskapillaren gedruckt (s. Abb. 79). Für beide Verfahren wurden anhand von Teststrukturen umfangreiche Testreihen, zur Bestimmung günstiger Druckparameter auf beiden Substrattypen und zur Bestimmung ihres Einflusses auf Leiterbahngeometrie und –widerstand durchgeführt. Weiterhin wurden gemeinsam mit dem IAM-WBM Untersuchungen zur Bestimmung der maximal erzielbaren Dehnung gedruckter Leiterbahnen auf Folien substraten durchgeführt.

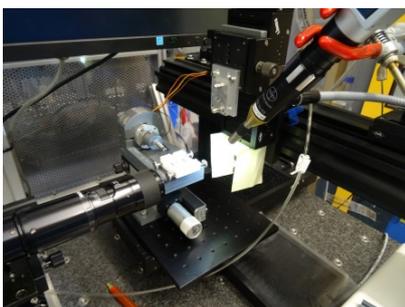


Abb. 78: Versuchsaufbau zum Extrusionsdruck der Spulen

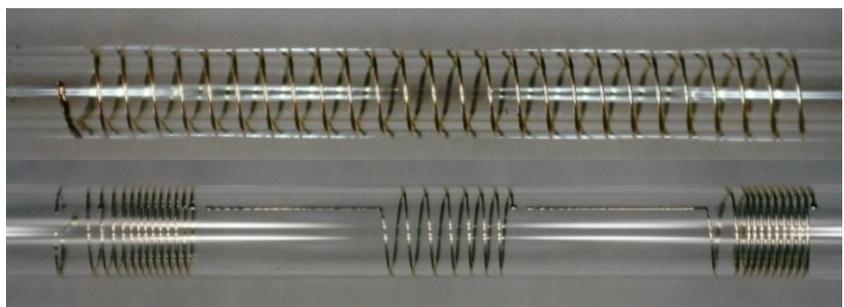


Abb. 79: Erste gedruckte Spulen auf Glaskapillaren

Das im Vorjahr entwickelte Konzept einer gedruckten Testschaltung zur Demonstration der Intralayer-Integration wurde in einer ersten Stufe umgesetzt. Auf PET-Substrat mit und ohne nanoporöser Beschichtung wurden die Leiterbahnen mit Silbernanopartikeltinte gedruckt und thermisch gesintert. Es zeigte sich, dass auf den PET-Substraten mit nanoporöser Beschichtung deutlich schmalere Leiterbahnen (ca. 105 µm) mit besserer Kantenqualität als auf dem PET-Substrat ohne nanoporöse Beschichtung möglich waren. Diese Substrate wurden automatisch mit SMD-Bausteinen bestückt. Abb. 80 zeigt die Testschaltung auf einem nanoporösen Substrat mit gedruckten Silberleiterbahnen und bestückten SMD-Bausteinen in Funktion. In

Abb. 80 ist auch zu erkennen, dass sich das Foliensubstrat deutlich wölbt; dies ist eine Folge des thermischen Sinterprozesses. Diese Wölbung führte zum Versagen der Leitkleber-Verbindungen. Um dies zu vermeiden, wurde eine zusätzliche mechanische Fixierung der SMD-Bauteile mittels eines manuell dosierten Underfill-Klebers eingeführt und so die Leitkleberverbindung entlastet.

Es ist das Ziel, die Testschaltung weitgehend aus gedruckten Bauteilen aufzubauen. Dazu werden am IAI neben den Leiterbahnen die Widerstände mittels einer kommerziellen Widerstandstinte gedruckt werden. Das Institut für Angewandte Materialien - Keramische Werkstoffe und Technologien (IAM-KWT) wird auf dieses Substrat Kondensatoren mit einer selbstentwickelten Barium-Strontium-Titanat-Tinte für das Dielektrikum drucken; das Institut für Nanotechnologie (INT) wird abschließend Feldeffekttransistoren mit einer selbstentwickelten Indiumoxid-Tinte für das Gate drucken. Da sich diese gedruckten Bauteile bezüglich ihrer Charakteristika erheblich von den bisher eingesetzten SMD-Bauteilen unterscheiden, wurde die Schaltung entsprechend angepasst und ein Spice-Simulationsmodell zur Schaltungssimulation und –auslegung entwickelt. Aus diesen Simulationen ergab sich, dass sich mit diesen Bauteileigenschaften eher eine höhere Frequenz der bistabilen Kippstufe realisieren lässt und somit eine optische Ausgabe über LEDs nicht mehr sinnvoll ist. Daher wurde die Schaltung im Hinblick auf die Ansteuerung eines Piezosummers optimiert (s. Abb. 81).

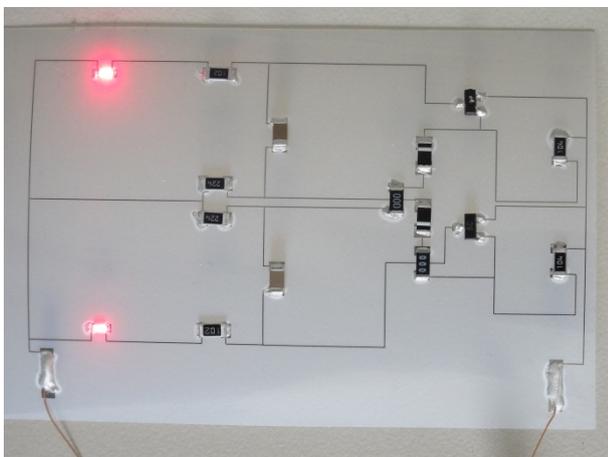


Abb. 80: Gedruckte und mit SMD-Bauteilen bestückte Testschaltung

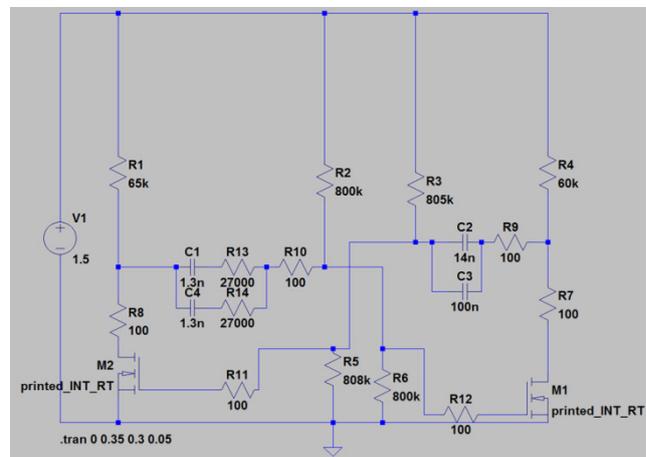


Abb. 81: Aufgedruckte Bauteile optimierte Schaltung

Zur Interlayer-Integration, d.h. zum Verbinden von Folienlagen wurden erste Untersuchungen zu thermischem Bonden und Bonden mit Fügehilfsmitteln durchgeführt. Mit der in den Vorjahren im Rahmen des EU-Projektes SmartLAM entwickelten Laserschweißanlage wurden gemeinsam mit IAM-AWP Versuche zum Verschweißen von Folien durchgeführt. Um die Absorption des Laserstrahls in der Fügezone zwischen den beiden transparenten Folienlagen sicherzustellen, ist eine absorbierende Schicht notwendig. Dazu wurden verschiedene Verfahren untersucht, den Infrarotabsorber Clearweld™ in einer dünnen homogenen Schicht aufzutragen, und mit diesen Proben die Laserschweißparameter variiert.

Im Rahmen der HEiKA-Kooperation mit der Arbeitsgruppe von Prof. Rasmus Schröder (BioQuant/CAM, Universität Heidelberg) zur Automatisierung der Probenhandhabung für die Correlative Array Tomography wurde die Prozessanalyse abgeschlossen und umfangreiche Lösungskataloge für die Automatisierung der einzelnen Prozessschritte erstellt. Eine ausgewählte Lösung wurde als Laboraufbau realisiert. Damit wurde in ersten Versuchen nachgewiesen, dass sich mehrere Schnittbänder von wenigen 10 nm Dicke reproduzierbar auf einem Substrat ablegen lassen.

Ein wesentlicher Faktor für die Rekonstruktion von 3D-Modellen aus Ultramikrotomschnitten ist eine konstante oder zumindest bekannte Schnittdicke. Bei den Untersuchungen zeigte sich jedoch, dass die am Mikrotom eingestellte Schnittdicke während des Schnittprozesses erheblich variiert. Um die tatsächliche Schnittdicke von auf dem Substrat abgelegten Schnitten zu bestimmen, wurde ein Bildverarbeitungssystem aufgebaut, das die Schnittdicke anhand der Interferenzfarben dünner Schichten bestimmt. Zur Untersuchung der geräteinternen Einflussfaktoren auf die Schnittdicke wurde das IAI von der Firma Boeckeler, USA, mit einer Studie beauftragt.

Die Anwendung der Ultramikrotomie auf die oben beschriebenen gedruckten Strukturen führte zu interessanten Erkenntnissen. Die beiden unterschiedlichen PET-Substrate mit Silber-Leiterbahnen wurden in einen Probenblock eingegossen, mit dem Ultramikrotom geschnitten und in Heidelberg am Rasterelektronenmikroskop untersucht. An der Faltenbildung in den Schnitten (Abb. 82) zeigte sich zunächst, dass die Steifigkeit des Einbettmediums besser an die Steifigkeit des PET-Substrats angepasst werden muss. Dennoch konnten an einzelnen Stellen der Schnitte interessante Einblicke in den Aufbau des Substrats und über das Interface zwischen Silbernanopartikelntinte und Substrat gewonnen werden. So zeigte sich z.B., dass bei dem nanoporösen Substrat die Dicke der nanoporösen Schicht 35  $\mu\text{m}$  (Gesamtdicke des Substrats 135  $\mu\text{m}$ ) beträgt und somit mit großer Wahrscheinlichkeit die Hauptursache für die Wölbung des Substrats nach dem thermischen Sintern ist. Weiterhin ist in Abb. 83 zu erkennen, dass die Silber-Nanopartikel nur geringfügig in die nanoporöse Schicht eindringen und auf ihrer Oberfläche eine zusammenhängende poröse Leiterbahnstruktur ergeben. Außerdem lässt sich in Detailaufnahmen auch die Ausbildung von Sinterhälsen zwischen einzelnen Partikeln und das Kornwachstum feststellen.

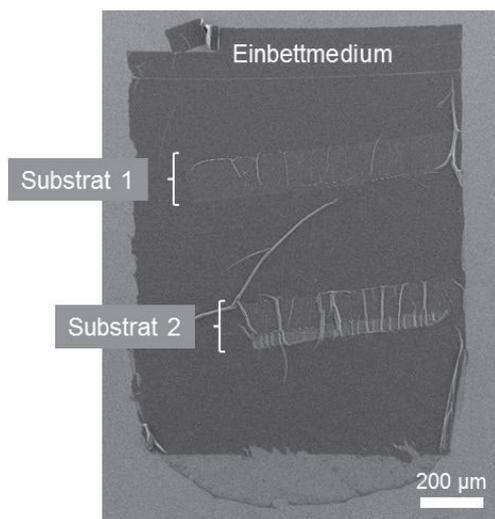


Abb. 82: Ultramikrotomschnitt mit zwei eingebetteten Substraten

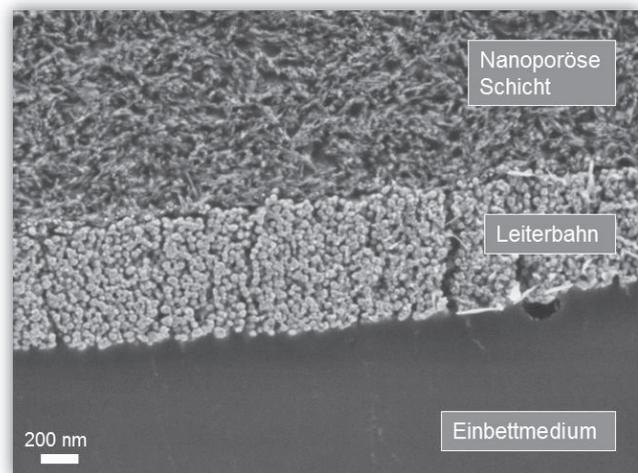


Abb. 83: Elektronenmikroskopische Aufnahme der Leiterbahn auf der nanoporösen Substratbeschichtung

Die Montage großflächiger Röntgengitter mittels kachelförmig angeordneter Einzelkacheln ist eine Teilaufgabe im Bereich „X-Ray Optics“ (Topic 3.2 in „Optics&Photonics“). Die Aufbau- und Verbindungstechnik zur Herstellung dieser Systeme basiert auf großflächigem Kapillarkleben. Im Jahr 2016 wurde dieses Verfahren, das auf der 2015 am IMT in Betrieb genommenen Röntgengitter-Montageplattform zum Einsatz kommt, auch für andere Einsatzzwecke etabliert. Es wurde in Zusammenarbeit mit dem IMT/KNMF (Karlsruhe Nano Micro Facility) eine Prozesskette zum Aufbau von Mastern für die Galvanoformung zur Herstellung von Formeinsätzen für die Replikation erarbeitet. Basierend hierauf sind unterschiedliche Systeme aufgebaut und anschließend am IMT galvanisiert worden, z.B. Glaslinsenarraymaster und Glasmaster mit zweiphotonenlithographisch hergestellten Mikronadeln. Für die in Größe und Stabilität unterschiedlichen Ausgangssubstrate wird jeweils der Prozess angepasst. Abb. 84 zeigt die Kupfergrundplatte mit dem kapillargeklebten dünnen Glassubstrat. Zur mechanischen Unterstützung des Substrats mit der Dicke von 0,7mm wird zusätzlich ein Strukturkleber mit geringem Schrumpf eingebracht (helle Punkte unter dem Glas). Ziel des Klebprozesses ist die sichere Abdichtung des Spalts zwischen Substrat und Kupferblock. Die Spaltfüllung muss homogen und möglichst flächengleich sein (s. Abb. 85). In weiteren Arbeiten wurde die 2015 erstellte Steuerungssoftware für die Gittermontageplattform angepasst und im Hinblick auf einen zukünftigen automatisierten Betrieb erweitert.



Abb. 84: Kupfergrundplatte mit kapillargeklebtem Glasmaster (25x25 mm<sup>2</sup>) zur Formeinsatzherstellung durch Galvanoformung

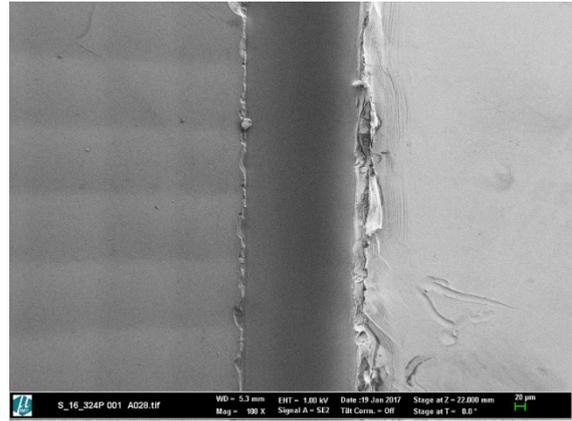


Abb. 85: Kapillarklebespalt zwischen Glaslinsenarraymaster (links) und Kupfergrundplatte (rechts) (Quelle: IMT/KIT)

Die Arbeiten zur Realisierung der Prozesskette zur Herstellung Photonischer Wirebonds in Stückzahlen (Topic 3.2 „Teratronics“ in Optics&Photonics) wurden weitergeführt. Das am IMT in diesem Topic angelegte BMBF-Projekt Phoibos wurde erfolgreich abgeschlossen. Die Transmission der am IMT automatisch hergestellten und am IAI überschichteten Photonischen Wirebonds konnte weiter verbessert werden. Die lokalisierte, sauber abgegrenzte Überschichtung von Wirebonds erweitert die Möglichkeiten zum Einsatz der Technologie bei On-Chip-Anwendungen (s. Abb. 86). Abb. 87 zeigt eine lichtmikroskopische Aufnahme des überschichteten Substrats. Durch die klare Abgrenzung des hochpräzise dosierten Fluids kann sichergestellt werden, dass angrenzende Strukturen in ihrer Funktion nicht beeinträchtigt werden. Im Jahr 2016 wurde begonnen, diese zurzeit manuell gesteuerten Prozesse auf eine neu zu konzipierende, umrüstbare Montageplattform zu transferieren. Zukünftig sollen diese Vorgänge vollautomatisiert abgearbeitet werden. Auf dieser neuen Plattform sollen neben den Projekten im Bereich Teratronics auch angrenzende, verwandte Applikationen aus dem Bereich biophotonische Sensoren automatisiert bearbeitet werden. Des Weiteren ist geplant, die Aufbautechniken aus dem Bereich X-Ray ebenfalls auf diesem System zu etablieren.

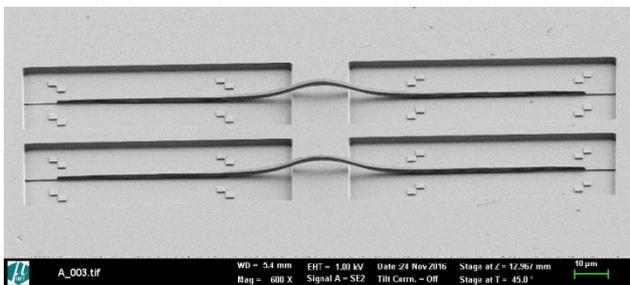


Abb. 86: On-Chip-Anwendung Photonischer Wirebonds zur Verbindung zweier optischer Wellenleiter (Quelle: IPQ/KIT)



Abb. 87: Lokal überschichtete Photonische Wirebonds

Im ZIM-KF-Projekt Optimat wird ein Konzept eines Gesamtsystems erarbeitet, das es erlauben soll, Metallpulver für das Additive Manufacturing Verfahren Selective Laser Melting (SLM) hinsichtlich der Größenklassenverteilung aufzubereiten. Es werden zwei mögliche Verfahrensvarianten näher untersucht. Vom Industriepartner wird ein kleiner Sichter (Chargengröße ca. 10 kg) für den Partikelfraktionsbereich 10-25 µm entwickelt. Von Seiten IAI wurden diese Arbeiten hinsichtlich benötigter Sensorik und Steuerungstechnik unterstützt. Ein alternativer Prozess ist Sieben, das jedoch für Metallpartikel nur bis zu Partikelgrößen  $\geq 25 \mu\text{m}$  etabliert ist. Neuere Entwicklungen von Filtergeweben für Raumfahrtanwendungen erlauben die Herstellung von Maschenweiten bis zu  $< 10 \mu\text{m}$ . Mit einer Ultraschallanregung bieten diese neuen Siebmaterialien das Potential für die Fraktionierung von Metallpulver eingesetzt zu werden. Zur Durchführung von Versuchen wurde von IAI für Versuche Anfang 2017 ein Konzept für einen Versuchsaufbau ausgearbeitet und Siebrahmen mit verschiedenen Maschenweiten beschafft.

Das vom BMWi geförderte ZIM-KF-Projekt „Selbstlernende Supportsysteme“ (SELESUP) wurde fristgerecht beendet. Das Gesamtprojekt wurde bereits am Anfang des Jahres äußerst positiv begutachtet. Unmittelbar im Anschluss konnte mit dem genehmigten neuen ZIM-Projekt APOSTL (Accessible Performant Ontology Supported Text Learning) gestartet werden. Im Rahmen des KIT-Teilprojektes BISHOP (Big Data Self Learning High Performance Ontology Population) wurden entsprechende Konzepte erarbeitet, wie anhand unstrukturierter Massendaten über Textextraktion Begriffe gelernt werden können. Sowohl die Abschlussarbeiten in SELESUP als auch erste Ansätze im neuen Projekt APOSTL wurden auf nationalen und internationalen Tagungen präsentiert.

### Systemintegration – Optische Inspektion und digitale Bildverarbeitung

Zur automatischen Analyse von gedruckten Leiterbahnen wurde das DIPLOM-Bildverarbeitungssystem (Digital Image Processing Library for Microstructures) erweitert. Zur Bildaufnahme wird ein rechnergesteuertes Mikroskop verwendet und es wird zunächst von der gedruckten Probe ein Mosaikbild aufgenommen. Das neuentwickelte DIPLOM-Modul erkennt in diesem Mosaikbild automatisch die Leiterbahnen und berechnet die jeweils mittlere Stegbreite der einzelnen Leiterbahnen (s. Abb. 88); zusätzlich werden noch für jede Bahn die minimale bzw. maximale Breite und die Standardabweichung ermittelt. Dieser automatisierte Prozess ermöglicht es, umfangreiche Testkampagnen zu analysieren und fundierte statistische Auswertungen zu erstellen.

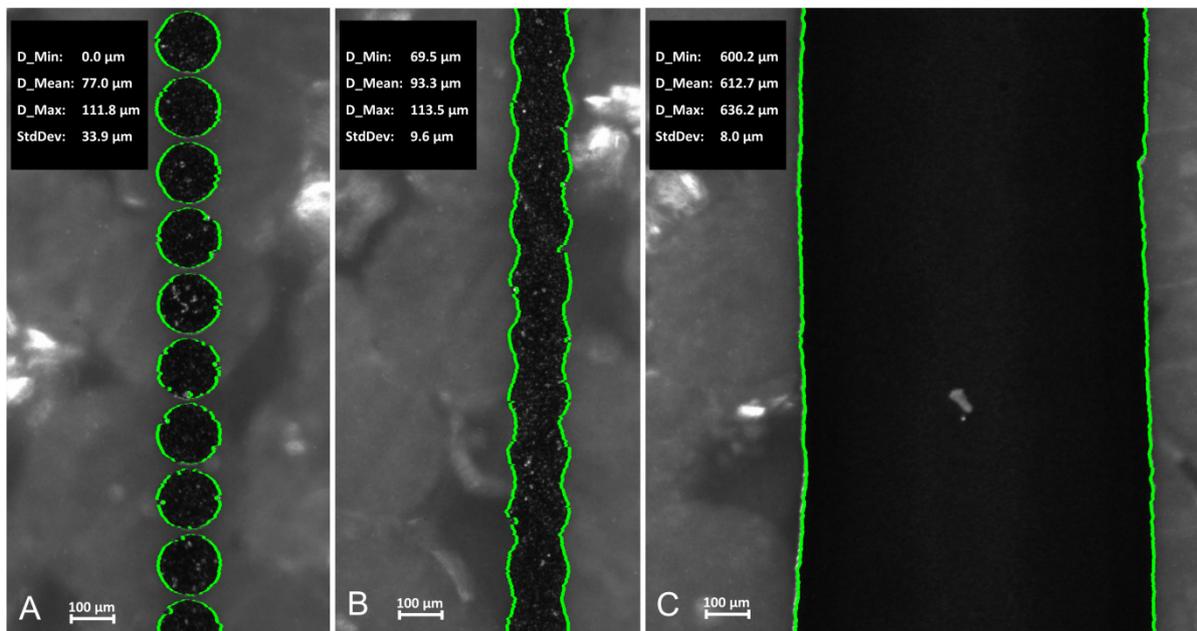


Abb. 88: Automatische Bestimmung der Stegbreiten von gedruckten Leiterbahnen; auch unterbrochene Leiterbahnen werden zuverlässig erkannt (s. Bildausschnitt A)

Zur Prüfung der Planarität von Folien-Substraten für gedruckte Systeme wird ein deflektometrisches Prüfverfahren entwickelt. Basierend auf durchgeführten Vorversuchen wurden zunächst geeignete Hardwarekomponenten (Monitor, Kameras, Objektive) ausgewählt und es wurde ein erster Prüfstand zur Erfassung von Folienoberflächen bis zu einer Größe von 150 x 150 mm<sup>2</sup> aufgebaut (s. Abb. 89).

Da die eigentliche deflektometrische Messung auf der geometrischen Rekonstruktion des Strahlengangs (Mustergenerator → Prüfobjekt → Kamera) beruht, ist zuvor eine Kalibrierung des Messaufbaus erforderlich. Das Ziel der Kalibrierung besteht in der Bestimmung der geometrischen Anordnung (Position und Ausrichtung) der Kamera relativ zum Mustergenerator (d.h. der extrinsischen Parameter), sowie der Abbildungseigenschaften des Bilderfassungssystems (d.h. der intrinsischen Parameter).

Statt einer Kamerakalibrierung und einer separaten Kalibrierung der geometrischen Parameter wird ein holistischer Ansatz verfolgt, in dem alle unbekannt Parameter gemeinsam in einem einzigen Prozess mit einem modifizierten Bündelausgleichsverfahren bestimmt werden. Dazu werden deflektometrische Messungen mit einem planen Oberflächenspiegel durchgeführt, dessen Neigung für jede Messung leicht variiert wird

(s. Abb. 90). Durch Spiegelung der Kamera an den verwendeten Spiegelebenen entstehen mehrere unterschiedliche virtuelle Kamerapositionen  $K'_1, K'_2, K'_3$ , die alle auf den feststehenden Mustergenerator gerichtet sind. Die Zuordnungen der einzelnen Kamerapixel zu den jeweils entsprechenden Bildschirmpunkten sind durch die deflektometrische Registrierung bekannt. Durch Minimierung des summierten Projektionsfehlers (mittels nichtlinearer Optimierungsverfahren, z.B. Levenberg-Marquardt) lassen sich somit die (gemeinsamen) intrinsischen sowie die (jeweils unterschiedlichen) extrinsischen Parameter der virtuellen Kameras berechnen. Die Spiegelbilder der virtuellen Kameras, genauer ihrer extrinsischen Parameter, an den (unbekannten) Spiegelebenen  $S'_1, S'_2, S'_3$  müssen alle auf die fixierte reale Kameraposition  $K$  treffen (s. Abb. 90). Durch Minimierung der paarweisen Abweichungen dieser Spiegelbilder lassen sich die Spiegelebenen und schließlich die gesuchte Position und Ausrichtung der Kamera  $K$  bestimmen. Das beschriebene Kalibrierungsverfahren wurde in Matlab implementiert und mit ersten Messungen getestet; weitere Untersuchungen zur Genauigkeit und Robustheit stehen noch aus.

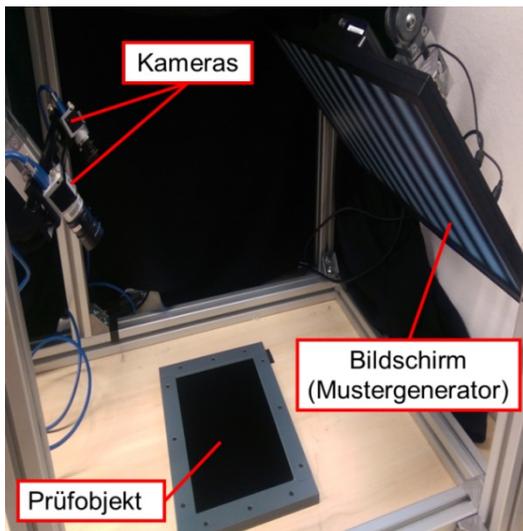


Abb. 89: Deflektometrie-Teststand zur Prüfung der Planarität von Folien; zur Kalibrierung wird das Prüfobjekt ersetzt durch einen planen Oberflächenspiegel

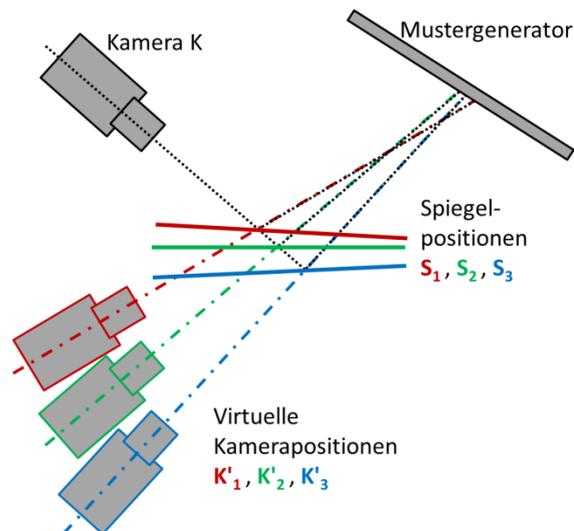


Abb. 90: Kalibrierung des Deflektometrie-Teststands mit einem planen Oberflächenspiegel; durch Veränderung der Spiegelposition werden die entsprechenden virtuellen Kamerapositionen erzeugt.

Im Rahmen des Förderprojektes EyeGuidance (Ideenwettbewerb Biotechnologie und Medizintechnik Baden-Württemberg, AZ 33-7533-7-11.6-9/3/1, Laufzeit: 2012 – 2015) wurde ein rechnergesteuertes Mosaikbildverfahren zur großflächigen Abbildung der Nervenfasern in der menschlichen Augenhornhaut entwickelt, für das auch Schutzrechtsansprüche angemeldet wurden (DE102010021346A1). Die Bildaufnahme erfolgt dabei mit einem konfokalen Laser-Scan-Mikroskop. Zur Erstellung eines Mosaikbildes wird eine Bildserie aufgenommen und dabei wird die Bewegung des untersuchten Auges über eine rechnergesteuerte Fixationsmarke vor dem nicht untersuchten Auge geführt. Im Rahmen des Projektes EyeGuidance konnte gezeigt werden, dass mit diesem Verfahren großflächige Aufnahmen von der Augenhornhaut in vivo erzeugt werden können. Das Verfahren ist gekennzeichnet durch kurze Aufnahmezeiten und durch einen hohen Automatisierungsgrad.

Aufgrund der erfolgversprechenden Ergebnisse des Förderprojektes wurden die nachfolgenden Arbeiten zur Weiterentwicklung des EyeGuidance-Systems durch einen Industrieauftrag von der Heidelberg Engineering GmbH finanziert. Gestützt auf die Ergebnisse einer Simulation mit ZEMAX (V 13) besteht der optische Aufbau des EyeGuidance-Systems aus vier konvexen Linsen (s. Abb. 91, Ausschnitt A). Zur Korrektur einer Fehlsichtigkeit kann die Position der Linse  $L_3$  mit einer Schlittenführung entsprechend eingestellt werden; der Einstellbereich ermöglicht eine Korrektur von  $\pm 10$  dpt. Als Display zum Anzeigen der Fixationsmarke wird ein Smartphone (Displaygröße: 4,5"; Auflösung: 1280 x 720 Pixel) verwendet. Damit das EyeGuidance-System auf die Pupillenmitte des nicht untersuchten Auges exakt ausgerichtet werden kann, ist zusätzlich eine Kamera integriert. Mit der Kamera kann der Bediener über die EyeGuidance-Optik die korrekte Ausrichtung kontrollieren (s. Abb. 91, Ausschnitt B). Damit das Display-Smartphone nicht die Sicht auf das Auge verdeckt, wird das in einer drehbaren Halterung gelagerte Display bei aktiver Kamera aus dem optischen Strahlengang heraus geschwenkt. Nach der Ausrichtung des EyeGuidance-Systems auf die Pupillenmitte

wird das Display wieder in den Strahlengang zurückgedreht (s. Abb. 91, Ausschnitt C) und die Fixationsmarke wird im Bildschirmzentrum eingeblendet.

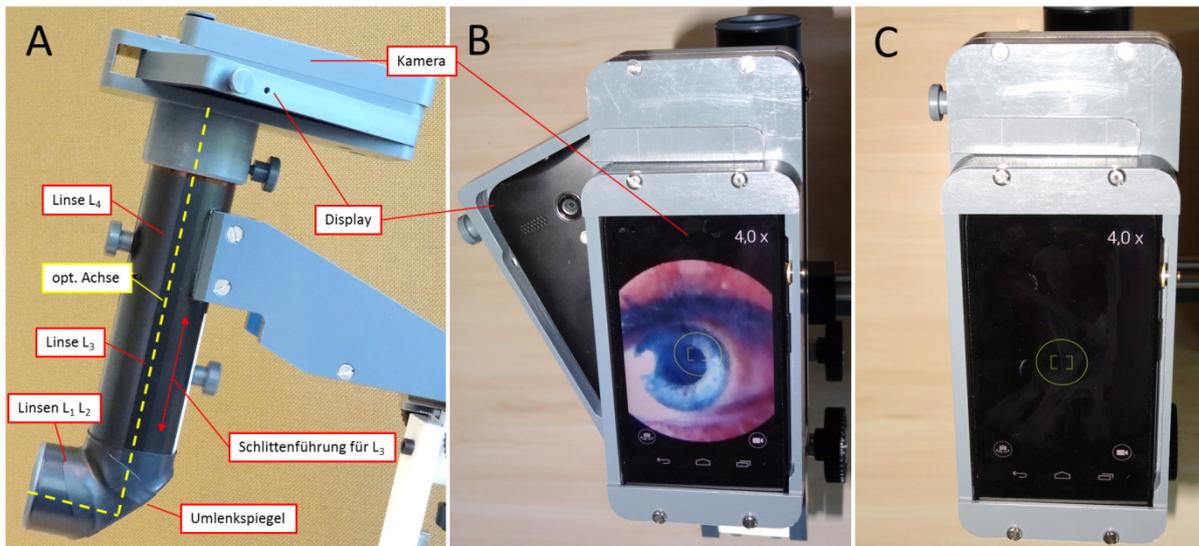


Abb. 91: EyeGuidance-System (A: optischer Aufbau; B: Kamera aktiv; C: Display aktiv)

Nach der Einrichtung des Laser-Scan-Mikroskops auf die Nervenfaserebene der Augenhornhaut wird die Aufnahme einer Bildserie gestartet. Ausgehend von der zentralen Startposition bewegt sich dann die Fixationsmarke auf einer Spiralbahn nach außen. Durch das Verfolgen der Fixationsmarke mit dem nicht untersuchten Auge bewegt sich das untersuchte Auge vor dem Mikroskop – aufgrund der beim Menschen synchronen Augenbewegung – auch auf einer entsprechenden Spiralbahn. Die Spiralbahnparameter (Geschwindigkeit, Windungsabstand) werden so gewählt, dass die Einzelbilder der Serie eine ausreichende Überdeckung mit den Nachbarbildern aufweisen. Nach der Aufnahme wird aus der abgespeicherten Bildserie ein Mosaikbild mit erweitertem Bildfeld berechnet. Eine besondere Herausforderung sind dabei die unvermeidbaren Augenbewegungen, die zu unterschiedlichen Bildverzerrungen führen. Zur Erzeugung eines Mosaikbildes mit hoher Qualität müssen diese bewegungsinduzierten Verzerrungen für jedes einzelne Bild der Serie präzise korrigiert werden.

Das neue EyeGuidance-System wird derzeit auch in einer klinischen Studie eingesetzt. Mit der von der Heidelberg Engineering GmbH finanzierten Studie soll gezeigt werden, dass das Verfahren zur frühzeitigen Erkennung von Nervenschädigungen bei Diabetespatienten geeignet ist.

# Programm SBD: Supercomputing & Big Data

## Data Life Cycle Labs

### Datenmanagement in der Energieinformatik

Das Data Life Cycle Lab (DLCL) Energy entwickelt Lösungen für das Datenmanagement im Energiebereich und kooperiert dabei mit dem Smart Energy System Simulation and Control Center (SEnSSiCC) des Energy Lab 2.0, mit der Helmholtz-Initiative ES 2050 und dem Forschungsprogramm SCI.

Im Rahmen der Entwicklung Generischer Datenservices (GDS) wurden verschiedene Datenbanken bzw. Speichersysteme für die Zeitreihenspeicherung untersucht, u.a. Cassandra, InfluxDB und OpenTSDB. Die beiden letzteren Produkte werden bereits eingesetzt, OpenTSDB im Rahmen der Entwicklung eines Microservice für Zeitreihenspeicherung und InfluxDB für Tests zur Speicherung von Smart-Meter-Daten des KIT (Pseudodaten).

Die im Jahr 2015 evaluierte bzw. konzipierte Toolfamilie für die Entwicklung einer semantischen Metadaten-schicht für GDS auf der Basis des Common Information Model (CIM) und für die Transformation zwischen verschiedenen Formaten ist nahezu vollständig prototypisch implementiert. Zur Verdeutlichung zeigt Abb. 92 noch einmal die Tools und die beteiligten Formate. Das Werkzeug Cimphony wurde beschafft und wird derzeit in verschiedenen Arbeitsgruppen, die sich mit semantischer Modellierung befassen, in Betrieb genommen. Die Konvertierung von UML-Daten aus Enterprise Architect erfolgt in RDF-Schemadaten (Resource Description Framework) und beschreibt die Ontologie des Stromnetzes. Anhand von Beispieldaten wurden Instanzenmodelle in RDF erstellt. Wie auch die Schemadaten, werden sie in einem Triplestore - Apache Jena TDB - gespeichert.

Die RDF-Schemadaten sind äquivalent zum CIM-Klassenmodell und die RDF-Instanzdaten zu einem Objektmodell. Damit lassen sich auch Java-Klassen bilden, die innerhalb des GDS als strukturierte Metadaten (SMD, Klassendiagramm s. Abb. 93) beschrieben werden. Für die Definition von SMD für beliebige Klassen, insbesondere für Nutzdatenobjekte, wurden ein Tool sowie des Weiteren ein Generator für Java-Code entwickelt.

Die Gesamtkonzeption eines auf semantischen Technologien beruhenden Datenmanagements ist Gegenstand der Forschungsarbeiten in der Helmholtz-Initiative ES 2050 und wird dort näher dargelegt.

Das IAI arbeitet im DLCL Energy in enger Kooperation zusammen mit dem Institut für Angewandte Informatik und Formale Beschreibungsverfahren (AIFB), welches den Schwerpunkt auf die Entwicklung von Workflows im Datenmanagement setzt. Beide Institute zusammen kooperieren mit dem Cluster Datenmanagement im Rahmen des Forschungsprogramms SCI.

Eine aus dem SCI-Cluster hervorgegangene Zusammenarbeit des DLCL Energy mit dem Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme (IRS) entwirft im Rahmen einer gemeinsam betreuten Diplomarbeit ein Datenhaltungssystem für multimodale Energiedaten, um Daten aus dem Energieprojekt RegEnKibo und weiterer IRS-Projekte zu verwalten. Dabei kommen Konzepte der Generischen Datenservices zum Einsatz.

Der geplante Umbau des Stromsystems hin zur Integration erneuerbarer Energien und zu einem sogenannten Smart Grid bringt eine Vielzahl von neuen bzw. veränderten Planungs- und Optimierungsaufgaben mit sich. Im Rahmen des Energy Labs 2.0 und des ES 2050 sollen hierzu exemplarische Szenarien durchgespielt werden. Dazu wurde eine Anforderungsanalyse für die geplante Optimierungs- und Planungstoolbox erstellt, wobei eine Konzentration auf die Aufgabenbereiche Kraftwerkseinsatzplanung, Wartungsplanung, Planung neuer Kraftwerke und Erzeuger sowie neuer Speicher und schließlich Planung des Netzausbaus vorgenommen wurde.

Die ersten beiden Aufgaben werden sinnvollerweise zusammen betrachtet und stellen eine komplexe Schedulingaufgabe dar. Ausgehend von einer prognostizierten Last sind diejenigen Erzeuger samt einer zeitlichen und mengenmäßigen Einspeisungsvorgabe zu bestimmen, die zur Abdeckung der Last benötigt werden, dabei möglichst kostengünstig sind und einen stabilen Netzbetrieb gewährleisten. Die verbleibenden beiden Aufgaben können auf ein Scheduling zurückgeführt werden, das auf zu erwartenden Lastszenarien basiert und die Zuschaltung noch nicht realisierter Komponenten erlaubt. Außerdem wurde ein erstes

Konzept zur Integration evolutionärer, memetischer und weiterer Optimierungsalgorithmen in eine geplante Co-Simulationsplattform entwickelt.

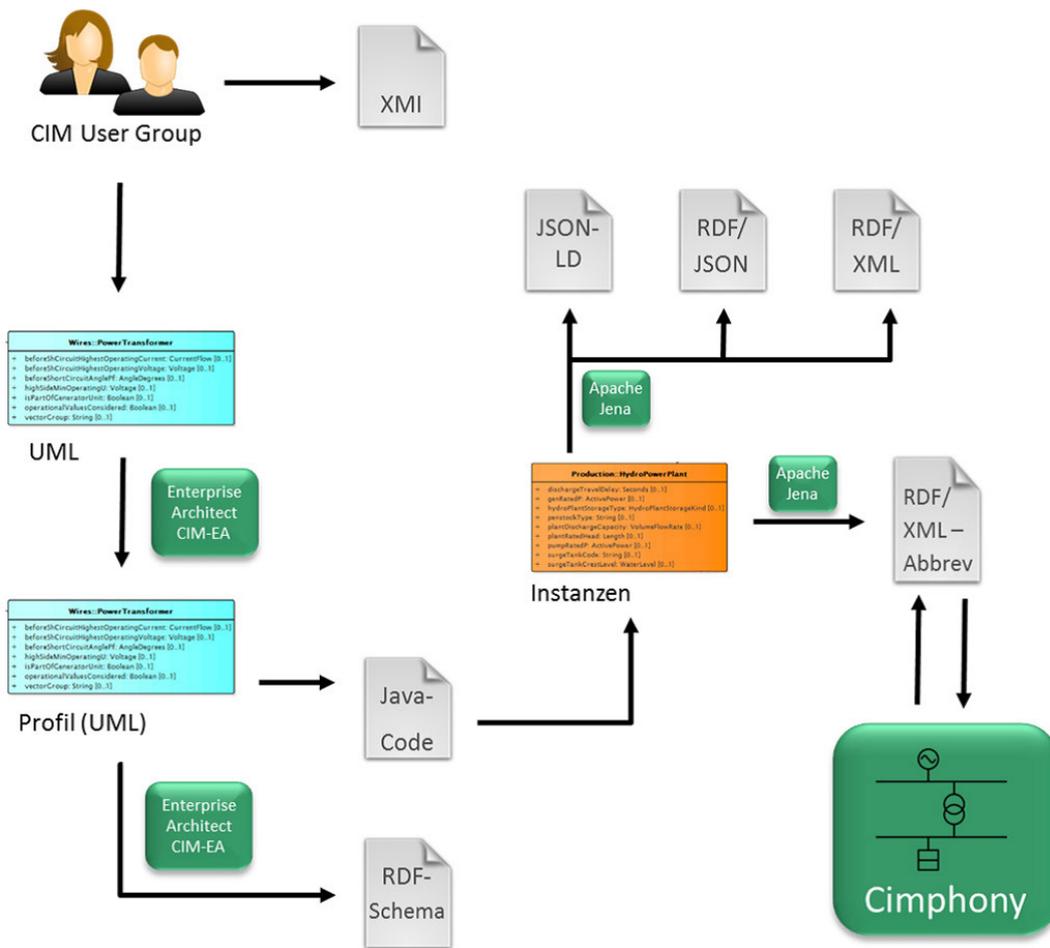


Abb. 92: Tools und Formate zur Darstellung und Bearbeitung des Common Information Models (CIM)

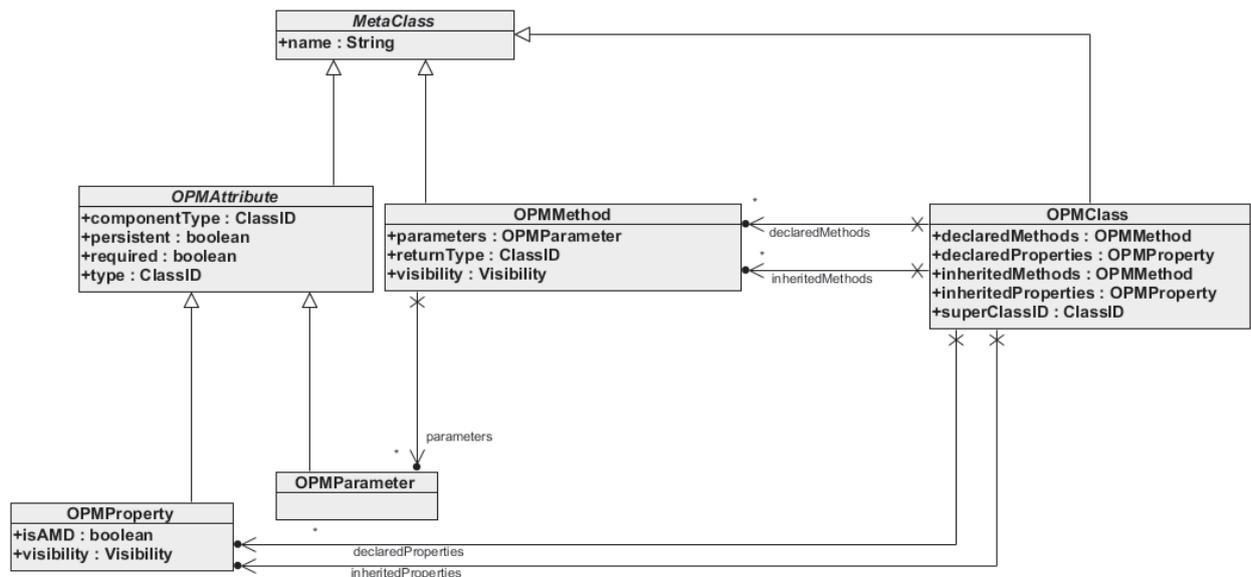


Abb. 93: Klassendiagramm für die strukturierten Metadaten (SMD). Die Abkürzung OPM steht für die interne Bezeichnung Objektorientiertes Programmiermodell und steht programmiersprachenübergreifend für die Einhaltung bestimmter Konventionen beim Design von Klassen.

# Literaturverzeichnis

## Publikationen, die in Web of Science oder Scopus verzeichnet sind

1. Allgeier, S.; Winter, K.; Bretthauer, G.; Guthoff, R. F.; Peschel, S.; Reichert, K.-M.; Stachs, O.; Köhler, B.  
A novel approach to analyze the progression of measured corneal sub-basal nerve fiber length in continuously expanding mosaic images.  
2016. *Current Eye Research*. doi:10.1080/02713683.2016.1221977
2. Allgeier, S.; Winter, K.; Bretthauer, G.; Guthoff, R. R.; Peschel, S.; Reichert, K.-M.; Stachs, O.; Köhler, B.  
Analysis of corneal subbasal nerve fiber length in mosaic image series acquired by guided eye movements.  
2016. *Biomedizinische Technik*, 61 (Suppl.1), 148. doi:10.1515/bmt-2016-5013
3. Badian, R. A.; Utheim, T. P.; Allgeier, S.; Köhler, B.; Lagali, N.  
Quantitative analysis of central corneal sub-basal inflammatory cells and dendritic cells in large-area mosaic images obtained by in vivo confocal microscopy.  
2016. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 57 (12), 1929
4. Bartschat, A.; Hübner, E.; Reischl, M.; Mikut, R.; Stegmaier, J.  
XPIWIT - An XML pipeline wrapper for the Insight Toolkit.  
2016. *Bioinformatics*, 32 (2), 315-317. doi:10.1093/bioinformatics/btv559
5. Bretthauer, G.  
Jahresrückblick 2016.  
2016. *Automatisierungstechnik*, 64 (12), 927-929. doi:10.1515/auto-2016-0133
6. Bretthauer, G.  
Vorwort 2016.  
2016. *Automatisierungstechnik*, 64 (1), 1-2. doi:10.1515/auto-2015-0093
7. Dietrich, P.-I.; Reuter, I.; Blaicher, M.; Schneider, S.; Billah, M. R.; Hoose, T.; Hofmann, A.; Caer, C.; Dangel, R.; Offrein, B.; Möhrle, M.; Troppenz, U.; Zander, M.; Freude, W.; Koos, C.  
Lenses for low-loss chip-to-fiber and fiber-to-fiber coupling fabricated by 3D direct-write lithography.  
2016. *Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO 2016)*, San Jose, CA, June 5-10, 2016. OSA Technical Digest, paper SM1G.4, Optical Society of America, Washington, DC.  
doi:10.1364/CLEO\_SI.2016.SM1G.4
8. Ebraert, E.; Wissmann, M.; Guttmann, M.; Kolew, A.; Worgull, M.; Barie, N.; Schneider, M.; Hofmann, A.; Beri, S.; Watte, J.; Thienpont, H.; Van Erps, J.  
Hot-embossing replication of self-centering optical fiber alignment structures prototyped by deep proton writing.  
2016. *Optical Engineering*, 55 (7), 076112/1-9. doi:10.1117/1.OE.55.7.076112
9. Faulwasser, T.; Findeisen, R.  
Nonlinear model predictive control for constrained output path following.  
2016. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 61 (4), 1026-1039. doi:10.1109/TAC.2015.2466911
10. Faulwasser, T.; Weber, T.; Zometa, P.; Findeisen, R.  
Implementation of nonlinear model predictive path-following control for an industrial robot.  
2016. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, PP (99), 7575680/1-7.  
doi:10.1109/TCST.2016.2601624
11. Gengenbach, U.; Beck, C.; Guth, H.; Koker, L.; Koker, M.; Martin, T.; Nagel, J.; Sieber, I.; Stiller, P.; Stachs, O.; Guthoff, R. F.  
Konzept und Realisierung eines optischen Mikrosystems zur Wiederherstellung der Akkommodation = Concept and realisation of an optical microsystem to restore accommodation.  
2016. *Automatisierungstechnik*, 64 (10), 839-849. doi:10.1515/auto-2016-0062
12. González Ordiano, J. Á.; Waczowicz, S.; Reischl, M.; Mikut, R.; Hagenmeyer, V.  
Photovoltaic power forecasting using simple data-driven models without weather data.  
2016. *Computer Science - Research and Development*, 1-10. doi:10.1007/s00450-016-0316-5

13. Gutjahr, B.; Gröll, L.; Werling, M.  
Lateral vehicle trajectory optimization using constrained linear time-varying MPC.  
2016. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 1–10. doi:10.1109/TITS.2016.2614705
14. Gutjahr, B.; Pek, C.; Gröll, L.; Werling, M.  
Recheneffiziente Trajektorienoptimierung für Fahrzeuge mittels quadratischem Programm.  
2016. Automatisierungstechnik, 64 (10), 786-794. doi:10.1515/auto-2016-0074
15. Hagenmeyer, V.; Cakmak, H. K.; Döpmeier, C.; Faulwasser, T.; Isele, J.; Keller, H. B.; Kohlhepp, P.; Kühnapfel, U.; Stucky, U.; Waczowicz, S.; Mikut, R.  
Information and communication technology in Energy Lab 2.0: Smart energies system simulation and control center with an open-street-map-based power flow simulation example.  
2016. Energy Technology, 4 (1), 145-162. doi:10.1002/ente.201500304
16. Holbein, B.; Isele, J.; Spatafora, L.; Hagenmeyer, V.; Schulenberg, T.  
Heat exchanger for down-hole condensation process.  
2016. 40th Geothermal Research Council Annual Meeting, Sacramento, CA, October 23-26, 2016. Technical Session Papers, 949-955
17. Hoose, T.; Billah, M.; Marin, P.; Blaicher, M.; Dietrich, P. I.; Hofmann, A.; Troppenz, U.; Möhrle, M.; Lindenmann, N.; Thiel, M.; Simon, P.; Hoffmann, J.; Goedecke, M. L.; Freude, W.; Koos, C.  
Multi-chip integration by photonic wire bonding: Connecting surface and edge emitting lasers to silicon chips.  
2016. OSA Technical Digest: Optical Fiber Communication Conference, Anaheim, California, March 20-22, 2016, Th3J.2, Optical Society of America, Washington (DC). doi:10.1364/OFC.2016.M2I.7
18. Keller, H. B.; Schneider, O.; Matthes, J.; Hagenmeyer, V.  
Zuverlässige und sichere Software offener Automatisierungssysteme der Zukunft – Herausforderungen und Lösungswege.  
2016. Automatisierungstechnik, 64 (12), 930-947. doi:10.1515/auto-2016-0060
19. Khan, A. M.; Mikut, R.; Reischl, M.  
A new feedback-based method for parameter adaptation in image processing routines.  
2016. PLoS one, 11 (10), e0165180. doi:10.1371/journal.pone.0165180
20. Khan, M. M.; Lustrino, D.; Silveira, W. A.; Wild, F.; Straka, T.; Issop, Y.; O'Connor, E.; Cox, D.; Reischl, M.; Marquardt, T.; Labeit, D.; Labeit, S.; Benoit, E.; Molgo, J.; Lochmüller, H.; Witzemann, V.; Kettelhut, I. C.; Navegantes, L. C. C.; Pozzan, T.; Rudolf, R.  
Sympathetic innervation controls homeostasis of neuromuscular junctions in health and disease.  
2016. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 113 (3), 746-750. doi:10.1073/pnas.1524272113
21. Knappe, D.; Ruden, S.; Langanke, S.; Tikko, T.; Ritzer, J.; Mikut, R.; Martin, L. L.; Hoffmann, R.; Hilpert, K.  
Optimization of oncocin for antibacterial activity using a SPOT synthesis approach: Extending the pathogen spectrum to Staphylococcus aureus.  
2016. Amino Acids, 48 (1), 269-280. doi:10.1007/s00726-015-2082-2
22. Knöll, D.; Atzmueller, M.; Rieder, C.; Scherer, K.-P.  
BISHOP - Big data driven self-learning support for high-performance ontology population.  
2016. Proceedings of the Conference 'Lernen, Wissen, Daten, Analysen (LWDA), Potsdam, September 12-14, 2016. Ed.: R. Krestel, 157-164
23. Koker, L.; Nagel, J. A.; Schulz, B.; Ritter, F.; Vollmannshäuser, S.; Besser, H.; Gengenbach, U.  
Automation of the test procedure for accelerated aging of implant packages.  
2016. Automatisierungstechnik, 64 (10), 827-838. doi:10.1515/auto-2016-0056
24. Konotop, I.; Klaiber, S.; Waczowicz, S.; Bretschneider, P.; Mikut, R.; Westermann, D.  
Investigation and mathematical modelling of the impact of incentive signals to consumers on their consumption, load forecast and network operation.  
2016. IET Generation, Transmission and Distribution, 10 (9), 2138-2146. doi:10.1049/iet-gtd.2015.1175

25. Kowtharapu, B. S.; Winter, K.; Marfurt, C.; Allgeier, S.; Köhler, B.; Hovakimyan, M.; Stahnke, T.; Wree, A.; Stachs, O.; Guthoff, R. F.  
Comparative quantitative assessment of the human corneal sub-basal nerve plexus by in vivo confocal microscopy and histological staining.  
2016. *Eye*, (November). doi:10.1038/eye.2016.220
26. Kühnel, D.; Marquardt, C.; Nau, K.; Krug, H. F.; Paul, F.; Steinbach, C.  
Environmental benefits and concerns on safety: Communicating latest results on nanotechnology safety research - The project DaNa2.0.  
2016. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-6. doi:10.1007/s11356-016-6217-0
27. Lagali, N.; Allgeier, S.; Guimaraes, P.; Badian, R.; Ruggeri, A.; Köhler, B.; Utheim, T. P.; Peebo, B.; Peterson, M.; Dahlin, L.; Rolandsson, O.  
Analysis of corneal subbasal nerve plexus from wide-area mosaics in healthy subjects and in type 2 diabetics.  
2016. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 57 (12), 6158
28. Marcato, D.; Breitwieser, H.; Scheickl, P.; Peravali, R.; Reischl, M.; Pylatiuk, C.  
Beispiele für den Einsatz von Automatisierungstechnik bei der Analyse biologischer Modellorganismen.  
2016. *Automatisierungstechnik*, 64 (11), 915-925. doi:10.1515/auto-2016-0117
29. Marchese Robinson, R. L.; Lynch, I.; Peijnenburg, W.; Rumble, J.; Klaessig, F.; Marquardt, C.; Rauscher, H.; Puzyn, T.; Purian, R.; Aberg, C.; Karcher, S.; Vriens, H.; Ogilvie Hendren, C.; Harper, S. L.  
How should the completeness and quality of curated nanomaterial data be evaluated.  
2016. *Nanoscale*, 8 (19), 9919-9943. doi:10.1039/C5NR08944A
30. Marchetti, A.; François, G.; Faulwasser, T.; Bonvin, D.  
Modifier adaptation for real-time optimization - Methods and applications.  
2016. *Processes*, 4 (4), 55. doi:10.3390/pr4040055
31. Matthes, J.; Hock, J.; Waibel, P.; Scherrmann, A.; Gehrmann, H.-J.; Keller, H. B.  
A high-speed camera based approach for the on-line analysis of particles in multi-fuel burner flames.  
2016. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 73, 10-17. doi:10.1016/j.exptthermflusci.2015.08.017
32. Meiser, J.; Willner, M.; Schröter, T.; Hofmann, A.; Rieger, J.; Koch, F.; Birnbacher, L.; Schüttler, M.; Kunka, D.; Meyer, P.; Faisal, A.; Amberger, M.; Duttonhofer, T.; Weber, T.; Hipp, A.; Ehn, S.; Walter, M.; Herzen, J.; Schulz, J.; Pfeiffer, F.; Mohr, J.  
Increasing the field of view in grating based X-ray phase contrast imaging using stitched gratings.  
2016. *Journal of X-Ray Science and Technology*, 24 (3), 379-388. doi:10.3233/XST-160552
33. Middel, V.; Zhou, L.; Takamiya, M.; Beil, T.; Shahid, M.; Roostalu, U.; Grabher, C.; Rastegar, S.; Reischl, M.; Nienhaus, G. U.; Strähle, U.  
Dysferlin-mediated phosphatidylserine sorting engages macrophages in sarcolemma repair.  
2016. *Nature Communications*, 7, 12875. doi:10.1038/ncomms12875
34. Mikut, R.  
Big Data & Automatisierung (Editorial).  
2016. *Automatisierungstechnik*, 64 (7), 503–506. doi:10.1515/auto-2016-0086
35. Mikut, R.; Ruden, S.; Reischl, M.; Breitling, F.; Volkmer, R.; Hilpert, K.  
Improving short antimicrobial peptides despite elusive rules for activity.  
2016. *Biochimica et Biophysica Acta - Biomembranes*, 1858 (5), 1024-1033. doi:10.1016/j.bbamem.2015.12.013
36. Mühlpfordt, T.; Faulwasser, T.; Hagenmeyer, V.  
Solving stochastic AC power flow via polynomial chaos expansion.  
2016. 2016 IEEE Conference on Control Applications (CCA), Part of 2016 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, Buenos Aires, RA, September 19-22, 2016. *Proceedings*, 70-76, IEEE, Piscataway (NJ). doi:10.1109/CCA.2016.7587824
37. Nau, K.; Bohmer, N.; Kühnel, D.; Marquardt, C.; Paul, F.; Steinbach, C.; Krug, H. F.  
The Dana2.0 knowledge base on nanomaterials – Communicating current nanosafety research based on evaluated literature data.  
2016. *Journal of Materials Education*, 38 (3-4), 93-108

38. Pazouki, M.; Allaei, S. S.; Hossein Pazouki, M.; Moller, D. P. F.  
Adaptive learning algorithm for RBF Neural Networks in kernel spaces.  
2016. 2016 International Joint Conference on Neural Networks, IJCNN 2016, Vancouver, Canada, 24 - 29 July, 2016, 4811-4818, IEEE, Piscataway (NJ). doi:10.1109/IJCNN.2016.7727832
39. Popova, A. A.; Depew, C.; Permana, K. M.; Trubitsyn, A.; Peravali, R.; Ordiano, J. A. G.; Reischl, M.; Levkin, P. A.  
Evaluation of the droplet-microarray platform for high-throughput screening of suspension cells.  
2016. *Journal of Laboratory Automation*. doi:10.1177/2211068216677204
40. Reischl, M.; Tuga, M. R.; Meister, L.; Alberg, E.; Doneit, W.; Liebetanz, D.; Rupp, R.; Mikut, R.  
Einfluss von Trainingseffekten auf die Parameteradaption für Mensch-Maschine-Schnittstellen in der Medizintechnik = Effects of training on the parameter adaptation in man-machine-interfaces in medical engineering.  
2016. *Automatisierungstechnik*, 64 (10), 816-826. doi:10.1515/auto-2016-0051
41. Scherer, K. P.; Germann, M.; Knoell, D.; Baumeister, J.; Furth, S.  
Wissensgenerierung durch Selbstlernen mit strukturierten Katarakt-Daten.  
2016. *Spektrum der Augenheilkunde*, 30 (2), 90. doi:10.1007/s00717-016-0295-8
42. Schmalfuß, L.; Rupp, R.; Tuga, M. R.; Kogut, A.; Hewitt, M.; Meincke, J.; Klinker, F.; Duttenhoefer, W.; Eck, U.; Mikut, R.; Reischl, M.; Liebetanz, D.  
Steer by ear: Myoelectric auricular control of powered wheelchairs for individuals with spinal cord injury.  
2016. *Restorative Neurology and Neuroscience*, 34 (1), 79-95. doi:10.3233/RNN-150579
43. Schmidt, A.; Bühler, S.; Senger, R.; Scholz, S.; Dickerhof, M.  
Detection and visual inspection of highly obfuscated plagiarisms.  
2016. *Proceedings of the 49th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS-49)*, Kauai, Hawaii, January 5-8, 2016. Ed.: T.X. Bui, 4113-4122, IEEE Computer Society, Los Alamitos (CA). doi:10.1109/HICSS.2016.510
44. Schmidt, A.; Milchevski, D.; Hoffart, J.; Weikum, G.  
Context-sensitive auto-completion for searching with entities and categories.  
2016. *Proceedings of the 39th International ACM SIGIR conference on Research and Development in Information Retrieval*, Pisa, I, July 17-21, 2016, 1097-1100, ACM, New York (NY)
45. Scholz, S.; Mueller, T.; Plasch, M.; Limbeck, H.; Adamietz, R.; Iseringhausen, T.; Kimmig, D.; Dickerhof, M.; Woegerer, C.  
A modular flexible scalable and reconfigurable system for manufacturing of microsystems based on additive manufacturing and e-printing.  
2016. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 40, 14-23. doi:10.1016/j.rcim.2015.12.006
46. Schreck, I.; Grico, N.; Hansjosten, I.; Marquardt, C.; Bormann, S.; Seidel, A.; Kvietkova, D. L.; Pieniazek, D.; Segerbäck, D.; Diabate, S.; Van Der Horst, G. T. J.; Oesch-Bartlomowicz, B.; Oesch, F.; Weiss, C.  
The nucleotide excision repair protein XPC is essential for bulky DNA adducts to promote interleukin-6 expression via the activation of p38-SAPK.  
2016. *Oncogene*, 35 (7), 908-918. doi:10.1038/onc.2015.145
47. Schutera, M.; Dickmeis, T.; Mione, M.; Peravali, R.; Marcato, D.; Reischl, M.; Mikut, R.; Pylatiuk, C.  
Automated phenotype pattern recognition of zebrafish for high-throughput screening.  
2016. *Bioengineered*, 7 (4), 261-265. doi:10.1080/21655979.2016.1197710
48. Shahid, M.; Takamiya, M.; Stegmaier, J.; Middel, V.; Gradl, M.; Klüver, N.; Mikut, R.; Dickmeis, T.; Scholz, S.; Rastegar, S.; Yang, L.; Strähle, U.  
Zebrafish biosensor for toxicant induced muscle hyperactivity.  
2016. *Scientific Reports*, 6, 23768. doi:10.1038/srep23768
49. Sieber, I.; Li, L.; Gengenbach, U.; Beckert, E.; Steinkopf, R.; Yi, A. Y.  
Optical performance simulation of free-form optics for an eye implant based on a measurement data enhanced model.  
2016. *Applied Optics*, 55 (24), 6671-6679. doi:10.1364/AO.55.006671
50. Sieber, I.; Martin, T.; Gengenbach, U.  
Robust design of an optical micromachine for an ophthalmic application.  
2016. *Micromachines*, 7 (5), 85. doi:10.3390/mi7050085

51. Singhal, M.; Marchetti, A. G.; Faulwasser, T.; Bonvin, D.  
Real-time optimization based on adaptation of surrogate models.  
2016. IFAC-PapersOnLine, 49 (7), 412–417. doi:10.1016/j.ifacol.2016.07.377
52. Stegmaier, J.; Amat, F.; Lemon, W. C.; Teodoro, G.; Mikut, R.; Keller, P. J.  
Real-time three-dimensional cell segmentation in large-scale microscopy data of developing embryos.  
2016. Developmental Cell, 36 (2), 225-240. doi:10.1016/j.devcel.2015.12.028
53. Stegmaier, J.; Arz, J.; Schott, B.; Otte, J. C.; Kobitski, A.; Nienhaus, G. U.; Strähle, U.; Sanders, P.; Mikut, R.  
Generating semi-synthetic validation benchmarks for embryomics.  
2016. 2016 IEEE 13th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI 2016), Prag, CZ, 13.-16.04.2016, 684-688, IEEE, Piscataway (NJ). doi:10.1109/ISBI.2016.7493359
54. Stegmaier, J.; Schott, B.; Hübner, E.; Traub, M.; Shahid, M.; Takamiya, M.; Kobitski, A.; Hartmann, V.; Stotzka, R.; Van Wezel, J.; Streit, A.; Nienhaus, G. U.; Strähle, U.; Reischl, M.; Mikut, R.  
Automation strategies for large-scale 3D image analysis.  
2016. Automatisierungstechnik, 64 (7), 555-566. doi:10.1515/auto-2016-0019
55. Steinbach, C.; Bohmer, N.; Krug, H. F.; Kühnel, D.; Nau, K.; Paul, F.; Reithel, S.; Marquardt, C.  
DaNa 2.0 - Verlässliche Informationen zur Sicherheit von marktüblichen Nanomaterialien.  
2016. Chemie - Ingenieur - Technik. doi:10.1002/cite.201600074
56. Süß, W.; Stucky, K.-U.; Jakob, W.; Maaß, H.; Cakmak, H. K.  
Generic data services for the management of large-scale data applications.  
2016. WSEAS Transactions on Computers, 15, 265-278
57. Vladov, N.; Segal, J.; Ratchev, S.; Plasch, M.; Kimmig, D.; Dickerhof, M.  
A decision support methodology for embodiment design and process chain selection for hybrid manufacturing platforms.  
2016. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 87 (1), 553–569. doi:10.1007/s00170-016-8514-7
58. von Gundlach, A. R.; Garamus, V. M.; Gorniak, T.; Davies, H. A.; Reischl, M.; Mikut, R.; Hilpert, K.; Rosenhahn, A.  
Small angle X-ray scattering as a high-throughput method to classify antimicrobial modes of action.  
2016. Biochimica et Biophysica Acta - Biomembranes, 1858 (5), 918-925. doi:10.1016/j.bbamem.2015.12.022
59. Wacker, I.; Spomer, W.; Hofmann, A.; Thaler, M.; Hillmer, S.; Gengenbach, U.; Schröder, R. R.  
Hierarchical imaging: a new concept for targeted imaging of large volumes from cells to tissues.  
2016. BMC Cell Biology, 17 (1), 17:38. doi:10.1186/s12860-016-0122-8
60. Waczowicz, S.; Reischl, M.; Klaiber, S.; Bretschneider, P.; Konotop, I.; Westermann, D.; Hagenmeyer, V.; Mikut, R.  
Virtual storages as theoretically motivated demand response models for enhanced smart grid operations.  
2016. Energy Technology, 4 (1), 163-176. doi:10.1002/ente.201500318
61. Waibel, P.  
Kamerabasierte Optimierung der Prozessführung von Drehrohröfen.  
2016. Automatisierungstechnik, 64 (12), 900-1002. doi:10.1515/auto-2016-0068
62. Winter, K.; Scheibe, P.; Köhler, B.; Allgeier, S.; Guthoff, R. F.; Stachs, O.  
Local variability of parameters for characterization of the corneal subbasal nerve plexus.  
2016. Current Eye Research, 41 (2), 186-198. doi:10.3109/02713683.2015.1010686

## Sonstige Publikationen, die in schriftlicher Form vorliegen

63. Alshut, R.  
Konzept für Bildanalysen in Hochdurchsatz-Systemen am Beispiel des Zebrabärblings. Dissertation.  
2016. Karlsruhe
64. Bartschat, A.; Toso, L.; Stegmaier, J.; Kuijper, A.; Mikut, R.; Köhler, B.; Allgeier, S.  
Automatic corneal tissue classification using bag-of-visual-words approaches.  
2016. Forum Bildverarbeitung 2016. Hrsg.: M. Heizmann, 245-256, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe
65. Benner, J.; Geiger, A.; Häfele, K.-H.  
Virtual 3D city model support for energy demand simulations on city level - The CityGML energy extension.  
2016. REAL CORP 2016. 21st International Conference on Urban Planning, Regional Development and Information Society, Hamburg, 22.-24.06.2016. Ed.: M. Schrenk, 777-786, CORP, Schwechat
66. Braun, P.; Faulwasser, T.; Grüne, L.; Kellett, C. M.; Weller, S., R.; Worthmann, K.  
Maximal islanding time for microgrids via distributed predictive control.  
2016. Proceedings of the 22nd International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems, Minneapolis, MN, July 11-15, 2016, 652-659, University of Minnesota, Minneapolis (MN)
67. Bretthauer, G.; Gengenbach, U.; Stachs, O.; Guthoff, R.  
Ein neues mechatronisches System zur Wiederherstellung der Akkomodationsfähigkeit des menschlichen Auges.  
2016. Schlaglicht Augenheilkunde : Linse, Katarakt und refraktive Chirurgie. Hrsg.: G.K. Lang, 72-77, Thieme Verl., Stuttgart
68. Brunet, A.; Müller, T.; Scholz, S.; Fuchsbauer, A.  
Requirements for 3D printed applications using novel nanoparticle enhanced digital materials.  
2016. 9th International Conference on Advances in Circuits, Electronics and Micro-electronics (CENICS 2016), Nice, F, July 24-28, 2016. Ed.: S.G. Scholz, 31-34, IARIA, Wilmington
69. Bühler, S.; Schmidt, A.  
Über die Erkennung von Übersetzungsplagiaten.  
2016. Forschung aktuell, 2016, 39-42
70. Dessors, S.; Tenchine, L.; Gout, S.; Azcarate, S.; Tosello, G.; Calaon, M.; Miller, N.; Brown, B.; Edouard, C.; Müller, T.; Wittner, W.; Prantl, M.; Shang, X.; Batal, A.  
Injection moulding and selective metallisation technologies for polymer microsystems.  
2016. Proceedings of the 4M/IWMF2016 Conference, Lyngby, DK, September 13-15, 2016. Ed.: G. Tosello, 19-22, Research Publishing, Singapore
71. Dobler, M.; Gourlay, J.; Scholz, S.; Schmidt, A.  
A cost model for SMARTLAM.  
2016. 9th International Conference on Advances in Circuits, Electronics and Micro-electronics (CENICS 2016), Nice, F, July 24-28, 2016. Ed.: S.G. Scholz, 16-21, IARIA, Wilmington
72. Doneit, W.; Mikut, R.; Liebetanz, D.; Rupp, R.; Reischl, M.  
Control scheme selection in human-machine-interfaces by analysis of activity signals.  
2016. Current Directions in Biomedical Engineering, 2 (1), 707-710. doi:10.1515/cdbme-2016-0153
73. Gaiser, I. N.  
Entwicklung und Analyse neuer flexibler Fluidaktoren und Realisierung nachgiebiger Leichtbau-Robotersysteme. Dissertation.  
2016. Karlsruhe
74. González Ordiano, J. Á.; Doneit, W.; Waczowicz, S.; Gröll, L.; Mikut, R.; Hagenmeyer, V.  
Nearest-neighbor based non-parametric probabilistic forecasting with applications in photovoltaic systems.  
2016. Proceedings. 26. Workshop Computational Intelligence, Dortmund, 24. - 25. November 2016. Hrsg.: F. Hoffmann, 9-30, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe
75. Gschwender, D.; Kost, F.; Niemeier, R.; Koch, L.; Döpmeier, C.; Schlachter, T.; Schillinger, W.  
Energieatlas Baden-Württemberg. Daten und Fakten zur Energiewende.  
2016. Umweltinformationssystem Baden-Württemberg, F+E-Vorhaben INOVUM, Innovative Umweltinformationssysteme. Phase I 2014/16. Hrsg.: K. Weissenbach, 61-70, KIT Scientific Publ., Karlsruhe

76. Hempel, S.; Benner, J.; Geiger, A.; Häfele, K.-H.  
STREAMER early design configurator - A tool for automatic layout generation.  
2016. Central Europe towards Sustainable Building 2016 (CESB16), Praha, CZ, June 22-24, 2016.  
Ed.: P. Hajek, Grada Publishing, Prague
77. Hoffmann, F.; Hüllermeier, E.; Mikut, R. (Hrsg.).  
Proceedings. 26. Workshop Computational Intelligence, Dortmund, 24. - 25. November 2016.  
2016. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe. doi:10.5445/KSP/1000060007
78. Holbein, B.; Isele, J.; Spatafora, L.; Hagenmeyer, V.  
Heating and cooling with geothermal energy. Heat management in an experimental holistic energy grid.  
2016. 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, CA, February 22-24, 2016. Pro-  
ceedings on CD-ROM, SGP-TR-209
79. Irle, J. P.  
Analyse und Entwurf von Beobachtern mit unbekanntem Signalen und Parametern. Dissertation.  
2016. Karlsruhe
80. Isele, J.; Spatafora, L.; Wiegand, F.; Holbein, B.  
Kamerainspektionssystem für tiefe Geothermiebrunnen (GeoKam).  
2016. Technische Informationsbibliothek, Hannover
81. Khatri, B.; Lappe, K.; Habedank, M.; Mueller, T.; Megnin, C.; Hanemann, T.  
Development and characterization of functional polymer-ceramic composite structures using fused  
deposition modeling.  
2016. Proceedings of the 4M/IWMF2016 Conference, Lyngby, DK, September 13-15, 2016.  
Ed.: G. Tosello, 251-254, Research Publishing, Singapore
82. Kimmig, D.; Schillinger, W.; Schlachter, T.; Döpmeier, C.; Hibbeler, C.; Koch, L.; Weissenbach, K.  
LUPO mobil - Konzepte und technologische Einblicke in die App 'meine Umwelt'.  
2016. Tagungsband des 23. Workshops "Umweltinformationssysteme 2016 - Umweltbeobachtung: Nah  
und Fern" (UIS 2016) des Arbeitskreises "Umweltinformationssysteme" der Fachgruppe "Informatik im  
Umweltschutz" der Gesellschaft für Informatik (GI) , Leipzig, 1.-2.Juni 2016. Hrsg.: U. Freitag, 117-128
83. Kimmig, D.; Schillinger, W.; Tauber, M.; Nonnenmann, B.; Schlachter, T.; Braun, E.; Döpmeier, C.;  
Greceanu, C.; Schmitt, C.; Koch, L.; Hibbeler, C.; Westrich, P.  
INOVUM Entwicklungsplattform - Unterstützung der Projektabwicklung vom Anforderungsmanagement  
zum Softwareartefakt.  
2016. Umweltinformationssystem Baden-Württemberg, F+E-Vorhaben INOVUM, Innovative Umweltin-  
formationssysteme. Phase I 2014/16. Hrsg.: K. Weissenbach, 71-80, KIT Scientific Publ., Karlsruhe
84. Kimmig, D.; Schillinger, W.; Tauber, M.; Schlachter, T.; Braun, E.; Döpmeier, C.; Greceanu, C.; Schmitt,  
C.; Koch, L.; Hibbeler C.; Westrich, P.; Weissenbach, K.  
LUPO mobil - Synergieeffekte bei der Entwicklung mobiler Anwendungen am Beispiel der Apps 'Meine  
Umwelt' und 'Meine Pegel'.  
2016. Umweltinformationssystem Baden-Württemberg, F+E-Vorhaben INOVUM, Innovative Umweltin-  
formationssysteme. Phase I 2014/16. Hrsg.: K. Weissenbach, 39-50, KIT Scientific Publ., Karlsruhe
85. Köhler, B.; Bretthauer, G.; Guthoff, R. F.; Reichert, K.-M.; Sieber, I.; Stachs, O.; Toso, L.; Allgeier, S.  
EyeGuidance - A computer controlled system to guide eye movements.  
2016. Current Directions in Biomedical Engineering, 2 (1), 433-436. doi:10.1515/cdbme-2016-0096,
86. Krause, K.-U.; Krätschmer, R.; Benner, J.  
Stand der Weiterentwicklung und Umsetzung des Standards XPlanung in Deutschland.  
2016. REAL CORP 2016. 21st International Conference on Urban Planning, Regional Development and  
Information Society, Hamburg, 22.-24.06.2016. Ed.: M. Schrenk, 679-688, CORP, Schwechat
87. Laux, F.; Schmidt, A.; Hristovski, D. (Hrsg.).  
DBKDA 2016 : 8th International Conference on Advances in Databases, Knowledge, and Data  
Applications, Lisboa, P, June 26-30, 2016.  
2016. IARIA, Wilmington
88. Löwner, M. O.; Gröger, G.; Benner, J.; Biljecki, F.; Nagel, C.  
Proposal for a new LoD and multi-representation concept for CityGML.  
2016. ISPRS Annals, IV-2/W1, 3-12. doi:10.5194/isprs-annals-IV-2-W1-3-2016

89. Lutz, C.  
Ein neues Konzept zur online-Spektroskopie-basierten Optimierung der Produktqualität des Hochleistungszementes Celitement. Dissertation.  
2016. Karlsruhe
90. Matthes, J.; Waibel, P.; Keller, H. B.; Gröll, L.  
Camera based identification and control of the Waelz process.  
2016. INCINCO 2016 : 13th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Lisboa, P, July 29.31, 2016. Proceedings Vol.1. Ed.: O. Gusikhin, 291-298, SCITEPRESS
91. Milosavljevic, P.; Cortinovis, A.; Marchetti, A. G.; Faulwasser, T.; Mercangoz, M.; Bonvin, D.  
Optimal load sharing of parallel compressors via modifier adaptation.  
2016. 2016 IEEE Conference on Control Applications (CCA), Buenos Aires, Argentina, 19–22 September 2016, 1488–1493, IEEE, Piscataway (NJ). doi:10.1109/CCA.2016.7588011
92. Milosavljevic, P.; Faulwasser, T.; Marchetti, A.; Bonvin, D.  
Time-optimal path-following operation in the presence of uncertainty.  
2016. Proceedings of the 15th European Control Conference (ECC16), Aalborg, DK, June 29 - July 1, 2016
93. Mühlpfordt, T.; Paulson, J. A.; Braatz, R. D.; Findeisen, R.  
Output feedback model predictive control with probabilistic uncertainties for linear systems.  
2016. Proceedings of the American Control Conference 2016, Boston, MA, July 6-8, 2016, 2035-2040, IEEE, Piscataway (NJ). doi:10.1109/ACC.2016.7525218
94. Müller, T.; Santos Machado, L.; Philipp-pichler, M.; Wilfinger, T.; Wittner, W.; Prantl, M.; Scholz, S. G.  
Combining metal injection moulding and polymer over moulding for the production of orthopaedic implants.  
2016. Proceedings of the 4M/IWMF2016 Conference, Lyngby, DK, September 13-15, 2016. Ed.: G. Tosello, Research Publishing, Singapore. doi:10.3850/978-981-11-0749-8\_742
95. Nagel, J. A.; Beck, C.; Harms, H.; Stiller, P.; Guth, H.; Stachs, O.; Bretthauer, G.  
Energie- und speichereffiziente Berechnung des Akkomodationsbedarfs im künstlichen Akkommodationssystem.  
2016. Schlaglicht Augenheilkunde : Linse, Katarakt und refraktive Chirurgie. Hrsg.: G.K. Lang, 66-71, Thieme Verl., Stuttgart
96. Nasrat, S.; Marcato, D.; Hirth, S.; Reischl, M.; Pylatiuk, C.  
Semi-automated detection of fractional shortening in zebrafish embryo heart videos.  
2016. Current Directions in Biomedical Engineering, 2 (1), 233-236. doi:10.1515/cdbme-2016-0052,
97. Nau, K.; Krug, H. F.  
Sichere Nanomaterialien?!.  
2016. Physik-Journal, 15 (11), 29-34
98. Nau, K.; Paul, F.  
Titannitrid: Goldglänzend und elektrisch leitfähig, aber steinhart.  
2016. Hessen-Nanotech News, 2016 (1), 12-13
99. Oger, C.  
Hochleistungsbremsen in Fahrzeugen: Ganzheitlicher Dimensionierungsansatz in der Konzeptphase. Dissertation.  
2016. de Gruyter, Berlin
100. Pfriem, A.  
Neues Konzept für ein modulares Robotersystem zur automatischen Untersuchung von Zebrabärblingen in Hochdurchsatzverfahren. Dissertation.  
2016. Karlsruhe
101. Rheinschmitt, L.; Gengenbach, U.; Bretthauer, G.  
Kapselung eines mechatronischen Systems zur Wiederherstellung der Akkomodationsfähigkeit.  
2016. Schlaglicht Augenheilkunde : Linse, Katarakt und refraktive Chirurgie. Hrsg.: G.K. Lang, 78-82, Thieme Verl., Stuttgart

102. Scherrmann, A.; Gehrmann, H.-J.; Baumann, W.; Teuscher, N.; Hauser, M.; Seifert, H.; Stapf, D.; Paur, H.-R.; Matthes, J.; Waibel, P.; Vogelbacher, M.; Keller, H.  
Mitverbrennung von Biomasse in einer Kraftwerksstaubfeuerung im Pilotmaßstab.  
2016. Kraftwerkstechnik 2016 – Strategien, Anlagentechnik und Betrieb. Hrsg.: M. Beckmann, 605–624, SAXONIA Standortentwicklungs- und –verwaltungsgesellschaft mbh, Freiberg
103. Schlachter, T.; Braun, E.; Döpmeier, C.; Greceanu, C.; Schmitt, C.; Kimmig, D.; Schillinger, W.; Tauber, M.; Weissenbach, K.; Möhnle, M.; Müller, J.; Köther, B.; Schwarz, H.; Kalemba, D.  
LUPO - Umsetzung einer (micro-)serviceorientierten Architektur (SOA) für Landesumweltportale.  
2016. Umweltinformationssystem Baden-Württemberg, F+E-Vorhaben INOVUM, Innovative Umweltinformationssysteme. Phase I 2014/16. Hrsg.: R. Weidemann, 25-37, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe
104. Schmitz, B.  
Ein neues Konzept zur Sensorik und Steuerung einer aktiven Hybrid-Orthese für die obere Extremität.  
Dissertation.  
2016. Karlsruhe
105. Schneider, O.; Keller, H. B.  
Integrierte Entwicklung zuverlässiger Software.  
2016. Softwaretechnik-Trends, 36 (3), 12-16
106. Scholz, S.; Brunet, A.; Müller, T.; Fuchsbaauer, A.  
Novel nanoparticle enhanced digital materials for 3D printing and their application shown for the robotic and electronic industry.  
2016. 9th International Conference on Advances in Circuits, Electronics and Micro-electronics (CENICS 2016), Nice, F, July 24-28, 2016. Ed.: S.G. Scholz, 27-30, IARIA, Wilmington
107. Scholz, S. G.; Mueller, T.; Santos Machado, L.; Calaon, M.; Tosello, G.; Dessors, S.; Pranti, M.; Miller, N.  
Process optimization for injection moulding of passive microwave compounds.  
2016. Proceedings of the 4M/IWMF2016 Conference, Lyngby, DK, September 13-15, 2016. Ed.: G. Tosello, Research Publishing, Singapore. doi:10.3850/978-981-11-0749-8\_743
108. Schott, B.; Stegmaier, J.; Arbaud, A.; Reischl, M.; Mikut, R.; Levi, F.  
Robust individual circadian parameter estimation for biosignal-based personalisation of cancer chronography.  
2016. Workshop Biosignalverarbeitung 2016 : Innovationen bei der Erfassung und Analyse bioelektrischer und biomagnetischer Signale, Berlin, 7.-8.April 2016, 67-70, PTB, Braunschweig
109. Schultz, T.; Putze, F.; Schulze, T.; Mikut, R.; Doneit, W.; Kruse, A.; Depner, A.; Franz, I.; Engels, M. A.; Gaerte, P.; Bothe, D.; Ziegler, C.; Maucher, I.; Ricken, M.; Dimitrov, T.; Herzig, J.; Bernardin, K.; Gehrig, T.; Lohse, J.; Adam, M.; Fischer, M.; Volpe, M.; Simon, C.  
I-CARE: Individual activation of people with dementia.  
2016. 13th Biannual Conference of the German Cognitive Science Society (KogWis 2016), Bremen, September 26-30, 2016. Proceedings. Ed.: T. Barkowsky, 219-220
110. Seifert, R.; Keller, H. B.; Conrad, T.; Peter, J.  
Alcohol control: Mobile sensor system and numerical signal analysis.  
2016. Sensors & transducers, 205 (10), 10-15
111. Seifert, R.; Keller, H. B.; Conrad, T.; Peter, J.  
Mobile sensor system for alcohol control and numerical signal analysis.  
2016. 7th International Conference on Sensor Device Technologies and Applications (SensorDevices 2016), Nice, F, July 24-28, 2016. Ed.: S. H. Yurish, 10-14, IARIA, Wilmington
112. Spatafora, L.; Isele, J.; Holbein, B.; Hagenmeyer, V.  
The GeoKam - A tool for video inspection in hot deep geothermal boreholes.  
2016. 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, CA, February 22-24, 2016. Proceedings on CD-ROM, SGP-TR-209
113. Stegmaier, J.  
New methods to improve large-scale microscopy image analysis with prior knowledge and uncertainty. Dissertation.  
2016. Karlsruhe

114. Stegmaier, J.; Peter, N.; Portl, J.; Mang, I. V.; Schröder, R.; Leitte, H.; Mikut, R.; Reischl, M.  
A framework for feedback-based segmentation of 3D image stacks.  
2016. Current Directions in Biomedical Engineering, 2 (1), 437-441
115. Steimer, K. C.; Zimmermann, C.; Zeitfelder, J.; Pylatiuk, C.; Stork, W.  
Portable auricular device for real-time swallow and chew detection.  
2016. Current Directions in Biomedical Engineering, 2 (1), 129-133. doi:10.1515/cdbme-2016-0031
116. Tuga, M. R.  
Development and implementation of an adaptive human-machine interface based on ear muscle signals. Dissertation.  
2016. Karlsruhe
117. Vogelbacher, M.; Waibel, P.; Matthes, J.; Keller, H. B.  
Bildbasierte Überwachung alternativer Brennstoffe eines Mehrstoffbrenners bei industriellen Verbrennungsprozessen = Image-based monitoring of alternative fuels of multi-fuel burner at industrial combustion processes.  
2016. Forum Bildverarbeitung 2016. Hrsg.: M. Heizmann, 297-308, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe
118. Vogelbacher, M.; Waibel, P.; Matthes, J.; Keller, S.; Keller, H. B.  
Bildbasierte Überwachung und Optimierung der Verbrennung von alternativen Brennstoffen bei Mehrstoffbrennern.  
2016. Anlagenbezogenes Monitoring : neue Anforderungen - neue Konzepte ; Würzburg, 25. und 26. Oktober 2016, 201-212, VDI-Verl., Düsseldorf
119. Weidemann, R. (Hrsg.).  
Jahresbericht 2015 / Institut für Angewandte Informatik (KIT Scientific Reports ; 7714).  
2016. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe. doi:10.5445/KSP/1000054065
120. Weissenbach, K.; Schillinger, W.; Weidemann, R.  
Ausblick INOVUM II. Geplante F+E-Aktivitäten in der Phase II von INOVUM.  
2016. Umweltinformationssystem Baden-Württemberg, F+E-Vorhaben INOVUM, Innovative Umweltinformationssysteme. Phase I 2014/16. Hrsg.: K. Weissenbach, 39-50, KIT Scientific Publ., Karlsruhe
121. Weissenbach, K.; Schillinger, W.; Weidemann, R. (Hrsg.).  
Umweltinformationssystem Baden-Württemberg, F+E-Vorhaben INOVUM, Innovative Umweltinformationssysteme. Phase I 2014/16. (KIT Scientific Reports ; 7715).  
2016. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe. doi:10.5445/KSP/1000055516
122. Wiegand, R.  
Ein neues Konzept für eine aktive Leichtbauorthese auf Basis von fluidgefüllten Hohlstrukturen für die obere Extremität. Dissertation.  
2016. Karlsruhe

## Vorträge, die nicht in schriftlicher Form vorliegen

123. Allgeier, S.; Winter, K.; Bretthauer, G.; Guthoff, R. R.; Peschel, S.; Reichert, K.-M.; Stachs, O.; Köhler, B.  
Analysis of corneal subbasal nerve fiber length in mosaic image series acquired by guided eye movements.  
2016. „Dreiländertagung“ of Biomedical Engineering, Basel, CH, October 4-6, 2016
124. Badian, R. A.; Utheim, T. P.; Allgeier, S.; Köhler, B.; Lagali, N.  
Quantitative analysis of central corneal sub-basal inflammatory cells and dendritic cells in large-area mosaic images obtained by in vivo confocal microscopy.  
2016. ARVO 2016 Annual Meeting, Seattle, WA, May 1-5, 2016
125. Brunet, A.  
Trends in nano/micro technologies.  
2016. 9th International Conference on Advances in Circuits, Electronics and Micro-electronics (CENICS 2016), Nice, F, July 24-28, 2016
126. de Avila Ferreira, T.; Marchetti, A. G.; Faulwasser, T.; Wuillemin, Z.; Au, S. F.; Nakajo, A.; Van herle, J.; Bonvin, D.  
Real-time optimization of a solid oxide fuel cell system with reformer.  
2016. 13th Symposium on Modeling and Experimental Validation of Fuel Cells, Batteries and Electrolysers (MODVAL 13), Lausanne, CH, March 22-23, 2016
127. Eck, U.; Kogut, A.; Tuga, M. R.; Doneit, W.; Schmalfuß, L.; Liebetanz, D.; Reischl, M.; Rupp, R.  
Steer by ear - Vergleichsstudie zur Steuerung eines Elektrorollstuhls mittels zweier oberflächlich gemessener Aktivierungsmuster der Ohrmuskulatur.  
2016. Inklusion von Menschen mit Querschnittlähmung: Eine multiprofessionelle Herausforderung : 29.Jahrestagung der Deutschsprachigen Medizinischen Gesellschaft für Paraplegie e.V., Hamburg, 25.-28.Mai 2016
128. Faulwasser, T.  
Path following - Tailored normal forms and NMPC design.  
2016. Universität Freiburg, 11.Mai 2016
129. Faulwasser, T.; Grüne, L.; Kellett, C. M.; Weller, S.  
Application of receding horizon optimal control to DICE integrated assessment models.  
2016. 10th International Conference on Computational and Financial Econometrics (CFE 2016), Sevilla, E, December 9-11, 2016
130. Geiger, A.; Hepp, S.; Ott, T.; Häfele, K.-H.  
Generierung eines CityGML Gebäudemodells des KIT Campus Nord.  
2016. 64.Deutscher Kartographentag (GeoInfo 2016), Potsdam, 14.-16.Juni 2016
131. Gonzalez, J. A.  
Data-based models for photovoltaic power forecasting with the Ausgrid solar home electricity data as example.  
2016. Mathematics of the Energy Transition : 2nd Winter School of the Graduate Center MSE, Ohlstadt, February 29 - March 4, 2016
132. Keller, H. B.  
IT-Security: Definition von Security-Zielen. Sicherheit - administrativ organisatorisch vers konstruktiv.  
2016. 2.Berliner Gesamtkonferenz der Sicherheitsinstitutionen in Deutschland, Berlin, 2.September 2016
133. Köhler, B.; Bretthauer, G.; Guthoff, R. F.; Reichert, K.-M.; Sieber, I.; Stachs, O.; Toso, L.; Allgeier, S.  
EyeGuidance - A computer controlled system to guide eye movements.  
2016. „Dreiländertagung“ of Biomedical Engineering, Basel, CH, October 4-6, 2016
134. Kyesswa, M.  
Analysis of power system dynamics.  
2016. Doktorandenworkshop der Initiative EnergieSystem 2050, Friedrichsdorf, 7.-8. Dezember 2016

135. Lagali, N.; Allgeier, S.; Guimaraes, P.; Badian, R.; Ruggeri, A.; Köhler, B.; Utheim, T. P.; Peebo, B.; Peterson, M.; Dahlin, L.; Rolandsson, O.  
Analysis of corneal subbasal nerve plexus from wide-area mosaics in healthy subjects and in type 2 diabetics.  
2016. ARVO 2016 Annual Meeting, Seattle, WA, May 1-5, 2016
136. Lohse, J.; Glesing, K.; Simon, C.; Adam, M.; Fischer, M.; Depner, A.; Kruse, A.; Franz, I.; Schultz, T.; Putze, F.; Schulze, T.; Mikut, R.; Doneit, W.; Engels, M. A.; Gaerte, P.; Bothe, D.; Ziegler, C.; Maucher, I.; Ricken, M.; Dimitrov, T.; Herzig, J.; Bernardin, K.; Gehrig, T.  
I-CARE: Ein Tablet-PC zur individuellen Aktivierung von Menschen mit Demenz im häuslichen Einsatz.  
2016. Leben und Altern - Funktionalität und Qualität : Gerontologie und Geriatrie Kongress 2016, Stuttgart, 7.-10.September 2016
137. Löwner, M. O.; Gröger, G.; Benner, J.; Biljecki, F.; Nagel, C.  
Proposal for a new LoD and multi-representation concept for CityGML.  
2016. 11th 3D Geoinfo Conference, Athinai, GR, October 20-21, 2016
138. Lutz, C.; Matthes, J.; Waibel, P.; Precht, U.; Garbev, K.; Beuchle, G.; Schweike, U.; Stemmermann, P.; Keller, H. B.  
Monitoring the drying and grinding process during production of celitement through a NIR-spectroscopy based approach.  
2016. 18th International Conference on Optics, Lasers and Spectroscopy (ICOLS 2016), Paris, F, September 26-27, 2016
139. Marquardt, C.; Bohmer, N.; Krug, H. F.; Kuehnel, D.; Paul, F.; Steinbach, C.; Nau, K.  
Supporting risk assessment of nanomaterials with quality - Approved information - DaNa literature criteria checklist.  
2016. Nanosafe 2016 Conference, Grenoble, F, November 7-10, 2016
140. Marquardt, C.; Bohmer, N.; Krug, H. F.; Kuehnel, D.; Paul, F.; Steinbach, C.; Nau, K.  
Supporting risk assessment of nanomaterials with quality - Approved information - DaNa literature criteria checklist.  
2016. 8th International Nanotoxicology Congress (nanoTOX 2016), Boston, MA, June 1-4, 2016
141. Marquardt, C.  
Nanopartikel - Gut oder bedenklich?  
2016. 25jähriges Jubiläum BUND Viernheim, VHS Viernheim, 21.Oktober 2016
142. Matthes, J.  
Grundlagen und Anwendungen strahlungsbasierter bildgebender Messtechnik in Hochtemperaturprozessen.  
2016. Hochschule Jena, 27.Mai 2016
143. Matthes, J.; Keller, S.; Schönecker, H.; Waibel, P.; Keller, H. B.  
Effizienzsteigerung von bestehenden Anlagen. Optimierung in der thermischen Abfallbehandlung durch den Einsatz von Infrarot-Kameratechnologien und dem INSPECT pro control System / Improving the efficiency of waste incineration processes. Optimization of thermal waste treatment based on infrared camera technologies and the INSPECT pro control system.  
2016. 28. VDI-/ITAD-Konferenz Thermische Abfallbehandlung 2016, Würzburg, 21.-22.September
144. Mayrhofer, M.; Gourain, V.; Reischl, M.; Affaticati, P.; Jenett, A.; Joly, J.-S.; Sieger, D.; Mione, M.  
Activation of YAP signaling is necessary for progression from Heterotopia to brain tumor.  
2016. 4th European Zebrafish Principal Investigator Meeting (EZPM), Lisboa, P, March 15-19, 2016
145. Mikut, R.  
Lastprognosen für das Fernwärmenetz der Stadt Karlsruhe.  
2016. Statuskolloquium der Forschungspartnerschaft Karlsruhe Energie, Karlsruhe, 23.November 2016
146. Mikut, R.  
Big Data : Perspektiven für Smart Grids und Smart Building.  
2016. 20.Dresdner Baustatik-Seminar, Dresden, 21.Oktober 2016
147. Mikut, R.; Hagenmeyer, V.  
Energy projects in KIT-IAI: Energy lab 2.0 and beyond.  
2016. Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung, Ilmenau, 2.Dezember 2016

148. Mikut, R.; Renkamp, N.; Gonzalez Ordiano, J. A.; Ludwig, N.; Schlagel, T.; Waczowicz, S.; Hagenmeyer, V.; Rink, M.; Iser, A.; Hitzel, J.  
Lastprognosen für das Fernwärmenetz der Stadt Karlsruhe.  
2016. Umwelt - Energie - Stadt : 4.Workshop der Stadt Karlsruhe mit den KIT-Zentren 'Klima und Umwelt' sowie 'Energie', Karlsruhe, 29.November 2016
149. Mikut, R.; Stegmaier, J.; Pylatiuk, C.; Reischl, M.  
Automated image analysis of in vivo processes in model organisms - Design of analysis pipelines, software, and applications.  
2016. 7th Annual Meeting of the EFOR Network, Gif-Sur-Yvette, F, March 7-8, 2016
150. Mühlpfordt, T.  
Stochastic optimal power flow - Problem formulation and solution.  
2016. Doktorandenworkshop der Initiative EnergieSystem 2050, Friedrichsdorf, 7.-8. Dezember 2016
151. Nau, K.; Bohmer, N.; Krug, H.; Kuehnel, D.; Marquardt, C.; Paul, F.; Steinbach, C.  
Nano inside and outside - Informing the public on safety aspects of nanomaterials - From experts to laypersons.  
2016. 8th International Nanotoxicology Congress (nanoTOX 2016), Boston, MA, June 1-4, 2016
152. Oyama, L. B.; Girdwood, S. E.; Cookson, A.; Fernandez-Fuentes, N.; Edwards, J. E.; Golyshin, P.; Golyshina, O.; Prive, F.; Mikut, R.; Hilpert, K.; Creevey, C. J.; Huws, S. A.  
Rumen derived antimicrobials as a solution to evolving and persistent clinical infections.  
2016. INRA-ROWETT 2016, Gut Microbiology Symposium, Clemont, F, June 20-23, 2016
153. Oyama, L. B.; Girdwood, S. E.; Cookson, A.; Fernandez-Fuentes, N.; Prive, F.; Edwards, J. E.; Golyshin, P.; Golyshina, O.; Mikut, R.; Hilpert, K.; Hess, M.; Creeveyand, C.; Huws, S. A.  
Anti-MRSA activity of novel antimicrobial peptides identified from cow metagenome.  
2016. New Antibacterial Discovery and Development : Gordon-Kenan Research Seminar, Lucca, I, March 12-13, 2016
154. Pylatiuk, C.; Stegmaier, J.; Marcato, D.; Spomer, W.; Pfriem, A.; Reischl, M.; Alshut, R.; Mikut, R.; Peravali, R.; Strähle, U.  
Automated feature detection and screening in zebrafish embryos.  
2016. Fish and Amphibian Embryos as Alternative Models in Toxicology and Teratology : An International Symposium and Workshop, Aulnay-sour-Bois, F, December 1-2, 2016
155. Rupp, R.; Schmalfuß, L.; Tuga, M.; Kogut, A.; Hewitt, M.; Eck, U.; Mikut, R.; Reischl, M.; Liebetanz, D.  
TELMYOS - A feasibility study of a telemetric wheelchair control interface based on the bilateral recording of myoelectric signals from ear muscles.  
2016. ASIA 2016 Annual Scientific Meeting, Philadelphia, PA, April 13-16, 2016
156. Scherer, K. P.; Germann, M.; Baumeister, J.; Furth, S.  
A knowledge based support for cataract surgery.  
2016. Mediterranean Conference for Academic Disciplines, Valletta, Malta, March 6-10, 2016
157. Scherer, K. P.; Germann, M.; Knoell, D.; Baumeister, J.; Furth, S.  
Wissensgenerierung durch Selbstlernen mit strukturierten Katarakt-Daten.  
2016. 57.Tagung der Österreichischen Ophthalmologischen Gesellschaft, Schladming, A, 5.-7.Mai 2016
158. Scherer, K. P.; Knoell, D.; Rieder, C.; Baumeister, J.; Furth, S.  
An knowledge based educational system for ophthalmic surgeons.  
2016. IJAS International Academic Conference, Venezia, I, June 28 - July 1, 2016
159. Scherrmann, A.; Gehrmann, H.-J.; Baumann, W.; Teuscher, N.; Hauser, M.; Seifert, H.; Stapf, D.; Paur, H.-R.; Matthes, J.; Waibel, P.; Vogelbacher, M.; Keller, H.  
Mitverbrennung von Biomasse in einer Kraftwerksstaubfeuerung im Pilotmaßstab.  
2016. 48. Kraftwerkstechnisches Kolloquium, 18.-19.10.16, Dresden
160. Schmidt, A.  
Graph storage considerations.  
2016. 3rd International Workshop on Large-scale Graph Storage and Management (GraphSM 2016), Lisboa, P, June 26-30, 2016

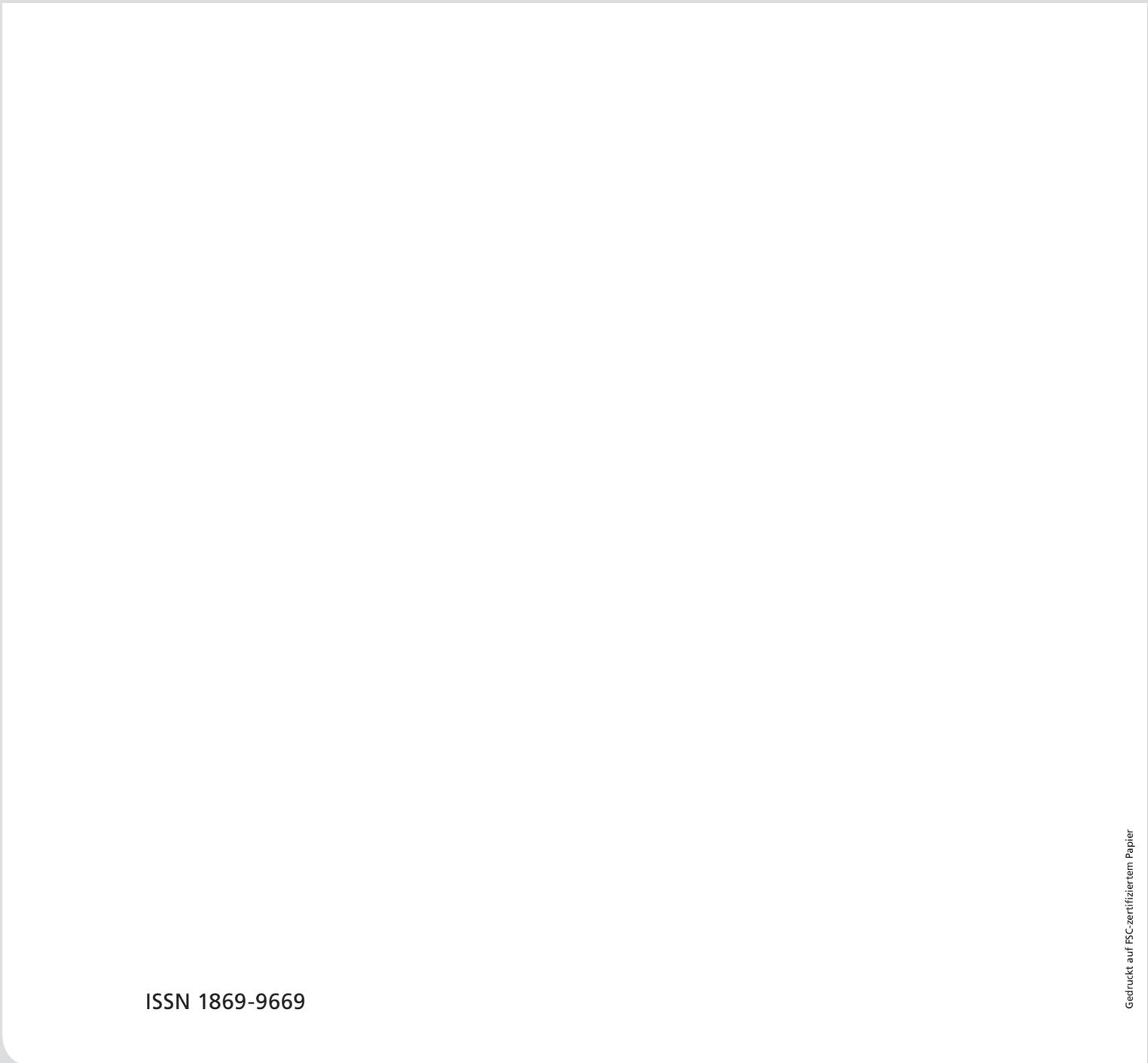
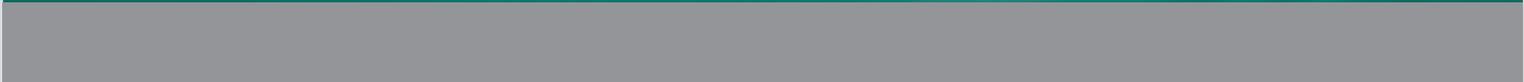
161. Schmidt, A.  
Semantic suggestions in information retrieval.  
2016. 8th International Conference on Advances in Databases, Knowledge, and Data Applications, DBKDA 2016, Lisbon, P, June 26-30, 2016
162. Schmidt, A.; Scholz, S.  
An introduction into statistical computing and natural language processing with R.  
2016. 8th International Conference on Advances in Databases, Knowledge, and Data Applications, DBKDA 2016, Lisbon, P, June 26-30, 2016
163. Schneider, O.  
How I learned to stop fixing code .. over and over again.  
2016. Rust Belt Rust Conference, Pittsburgh, PA, October 27-28, 2016
164. Scholz, S.  
Additive Manufacturing für Elektronik-Komponenten.  
2016. Von Losgröße 1 bis Serienfertigung – 3D Druck in Maschinenbau, Elektronik und Life Sciences, KIT-Business-Club, Karlsruhe, 16.November 2016
165. Scholz, S.  
Application driven advances in additive manufacturing.  
2016. 9th International Conference on Advances in Circuits, Electronics and Micro-electronics (CENICS 2016), Nice, F, July 24-28, 2016
166. Scholz, S. G.  
Industry 4.0.  
2016. 12th International Conference on Networking and Services (ICNS), Lisboa, P, June 26-30, 2016
167. Scholz, S. G.  
(Self)control of energy systems: Challenges and optimization.  
2016. 12th International Conference on Networking and Services (ICNS), Lisboa, P, June 26-30, 2016
168. Scholz, S. G.  
Society progress and quantum technology: Quo vadis?.  
2016. 9th International Conference on Advances in Circuits, Electronics and Micro-electronics (CENICS 2016), Nice, F, July 24-28, 2016
169. Scholz, S.; Nau, K.  
Novel nano inks for additive manufacturing. Establishing nano safety risk management concepts in 3D printing.  
2016. 8th International Nanotoxicology Congress (nanoTOX 2016), Boston, MA, June 1-4, 2016
170. Seifert, R.; Keller, H. B.  
Numerische Signalanalyse von Messdaten zur Brandfrüherkennung.  
2016. 3. Fachsymposium Hybrid Sensor Net, Karlsruhe, 01.07.2016
171. Seifert, R.; Keller, H. B.; Conrad, T.; Peter, J.  
Mobile sensor system for breath control: Thermo-cyclic operation and numerical signal analysis.  
2016. 16th International Meeting on Chemical Sensors (IMCS 2016), Jeju, Korea, July 10-13, 2016
172. Singhal, M.; Marchetti, A. G.; Faulwasser, T.; Bonvin, D.  
Real-time optimization based on adaptation of surrogate models.  
2016. 11th IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process Systems, Including Biosystems (DYCOPS-CAB 2016), Trondheim, N, June 6-8, 2016
173. Süß, W.; Stucky, K.-U.; Jakob, W.; Maaß, H.; Cakmak, H. K.  
Generic data services for the management of large-scale data applications.  
2016. European Conference on Computer Science (ECCS 2016), Roma, I, October 21-23, 2016
174. Ungerer, M.; Maurer, V.; Hofmann, A.; Gengenbach, U.  
Extrusion printing process for the manufacturing of electrodes on planar and curved substrates.  
2016. Internationale Fachmesse und Kongress für gedruckte Elektronik (LOPEC 2016), München, 5.-7.April 2016

175. Vogelbacher, M.; Waibel, P.; Matthes, J.; Keller, H. B.  
Bildbasierte Überwachung alternativer Brennstoffe eines Mehrstoffbrenners bei industriellen Verbrennungsprozessen.  
2016. Forum Bildverarbeitung, Karlsruhe, 1.-2.Dezember 2016
176. Vogelbacher, M.; Waibel, P.; Matthes, J.; Keller, H. B.  
Bildbasierte Überwachung und Optimierung der Verbrennung von alternativen Brennstoffen bei Mehrstoffbrennern.  
2016. 5. Jahrestagung des KIT-Zentrums Energie, Blick nach Vorne - Energiesystem 2050, Karlsruhe, 15.Juni 2016
177. Vogelbacher, M.; Waibel, P.; Matthes, J.; Keller, H. B.  
Image reprocessing for multi-fuel burner analysis and optimization.  
2016. European Conference on Computer Vision (ECCV), Amsterdam, NL, October 8-16, 2016
178. Wrang, D.; Faulwasser, T.; Billeter, J.; Amstutz, V.; Vrabel, H.; Battistel, A.; Girault, H.; Bonvin, D.  
Modeling and optimal control of a redox flow battery coupled with hydrogen generation.  
2016. 13th Symposium on Modeling and Experimental Validation of Fuel Cells, Batteries and Electrolysers (MODVAL 13), Lausanne, CH, March 22-23, 2016

## Poster und sonstige Publikationen

179. Braun, E.; Döpmeier, C.  
A new software architecture for a distributed, modular and scalable IT infrastructure of future power system control centers.  
2016. Doktorandenworkshop der Initiative EnergieSystem 2050, Friedrichsdorf, 7.-8. Dezember 2016
180. Braun, E.; Liu, J.; Döpmeier, C.; Stucky, K. U.  
A service oriented IT architecture and its core components for the Energiewende.  
2016. 5. Jahrestagung des KIT-Zentrums Energie, Blick nach Vorne - Energiesystem 2050, Karlsruhe, 15.Juni 2016
181. Gonzalez Ordiano, J. A.; Mikut, R.; Hagenmeyer, V.  
New data-driven probabilistic forecasting methods.  
2016. Doktorandenworkshop der Initiative EnergieSystem 2050, Friedrichsdorf, 7.-8. Dezember 2016
182. Gonzalez Ordiano, J. A.; Waczowicz, S.; Reischl, M.; Mikut, R.; Hagenmeyer, V.  
Data-driven photovoltaic power forecasting.  
2016. 5. Jahrestagung des KIT-Zentrums Energie, Blick nach Vorne - Energiesystem 2050, Karlsruhe, 15.Juni 2016
183. Isele, J.  
SESCL - Smart Energy System Control Laboratory.  
2016. 5. Jahrestagung des KIT-Zentrums Energie, Blick nach Vorne - Energiesystem 2050, Karlsruhe, 15.Juni 2016
184. Jumar, R.  
Identification of electrical simulation models based on measurements in live systems.  
2016. Doktorandenworkshop der Initiative EnergieSystem 2050, Friedrichsdorf, 7.-8. Dezember 2016
185. Liu, J.; Döpmeier, C.  
Basic concepts of the energy system 2050 co-simulation platform.  
2016. Doktorandenworkshop der Initiative EnergieSystem 2050, Friedrichsdorf, 7.-8. Dezember 2016
186. Marquardt, C.; Krug, H. F.; Kuehnel, D.; Paul, F.; Steinbach, C.; Nau, K.  
The DaNa2.0 knowledge base nanomaterials - Quality approved and easy-to-understand information on current nanosafety research.  
2016. 82.Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für experimentelle und klinische Pharmakologie und Toxikologie (DGPT) und 18.Jahrestagung der Klinischen Pharmakologie (VKliPha) in Zusammenarbeit mit der AGAH, Berlin, 20.Februar - 3.März 2016
187. Schott, B.; Stegmaier, J.; Arbaud, A.; Reischl, M.; Mikut, R.; Levi, F.  
Robust model for biosignal-based personalisation of cancer chronotherapy.  
2016. Summer UK Clock Club, Warwick, GB, July 4, 2016
188. Stegmaier, J.; Mikut, R.  
Enhancing image analysis pipelines with uncertainty treatment.  
2016. Imaging and Feature Recognition meet Computer Vision : Helmholtz Networking Workshop, Leipzig, September 20-21, 2016
189. Süß, W.; Schumilin, A.; Braun, E.; Stucky, K.-U.  
Data management services for Energy Lab 2.0.  
2016. Programmtreffen Supercomputing and Big Data der Helmholtz-Gemeinschaft, Karlsruhe, 30.Juni - 1.Juli 2016





ISSN 1869-9669