



Vorlauftforschung 2018

Schriftenreihe

Hrsg.: Der Präsident der TH Nürnberg, Prof. Dr. Michael Braun





Vorlauftforschung
der TH Nürnberg
2018

Vorlaufforschung

Editorial

Prof. Dr. Ralph Blum
Vizepräsident für angewandte Forschung und Entwicklung

Berichte zur Vorlaufforschung

Die Vorlaufforschung an der TH Nürnberg ist ein Erfolgskonzept, das bei den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern unserer Hochschule weiterhin auf sehr positive Resonanz stößt.



Bereits 2013 wurde das eigeninitiierte Projekt „Vorlaufforschung“ als Initiative der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm gegründet. Unser Ziel war und ist es, Institute, Kompetenzzentren sowie forschungsaktive Professorinnen und Professoren auf dem Weg von der Idee zum förderfähigen Konzept zu unterstützen. Dabei leistet die TH Nürnberg eine Anschubfinanzierung für die Erarbeitung wissenschaftlicher Forschungs- und Entwicklungsanträge – eine wichtige Voraussetzung für das anschließende Einwerben von Drittmittel aus der Industrie, von Stiftungen oder im Rahmen staatlicher Forschungsprogramme.

Eine interdisziplinär zusammengesetzte Gruppe von Gutachterinnen und Gutachtern, bestehend aus Mitgliedern des Sachverständigenausschusses für Wissens- und Technologietransfer sowie weiteren Professorinnen und Professoren aus allen Fach- und Forschungseinrichtungen der TH Nürnberg, wählt die zu fördernden Projekte aus. Die Ausschreibung ist themenoffen, die thematische Vielfalt der eingereichten Anträge ist beeindruckend und zeigt das enorme FuE-Potential der TH Nürnberg und das große Engagement unserer Professorinnen und Professoren, aktiv Forschung und Entwicklung zu betreiben. Insgesamt wurden 22 Anträge aus beinahe allen Fakultäten, Instituten und Kompetenzzentren der TH Nürnberg mit einem Antragsvolumen von 612.550 Euro eingereicht.

Im Zuge des Projekts Vorlaufforschung konnte die TH Nürnberg im Jahr 2018 elf Forschungsprojekte mit einer Summe von 300.181 € fördern, die ein hohes Maß an Innovations- und Entwicklungspotenzial aufweisen und nachhaltig die Bedeutung des Forschungsstandpunkts der Metropolregion Nürnberg festigen.

Inzwischen haben sich aus einigen der hier vorgestellten Projekten eine Reihe von Folgeprojekten ergeben, die durch Drittmittel finanziert werden. Unter anderem wird das Projekt „Osteo-TrainSim“ der Vorlaufforschung zur Vorbeugung von Osteoporose durch mechanisch stimuliertes Knochenwachstum mittlerweile weitergeführt und durch die STAEDTLER Stiftung gefördert. Die Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V. stellt Fördergelder für das Projekt „Spraymodel für direkteinspritzende Ottomotoren“ bereit, ein Folgeprojekt der Vorlaufforschung zu IoT und Big Data in der Motorenentwicklung.

Die Vorlaufforschung ist ein zentraler Baustein in der Forschungsstrategie der Technischen Hochschule Nürnberg und wird deshalb auch in den Jahren 2019 und 2020 fortgeführt.

Lassen Sie sich gerne von den folgenden Beiträgen inspirieren!

Prof. Dr. Ralph Blum
Vizepräsident für angewandte Forschung und Entwicklung

Inhalt

Vorlauftforschung der TH Nürnberg 2018

Berichte zur Vorlauftforschung 5

Prof. Dr. Ralph Blum

Vizepräsident für angewandte Forschung und Entwicklung, TH Nürnberg

Personalisierte, optimierte Therapie – Machine Learning und Leistungsverfolgung im Kontext der Demenzprävention 10

Prof. Dr. Jürgen Bäsig

Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik, TH Nürnberg

Michael Jank, M. Eng.

Universitätsklinikum Erlangen

IoT and Big Data in der Motorenentwicklung – Entwicklung einer Schnittstelle am Motorprüfstand zum Datenstreaming und zur -reduktion mittels Online Analyse 18

Prof. Dr.-Ing. Georgios Bikas, Peter Weigand, M. Eng., Patrick Rambacher, M. Eng.

Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik, TH Nürnberg

Gender und Kulturelle Diversität in Software Engineering als Grundlage erfolgreicher Digitalisierung – Eine Untersuchung mit Hilfe von Sentiment Analysis 30
DIVERSENTA

Prof. Dr. Patricia Brockmann

Fakultät Informatik, TH Nürnberg

Nachhaltigkeitstransformation – Explorative Fallstudie zu den Wirkungen des CSR-Richtlinie-Umsetzungsgesetz 40

Prof. Dr. Frank Ebinger, Sebastian Fuchs, M. A., M. Sc.

Nuremberg Campus of Technology, Fakultät Betriebswirtschaft, TH Nürnberg

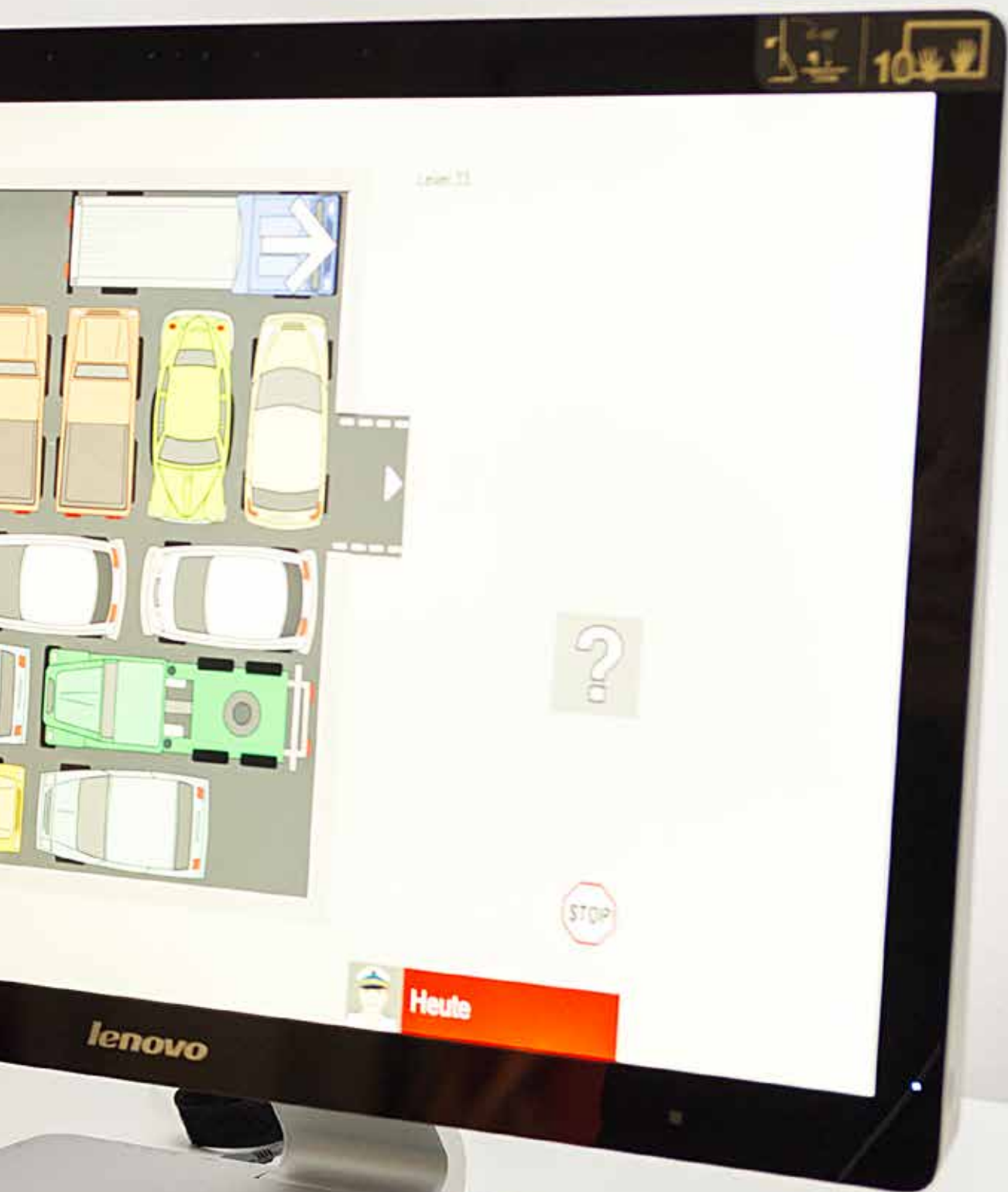
BrioLens – Innovatives Brillouin-Spektrometer für die optische in-vivo-Diagnostik der menschlichen Hornhaut und Augenlinse 52

Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Engelbrecht, Dr.-Ing. Roman Kruglov

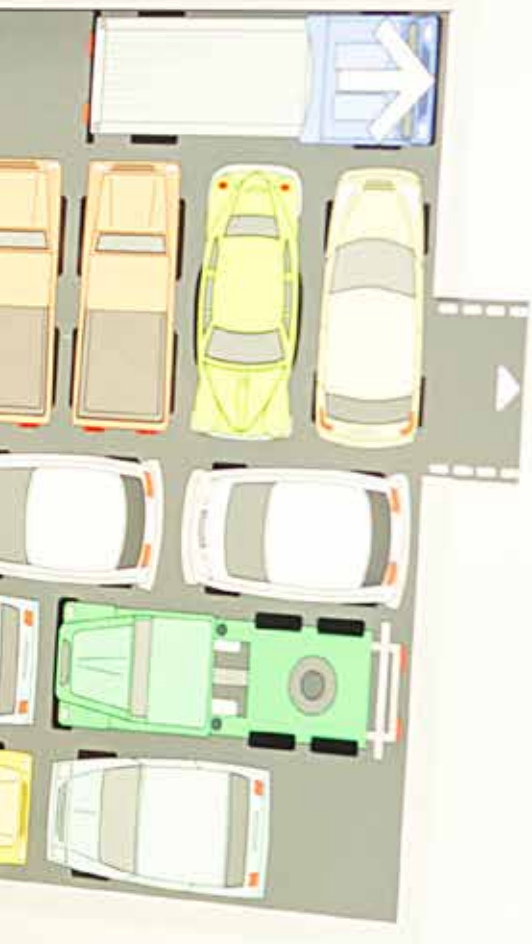
Institut für Anwendungen optischer Polymerfasern (POF-AC), TH Nürnberg

Superstau





Level 11



Heute

lenovo





Personalisierte, optimierte Therapie – Machine Learning und Leistungsverfolgung im Kontext der Demenzprävention

Prof. Dr. Jürgen Bäsig
Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik
TH Nürnberg
Michael Jank, M. Eng.
Universitätsklinikum Erlangen
Zentrum für Medizinische Versorgungsforschung
Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik
TH Nürnberg

Das Ziel des Projektes ist es, ein einfach anzuwendendes digitales Kognitionstraining für leicht kognitiv Beeinträchtigte (LKB) zu entwickeln. Das Training wird durch spielerische kognitive Übungen realisiert. Es werden lernende Systeme eingesetzt, die basierend auf psychometrischen Eingangstests und bearbeiteten Übungen die individuelle Leistungsgrenze ermitteln und die Übungen den Fähigkeiten entsprechend anpassen. Durch diese personalisierte Förderung wird der Therapieeffekt gesteigert. Das Projekt zielt auf die Förderung von zuhause lebenden Personen mit LKB. Mit der zu entwickelnden Anwendung sollen kognitive Fähigkeiten erhalten werden. Das Ziel ist es, den Übertritt zur Demenz spürbar zu verzögern und somit die Übertrittsrate insgesamt zu reduzieren. Dies kann einen signifikanten Beitrag zur nicht-pharmakologischen Demenzprävention leisten.

Wesentliche Projektziele

1. Projektdaten

Fördersumme	15.360,61 Euro
Laufzeit	Februar bis Dezember 2018
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik / Genesis
Projektleitung	Prof. Dr. Jürgen Bäsig
Kontaktdaten	E-Mail: juergen.baesig@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

In einer alternden Gesellschaft und einer zugleich steigenden Lebenserwartung nimmt die Zahl der unter kognitiven Einschränkungen leidenden Personen stetig zu. Die Ausprägungen reichen dabei von leichter kognitiver Beeinträchtigung (LKB, engl. MCI) bis zu schwerer Demenz [1]. Die LKB geht häufig einer Demenz voraus und gilt bei der Alzheimerkrankheit als Prädemenzstadium [2, 3]. Im Vergleich zur nicht betroffenen Bevölkerung weisen die Personen mit LKB-Befund eine 2- bis 4,6-fache jährliche Konversionsrate zur Demenz auf. Innerhalb von vier Jahren nach dem LKB-Befund wird bei 80 Prozent der Betroffenen Demenz diagnostiziert [2]. Leicht kognitiv Beeinträchtigte zeigen Schwächen in mindestens einem kognitiven Bereich auf, sind jedoch in der Lage, ihren Alltag zu bewältigen. Ein LKB-Befund bedingt in der Regel keinen Pflegebedarf bzw. Pflegegrad [4].

In der primären Prävention des Demenzsyndroms gibt es derzeit keine breit zugängliche pharmakologische Therapie deren langfristige Wirksamkeit belegt ist [5, 6]. Studien zeigen, dass individuelle Verhaltensweisen das Demenzrisiko in begrenztem Umfang reduzieren können. Motorische oder kognitive Aktivierungen im Alltag schwächen den Demenzverlauf ab. Kognitive Aktivierungen im Alltag werden in der Demenzprävention bisher generell zu wenig berücksichtigt und nicht effektiv eingesetzt, da auf die individuellen Fähigkeiten nicht Rücksicht genommen wird. [7–10]

MAKS ist eine Mehrkomponententherapie für Demenzkranke, mit den Komponenten: Motorik, Alltagspraktik, Kognition und Sozial. Eine aktuelle Studie zur MAKS-Therapie untersuchte deren Wirksamkeit in Tagespflegeeinrichtungen. Die DeTaMAKS (Demenz-Tagespflege-MAKS) - Studie [11] schloss eine Personengruppe von leicht kognitiv Beeinträchtigten ein, die über einen Zeitraum von sechs Monaten therapiert wurde. Die Subgruppenanalyse für LKB, zeigte eine Abnahme von 0,36 (SD: 3,12) MMSE-Punkten der Interventionsgruppe und damit einen deutlich geringeren Abbau der kognitiven Fähigkeiten als in der Kontrollgruppe (Δ MMSE: 1,45; SD: 4,38; Cohen's d: 0,29; p: 0,195) [12]. Die Mini-Mental-Status-Examination (MMSE) ist ein Maßstab für die kognitiven Fähigkeiten mit geringer Sensitivität. MMSE-Ergebnisse von 30-24 Punkten bezeichnen keine oder nur eine leichte kognitive Beeinträchtigung, <24 Punkte bezeichnen Demenzausprägungen. Im Rahmen der DeTaMAKS-Studie wurde die Software MAKS-m eingesetzt, die auf dem genesis-Projekt beruht und digitale kognitive Übungen bietet. Die MAKS-m Software bildet die Basis der in diesem Projekt zu entwickelnden Software.

Zur Akzeptanz neuer Technologien, speziell Tablet-PCs, bei Demenzkranken in Pflegeheimen führte die Charité eine Pilotstudie [13] durch. Diese kam zu dem Ergebnis, dass Tablet-PCs eine hohe Akzeptanz bei den Heimbewohnern haben und das Sozialverhalten positiv beeinflussen. Bei der Bewertung der kognitiven Fähigkeiten im Studienverlauf wurde eine Verschlechterung um 1,36 MMSE-Punkte nach bereits drei Monaten verzeichnet. Derzeit wird von Charité, TU Berlin und den Domizil Seniorenresidenzen die „PflegeTab“-Studie durchgeführt, die eine positive Auswirkung von Pflege-Tablet-PCs auf die Lebensqualität von Pflegeheimbewohnerinnen und -bewohnern untersucht. „PflegeTab“ verfolgt keinen therapeutischen Ansatz. [14]

Lernende Systeme wurden für die Kategorisierung von kognitiven Einschränkungen, sowohl nach Schwere als auch nach Krankheitstyp, erprobt. Dabei erzielten diese hohen Genauigkeiten bei der Differenzierung [15–17]. Der Einsatz von lernenden Systemen, die den Fähigkeitsverlauf überwachen oder Schwierigkeitsgrade modellieren, wurde im Kontext der kognitiven Fähigkeiten noch nicht evaluiert. Machine Learning Methoden sind bei der Lernfortschrittsverfolgung in intelligenten Lehrsystemen verbreitet.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Ziel dieses Projektes ist es, mit einer Therapiesoftware den kognitiven Status und die Selbständigkeit der Betroffenen zu erhalten. Da es sich bei LKB zum Teil um Frühstadien neurodegenerativer Erkrankungen handelt, ist bereits der Erhalt der Fähigkeiten positiv zu bewerten [3]. Eine Steigerung der kognitiven Fähigkeiten ist möglich [18]. Die Therapiesoftware soll durch den Einsatz lernender Systeme den Therapieerfolg maximieren und so eine Verbesserung ermöglichen.

Das entstehende Programm zielt darauf ab, das kognitive Niveau der Benutzerinnen und Benutzer zu verfolgen und darauf aufbauend die Schwierigkeitsgrade der Übungen anzupassen. Der Verlauf der kognitiven Fähigkeiten soll durch Methoden der Lernfortschrittsverfolgung das Nutzungsverhalten bei der Durchführung der Übungen und psychometrischen Tests analysiert und bewertet werden. Es ist geplant, zur Generierung der Schwierigkeitsgrade ein Modell der Nutzerin oder des Nutzers einzusetzen. Durch die dynamische Anpassung wird für die Nutzerin oder den Nutzer ein individueller Schwierigkeitsverlauf erzeugt, der dessen Lösungsstrategie und

eventuelle Kompensationen einzelner kognitiver Defizite einbezieht. Der Fokus liegt darauf, die Anwenderin bzw. den Anwender damit an der individuellen Leistungsgrenze zu fordern und zu fördern und so eine Steigerung der Wirksamkeit der Therapie zu erreichen. Die zu entwickelnde Software wird für den Heimgebrauch konzipiert, Zielplattformen sind PC und Tablet. Die Nutzung wird möglichst einfach und intuitiv gestaltet, um die Lernanforderung für den Einstieg gering zu halten und das kognitive Training ohne Betreuung durchzuführen.

Die individuelle Therapie soll zunächst mit einer Pilotstudie evaluiert werden, primäre Ergebnisparameter sind

- Umsetzbarkeit
- Akzeptanz
- Adhärenz
- Hinweise auf die Wirksamkeit

Die Studie soll mit 30 leicht kognitiv Beeinträchtigten über einen Zeitraum von sechs Monaten durchgeführt werden. Mittels eines psychometrischen Testes sollen die kognitiven Fähigkeiten zu Beginn und Ende auf dem Tablet ermittelt werden. Akzeptanz und Adhärenz werden durch Befragungen und Nutzungsanalysen erfasst. Ziel der Therapie ist es, kognitive Fähigkeiten und Selbstständigkeit zu erhalten und so den Übertritt zur Demenz und damit den Pflegebedarf hinaus zu zögern. Ebenso wird die Belastung für Angehörige und Pflegeeinrichtungen verzögert.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Das Projekt wurde in Zusammenarbeit mit dem Langzeitprojekt genesis der TH Nürnberg durchgeführt. Zur Entwicklung der Therapiesoftware wurde das genesis-Framework eingesetzt. Weiterer Kooperationspartner ist das Zentrum für Medizinische Versorgungsforschung (ZMV) am Universitätsklinikum Erlangen. Seitens des ZMV wurden psychometrische und psychologische Inhalte betreut.

Zur Abbildung des kognitiven Fähigkeitsniveaus hat das Forschungsteam ein psychometrisches Konzept entwickelt. Das primäre Ziel des Konzepts ist, die Sensitivität für kognitive Einbußen zu Beginn einer Demenz zu erreichen. Die Basis bilden die basalkognitiven Fähigkeiten, Informationsverarbeitungsgeschwindigkeit und Gedächtnisspanne sowie das Kurzzeitgedächtnis als demenzspezifische Größe. Die kognitive Leistungsfähigkeit wird auf mehreren Verarbeitungsstufen ermittelt. Für die Erfassung der kognitiven Fähigkeiten wurden psychometrische Tests aus etablierten Testbatterien digitalisiert. Die Ermittlung des Fähigkeitsniveaus erfolgt bei der ersten Benutzung und in monatlichen Verlaufsuntersuchungen. Eine Normierung ist aufgrund der benötigten Probandenzahl zunächst nicht beabsichtigt. In der Pilotstudie sollen die kognitiven Leistungen durch evaluierte Testbatterien festgestellt werden.

Für die Umsetzung des Trainings wurden die existierenden Übungen des genesis-Projekts gesichtet. Geeignete Übungen wurden adaptiert und auf das Fähigkeitsniveau von LKB angepasst. Zudem wurden mehrere kognitive Übungen neu implementiert.

Die Anwendung lernender Systeme bedingt die Aufzeichnung der Ergebnisse von psychometrischen Tests und der Übungen. Dazu wurde das bestehende genesis-System angepasst und Schnittstellen zur Einbindung der

Systeme geschaffen. Recherchen zur Lernfortschrittsverfolgung und zu dynamischer Modellierung von Personen mit kognitiven Beeinträchtigungen werden durchgeführt.



Abbildung 1: Senioren beim Lösen einer kognitiven Aufgabe zur Wahrnehmung aus MAK5-m.; Foto: Stefan Minx

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Bereits im zweiten Quartal 2018 konnten mit dem Universitätsklinikum Erlangen Drittmittel von privaten Stiftungen eingeworben werden. Die Finanzierung des Projektes ist bis zum Ende des Jahres 2019 sichergestellt. Aufgrund dieser frühzeitigen Förderzusagen wurde der Fokus auf die Datengewinnung und damit eine funktionsfähige Software ohne maschinelles Lernen gesetzt.

Für das erste Quartal 2019 sind eine Usability-Untersuchung und eine Datengewinnungsstudie geplant. Die Probanden werden in Zusammenarbeit mit Gedächtnissprechstunden akquiriert. Im zweiten und dritten Quartal werden iterative Entwicklungsschritte durchgeführt und mit Testpersonen untersucht. Die Einbindung der lernenden Systeme ist für das dritte Quartal 2019 geplant. Der Beginn der sechsmonatigen Pilotstudie ist für das vierte Quartal 2019 vorgesehen. Im Zuge des Forschungsprojektes wird eine kooperative Promotion angestrebt.

6. Literaturverzeichnis

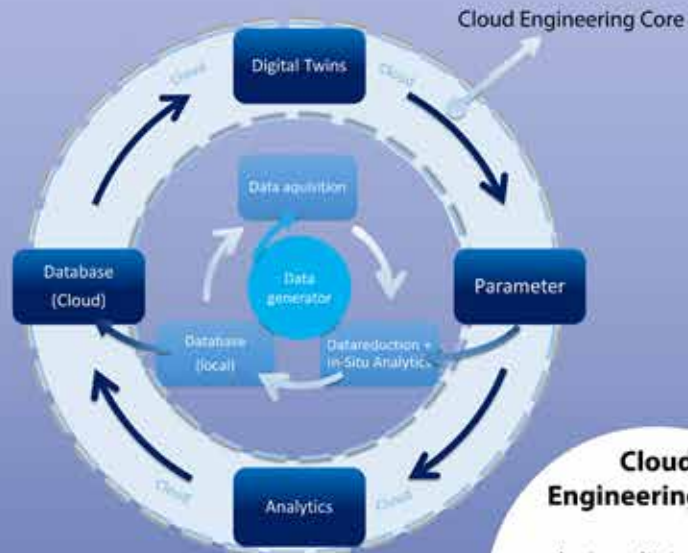
- [1] RIEDEL-HELLER, Steffi G. ; KÖNIG, Hans-Helmut: Häufigkeit und Kosten von kognitiven Störungen in Deutschland. In: Psychiatrische Praxis 38 (2011), Nr. 7, S. 317–319
- [2] KURZ, A. ; DIEHL, J. ; RIEMENSCHNEIDER, M. ; PERNECZKY, R. ; LAUTENSCHLAGER, N.: Leichte kognitive Störung. Fragen zur Definition, Diagnose, Prognose und Therapie. In: Der Nervenarzt 75 (2004), Nr. 1, S. 6–15

- [3] JESSEN, F. ; DODEL, R.: Prädiktion der Alzheimer-Demenz. In: Der Nervenarzt 85 (2014), Nr. 10, S. 1233–1237
- [4] DIMDI - ICD-10-GM Version 2017. URL <https://www.dimdi.de/static/de/klassi/icd-10-gm/kodesuche/onlinefassungen/htmlgm2017/block-f00-f09.htm>. – Aktualisierungsdatum: 2017-08-15 – Überprüfungsdatum 2017-08-17
- [5] KRAFT, J. W.: Medikamentöse Therapie demenzieller Erkrankungen. In: Der Internist 58 (2017), Nr. 2, S. 117–124
- [6] BULLOCK, Roger: Drug treatment in dementia. In: Current Opinion in Psychiatry 14 (2001), Nr. 4. URL http://journals.lww.com/co-psychiatry/Fulltext/2001/07000/Drug_treatment_in_dementia.19.aspx
- [7] HESER, Kathrin ; WAGNER, Michael ; WIESE, Birgitt ; PROKEIN, Jana ; ERNST, Annette ; KÖNIG, Hans-Helmut ; BRETTSCHEIDER, Christian ; RIEDEL-HELLER, Steffi G. ; LUPPA, Melanie ; WEYERER, Siegfried ; EIFFLAENDER-GORFER, Sandra ; BICKEL, Horst ; MÖSCH, Edelgard ; PENTZEK, Michael ; FUCHS, Angela ; MAIER, Wolfgang ; SCHERER, Martin ; EISELE, Marion: Associations between Dementia Outcomes and Depressive Symptoms, Leisure Activities, and Social Support. In: Dementia and geriatric cognitive disorders extra 4 (2014), Nr. 3, S. 481–493
- [8] GUURE, Chris B. ; IBRAHIM, Noor A. ; ADAM, Mohd B. ; SAID, Salmiah Md: Impact of Physical Activity on Cognitive Decline, Dementia, and Its Subtypes : Meta-Analysis of Prospective Studies. In: BioMed research international 2017 (2017), S. 9016924
- [9] CHENG, Sheung-Tak: Cognitive Reserve and the Prevention of Dementia: The Role of Physical and Cognitive Activities. In: Current psychiatry reports 18 (2016), Nr. 9, S. 85
- [10] VERGHESE, Joe ; LIPTON, Richard B. ; KATZ, Mindy J. ; HALL, Charles B. ; DERBY, Carol A. ; KUSLANSKY, Gail ; AMBROSE, Anne F. ; SLIWINSKI, Martin ; BUSCHKE, Herman: Leisure activities and the risk of dementia in the elderly. In: The New England journal of medicine 348 (2003), Nr. 25, S. 2508–2516
- [11] BEHRNDT, Elisa-Marie ; STRAUBMEIER, Melanie ; SEIDL, Hildegard ; BOOK, Stephanie ; GRAESSEL, Elmar ; LUTTENBERGER, Katharina: The German day-care study : Multicomponent non-drug therapy for people with cognitive impairment in day-care centres supplemented with caregiver counselling (DeTaMAKS) - study protocol of a cluster-randomised controlled trial. In: BMC health services research 17 (2017), Nr. 1, S. 492
- [12] STRAUBMEIER, Melanie ; BEHRNDT, Elisa-Marie ; SEIDL, Hildegard ; ÖZBE, Dominik ; LUTTENBERGER, Katharina ; GRAES



IFZN

Institut für Fahrzeugtechnik
Nürnberg



Testb...
combusti
generating hi
low-frequ

Hardware
with dSpace

Cloud Engineering Core
analytics, digital twins & co-simulation, big data machine learning, conceptual design, cloud data storage

Illo
Industrial I
Thi

Datalake
Teststand Dataserver (TDS) as local cloud solution (intranet) or as web based cloud platform



<https://www.wired.com/2019/01/superdata-the-virtual-city/>



<https://www.gettyimages.com/detail/stock-photo/1114305342/stock-photo>





Test bench

on engine
high-, mid- and
frequency data

in the Loop
the RTI System



<http://www.dspace.com>

Data Acquisition

dSpace Microautobox II
and dSpace Rapid Pro
highfrequency massflow
measuring via 3D-printed
massflow probes

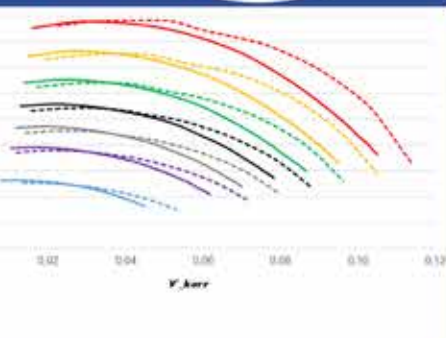
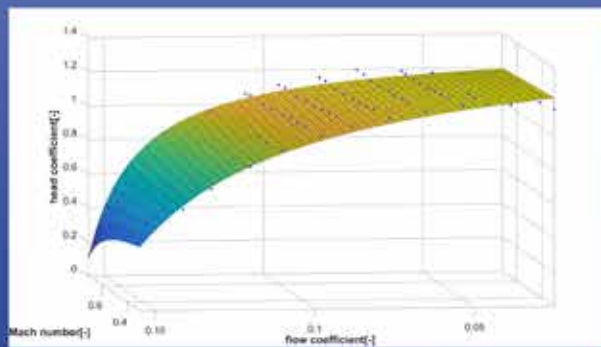


DT

Internet of
things

Data Reduction

In-Memory & In-Situ
analytics for data reduction,
Digital Twins, Dockers,
machine learning,





IIoT and Big Data in der Motorenentwicklung – Entwicklung einer Schnittstelle am Motorprüfstand zum Datenstreaming und zur -reduktion mittels Online Analyse

Prof. Dr.-Ing. Georgios Bikas
 Peter Weigand, M. Eng.
 Patrick Rambacher, M. Eng.
 Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik
 TH Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Geplant ist, eine Datenschnittstelle zwischen Motorenprüfstand und IoT-Plattform zu schaffen, um einen sog. „Digitalen Zwilling“ des Motors zu produzieren. Das Ziel ist es ein besseres Verständnis der physikalischen Zusammenhänge zu erreichen. Dadurch wird eine schnellere Weiterentwicklung der Technologie realisiert. Datenstreaming und physikalisch basierte Modelle ermöglichen gleichzeitig eine Überwachung und eine Plausibilitätsüberprüfung von Motorprozessdaten in Echtzeit. Das Forschungsprojekt zielt darauf ab, teure Wiederholungsmessungen zu vermeiden und die Informationsdichte zu erhöhen. So bietet sich die Grundlage für eine offene Entwicklungsumgebung für Modellierungen, Steuerungs- und Regelungsalgorithmen sowie Online- und Offlineanalysen mit oder ohne Preprocessing.

1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2018
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik / Institut für Fahrzeugtechnik Nürnberg
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Georgios Bikas
Kontaktdaten	E-Mail: georgios.bikas@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Internet of Things kurz IoT ist eine disruptive Technologie, die automatisiert relevante Informationen von vernetzten Gegenständen (Things) aus der realen Welt erfasst, miteinander verknüpft und in der Cloud verfügbar macht. Der Trend des IoT hat sich in Bereichen etabliert, in denen in Echtzeit riesige Datenmengen bewältigt werden müssen. Die Herausforderung der enormen Geschwindigkeit von Datenerfassung und -speicherung sowie des damit einhergehenden immensen Datenvolumens hat den Begriff Big Data geprägt.

Als Beispiele sind soziale Netzwerke im Internet als auch industrielle Anwendungen zu nennen. Das bekannteste Beispiel industrieller IoT-Anwendungen ist die von General Electrics entwickelte Software Predix™.

Ähnlich riesige Mengen von Messdaten (Big Data) werden in Versuchsreihen auf Motorenprüfständen erfasst und in Dateien gespeichert. Solche Dateien werden von verschiedenen Messsystemen erzeugt, die die aufgenommenen Informationen in unterschiedlichen Dateiformaten speichern. Die Fülle von Dateiformaten stellt eine Herausforderung dar, wenn Datenanalyse, Berichterstellung, Visualisierung oder ähnliche Arbeitsschritte erfolgen sollen, die es erforderlich machen, die Datendateien in unterschiedliche Formate zu konvertieren. Wenn man von x Dateiformaten und y Werkzeugen ausgeht (x und y entsprechen der jeweiligen Anzahl), bewegt sich die Kom-

plexität des Problems in der Größenordnung x mal y . Hinzu kommt die Tatsache, dass nur ein kleiner Bruchteil der in Datenbanken gespeicherten Dateien in einer Offline Analyse weiterverarbeitet wird. Das führt zu einem enormen Informationsverlust und oft zur Wiederholung von extrem teuren Motorenversuchsreihen. Nach Einschätzung von National Instruments werden nur 5% aller Daten analysiert (Stand 2017: <http://www.ni.com/de-de/innovations/big-analog-data.html>).

Vergleichbare Erfahrungen teilen wir am Institut für Fahrzeugtechnik IFZN, im Betrieb eines Forschungsmotors auf einem AVL-Prüfstand (Abbildung 1). Gesteuert wird der Forschungsmotor über das AVL-Programm PUMA. Während des Motorbetriebs werden „schnelle“ und „langsame“ Daten erfasst. Der Fokus in unserem Vorhaben liegt in den „schnellen“ Daten, deren Menge exorbitant hoch ist. Bei einer Motordrehzahl von zum Beispiel 3000 U/min werden 50 Motorzyklen pro Sekunde vermessen. Jeder Zyklus (360° Kurbelwinkel) wird mit einer zeitlichen Auflösung von einem $0,1^\circ$ Kurbelwinkel erfasst. In der Regel werden Motordaten von 200 hintereinander folgenden Zyklen aufgenommen und in einer Datei gespeichert. AVL speichert diese in speziellen I-Files, die das Forschungsteam in der Regel später in einer Offline Analyse verarbeitet.

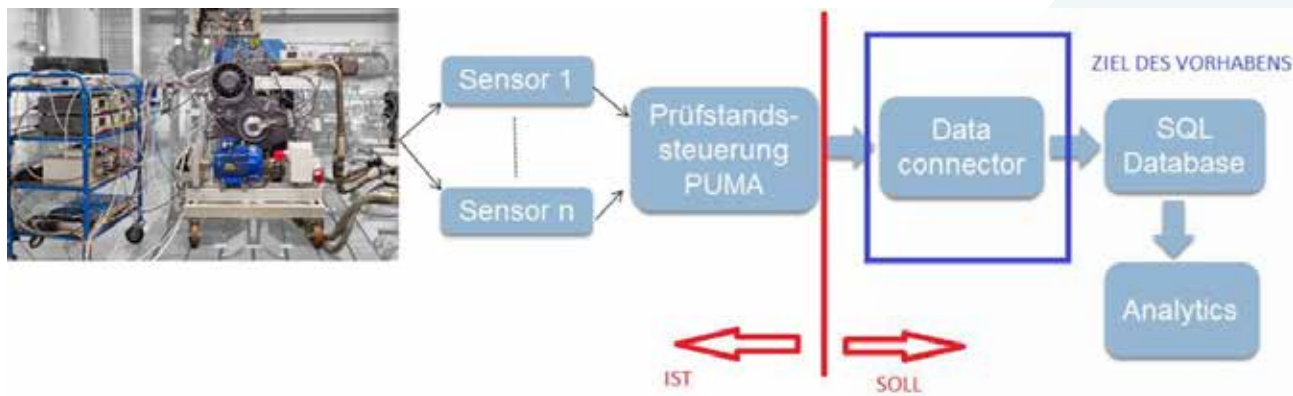


Abbildung 1: Motorprüfstand am IFZN und Kette der Datenerfassung. Rote Schnittstelle trennt den „IST“ zum „SOLL“ Zustand. Blaue Box kreist das Ziel des Vorhabens ein. Foto und Grafik: Labor für Verbrennungskraftmaschinen

An diesem Versuchsaufbau werden – wie auch in der Industrie – immer wieder Wiederholungsmessungen gefahren, weil oftmals Unklarheit bezüglich folgender Aspekte besteht:

- Vorhandensein der Daten
- Validität der vorhandenen Daten
- Gegebene Rahmenbedingungen wie z.B. Umgebungsparameter (Temperatur, Druck, Luftfeuchtigkeit etc.)
- Vergleichbarkeit der Daten
- Dokumentation der Prüfparameter

Vor diesem Hintergrund besteht der Wunsch nach einem robusten Werkzeug, das all diese Punkte verlässlich sicherstellt und die Bedienerin und den Bediener unterstützt.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Das Ziel des Vorhabens ist es, einen sog. Data Connector zu entwickeln, der die erfassten Daten in Form eines Datastreamings direkt in eine open-source-Datenbank weiterleitet. Das Projekt zielt darauf ab, sämtliche erfasste

Daten durch die vom Forschungsteam entwickelten Algorithmen in-situ zu analysieren und zu reduzieren, weil die riesige Datenmenge nicht gespeichert werden kann. Daraus resultiert eine sinnvolle Untermenge von Roh- und aufbereiteten Daten, die anschließend in einer Datenbank (z.B. MySQL) zwecks Weiterverarbeitung und komplexer Analyse gespeichert werden (Abbildung 2). Dadurch wird das erwünschte Datastreaming vom Prüfstand zur Online Datenauswertung sichergestellt. Im nächsten Schritt können die Daten im open-Source-Connector (z.B. Apache Spark) auf Plausibilität geprüft werden und anhand von Qualitätskriterien entweder online analysiert und zur Weiterverarbeitung gespeichert oder nicht berücksichtigt werden.

Dieser Ansatz ermöglicht einen direkten und sinnvollen Eingriff in den Messablauf.

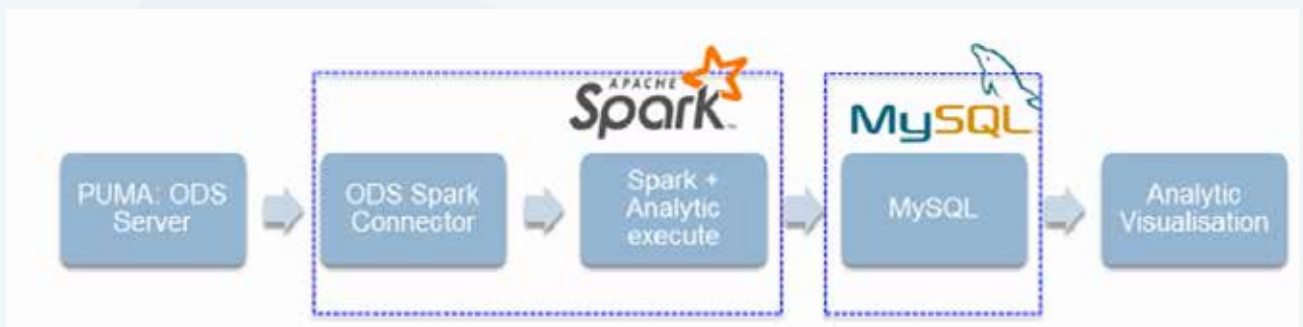


Abbildung 2: Arbeitsschritte für Data Connector und Datenstreaming zum Beispiel mit Apache Spark. Dort werden eigenentwickelte Algorithmen zur Datenanalyse aufgerufen. Grafik: Labor für Verbrennungskraftmaschinen

Um diese „Vorfilterung“ der erfassten Daten zu gewährleisten, ist die genannte in-situ-Analyse und der Abgleich zu bestehenden Daten unumgänglich. Aus diesem Grund stimmt das Forschungsteam die Modelle darauf ab und passt sie entsprechend an. Die Aufgabe der Messdatenerfassung wurde aufgrund der großen Datenrate teilweise ausgelagert, um Übertragungsverzögerungen von vornherein zu umgehen.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Teil 1: Erweiterung des Datenerfassungssystems zwecks Datenstreaming (Hardware):

Im Labor für Verbrennungsmotoren an der TH Nürnberg ist das bestehende Datenerfassungssystem um mehrere dSpace-Komponenten erweitert worden, die auf Echtzeit-Applikationen angepasst sind. Die Grundkomponente bildet hier eine sog. MicroAutobox II mit Real-Time-Interface. Gekoppelt mit einem Rapid Pro System und einem Engine Control Module besteht die Möglichkeit der in mehreren kHz Bereich hochaufgelösten Datenerfassung sowie der entkoppelten Motorsteuerung mittels des dSpace-Systems. Eine Erweiterung durch einen Embedded PC wird die Leistungsfähigkeit für Rechenmodelle weiter ausbauen und die Möglichkeit des direkten Datenstreamings entwickelt (Abbildung 3).

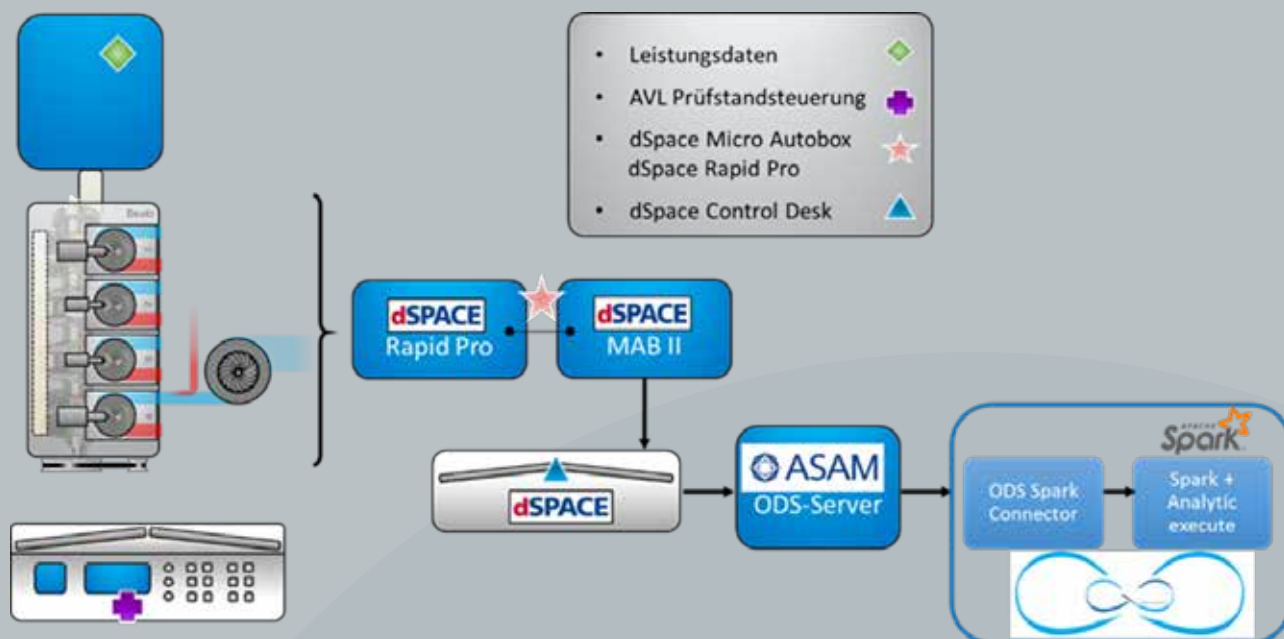


Abbildung 3: Entwicklung einer Prozesskette am IFZN-Motorprüfstand von der Datenerfassung bis in die Cloud / Datenstreaming. Grafik: Labor für Verbrennungskraftmaschinen

Der große Vorteil dieses modularen Systemaufbaus besteht zum einen aus der Entkopplung von Prüfstands-Komponenten und zum anderen aus dem kompakten Aufbau, was eine mögliche mobile Anwendung in Aussicht stellt.

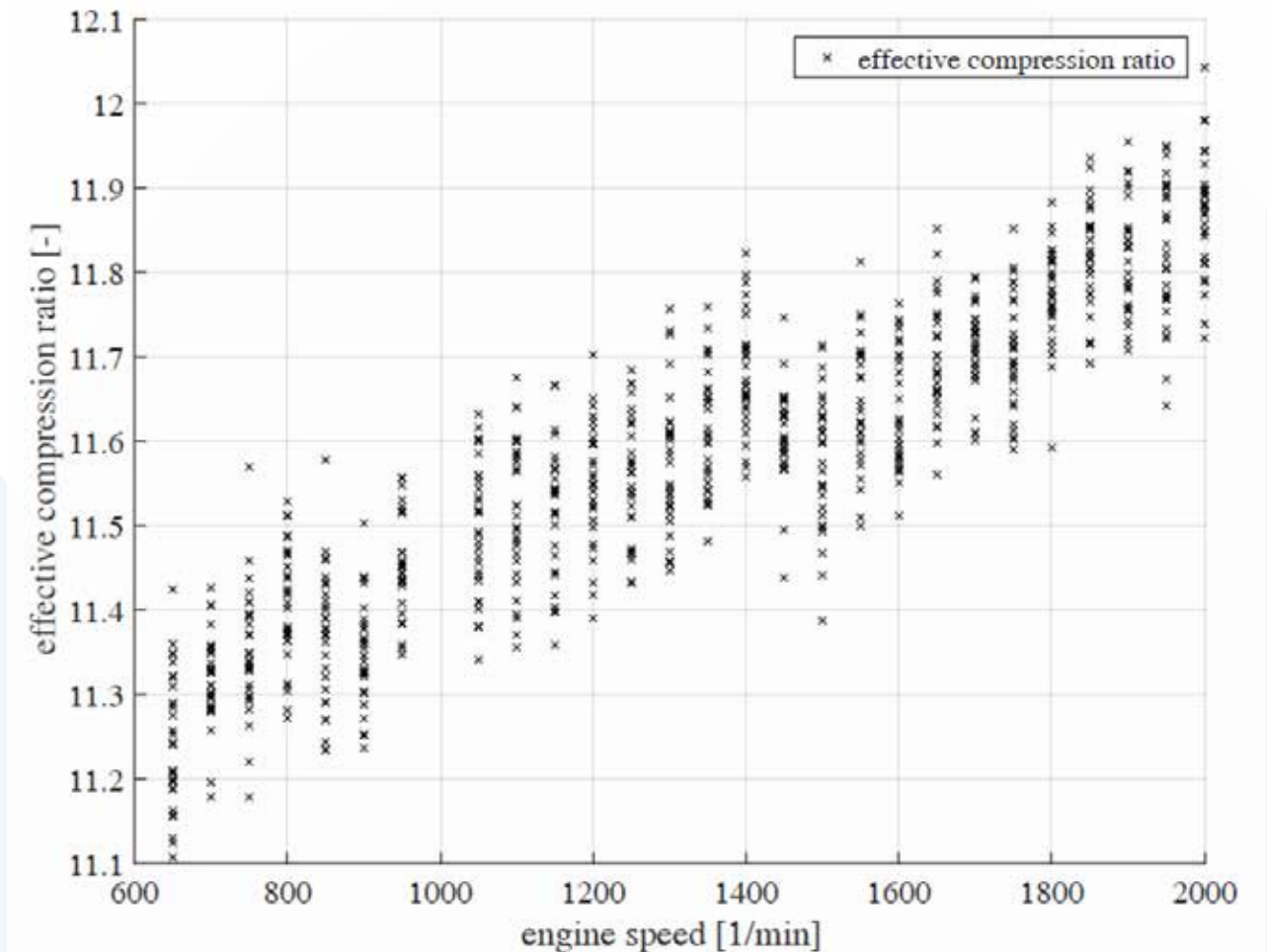
Bis zum Frühjahr 2019 wurde im Labor für Verbrennungskraftmaschinen der Aufbau eines solchen Messdatenerfassungs-Systems abgeschlossen und für eine Ladedruckregelung als erstes Anwendungsbeispiel realisiert. Die Sensordaten fallen hier am MicroAutobox-System an, das als Datenschnittstelle fungiert. An dieser Position realisiert das Micro-Autobox-System eine echtzeitfähige Datenakquise. Anschließend wird innerhalb der MicroAutobox eine signalabhängige, individuelle Datenpufferung und die dazugehörige Modelrechnung ausgeführt, parallel zur Datenerfassung. Für das Anwendungsbeispiel der Ladedruckregelung basiert die Modelrechnung auf einem physikalisches Modell zur Parametrierung des Verdichterkennfeldes. Die dem Modell gestellte Anforderung an Genauigkeit und Geschwindigkeit ist sehr hoch. Die benötigte Zeit für den Regelkreis beträgt auf dem dSpace System 1 ms (1kHz). Weil hier ebenfalls eine Kommunikationsschnittstelle zu externen Rechnern vorgesehen ist, hat die MicroAutobox gleichzeitig die Funktion des Sensoreingangs und Datenconnectors zum IoT. Um ein Datenstreaming vollständig – wie im Projektvorhaben beschrieben – zu realisieren, wird noch eine geeignete Cloud-Datenbank benötigt. Diese befindet sich momentan noch im Entwicklungsstadium. Für den zukünftigen Projektverlauf ist es auch geplant, mit dem angeschafften dSpace Rapid Pro System die komplette Messdatenerfassung des Forschungsmotors für das Datenstreaming zugänglich zu machen.

Teil 2: Softwarekomponenten:

■ Motordiagnose durch dynamische Verdichtungsverhältnisabschätzung

Durch eine Kompressions-Überwachung ist es möglich, eine Erhöhung sowie eine Verringerung des Kompressionsdrucks zu detektieren. Bisherige Lösungen überwachen bislang nur den Maximaldruck, was zum Beispiel Schäden an den Kompressionsringen (Stichwort „Blowby“) unbemerkt lässt. Auch können hierdurch

der Zylinderfüllungsgrad und das effektive Kompressionsverhältnis berechnet werden. Aus dem am Institut entwickelten Modell wird durch Analyse der Druckverlaufskurve jene Überwachung realisiert, die all diese Betrachtungen zulässt.



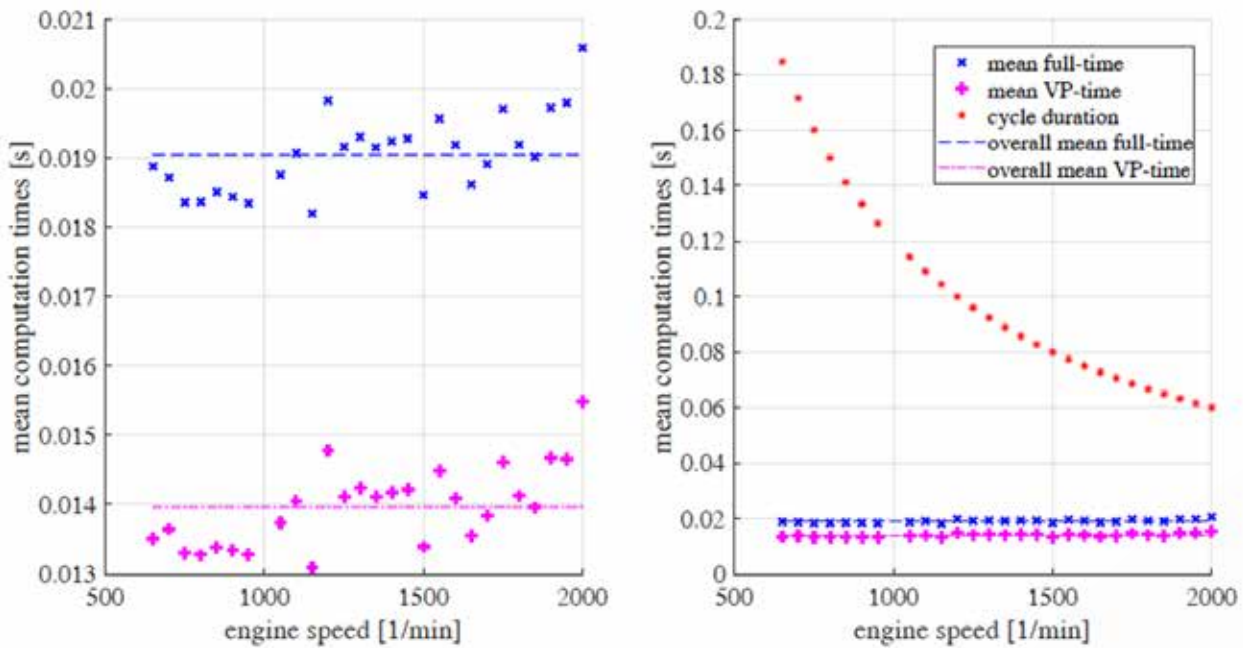


Abbildung 5: Vergleich der mittleren Zyklus-Dauer, der mittleren Rechenzeit des Algorithmus (mean fulltime) und des implementierten Rechen-Algorithmus (mean VP-time) für Drehzahlen zwischen 650 1/min und 2000 1/min. Grafik: Labor für Verbrennungskraftmaschinen

■ Digitaler Zwilling: Verdichter-Modell

Bei der Entwicklung moderner Verbrennungsmotoren sind präzise und kompakte Berechnungsmodelle für die Entwicklung des Motorsteuerungsdesigns unverzichtbar. Dabei ist das Modell für den Turbolader eines der kritischsten Größen im Bereich des Gesamtmotormodells, denn dieses beeinflusst die Randbedingungen für die Gasaustauschprozesse innerhalb des Motormodells. Üblicherweise wird für den Turbolader vom Hersteller die sog. Verdichterkennlinie zur Verfügung gestellt, diese liefert jedoch in der Regel nur ungenügend Daten, um direkt in der Simulation verwendet zu werden. Deshalb ist es für die Simulation von Motorlastzyklen notwendig, die gemessenen Daten des Herstellers mit Hilfe von Berechnungsalgorithmen zu inter- bzw. extrapolieren, um so eine breitere und dichter „besiedelte“ Verdichterkennlinie aufzustellen. Diese Berechnungsalgorithmen sind in der Regel nicht echtzeitfähig, weil durch die Inter- bzw. Extrapolation das Gesamtmodell signifikant verlangsamt wird.

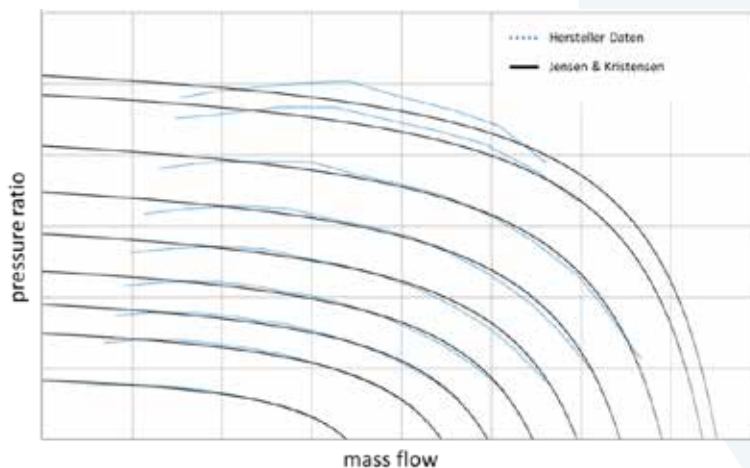


Abbildung 6: Verdichterkennfeld Vergleich Herstellerangabe und Berechnung. Grafik: Labor für Verbrennungskraftmaschinen

Auf Basis der Arbeiten von Jensen und Kristensen (2005) wurde im Rahmen der Vorlaufforschung und des Erasmus Programms eine Abschlussarbeit durchgeführt und so ein eindimensionales echtzeitfähiges Berechnungsmodell für einen beliebigen Verdichter realisiert. Als Input-Dateien werden lediglich die Messdaten des Verdichterkennfeldes vom Hersteller benötigt. Die obige Abbildung zeigt als Beispiel das Ergebnis der Arbeit für das echtzeitfähige Berechnungsmodell.

■ Digitaler Zwilling: NOx-Modell

Auf der Grundlage eines komplexeren NOx-Modells von Prof. Dr.-Ing. Bikas (2016) hat ein Studierender im Rahmen einer Bachelorarbeit ein vereinfachtes Modell entwickelt. Aufgrund einer vergleichsweise langen Rechenzeit zielt das Forschungsteam darauf ab, einen Weg zu finden, das originale Modell echtzeitfähig umzusetzen. Das Ziel am Prüfstand ist weiterhin der „Digitale Zwilling“, der durch echtzeitfähige Modelle sehr viel ausführlicher aufgebaut werden kann. Durch eine solche Entwicklung kann bei bekannten Eingangsgrößen die Zusammensetzung des Abgases eines Verbrennungsmotors – mit Fokus auf den NOx-Emissionen – vorausberechnet werden. Das Modell fußt hier auf der Verbrennungsschemie und deren physikalischen Beeinflussungsmechanismen.

Der Vorgang ist zweistufig aufgebaut, weil das Forschungsteam auch eine Abgasrückführung mitberücksichtigt hat.

Der erste Schritt bildet also zunächst die Berechnung der Zusammensetzung des Gemisches am Einlassventil – bestehend aus Frischluft und rückgeführten Abgasen. Diese geht als Eingangsgröße in das NOx-Modell ein (Abbildung 7).

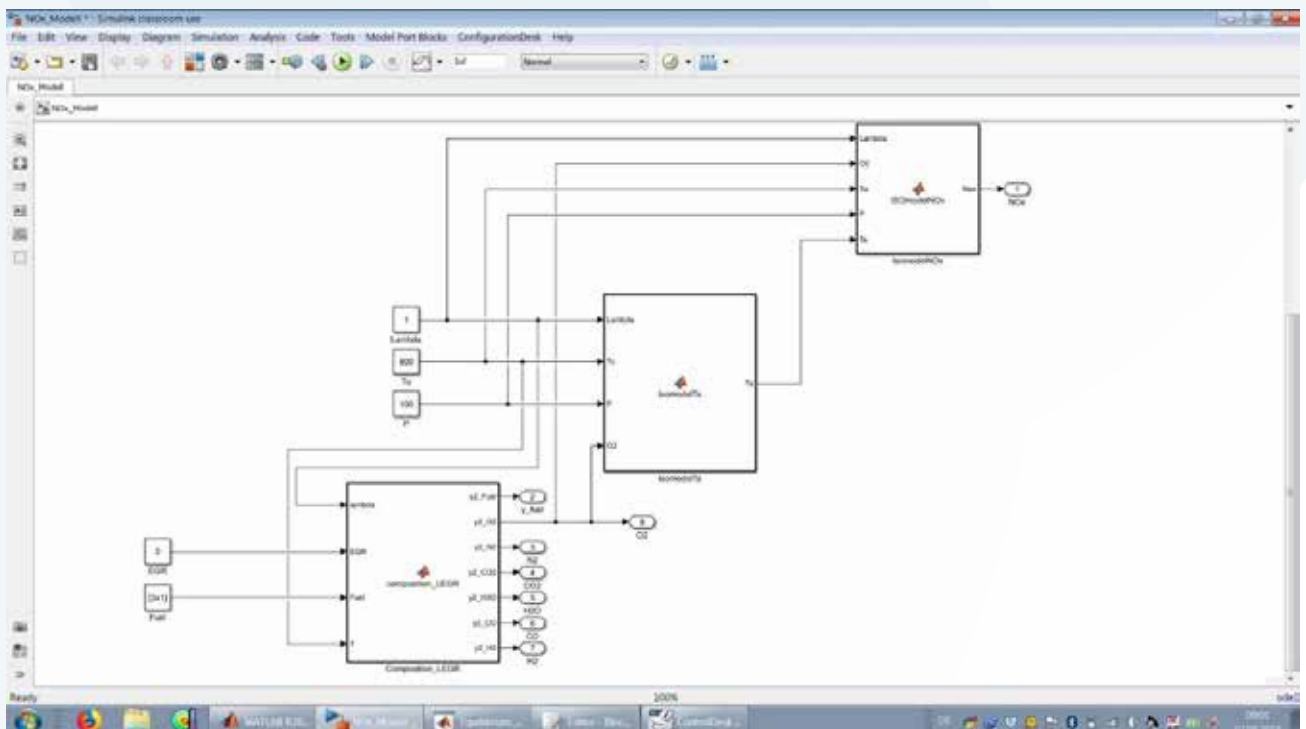


Abbildung 7: Aufbau des NOx-Modells mit Eingangsgrößen-Modellen. Grafik: Labor für Verbrennungskraftmaschinen

Ebenfalls benötigt wird die mittlere Temperatur des verbrannten Gemischs (T_a), die hier im IsomodelTa berechnet werden kann. Hierzu werden die Größen Lambda, die Temperatur des unverbrannten Gemischs sowie der Umgebungsdruck vor der Verbrennung benötigt. Diese werden ebenfalls für das NOx-Model als Eingangsgröße herangezogen (Abbildung 7).

Über eine mehrfache Variablentransformation hat das Forschungsteam versucht, die Reaktionsmechanismen für sinnvoll unterteilte Bereiche zu linearisieren bzw. zu vereinfachen, sodass die Ergebnisse durch wenige Formeln und Lookup-Tabellen nachgebildet werden können (Abbildung 8). Dies brachte eine durchschnittliche Rechenzeitersparnis von 98 Prozent – dadurch wurde das Modell echtzeitfähig.

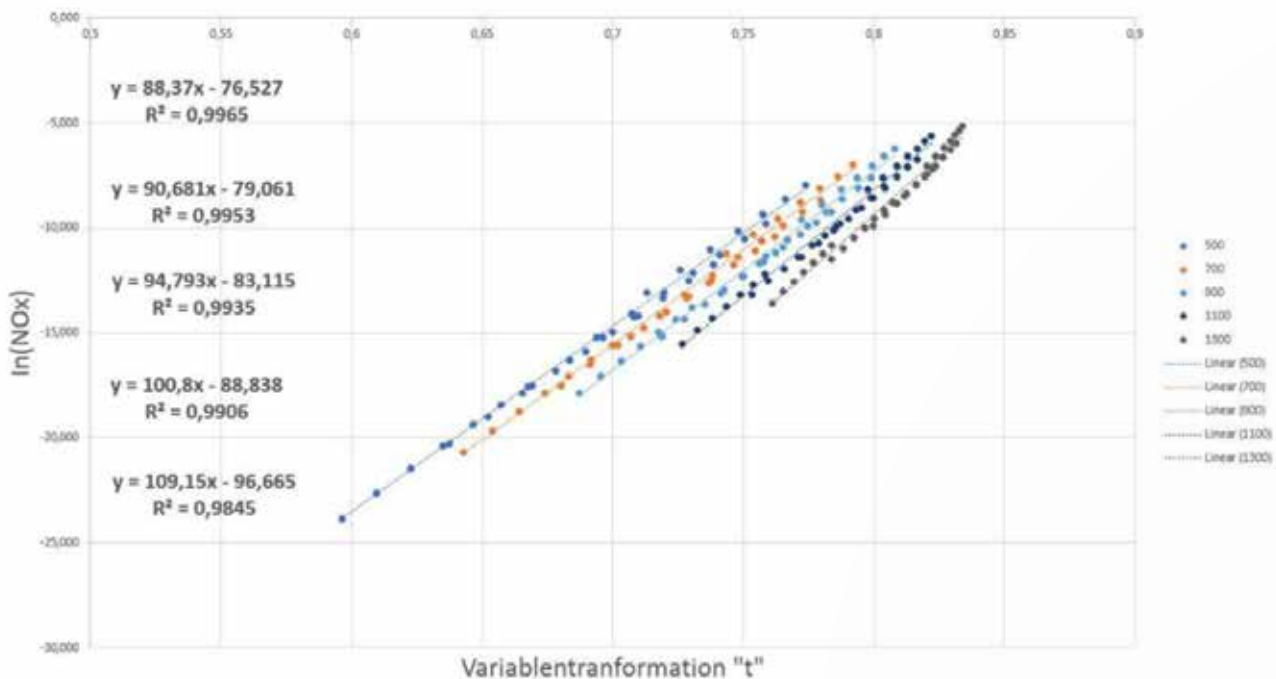


Abbildung 8: Konstanten-Gleichungen für den Lambdabereich $0,5 \leq \lambda < 0,9$. Grafik: Labor für Verbrennungskraftmaschinen

Teil 3: Ausblick

Durch die zuvor beschriebenen Modelle und die Implementierung dieser auf die MicroAutobox – in der Funktion des Prototypen-Steuergeräts – konnte der Grundstein für den „Digitalen Zwilling“ gelegt werden. Einige essentielle Parameter können durch die Modelle beschrieben und berechnet werden. Auch ist es möglich, durch den Aufbau des dSpace-Systems eine echtzeitfähige Datenakquirierung zu realisieren, die im nächsten Schritt in ein Datenstreaming umgesetzt werden soll. Für die Realisierung eines Datenstreamings hat das Forschungsteam Kontakt mit der Firma Peak Solution GmbH und der Chalmers University of Technology in Göteborg geknüpft. Das Forschungsteam plant, im Austausch mit diesen Anlaufstellen eine strukturierte, echtzeitfähige Datenbank sowie die Kommunikation mit dieser Datenbank aufzubauen und so ein Realtime-Streaming realisieren zu können.

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Mit diesem Vorlauforschungsprojekt konnte das Forschungsteam die Grundlage für weitere Projektanträge legen, unter anderem im Rahmen des Landesforschungsprogramms. Mit dem Antrag „Big Data in der Fahrzeug-

entwicklung – Entwicklung einer Prozesskette mittels Datenstreaming von Prüfständen und Felddaten in der Cloud zur Ermöglichung von Data Analytics“ hat das Forschungsteam einen relevanten Beitrag geleistet. Für die weiteren Forschungsvorhaben konnte mit dem Unternehmen Peak Solution GmbH ein regionaler ortsansässiger Partner gefunden werden, der im Bereich des Versuchs- und Messdatenmanagements über einschlägige Erfahrung verfügt und im Rahmen einer Interessenbekundung seine weitere Unterstützung erklärt hat. Für das Konzept konnte eine Kooperation mit Studierenden gewonnen werden und ein Wissensaustausch mit der Chalmers University of Technology in Göteborg, die im Bereich der künstlichen Intelligenz (KI) eine der renommiertesten Anlaufstellen weltweit darstellt, vereinbart werden. Damit verbunden ist das Ziel, die Folgefinanzierung durch Fördermittel, auch aus dem europäischen Raum, sicherzustellen und so neue Forschungsthemen im Bereich IOT, Big Data Management und „Digitale Zwillinge“ an der TH Nürnberg zu etablieren.

Im Zuge dieses Vorlaufforschungsprojekts wurden mehrere Abschluss- und Projektarbeiten vergeben. Eine Auflistung der wissenschaftlichen Arbeiten im Zusammenhang mit dem Projekt ist in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Art	Autor	Titel	Status
Bachelorarbeit	Marina Brilz	Entwicklung der Echtzeitfähigkeit eines existierenden physikalisch-basierenden NOx Modells und Implementierung auf einem Prototypen-Steuergerät	abgeschlossen
Masterarbeit	Thibaut Coolman	Turbocharger Modelling for Accurate Real Time Simulation	abgeschlossen
Masterprojekt	Christoph Hiltner	Online compression ratio estimation at internal combustion engines	abgeschlossen
Bachelorarbeit	Tobias Braun	Big Data Management: Analyse der Reproduzierbarkeit, Abweichung und Standardwert von Motor-Prüfstandsdaten und Automatisierung einer Plausibilitätsprüfung	abgeschlossen
Bachelorarbeit	Torsten Mühlport	Erprobung und Applikation eines elektrischen Verdichters an einem Diesel-Forschungsmotor mit Common Rail Einspritzsystem	laufend
Bachelorarbeit	Ralf Schneider	Erprobung und Validierung neuartiger Messtechnik zur Kurbelwinkelaufgelösten Massenstromanalyse des Ein- und Auslasskanals eines Forschungsmotors	laufend

6. Literatur

1. Jensen, J. P., Kristensen, A. F., Sorenson, S. C., Houbak, N., & Hendricks, E. (2005). "Mean value modelling of a small turbocharged diesel engine" (Technical Paper No. 910070). SAE.
2. Michos N. K., Bikas G., Vlaskos I.: "A new global algebraic model for NOx emissions formation in postflame gases - Application to lean premixed combustion systems", SAE 2016, 2016-01-0803.
3. Bikas G., Michos N.K., Vlaskos I.: "Ein neues globales algebraisches Modell der NOx-Bildung für Erdgasmotoren" MTZ 12/2015, S. 68-73.







Gender und Kulturelle Diversität
im Software Engineering als
Grundlage erfolgreicher Digitalisierung –
Eine Untersuchung mit Hilfe
von Sentiment Analysis

DIVERSENTA

Prof. Dr. Patricia Brockmann
Fakultät Informatik
TH Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Das Forschungsteam hat mit dem Einsatz der Sentiment-Analyse die Rolle von Gender und kultureller Diversität im Software Engineering untersucht. Die Auswirkung der interkulturellen Dimensionen und der informellen Kommunikation auf das Team-Building, das Vertrauen und die Kooperation zwischen kulturell- und genderdiversen Teammitglieder war Gegenstand der Analysen. Die Möglichkeiten, diese Erkenntnisse für die Stärkung der digitalen Teilhabe unterrepräsentierter Gruppen einzusetzen wurden identifiziert. Ein anschließendes Forschungsprojekt zielt darauf ab, diese Aspekte weiter zu erforschen.

1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2018
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Informatik
Projektleitung	Prof. Dr. Patricia Brockmann
Kontaktdaten	E-Mail: patricia.brockmann@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Der technologische Wandel stellt die Gesellschaft vor neue Herausforderungen im Hinblick auf die digitale Teilhabe. Eine erfolgreiche Digitalisierung erfordert die Berücksichtigung der Bedürfnisse heterogener Benutzergruppen und Teammitglieder schon während der Ermittlung und Analyse der Systemanforderungen. Eine Betrachtung kultureller Dimensionen kann als grundlegende Struktur genutzt werden, um den Projektteilnehmerinnen und -teilnehmern länder- und kulturspezifische Unterschiede bewusst zu machen. Im Gegenteil zu früheren Software Engineering Projekten, die in kleinen Teams am selben Ort arbeiteten, werden heute globale Software-Entwicklungsteams mit einer Vielfalt an neuen Herausforderungen konfrontiert:

- Geografische Entfernung: Ein aufgeteiltes Team kann mehr als die doppelte Zeit für dieselbe Aufgabe benötigen wie ein Team mit allen Mitgliedern an einem Ort [HER03].
- Zeitverschiebungen: In der Theorie sollten die unterschiedlichen Zeitzonen dem Team ermöglichen, rund um die Uhr zu arbeiten. In der Realität behindern diese jedoch häufig eine synchrone Kommunikation in Echtzeit zwischen den Team-Mitgliedern an unterschiedlichen Aufenthaltsorten [SOS02].
- Sprachunterschiede: Gruppen in Ländern, in denen unterschiedliche Sprachen gesprochen werden, können mit Problemen in der verbalen Echtzeit-Kommunikation konfrontiert werden. Jede Gruppe kann zusätzliche Zeit benötigen, um ihre Gedanken in eine gemeinsame Fremdsprache, wie beispielsweise Englisch, das ein

zusätzlicher Kommunikationsfilter ist, zu übersetzen. Dies könnte Nicht-Muttersprachler entmutigen, an Telefon- oder Videokonferenzen teilzunehmen [SAN07].

- Vertrauen: Mitgliedern aus Teams in unterschiedlichen Ländern, die sich nie persönlich getroffen haben, fällt es oft schwer, informelle Kommunikationsformen zu etablieren, die hingegen in Gruppen mit demselben Arbeitsplatz natürlich entstehen [NGU06].
- Kulturelle Unterschiede: Missverständnisse aufgrund von kulturellen Unterschieden haben sich wiederholt als eine der größten Herausforderungen für eine erfolgreiche globale Software-Entwicklung erwiesen [KRU04, HUA07].
- Geschlechterunterschiede: Einflüsse aus der Umwelt und Kultur prägen den Umgang mit der IT von Männern und Frauen unterschiedlich [BLU07].

Einer der ersten Wissenschaftler, der empirische Methoden zur Untersuchung von kulturellen Unterschieden in der Softwareindustrie erforscht hat, war Geert Hofstede [HOF05]. Dieser wendete multivariate statistische Methoden an, um Daten, die von tausenden IBM-Angestellten weltweit gesammelt wurden, zu analysieren. Hofstede klassifizierte Unterschiede in kulturellen Perspektiven in fünf Dimensionen:

- Machtdistanz: die Einstellung einer Gesellschaft hinsichtlich der Ungleichheit zwischen den Individuen in einer Gesellschaft
- Kollektivismus vs. Individualismus: der Grad an Interdependenz, den eine Gesellschaft zwischen ihren Mitgliedern aufrechterhält
- Vermeidung von Ungewissheit, Ambivalenz: sich von unbekanntem Situationen bedroht fühlen
- Langfristige vs. kurzfristige Orientierung: Zurückhaltung von aktuellem Verbrauch vs. sofortiger Konsum
- Maskulin vs. feminin: Wettbewerb, Erfolg und Erfüllung vs. Kooperation, Harmonie und Bescheidenheit

Methoden zur Unterrichtung der interkulturellen Dimensionen von globalem Software Engineering wurden in der zurückliegenden Forschung [OLI17, HAR14, END14, END13, BEI12] mit dem Einsatz von internationalen Kooperationspartnern in Mexiko, der Mongolei und Schweden untersucht. Im Wintersemester 2018/2019 ist eine weitere Zusammenarbeit mit der Ritsumeikan University in Japan geplant.

Die kulturelle Dimension maskulin vs. feminin variiert weltweit beträchtlich. Länder wie Deutschland und Mexiko erreichen eine relativ hohe Wertung auf der maskulinen Skala, Schweden liegt im Vergleich hoch auf der femininen Skala [HOF05]. Historisch gesehen war der Anteil an Frauen in der IT bisher um einiges kleiner als der Anteil der Männer. In einem aktuellen Bericht von Accenture [ACC16], der knapp 5000 Frauen und Männer hinsichtlich ihrer Vertrautheit mit digitalen Technologien einschätzte, übertrafen die Männer in der Digital Fluency die Frauen in fast allen untersuchten Ländern. Digital Fluency oder auf Deutsch "Medienkompetenz" kann die Karriere einer Person in jedem Stadium beschleunigen, sowohl in der Bildung als auch am Arbeitsplatz. Diese essenzielle Fähigkeit hilft besonders beim Aufstieg hin zu Führungspositionen. Die Diskrepanz in Digital Fluency verringert sich, allerdings könnte es bei der aktuellen Entwicklungs-Geschwindigkeit 50 Jahre dauern, um eine Gleichstellung der Geschlechter zu erreichen [ACC16].

3. Ziele des Forschungsprojekts

Das Ziel dieses Forschungsprojekts ist, die Rolle von Gender und kultureller Diversität in Software Engineering mit den nachfolgend skizzierten Fragestellungen zu erforschen. Wie wirken sich Gender und kulturelle Diversität auf die Ermittlung, Analyse und Spezifikation der Systemanforderungen aus? Wie kann sie Team-Building und interkulturelle Kommunikation in globalen Software-Entwicklungsprojekten beeinflussen? Bieten kulturell- und gender-diverse Teams für Software Engineering besondere Vorteile? Gibt es spezifische Herausforderungen, mit denen kulturell- und gender-diverse Teams konfrontiert werden? Wie können diese Erkenntnisse eingesetzt werden, um die digitale Teilhabe diverser gesellschaftlichen Gruppen auszuweiten?

Der methodische Zugang des Forschungsteams basiert auf dem Einsatz der ‚Sentiment Analysis‘. Dies ist eine Methode des maschinellen Lernens, die die rechnergestützte Verarbeitung von Meinungen, Stimmungen und Subjektivität [PAN08] erforscht. Im vorliegenden Forschungsprojekt hat das Team Sentiment Analysis eingesetzt, um Projektdokumentationen (sog. „Artefakte“) und Kommunikationsprotokolle, die in den Requirements Engineering und System Design Phasen von Softwareprojekten entstanden sind, zu analysieren. Sentiment Analysis wurde auch dazu verwendet, Inhalte aus sozialen Netzwerken auszuwerten. Dies ermöglichte die Untersuchung der Meinungen und Erfahrungen einer hohen Anzahl an Projektbeteiligten.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Die erste Phase des Forschungsprojekts fokussierte auf den Forschungsbereich „Kulturelle Vielfalt im Software Engineering“. Im Mittelpunkt standen die Untersuchung kultureller Dimensionen in internationalen Software-Teams und wie Studierende die Zusammenarbeit in virtuellen, verteilten Teams am besten lernen können. Das Forschungsteam hat Fallstudien mit internationalen Studierenden aus Deutschland, Japan, Mexiko und der Mongolei durchgeführt. Die ersten Ergebnisse dieser Forschung wurden in einem Paper zusammen mit zwei Studierenden veröffentlicht [FU18]. Eine Masterstudentin aus Kolumbien und eine Bachelorstudentin aus China nahmen an einer IEEE/ACM-Konferenz teil, die European Conference on Software Engineering Education (ECEE 2018), um die Ergebnisse dieses Papiers zu präsentieren. Weitere Ergebnisse wurden gemeinsam mit Kolleginnen und Kollegen aus Partnerhochschulen in Japan und Mexiko veröffentlicht und von der Projektleiterin auf zwei wissenschaftlichen Konferenzen vorgestellt, die IEEE/ACM International Conference on Global Software Engineering (ICGSE 2018) [MAR18a] sowie die International Conference on Information and Communication Technology in Education (ICICTE 2018) [BRO18]. Einer der Forschungspartner präsentierte ein Paper über das gemeinsame Forschungsprojekt auf einer wissenschaftlichen Konferenz in China, die International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC 2018) [MAR18b]. Ein weiteres Paper wurde angenommen und wird von der Projektleiterin im Januar 2019 auf der Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS 2019) [MAR18c] vorgestellt.

Die zweite Phase des Forschungsprojekts zielte auf die technischen Aspekte der Sentiment Analysis. Im Fokus stand die Analyse der informellen Kommunikation, die eine wichtige Grundlage für das Vertrauen in Software-Engineering-Teams bildet. Das Forschungsteam hat untersucht, ob Männer und Frauen, die in der Softwareentwicklung arbeiten, in verschiedenen geografischen Gebieten Unterschiede in ihrer informellen Kommunikation

aufweisen. Mit dem Machine Learning System Weka, entwickelt an der University of Waikato, wurden Beiträge von Twitter analysiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchung wurden für eine Präsentation auf der ACM International Conference on Distributed and Event-Based Systems (DEBS 2018) an der University of Waikato in Neuseeland im Juni 2018 angenommen [BRA18a]. Eine Masterstudentin reiste zur Konferenz, um die Ergebnisse dieses Papers vorzustellen.

Derzeit werden weitere Forschungsarbeiten durchgeführt, um zu analysieren, wie Menschen aus verschiedenen Kulturkreisen und unterschiedlichen Geschlechts in Software-Engineering-Projekten zusammenarbeiten. Öffentlich zugängliche Daten aus der Open Source Software Collaboration Plattform JIRA werden mit dem Machine Learning System Weka analysiert. Im November 2018 wurde ein Poster mit den vorläufigen Ergebnissen von zwei Masterstudentinnen auf einer wissenschaftlichen Tagung präsentiert, der Artificial Intelligence International Conference (A2IC 2018) [BRA18b].

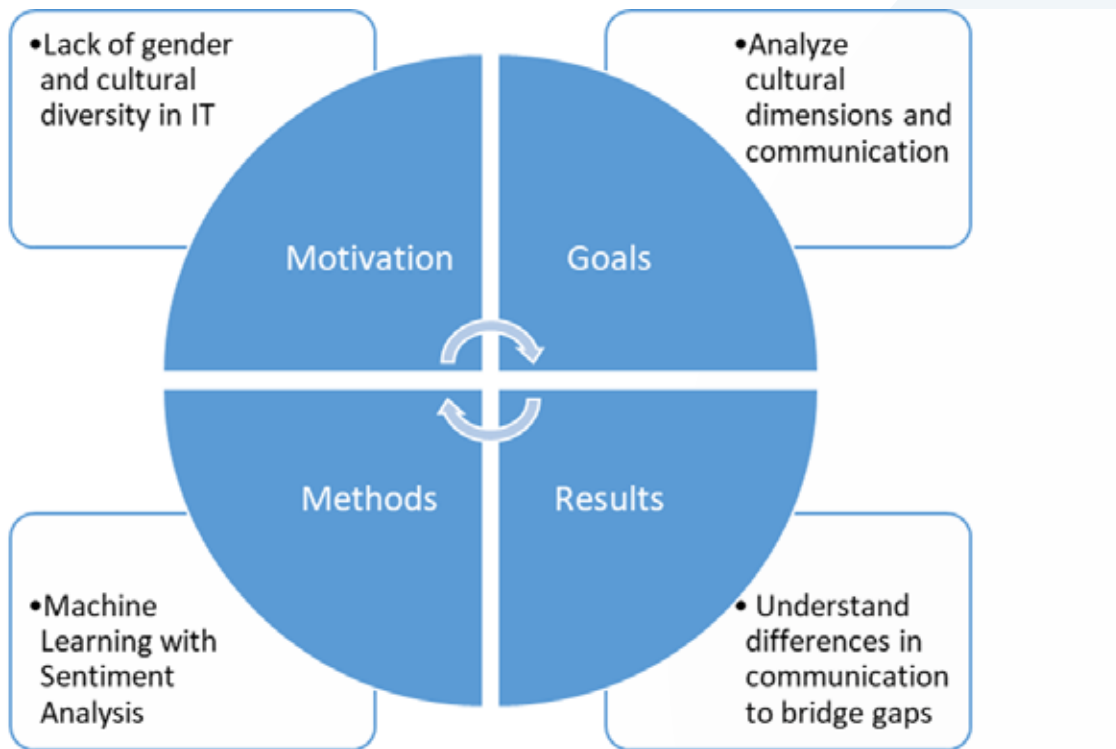


Abbildung 1: Motivation, Goals, Methods and Results; Grafik: Patricia Brockmann

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Während der Laufzeit dieses Projekts wurden sieben Paper [1 – 7] auf internationalen wissenschaftlichen Konferenzen präsentiert und veröffentlicht. Darüber hinaus wurde die internationale Zusammenarbeit verfestigt und intensiviert und ein Förderantrag für die Finanzierung der zukünftigen Forschungsk Kooperation eingereicht.

Die im Projektantrag genannte internationale Forschungspartnerin, Prof. Dr. Annika Hinze von der University of Waikato in Neuseeland, besuchte im Juli 2018 die TH Nürnberg, um die weitere Arbeit an der Forschungs-

kooperation zu koordinieren. Während eines zweiten Besuchs im Oktober 2018 hat Prof. Dr. Annika Hinze eine Reihe von Gastvorträgen über gemeinsame Forschungsthemen an der Fakultät Informatik gehalten. Die Pläne für eine kooperative Masterarbeit wurden finalisiert und die Option einer anschließenden kooperativen Doktorarbeit wurde diskutiert.

Die Weiterentwicklung und die wissenschaftliche Vertiefung dieser Themen wird im Rahmen eines langfristigen Forschungsprojekts angestrebt. Das Ziel des anschließenden Forschungsvorhabens ist die Untersuchung, die Einführung und die Bewertung von Digitalisierungsmaßnahmen in MINT-Studiengängen mit der Absicht, neue MINT-Studierenden aus unterrepräsentierten Gruppen zu gewinnen und während ihres Studiums zu unterstützen. Prof. Dr. Patricia Brockmann, Prof. Dr. Heidi Schuhbauer von der TH Nürnberg sowie Prof. Dr. Annika Hinze von der University Waikato haben im November 2018 einen Förderantrag für die STAEDTLER Stiftung zum Thema „Digitalisierung des studentischen Lebenszyklus zur Förderung unterprivilegierten Studierenden in MINT-Studiengänge“ eingereicht.

6. Literatur

- [ACC16] "Getting to Equal", Accenture Research IWD, 2016.
- [BEI12] Beier, S.; Bickel, M.; Brockmann, P.; Choinzon, M., (2012). „It Takes a Global Village to Teach Global Software Engineering“, ICEEE 2012: International Conference on E-Learning and E-Technologies in Education, Lodz, Poland.
- [BLU07] Blum, L., Frieze, O., Hazzan, M., Dias, B. „A Cultural Perspective on Gender Diversity in Computing“. In Reconfiguring the Firewall, Mezaros, P. and Peters, A. K. Eds., CRC Press (2007).
- [BRA18a] Branz, L., Brockmann, P. (2018) „Sentiment Analysis of Twitter Data: Towards Filtering, Analyzing and Interpreting Social Network Data“, ACM International Conference on Distributed and Event-Based Systems (DEBS2018).
- [BRA18b] Branz, L., Pastran Reina, L., Brockmann, P. (2018) „Sentiment Analysis of Developer Comments“, Artificial Intelligence International Conference (A2IC2018).
- [BRO18] Brockmann, P. (2018) „Blended Learning: Simulation of an International Scientific Conference to Teach IT Students Research Skills, International Conference on Education, Research and Innovation (ICERI2018)
- [END14] Ende, M.; Lämmermann, R.; Brockmann, P.; Olivares-Ceja, J.M. (2014). „Learning Software Engineering with Global Teams“, International Journal of Technology and Educational Marketing (IJTEM), Volume 4, Issue 1.
- [END13] Ende, M; Lämmermann, R.; Brockmann, P.; Ayurzana, G. (2013). „A Virtual, Global Classroom to Teach Global Software Engineering: A Joint Mongolian-German Team-Teaching Project“, ICEEE 2013: International Conference on E-Learning and E-Technologies in Education, Lodz, Poland.
- [FU18] Fu, Y., Pastran Reina, L., Brockmann, P. (2018) „Teaching Global Software Engineering: Experience Report Comparing Distributed, Virtual, Collaborative Courses at the Bachelor’s and Master’s Degree Levels“, ACM European Conference on Software Engineering Education (ECSEE2018).
- [HAR14] Harrer, M.; Brockmann, P.; Olivares-Ceja, J.M. (2014). „Teaching Cultural Aspects of Global Software Engineering: A Virtual Mexican-German Team-Teaching Experience“, European Conference on Software Engineering and Education (ECSEE).
- [HER23] Herbsleb, J.D., Mockus, A.: An empirical study of speed and communication in globally distributed software development. In: IEEE Transactions on Software Engineering (2003).
- [HOF05] Hofstede, G. and Hofstede, G.J.: Cultures and Organizations: Software of the Mind. McGraw-Hill, 2nd Edition (2005).
- [HUA07] Huang, H. and Trauth, E.: Cultural Influences and globally distributed information systems development: experiences from Chinese IT professionals. In: SIGMIS-CPR 2007, Proceedings of the ACM SIGMIS CPR Conference on Computer Personnel Research: The global information technology workforce, ACM 2007.
- [KRU04] Kruchten, P.: Analyzing Intercultural Factors Affecting Global Software Development – A Position Paper. In: Proceedings of (GSD 2004) 3rd International Workshop on Global Software Development, IEEE “2004).

- [MAR18a] Marutschke, M., Kryssanov, V., Brockmann, P. (2018) „East Meets West: Global Software Engineering Course in Japan and Germany“, IEEE/ACM International Conference on Global Software Engineering (ICGSE2018).
- [MAR18b] Marutschke, D. M., Kryssanov, V., Brockmann, P. (2018) „Joint Global Software Engineering Education in Germany and Japan – A Case Study“, International Conference on Innovative Computing, Information and Control (ICICIC 2018).
- [MAR18c] Marutschke, D. M., Kryssanov, V., Olivares-Ceja, J. M., Brockmann, P. (2018) „Virtual, Distributed Courses to Teach Global Software Engineering: A Cultural Contrast of Germany, Japan, Mexico, and Mongolia“, Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS2018).
- [NGU06] Nguyen, P., Babar, M., Verner, J.: Critical factors in establishing and maintaining trust in software outsourcing relationships. In: ICSE International Conference on Software Engineering (2006).
- [OLI17] Olivares-Ceja, J.M., Gutierrez-Sanchez, B., Kreß, A., Staufer, J., Brockmann, P. (2017) „Project-Based Learning in an International Global Classroom to Teach Global Software Engineering“, International Conference on Education and New Learning Technologies (EDULEARN17).
- [PAN08] Pang, B., Lee, L. “Opinion Mining and Sentiment Analysis”. In: Foundations and Trends in Information Retrieval, Vol. 2, No. 1-2, 2008.
- [SAN07] Sangwan, R., Bass, M., Mullick, N., Paulish, D., Kazmeier, J.: Global Software Development Hand-book. Auerbach Publications, New York (2007).
- [SOS02] Sosa, M., Eppinger, S., Pich, M. McKendrick, D., Stout, S.: “Factors that influence technical communication in distributed product development: an empirical study in the telecommunications industry”. In: IEEE Transactions on Engineering Management (2002).









Nachhaltigkeitstransformation – Explorative Fallstudie zu den Wirkungen des CSR-Richtlinie-Umsetzungsgesetz

Prof. Dr. Frank Ebinger
Sebastian Fuchs, M. A., M. Sc.
Nuremberg Campus of Technology
Fakultät Betriebswirtschaft
TH Nürnberg

Das primäre Ziel des Forschungsprojekts ist die Evaluation der Wirkung des CSR-Richtlinie-Umsetzungsgesetzes auf Unternehmensebene. Das Gesetz überführt die Richtlinie 2014/95/EU der Europäischen Union im Hinblick auf die Veröffentlichung von nichtfinanziellen und die Diversität betreffende Informationen in nationales deutsches Recht. Berichtspflichtige Unternehmen sind per Definition groß, und damit von besonderem gesellschaftlichem Interesse („Public Interest Entities“). Neben der Publikation ganzheitlicher Unternehmensinformationen für Anspruchsgruppen ist beabsichtigt, große Unternehmen zu einem nachhaltigen Handeln in Ihren Aktivitäten zu bewegen. Dies wird als Teil einer gesellschaftlichen Nachhaltigkeitstransformation verstanden. Zu evaluieren, ob das CSR-RUG in nachhaltigeren Unternehmen resultiert, ist das Ziel dieses Vorlaufforschungsprojekts. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass bisher keine tieferen Veränderungen Richtung Nachhaltigkeit in den von uns betrachteten Unternehmen als Resultat des CSR-RUG zu erfassen sind. Allerdings dringt das Thema Nachhaltigkeit in den meisten befragten Unternehmen durch die Einführung des Gesetzes in das Wahrnehmungsfeld der Vorstandsebene – und damit auf den strategischen Radar.

Wesentliche Projektziele

1. Projektdaten

Fördersumme	29.600 Euro
Laufzeit	Juli bis Dezember 2018
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Betriebswirtschaft / Nuremberg Campus of Technology
Projektleitung	Prof. Dr. Frank Ebinger
Kontaktdaten	E-Mail: frank.ebinger@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Die gesellschaftliche Transformation in Richtung Nachhaltigkeit, und ein daran orientiertes Wirtschaften, findet sich heute als politische Zielsetzung in vielen wirtschaftspolitischen und zivilgesellschaftlichen Zusammenhängen in internationalen, europäischen und deutschen Entwicklungsdiskussionen wieder. Wissenschaftliche Analysen zeigen hierbei allerdings, dass es keinen Königsweg zur Erreichung gesellschaftlicher Veränderungsprozesse gibt. Entsprechend wichtig wird die fallstudienbezogene Wirkungsforschung (potenzieller) Politikinterventionen für eine Einschätzung, inwieweit die (geplanten) Interventionen zu einer nachhaltigen Transformation von Wirtschaftsstrukturen beitragen.

Dieses Vorlaufforschungsprojekt knüpft an diese Überlegungen an, und stellt für seine Fallstudie die vom Europäischen Parlament und dem Rat im Oktober 2014 beschlossene CSR-Richtlinie 2014/95/EU in den Mittelpunkt seiner Analyse (Europäische Kommission, 2014). Geschätzt unterliegen ungefähr 6.000 Unternehmen mit mehr als 500 Mitarbeitern der neuen Verordnung. Diese umfasst „Umweltfragen, soziale und mitarbeiter-

bezogene Aspekte, Achtung der Menschenrechte, Fragen der Korruption und Bestechung sowie Diversität in Verwaltungsräten“ (ebd.). Zusätzlich stellte die Europäische Kommission unverbindliche Leitlinien zur Berichterstattung über die einbezogenen Wirkungsbereiche zur Verfügung (Europäische Kommission, 2016). Das von der Bundesrepublik Deutschland am 19. April 2017 umgesetzte Gesetz zur Stärkung der nichtfinanziellen Berichterstattung von Unternehmen in deren Lage- und Konzernlageberichten (CSR-Richtlinie-Umsetzungsgesetz) sieht auf nationaler Ebene die Offenlegung nichtfinanzieller Informationen für bestimmte Unternehmen vor. Bei den betroffenen Unternehmen handelt es sich um am Kapitalmarkt gelistete Unternehmen, Banken und Versicherungen, die im Jahresschnitt mindestens 500 Mitarbeitern und eine Bilanzsumme von mehr als 20 Mio. Euro aufweisen oder die einen Umsatz von über 40 Mio. Euro überschreiten (Deutscher Bundestag, 2017). Die Berichtspflicht spiegelt die EU-Richtlinie auch im Hinblick auf nichtfinanzielle Aussagen und Kennzahlen über Umwelt-, Sozial- und Arbeitnehmerbelange, die Achtung der Menschenrechte und die Bekämpfung von Korruption sowie der Angabe von Diversitätsinformationen.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Die Wirkungen dieses noch jungen Gesetzes sind bisher noch weitgehend unerforscht. Offen bleibt, wie die angesprochenen deutschen Unternehmen mit dieser Pflicht umgehen werden und welche strukturellen Wirkungen dieses neue Gesetz haben wird. Zusätzlich stellen sich Fragen nach den künftigen Berichtsformen, Strukturen und Standards. Das Ziel dieses Projekts ist es, Transformationsprozesse auf Unternehmensebene in der Umsetzung deutscher Unternehmen zu evaluieren. Hier soll einerseits die transformative Wirkung des Gesetzes auf der Ebene von Organisationsstrukturen untersucht werden. Andererseits sollen die Potenziale für zukünftige Ergänzungen und ähnliche, nachhaltigkeitsorientierte Gesetzesvorhaben aufgezeigt werden.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Um der oben genannten Zielsetzung der Evaluationsforschung im Hinblick auf das CSR-RUG gerecht zu werden, wurden zwei Arbeitspakete geschnürt:

- Arbeitspaket 1: Literaturanalyse und Vorbereitung der empirischen Erhebung (Juli bis September)
- Arbeitspaket 2: Durchführung und Auswertung der empirischen Erhebung (Oktober bis Dezember)

Arbeitspaket 1

Die theoretischen Grundlagen dieses Forschungsvorhabens sind interdisziplinär. In der Literaturanalyse wurde die Forschung im Hinblick auf Nachhaltigkeits-, Umwelt-, und CSR-Reporting berücksichtigt. Diese Forschungsströmungen wurden ergänzt durch Literatur, die sich mit freiwilliger und verpflichtender Berichterstattung befasst. Daneben wurde Literatur hinsichtlich der durch Reporting-Veränderungen ausgelösten Transformations- und Veränderungsprozesse ausgewertet und ein theoretischer Fokus auf Evaluation des Ausmaßes der Veränderungsprozesse als Folge einer Veränderung in der Umwelt von Unternehmen mit Laughlin (1991) identifiziert.

Laughlins (1991) Rahmenkonzept hat sich in den vergangenen beinahe drei Jahrzehnten zu einer Konstante der Evaluationsforschung im Hinblick auf Veränderungen von Organisationen hinsichtlich Nachhaltigkeit im Kontext von Reporting-Veränderungen entwickelt (Biswas & O’Grady, 2016; Bouten & Hoozée, 2013; da Silva Montei-

ro, Albar-Guzmán, & Albar-Guzmán, 2010; Evans & Tucker, 2015; Fraser, 2012; Larrinaga-González et al., 2001; Larrinaga-Gonzalez & Bebbington, 2001; Narayanan & Adams, 2016; Passetti, Cinquini, & Tenucci, 2018; Stubbs & Higgins, 2014; Tilt, 2006). Eine erste empirische Anwendung und Verfeinerung erfuh der Ansatz durch Gray et al. (Gray, Walters, Bebbington, & Thompson, 1995). Darum wurde es als idealer theoretischer Rahmen zur Evaluierung von Veränderungsprozessen auf Unternehmensebene als Resultat von Veränderungsprozessen des CSR-RUG identifiziert.

Laughlin (1991) versteht Unternehmen als Systeme, die aus interpretativen Schemata (*interpretative schemes*), Designstrukturen (*design archetypes*) und Untersystemen (*subsystems*) bestehen, sich aber in ihrer Materialität unterscheiden und jederzeit in dynamischer Balance zueinander befinden. Grundsätzlich unterscheidet Laughlin (1991) hierbei bestimmte Kategorien von Veränderungen (Tabelle 1). Er unterscheidet zwischen ausgebliebener Veränderung (*inertia*), Veränderungen der Kategorie des ersten Grades (*morphostatic / firstorder change*) und Veränderungen zweiten Grades (*morphogenetic / secondorder change*).

Reaktionen der Unternehmen im Bereich der Veränderungen ersten Grades, die keine substantielle Veränderung bedeuten, beinhalten die kurzzeitige Beschäftigung mit dem Veränderungsimpuls mit dessen anschließender Zurückweisung (*rebuttal*) oder, alternativ, die oberflächliche Reorientierung (*reorientation*) des Unternehmens. Veränderungen zweiten Grades, die substanzieller Natur sind, beschreibt Laughlin (1991) durch die folgenden beiden Reaktionen von Unternehmen auf den Veränderungsimpuls: Kolonisierung (*colonization*) und Evolution (*evolution*). Die erstgenannte Reaktion der Kolonisierung resultiert in der erzwungenen Annahme einer vollständigen neuen Basis des Unternehmens. Evolution, nach Laughlin (1991) als die weitreichendste Antwort von Unternehmen auf Veränderungen, ist der Kolonisierung ähnlich, in der Annahme eines neuen „Ethos“ des Unternehmens, ist aber von völliger Freiwilligkeit der Akteurinnen und Akteure gekennzeichnet.

Level of change	Response	Explanation
No change	Inertia	No change
Firstorder change (morphostatic)	Rebuttal	Organization may change slightly but then revert after the disturbance
	Reorientation	A disturbance cannot be rebutted and must be “(...) internalized (...) but in a way that the real heart of the organization is basically unaffected” (Laughlin, 1991, pp. 217-18)
Secondorder change (morphogenetic)	Colonisation	Colonisation
Change is forced upon an organisation, “formulating a totally new underlying ethos” (Laughlin, 1991, p. 219)		
	Evolution	A change that is chosen by the organisation, and is “accepted by all participants freely and without coercion” (Laughlin, 1991, p. 220)

Tabelle 1: Typologie der Organisationalen Veränderung nach Laughlin (1991) und Gray et al. (1995) nach Tilt (2006)

Arbeitspaket 2

In Anbetracht der Zielsetzung dieses Forschungsvorhaben hat das Forschungsteam auf qualitative Methoden zurückgegriffen, um die transformative Kapazität des CSR-RUG valide evaluieren zu können. Qualitative Methoden sind von Natur aus explorativ (Bryman, 1984). Patton (1990) hat zudem die Evaluation von Politikfolgen als eine der Hauptfunktionen von qualitativer Forschung beschrieben.

Bei der verfolgten Forschungsstrategie handelt es sich um die Methode der Fallstudie, da diese im Speziellen dazu geeignet ist, neuartige Sachverhalte, deren Implikationen sich erst ausformen, zu beschreiben (Yin, 2009). Das Ziel war es, einen sogenannten Schnappschuss der zu evaluierenden Fallsituation zu erstellen.

Zunächst war angedacht, über eine lokale Wirtschaftsorganisation Zugang zu berichtspflichtigen Unternehmen nach CSR-RUG zu erlangen. Bedauerlicherweise blieben mehrere dahingehend gestartete Versuche, eine Stichprobe zu erzeugen, die unter Umständen auch lokale Einblicke gewährt hätte, erfolglos. Schließlich wurde eine Stichprobe auf Zufallsbasis vor dem Hintergrund einer publizierten Liste berichtspflichtiger Unternehmen erstellt (Kluge & Sick, 2016). Wichtig erschien dabei die Repräsentanz unterschiedlicher Industrien und die Streuung der kapitalmarktorientierten Unternehmen über unterschiedliche Börsenindizes.

Von 536 berichtspflichtigen Unternehmen hat das Forschungsteam 106 Unternehmen mit individualisierten E-Mails und Einladungsschreiben kontaktiert, das entspricht einem Fünftel der Gesamtmenge. Um die Stichprobe möglichst groß zu gestalten, wurden auch Erinnerungsmails an die kontaktierten Unternehmen gesendet.

14 Unternehmen erklärten sich bereit, bei dem Vorlaufforschungsprojekt mitzuarbeiten. Vor dem Start der Datenerhebung, sagten bedauerlicherweise von diesen 14 Unternehmen vier Ihre Teilnahme wieder ab.

Anonymisierte Charakteristika der teilnehmenden Unternehmen sind in Tabelle 2 skizziert. Von den teilnehmenden Unternehmen wurden Primärdaten und Sekundärdaten zum Zwecke der Triangulation erhoben (Jick, 1979). Bei den Primärdaten handelt es sich um semistrukturierte Interviews von einer Länge zwischen 40 und 94 Minuten und einer durchschnittlichen Dauer von 67 Minuten. Diese Tiefeninterviews folgten einem Fragenkatalog, der eine Interpretation nach Laughlin (1991) erlauben sollte. Bei den Sekundärdaten handelt es sich um Daten, die den Rahmen für unsere Interviews bildeten: Eigenpublikationen der Unternehmen und Medienberichte über Nachhaltigkeitsaktivitäten der beteiligten Unternehmen.

Die empirischen Methoden sollten schließlich zur Beantwortung der folgenden zentralen Forschungsfrage eingesetzt werden:

Was sind die Effekte des CSR-RUG hinsichtlich des Ausmaßes der daraus resultierenden Veränderungen auf dem Unternehmenslevel?

In Anbetracht unseres Evaluationsinteresses hatte der analytische Ansatz das Ziel, Laughlins (1991) Model empirisch auszufüllen. Unser Ansatz folgte darum den nachfolgenden Schritten:

- Zunächst waren die Sekundärdokumente inhaltlich mit unserem Evaluationsinteresse analysiert worden (Bowen, 2009)
- In einem zweiten Schritt wurden während der Interviews Codes in Echtzeit vergeben, die sich aus unserem Evaluationsframework ergeben hatten (Saldaña, 2009)
- Es wurden zusätzlich Audioaufnahmen angefertigt, die anschließend transkribiert wurden; diese wurden dann mit Hilfe einer qualitativen Datenanalysesoftware ebenfalls codiert
- Anschließend wurden Fallstudien der einzelnen Unternehmen verfasst, um Quervergleiche anstellen zu können; währenddessen wurden Analyseergebnisse der Dokumentenanalyse, der „Echtzeitcodes“ und des elektronischen Kodierungsverfahrens trianguliert, um die Validität unser Fälle zu gewährleisten
- Zuletzt verfasste das Forschungsteam eine Forschungspublikation und präsentierte die Projektergebnisse mehrfach vor unterschiedlichen Anspruchsgruppen und verfeinerte die Resultate auf Basis des erhaltenen Feedbacks

Es kann als Resultat festgehalten werden, dass weder totale Inaktivität (*inertia*) noch fundamentale Veränderungen morphogenetischer Art als Resultat des CSR-RUG auf Unternehmensebene festgestellt wurden. Alle Organisationen wiesen Veränderungen des ersten Grades auf. Die Mehrheit der Unternehmen (5) zeigten Veränderungen, die das Forschungsteam nach Laughlin (1991) als *rebuttal* einordnete. Bei diesen Unternehmen (Air Corp, Car Corp, DIY Corp, Ind Corp, Sports Corp) fanden lediglich geringe Veränderungen der Unternehmensstrukturen (*design archetypes*) statt. Dies hatte den Hintergrund, dass diese Unternehmen schon über entsprechende Berichtsstrukturen verfügten und diese lediglich leicht an die gesetzlichen Erfordernisse angepasst wurden. Die verbleibenden vier Unternehmen ordnete das Forschungsteam ebenfalls in Veränderungen ersten Grades ein,

allerdings in den Typ der *reorientation*. Bei diesen Unternehmen handelte es sich um Unternehmen, die entweder inhaltliche Berichtsstrukturen ausbauen mussten, die auch personell unterlegt wurden, (Pack Corp) oder sogar erst gänzlich aufbauen mussten (Cable Corp HI Corp, Supply Corp).

Es hat sich jedoch gezeigt, dass sich alle Unternehmen in parallelen Transformationsprozessen zu (teilweise industriespezifischen) Nachhaltigkeitszielen befinden. Diese deuten auf eine langfristige Nachhaltigkeitsausrichtung hin, die wegen ihrer langen Fristigkeit kaum sichtbar sind. Solche Effekte können mit Gray et al. (1995) theoretisch gefasst werden. Derartige Transformationsprozesse mögen laut Gray et al. (1995) zunächst trivial erscheinen und die Organisation nicht grundlegend in ihren *interpretative schemes* beeinflussen, aber langfristig haben sie einen strategisch wirksamen Effekt auf das Nachhaltigkeitsmanagement. Die Autoren führten darum *colonization* und *evolution* für Veränderungen des ersten Grades ein. In unserem Fall ist dies (teilweise) die Angst vor den Konsequenzen der sich abzeichnenden gesamtgesellschaftlichen Transformation, die Unternehmen dazu bewegt, diese defensiv anzugehen, ohne dabei die *interpretative schemes* des Unternehmens zu verändern. Ein Beispiel für eine derartige Kolonisierung stellt in der vorliegenden Erhebung Car Corp dar, die zwar aus kurzfristig ökonomischen Gesichtspunkten weiterhin auf den Verbrennungsmotor setzt, obschon das Unternehmen eine wettbewerbsstrategische Ausrichtung an Nachhaltigkeit postuliert und auch erste Modelle abseits des klassischen Verbrennungsmotors anbietet. Langfristig ist jedoch für das Unternehmen Veränderung allerdings zweiter Ordnung und eine tiefgreifende Neuorientierung unablässig.

Einen Fall „langsamer“ *Evolution* von morphostatischer Natur hin zu einem morphogenetischen Wandel ist das Beispiel von Sports Corp. Dieses Fallbeispiel zeigt eine Veränderung der *interpretative schemes* hin zur Nachhaltigkeit. Allerdings muss das Unternehmen zum Teil noch auf konventionelle Wertschöpfung zurückgreifen, bevor es vollständig auf Nachhaltigkeit ausgerichtet sein wird.

Bei diesen beiden Unternehmen ist der „kleinere“ Implementierungsprozess des CSR-RUG in den größeren Transformationsprozess eingebettet und mag langfristig zu einem morphogenetischen Wandel in Kombination der beiden Prozesse münden. Eine tiefere Analyse der Resultate ist in der aktuell entstehenden wissenschaftlichen Publikation vorgesehen.

Anonymisierter Name	Wirtschaftsbereich	Hintergrund
HI Corp	Immobilien	Ein führender Anbieter von Wohnimmobilien in Deutschland, der in den letzten vier Jahren seine selbst veröffentlichten Finanzkennzahlen steigern konnte. Die HI Corp erwartete eine positive zukünftige Entwicklung und plante ihre Internationalisierung.
Car Corp	Automobil	Ein weltweit tätiges Automobilunternehmen, das in der Branche führend ist. Die Fünfjahresübersicht zeigt positive Volumendaten für verkaufte Einheiten, Produktionseinheiten und Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Wichtige Finanzkennzahlen zeigen entweder eine positive Entwicklung oder deuten auf eine Erholung von Werten hin, die vorübergehend gesunken sind. Das Unternehmen steht vor einer aktuellen Umweltkrise. Es hat zukünftige Herausforderungen für das Unternehmen und die Industrie identifiziert.
Pack Corp	Verpackungsanlagen	Pack Corp ist ein vertikal integrierter Hersteller von Abfüll- und Verpackungstechnologie. Die aufgeführten Kennzahlen der letzten fünf Jahre zeigen eine positive Entwicklung. Pack Corp veröffentlichte einen positiven Ausblick und plant, in neue Standorte zu investieren.
Air Corp	Luftfahrt	Air Corp produziert Turbinen vor allem für die Flugzeugindustrie. Es wies für 2017 die bisher positivsten Zahlen auf und prognostizierte für 2018 eine weitere positive Entwicklung.
Cable Corp	Kabel	Cable Corp ist ein Engineering- und Produktionsunternehmen, mit einem Fokus auf der Kabelproduktion. 2015 und das Folgejahr wurden angesichts der positiven Entwicklung des Jahres 2017 als schwierig bezeichnet. Die Cable Corp steht 2018 vor erheblichen Herausforderungen wie steigenden Rohstoffpreisen und einem Rückgang der Aufträge aus der Automobilindustrie.
DIY Corp	Baumarkt	DIY Corp verzeichnete in den letzten fünf Jahren steigende Umsätze. Es bietet DIY-Lösungen in seinen physischen und Online-Shops an. Aufgrund der zunehmenden Bedeutung des E-Commerce sieht es sich einem wettbewerbsintensiveren Umfeld gegenüber. Dennoch ist der Ausblick mäßig optimistisch.
Sports Corp	Sportbekleidung	Sports Corp ist ein Hersteller von Sportbekleidung. In den letzten fünf Jahren wurde ein starker Umsatzanstieg erzielt. Das Unternehmen plant mit einer weiteren stabilen Umsatzsteigerung. Für den Rest des fünfjährigen Strategiezyklus bis 2020 wird ein Nettoeinkommenswachstum von über 20 Prozent erwartet.
Supply Corp	Automobilzulieferer	Supply Corp ist ein globaler Industrielieferant, vor allem für die Automobilindustrie. In den letzten fünf Jahren wurden Umsatz und EBIT gesteigert. Das Unternehmen gibt einen positiven Ausblick auf die finanziellen Ziele bis 2020.
Ind Corp	Anlagenbauer und Ingenieurdienstleister	Ind Corp ist ein global operierender Akteur im Anlagenbau und ein Dienstleister im Ingenieurbereich. 2014 war für das Unternehmen das zweite Jahr in Folge mit einem Umsatzrückgang. Die Periode von 2014-2018 verzeichnete konstant wachsende Jahresergebnisse. Folglich erwartet Ind Corp, die selbst gesteckten strategischen Ziele bis zum Jahr 2020 oder früher zu erreichen.

Tabelle 2: Kurzprofil der in der Stichprobe enthaltenen Unternehmen

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Mit Blick auf die Projektnachhaltigkeit zielt die Forschung darauf ab, den Effekt des CSR-RUG zu evaluieren und die Ergebnisse des Vorlaufforschungsprojekts für Veröffentlichungen und der Initiierung weiterer Publikationen einzusetzen:

- Beginn 2019: Die Einreichung eines englischsprachigen Fachartikels in einem referierten Journal mit dem wissenschaftlichen Fokus Nachhaltigkeitsmanagement
- Einreichung eines Beitrags zur deutschsprachigen Publikation der Ergebnisse in der Fachzeitschrift *Ökologisches Wirtschaften* (erscheint im Sommer 2019)
- Weiteres Ergebnis des Forschungsprojekts waren u. a. zwei Abschlussarbeiten zum sich verändernden Berichtsverhalten berichtspflichtiger Unternehmen nach CSR-RUG sowie eine Abschlussarbeit zur Implementierung der Richtlinie in eine größer angelegten Einzelfallstudie. Die Autorinnen und Autoren der drei genannten Publikationen bildeten eine Arbeitsgruppe und standen im intensiven Austausch
- Präsentation der Forschungsergebnisse auf der IÖW Fachkonferenz „CSR-Reporting in Zeiten der Berichtspflicht“ am 21. Februar 2019 in Berlin
- Erste Sondierungen mit Forschungspartnern zur Erarbeitung eines Forschungsantrags zur transformativen Wirkung des CSR-RUG

Im Projektverlauf haben sich weitere Fragestellungen herauskristallisiert:

- Wie wird die Implementierung eines Systems zur Erfüllung der nichtfinanziellen Berichtspflichten als Prozess als zu administrierender Qualitätsmanagementprozess realisiert? Zur Erforschung der Qualitätsdimension wäre es notwendig, Längsschnittdaten zu erheben. Zwar haben die vorliegenden Daten bereits einen leicht prozessualen Charakter, allerdings nicht über unterschiedliche Berichtsgenerationen hinweg
- Ein Phänomen, das in allen Interviews präsent war, ist die CSR-RUG Implementierung auf Unternehmensebene als neues Geschäftsfeld von Wirtschaftsprüfungsunternehmen. Es erscheint darum als lohnenswert, das Phänomen des CSR-RUG aus der Warte der Wirtschaftsprüfungsgesellschaften zu betrachten

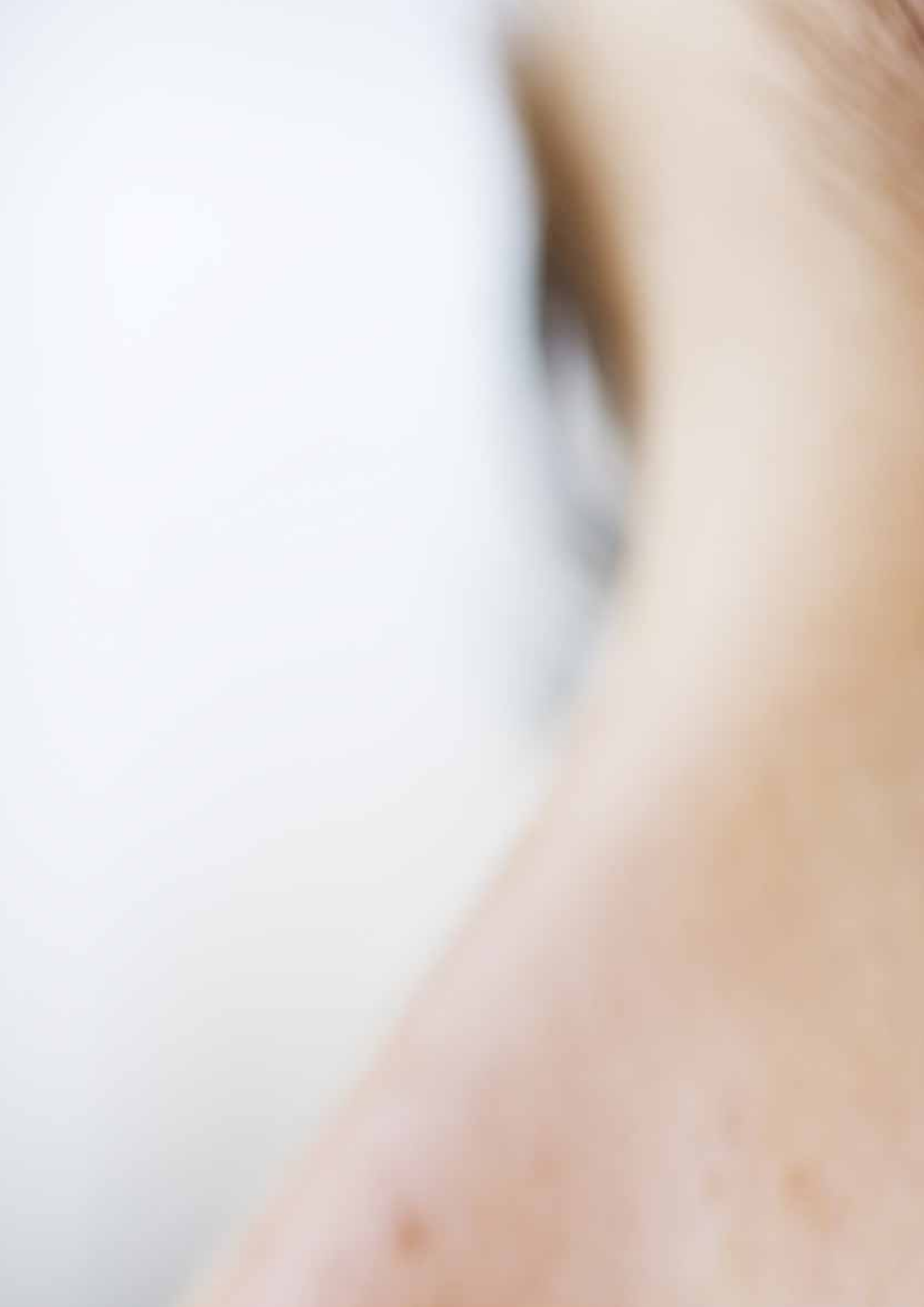
Danksagung und Limitationen

An dieser Stelle möchten wir der TH Nürnberg für die finanzielle Förderung des Projekts danken. Zudem gilt unser Dank den Firmen, die sich dazu bereit erklärt hatten, an diesem Vorlaufforschungsprojekt teilzunehmen.

Das Projekt sah sich mehreren Limitationen ausgesetzt, da die Bereitschaft von Unternehmen zu dieser frühen Phase des CSR-RUG über die Implementierungen zu berichten, relativ gering und von hoher Unsicherheit geprägt war. Entsprechend fiel die Stichprobengröße relativ klein aus. Eine höhere Anzahl von Interviewpartnern hätte in Bezug auf den Implementierungs- und Veränderungsvorgang zu noch besser zu generalisierenden Erkenntnissen geführt. Aber die für die Phase der Vorlaufforschung, typischen Limitierungen liefern wertvolle Hinweise für eine nachfolgende breiter angelegte Studie. So zeigen die Diskussionen um die Ergebnisse der Studie Implikationen für die weitere, tiefer gehende Erforschung des CSR-RUG auf Unternehmensebene auf. Entsprechend werden in den kommenden Monaten weitere Befragungen von Unternehmen durchgeführt und die Ergebnisse in einer umfassenderen Studie publiziert.

6. Literatur

- Biswas, S., & O'Grady, W. (2016). Using external environmental reporting to embed sustainability into organisational practices. *Accounting Research Journal*, 29(2), 218–235. <https://doi.org/10.1108/ARJ-04-2015-0063>
- Bouten, L., & Hoozée, S. (2013). On the interplay between environmental reporting and management accounting change. *Management Accounting Research*, 24(4), 333–348. <https://doi.org/10.1016/J.MAR.2013.06.005>
- Bowen, G. A. (2009). Document Analysis as a Qualitative Research Method. *Qualitative Research Journal*, 9(2), 27–40. <https://doi.org/10.3316/QRJ0902027>
- Bryman, A. (1984). The Debate about Quantitative and Qualitative Research: A Question of Method or Epistemology? *The British Journal of Sociology*, 35(1), 75–92.
- da Silva Monteiro, S. M., Aibar-Guzmán, B., & Aibar-Guzmán, B. (2010). Organizational and accounting change within the context of the environmental agenda: Evidence from Portugal. *Journal of Accounting & Organizational Change*, 6(4), 404–435. <https://doi.org/10.1108/18325911011091800>
- Deutscher Bundestag. Gesetz zur Stärkung der nichtfinanziellen Berichterstattung der Unternehmen in ihren Lage- und Konzernlageberichten (CSR-Richtlinie-Umsetzungsgesetz) (2017).
- Evans, M., & Tucker, B. P. (2015). Unpacking the package: Management control in an environment of organisational change. *Qualitative Research in Accounting and Management*. <https://doi.org/10.1108/QRAM-07-2015-0062>
- Fraser, M. (2012). “Fleshing out” an engagement with a social accounting technology. *Accounting, Auditing & Accountability Journal*, 25(3), 508–534. <https://doi.org/10.1108/09513571211209626>
- Gray, R., Walters, D., Bebbington, J., & Thompson, I. (1995). The Greening of Enterprise: An Exploration of the (NON) Role of Environmental Accounting and Environmental Accountants in Organizational Change. *Critical Perspectives on Accounting*, 6(3), 211–239. <https://doi.org/10.1006/CPAC.1995.1021>
- Jick, T. D. (1979). Mixing Qualitative and Quantitative Methods: Triangulation in Action. *Administrative Science Quarterly*, 24(4), 602. <https://doi.org/10.2307/2392366>
- Kluge, N., & Sick, S. (2016). Geheimwirtschaft bei Transparenz zum gesellschaftlichen Engagement? Zum Kreis der vom CSR-Richtlinie-Umsetzungsgesetz potentiell betroffenen Unternehmen. Mitbestimmungsreport 27. Retrieved from <https://www.econstor.eu/handle/10419/175255>
- Larrinaga-Gonzalez, C., & Bebbington, J. (2001). Accounting change or institutional appropriation?—A case study of the implementation of environmental accounting. *Critical Perspectives on Accounting*, 12(3), 269–292. <https://doi.org/10.1006/CPAC.2000.0433>
- Larrinaga-González, C., Carrasco-Fenech, F., Javier, F., Carmen, C.-G., José, C.-R., Páez-Sandubete, M., & Páez, M. (2001). Accounting, Auditing & Accountability Journal The role of environmental accounting in organizational change -An exploration of Spanish companies. *Accounting, Auditing & Accountability Journal* (Vol. 14). Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1108/09513570110389323>
- Narayanan, V., & Adams, C. A. (2016). Accounting and Business Research Transformative change towards sustainability: the interaction between organisational discourses and organisational practices Transformative change towards sustainability: the interaction between organisational discourses a. <https://doi.org/10.1080/00014788.2016.1257930>
- Passetti, E., Cinquini, L., & Tenucci, A. (2018). Implementing internal environmental management and voluntary environmental disclosure. *Accounting, Auditing & Accountability Journal*, 31(4), 1145–1173. <https://doi.org/10.1108/AAAJ-02-2016-2406>
- Patton, M. Q. (1990). *Qualitative evaluation and research methods* (2nd ed.). Thousand Oaks, CA.
- Saldaña, J. (2009). *The coding manual for qualitative researchers*. London, Thousand Oaks (CA), New Delhi, Singapore: SAGE Publications.
- Stubbs, W., & Higgins, C. (2014). Integrated Reporting and internal mechanisms of change. *Accounting, Auditing & Accountability Journal*, 27(7), 1068–1089. <https://doi.org/10.1108/AAAJ-03-2013-1279>
- Tilt, C. A. (2006). Linking environmental activity and environmental disclosure in an organisational change framework. *Journal of Accounting & Organizational Change*, 2(1), 4–24. <https://doi.org/10.1108/18325910610654108>
- Yin, R. (2009). *Case study Research: design and methods*.







BrioLens – Innovatives Brillouin- Spektrometer für die optische in-vivo- Diagnostik der menschlichen Hornhaut und Augenlinse

Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Engelbrecht
Dr.-Ing. Roman Kruglov
Institut für Anwendungen optischer Polymerfasern (POF-AC)
TH Nürnberg

Einige Erkrankungen des menschlichen Auges wie Presbyopie (Altersweitsichtigkeit), Katarakt (Grauer Star) oder ein Kereatoconus (Hornhautauswölbung) machen sich frühzeitig durch Veränderung der viskoelastischen Eigenschaften der Hornhaut und der Linse bemerkbar. Eine kontaktlose optische insitu-Diagnostik könnte sowohl für die ophthalmologische Forschung wie auch für die klinische Diagnostik neue Erkenntnisse zum Nutzen der Patientinnen und Patienten bieten. Eine mögliche Methode ist die Messung der Brillouin-Streuung eines eingestrahlt Lasers. Dieses Spektrum hängt in charakteristischer Weise von den viskoelastischen Eigenschaften eines Objekts ab. Das Ziel ist es, im Rahmen dieses Projekts ein augensicheres, fasergekoppeltes Brillouin-Spektrometer zu entwickeln. Eine wesentliche Herausforderung ist eine ausreichend rauscharme Detektor-Optoelektronik, um die extrem schwache Lichtleistung der Brillouin-Streuung zu erfassen.

Wesentliche Projektziele

1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2018
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Institut für Anwendungen optischer Polymerfasern (POF-AC)
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Engelbrecht
Kontaktdaten	E-Mail: rainer.engelbrecht@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Das Auge ist das wichtigste Sinnesorgan des Menschen. Pathologische Veränderungen des Auges führen zu erheblichen Einschränkungen der Lebensqualität und verursachen hohe Kosten im Gesundheitswesen. Altersbedingte Degradationen der Elastizität der Augenlinse (*Lens oculi*) führen zur Altersweitsichtigkeit (Presbyopie), die in einigen Studien bereits als Vorstufe des Grauen Stars (*Katarakt*) mit vollständiger Linsentrübung angesehen wird. Dies betrifft einen Großteil der Bevölkerung im hohen Alter, das Einsetzen einer Intraokularlinse (IOL) ist eine der häufigsten Operationen überhaupt. Eine weitere pathologische Veränderung der Cornea ist der Kereatoconus (Hornhautauswölbung), die aus einer Schwächung des Hornhautgewebes resultiert.

Die Diagnose des vorderen Augenbereichs aus Hornhaut (*Cornea*), den Augenkammern (*Camerae bulbi*) sowie der Linse hat daher für die akute Patientenversorgung und klinische Forschung eine große Bedeutung. Von besonderem Interesse sind daher berührungslose in-vivo Diagnosesysteme zur Messung der viskoelastischen Eigenschaften von Hornhaut und Linse.

Eine Methode zur berührungslosen, optischen Messung der viskoelastischen Eigenschaften eines transparenten Objekts ist die sogenannte Brillouin-Streuung - eine Streuung von Lichtwellen an Schallwellen in einem Medium [1]. Schallwellen sind periodische Dichtewellen, die sich mit Schallgeschwindigkeit v_A ausbreiten. Die für spon-

tane Brillouin-Streuung relevanten, regellosen Schallwellen mit Frequenzen im GHz-Bereich (Hyperschall) sind in jedem Körper durch thermische Anregung stets vorhanden, wenn auch mit geringer Amplitude. Aufgrund des photoelastischen Effekts entsteht durch eine Schallwelle auch eine periodische Modulation des optischen Brechungsindex, an dem Lichtwellen wie an einem Bragg-Gitter gestreut werden können. Aufgrund der Streuung an mit v_A bewegten Brechzahlgittern und aufgrund des Doppler-Effektes hat das gestreute Licht einen charakteristischen, vom Streuwinkel θ abhängigen Brillouin-Frequenzversatz

$$f_B(\theta) = 2n \frac{v_A}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \sim \sqrt{\frac{Y}{\rho_0}},$$

wobei λ die Lichtwellenlänge und n der Brechungsindex des Mediums ist. Für die Streuung in Rückwärtsrichtung ($\theta=180^\circ$) wird dieser Frequenzversatz maximal und ist typischerweise im Bereich etlicher GHz. Abbildung 1b zeigt ein gemessenes Spektrum der stimulierten Brillouin-Streuung (SBS) in Quarzglas mit einem mittleren Frequenzversatz von $f_B = 11,1$ GHz bei einer Wellenlänge von 1550 nm, gegeben durch die Schallgeschwindigkeit in Glas. In biologischem Gewebe ist diese Brillouin-Frequenz deutlich geringer und kann so von der Streuung in Glasfasern unterschieden werden. Weiterhin ist eine gewisse Brillouin-Bandbreite B_B des Streulichts erkennbar, die durch die Dämpfung der Schallwellen aufgrund der inneren mechanischen Reibung im Medium entsteht. Für die Diagnostik ist nun relevant, dass die Schallgeschwindigkeit und damit die Brillouin-Frequenz f_B abhängig vom mechanischen Elastizitätsmodul Y (Youngs' Modulus) sowie der Dichte ρ_0 ist, der die Steifigkeit und Elastizität des Materials beschreibt. Die Brillouin-Bandbreite B_B wiederum ist abhängig von der Viskosität η und damit der inneren Reibung eines Festkörpers:

$$B_B \sim \frac{\eta}{\rho_0}$$

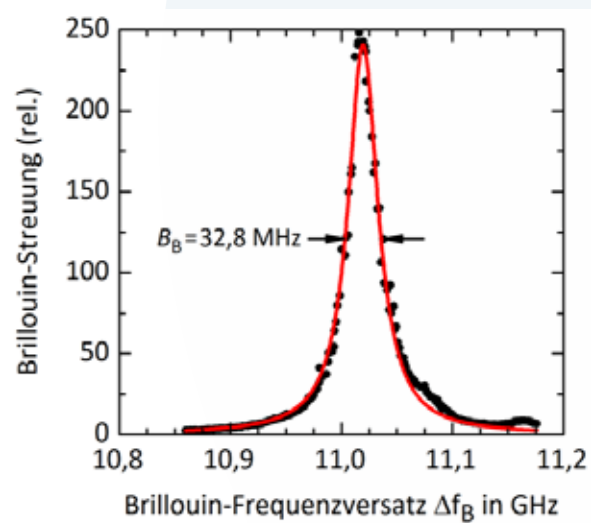
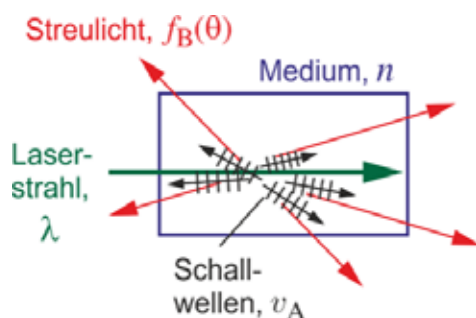


Abbildung 1: Entstehung der Brillouin-Streuung (a) sowie gemessenes Brillouin-Spektrum einer 100 m langen Glasfaser (b) [1]; Grafiken: R. Engelbrecht, R. Kruglov, POF-AC, TH Nürnberg

Durch die Messung des Spektrums der Brillouin-Streuung können also diese wichtigen mechanischen Eigenschaften berührungslos bestimmt werden, die z.B. in der Linse für die nachlassende Akkommodationsfähigkeit im Alter oder andere pathologische Veränderungen relevant sind. Hierzu wird der Lichtstrahl eines Lasers geringer Leistung in die Linse fokussiert und durch eine konfokale Optik das rückgestreute Licht nur aus diesem Fokus innerhalb der Linse aufgenommen. Dabei entstehen zwei Herausforderungen:

- Das Streulicht der spontanen Brillouin-Streuung ist aufgrund der geringen Amplitude der thermisch angeregten Schallwellen sehr schwach und erfordert eine hochempfindliche Lichtdetektion
- Der optische Frequenzversatz des Streulichtes von einigen GHz sowie die Bandbreite im Bereich von 100 MHz sind sehr klein im Vergleich zur optischen Frequenz des Lasers von einigen 100 THz, für Licht im nahen Infrarot oder im Sichtbaren. Dies erfordert extrem hochauflösende optische Spektrometer.

Hierfür sind aus der Literatur Labor-Lösungen und erste angekündigte Produkte für eine in-vivo Augendiagnostik bekannt, die aktuell jedoch folgende Probleme und Einschränkungen haben [2,3]:

- Die zur Abtrennung der viel stärkeren Spiegelung am Auge und der Rayleigh-Streuung erforderlichen optischen Filter sind aufwendige und teure Sonderbauteile und haben eine nur mäßige Auflösung
- Die zur Detektion verwendeten, intensitätsverstärkten und gekühlten Zeilenkameras sind sehr teuer
- Durch die Verwendung sichtbarer Laser entstehen eine Blendwirkung sowie eine Netzhautgefährdung

Das Projekt zielt daher darauf ab, die Grundlagen für ein neues Konzept zu untersuchen, das im Erfolgsfall zu einem innovativen Brillouin-Spektrometer für die optische in-vivo-Diagnostik der menschlichen Hornhaut und Augenlinse weiter entwickelt wird (Abbildung 2).

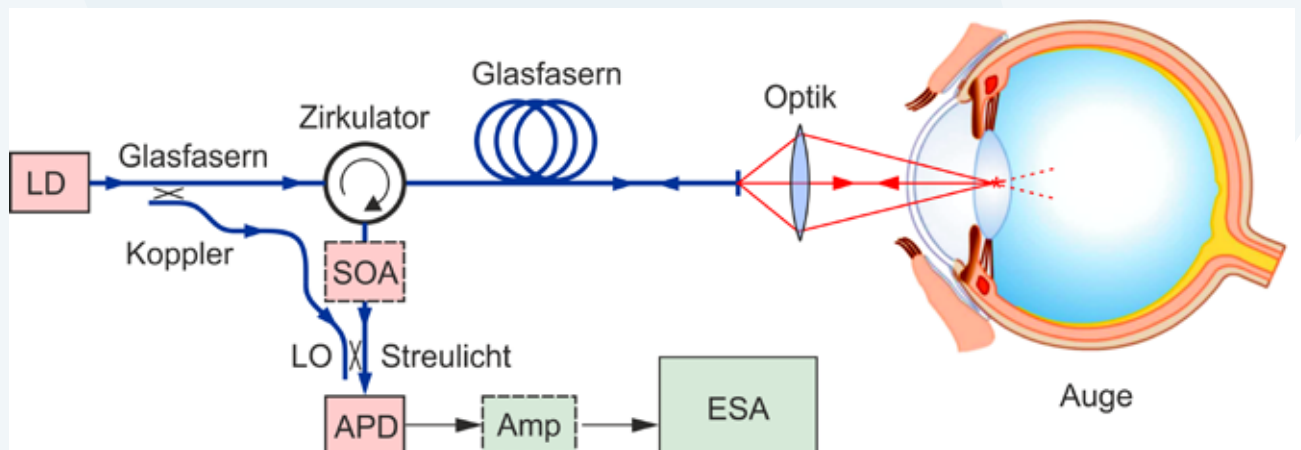


Abbildung 2: Aufbau eines fasergekoppelten Brillouin-Spektrometers zur in-vivo Diagnostik am Auge; Grafik: R. Engelbrecht, R. Kruglov, POF-AC, TH Nürnberg

3. Ziele des Forschungsprojekts

Ziel des Projekts sind ex-vivo Voruntersuchungen zur Entwicklung eines neuartigen optischen Messgerätes zur späteren in-vivo-Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von menschlicher Hornhaut und Linse sowie künstlicher Intraokularlinsen mittels Brillouin-Spektroskopie. Eine wesentliche Herausforderung ist eine ausreichend rauscharme Detektor-Optoelektronik, um die extrem schwache Lichtleistung der Brillouin-Streuung zu

erfassen. Die aus so kleinen Volumen rückgestreute Lichtleistung ist ersten Abschätzungen zufolge um acht bis neun Größenordnungen schwächer als das eingestrahlte Licht. Da die eingestrahlte Lichtleistung zur Vermeidung von Schäden im Auge begrenzt ist, stellt sie extreme Anforderungen an die optoelektronische Messtechnik. Durch Verwendung fasergekoppelter Komponenten aus der optischen Nachrichtentechnik soll trotzdem ein zuverlässiger und kostenoptimierter Aufbau realisiert werden, der sich durch folgende Innovationen auszeichnet (Abbildung 2):

- Verwendung einer Laserdiode (LD) bei 1310 nm im nahen Infrarot. Bei dieser Wellenlänge ist die Augenvorderkammer bis zur Linse ausreichend transparent, nicht jedoch der Glaskörper - dadurch ist es möglich, eine größere Leistung einzustrahlen, ohne die Netzhaut zu gefährden
- Heterodyne Mischung des Streulichts mit der Laserquelle (LO) an einer schnellen Avalanche-Photodiode (APD). Dadurch ist eine höchst sensitive Detektion der schwachen Brillouin-Streuung möglich. Zudem kann als Ergebnis (Differenzfrequenzen) das Brillouin-Spektrum im Strom der APD direkt mit einem herkömmlichen elektronischen Spektrumanalysator (ESA) im GHz-Bereich gemessen werden. Eine aufwendige optische Filterung ist dann nicht erforderlich, eine faseroptische Vorfilterung ist möglich.
- Untersuchung rauscharmer optischer Verstärker auf Halbleiter-Basis (SOA, semiconductor optical amplifier) in Kombination mit rauscharmen elektronischen Mikrowellenverstärkern (Amp) zur Minimierung des Detektorrauschens

Zunächst muss das neue Detektions-Konzept grundlegend validiert werden. Dies soll durch hochaufgelöste Messung der schwachen spontanen Brillouin-Streuung aus möglichst kurzen Glasfasersegmenten erfolgen. Damit kann das Gesamtsystem Schritt für Schritt entwickelt, getestet und optimiert werden. Das Forschungsteam zielt darauf ab, damit die Grundlage für Anschlussprojekte zu liefern, in denen mit einer Freistrahl-optik erste Messungen und weitere Konzeptoptimierungen an porcinen Augen ex-vivo durchgeführt werden. Das Fernziel sind Untersuchungen an humanen Augen mit klinischen Partnern.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Als Grundlage für Anschlussprojekte mit einer Freistrahlmessung an Augen, muss das faseroptische Detektionskonzept aufgebaut und getestet werden. Im Rahmen des Projekts werden daher zunächst die einzelnen Systemkomponenten spezifiziert, die marktverfügbaren Komponenten beschafft und eingehend charakterisiert. Zentrale Komponenten sind die DFB-Laserdiode als augensichere Lichtquelle, ein optischer Verstärker auf Halbleiterbasis (SOA, semiconductor optical amplifier), optionale optischer Filter auf Basis von Faser-Bragg-Gittern (FBGs) sowie eine ultrabreitbandige Photodiode zur heterodyn Detektion des Streulichts. Alternativ zur ursprünglich geplanten Avalanche-Photodiode (APD) wird im Projektverlauf ein sogenannter Balanced-Receiver untersucht, der bei heterodyner Licht-Detektion Vorteile hat. Weitere zentrale Komponenten, wie ein elektronischer Spektralanalysator (ESA) mit einer Bandbreite bis 26 GHz, um die erwarteten Brillouin-Frequenzen im Bereich von 5 GHz bis 15 GHz zu detektieren, stehen im Labor für optische Nachrichtentechnik zur Verfügung. Anschließend werden daraus fasergekoppelte Brillouin-Spektrometer aufgebaut und schrittweise optimiert.

Tests erfolgen durch die Messung der spontanen Brillouin-Streuung (SpBS) aus zunehmend kürzeren Glasfasersegmenten. Da das Spektrum und die Stärke der spontanen Brillouin-Streuung in Glasfasern wohlbekannt sind,

kann damit eine systematische Konzeptvalidierung erfolgen. Im Gegensatz dazu liegen für die Brillouin-Streuung aus biologischen Materialien wie Hornhaut oder Augenlinse nur qualitative erste Messergebnisse aus der Literatur vor. Diese sind jedoch schlecht geeignet, um die Performance des Systems während der Entwicklung zu testen. Auch machen Tests in Freistrahntechnik und aus kleinen Objektvolumen wegen der zu erwartenden äußerst kleinen Leistung der Brillouin-Streuung erst dann Sinn, wenn das Messsystem an kurzen Glasfaserproben soweit wie möglich hinsichtlich minimalem Detektorrauschen optimiert wurde.

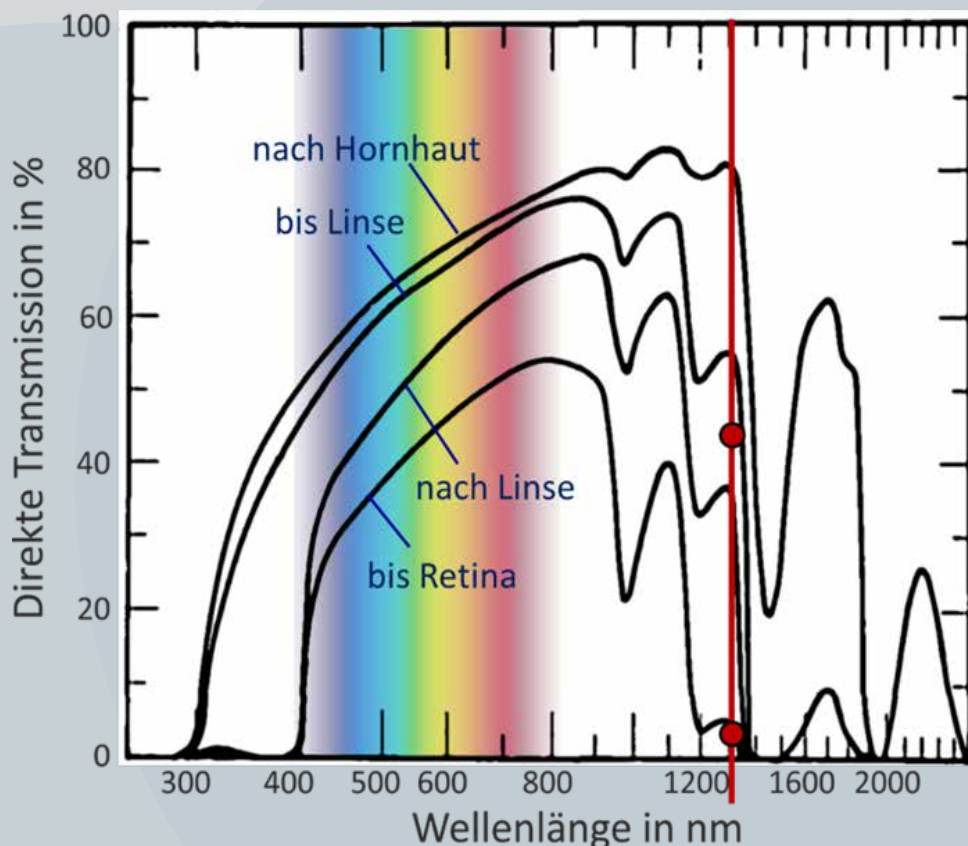


Abbildung 3: Spektrale Transmission durch das Auge sowie ausgewählte augensichere Wellenlänge von 1310 nm nach [4];
 Grafik: R. Engelbrecht, R. Kruglov, POF-AC, TH Nürnberg

Eine wichtige Festlegung zu Projektbeginn war die Festlegung der optischen Wellenlänge einer Laserdiode als Lichtquelle. Diese sollte einerseits bis zur Augenlinse vordringen, und andererseits nicht bis zur Netzhaut gelangen. Ein interessantes Wellenlängenfenster ist gemäß Literaturdaten der Bereich im nahen Infrarot um 1310 nm, wie in Abbildung 3 dargestellt [4]. Die direkte Transmission (ohne Streulichtanteile) bis zur Linse beträgt immerhin noch 50 Prozent, während die Transmission bis zur Retina auf unter 5 Prozent abgefallen ist. Wie in Bild 2 dargestellt, wird der Laser außerdem in die Linse fokussiert, um mit einem konfokalen Abbildungsprinzip auch das Streulicht nur aus dem Fokusbereich zu empfangen. Der Lichtstrahl ist nach dem Fokus divergent, sodass die Leistung auf der Retina auf eine größere Fläche verteilt wird. Um Verbrennungen im Bereich des Fokus in der Linse zu vermeiden, wird die Leistung des Lasers auf maximal 20 mW beschränkt. Ein weiterer Vorteil ist die geringe Dämpfung von Standard-Einmodenglasfasern bei 1310 nm. Daher gibt es zahlreiche Laserdioden und Faserkomponenten wie Koppler und Zirkulatoren, optische Halbleiterverstärker sowie Photodetektoren bei dieser Wellenlänge, die für Systeme der optischen Datenübertragung mit höchster Qualität und Zuverlässigkeit entwickelt wurden. Als

Lichtquelle wurde daher eine DFB-Laserdiode (distributed feedback) ausgewählt, die sich zudem durch eine monofrequente und spektral schmalbandige Lichtemission bei genau einer Wellenlänge bzw. genau einer optischen Frequenz f_0 auszeichnet. Für eine Wellenlänge von 1310 nm beträgt diese 228,84 THz.

Als Detektionsprinzip kommt eine sogenannte heterodyne Detektion zum Einsatz. Dabei wird an der Photodiode das Streulicht mit einem Teil des Lichts der Laserdiode (LO, Lokaloszillator) überlagert. Im elektrischen Photodiodenstrom entstehen dann alle Differenzfrequenzen der in den optischen Spektren enthaltenen Frequenzanteile. Das Streulicht enthält Spektralanteile bei $f_0 - f_B$, wobei f_B der Frequenzversatz der Brillouin-Streuung ist. Der LO hat die unveränderte optische Frequenz der Laserdiode f_0 . Für die Frequenzanteile im elektrischen Photodiodenstrom gilt daher:

$$f_{PD} = f_{LO} - f_{streu} = f_0 - (f_0 - f_B) = f_B$$

Dadurch können im Photodiodenstrom und einem elektrischen Spektrumanalysator (ESA) direkt die Brillouin-Frequenzen f_B im GHz-Bereich gemessen werden, die wiederum die Information über die viskoelastischen Eigenschaften des Streuobjekts enthalten. Die heterodyne Detektion ist dabei unabhängig von langsamen Veränderungen der optischen Frequenz f_0 bzw. der Wellenlänge der Laserdiode. Kleine Veränderungen der Wellenlänge sind typisch bei der Änderung der Temperatur und des Betriebsstroms der Laserdiode, wie eine Messung in Abbildung 4a zeigt. Solange man aber innerhalb des Transmissionsfensters in Bild 3 bleibt, ist dies wie beschrieben bei heterodyner Detektion kein Problem und ein wesentlicher Vorteil gegenüber dem bisherigen Stand der Technik, der optische Filter verwendet und empfindlich auf eine Veränderung der Wellenlänge der Lichtquelle reagiert.

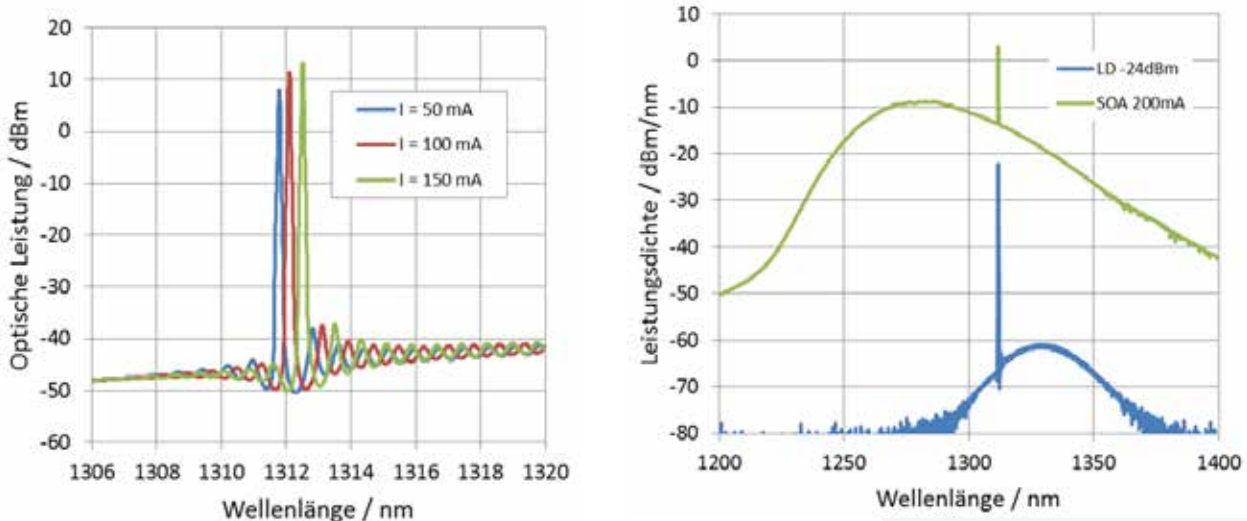


Abbildung 4: Spektrum der DFB-Laserdiode für verschiedene Ströme (a), sowie Ausgangsspektrum des optischen Halbleiterverstärkers (SOA) (b) mit Laserdiodenspektrum (LD) am Eingang; Grafiken: R. Engelbrecht, R. Kruglov, POF-AC, TH Nürnberg

Eine weitere wichtige Komponente in Abbildung 2 ist der optische Halbleiterverstärker (SOA) mit einer Lichtverstärkung von 25 dB (Verstärkungsfaktor >300) bei einer Wellenlänge von 1310 nm. In Abbildung 4b ist dies in der Verstärkung der Laserdiode durch den SOA zu sehen. Der SOA kann im optischen Aufbau wahlweise die Leistung der Laserdiode als LO oder des Streulichtes als Signal vor der heterodynen Detektion an der Photodiode verstärken. Die Erwartung vor Projektbeginn war, dass damit eine wesentliche Verbesserung des Messsignals im Vergleich zum elektronischen Detektorrauschen erzielt werden kann, wenn vor der Detektion die optische Leistung verstärkt wird. Wie in Abbildung 4b jedoch auch zu sehen, erzeugt der SOA zusätzlich ein breitbandiges optisches Rauschen (ASE, amplified spontaneous emission). Durch eine heterodyne Mischung unterschiedlicher optischer Spektralanteile an der Photodiode entstehen unerwünschte Rauschbeiträge (spontaneous-spontaneous beat noise) auf der elektronischen Seite im Bereich der zu messenden Brillouin-Frequenz f_B .

Abbildung 5 zeigt ein Blockschaltbild zur testweisen Messung eines Brillouin-Spektrums aus 6 m Glasfaser (5 m zuzüglich 1 m Pigtail am Zirkulator). Neben der Laserdiode (LD), dem optischen Halbleiterverstärker (SOA) sind zwei 50/50-Koppler zur Aufteilung des Lichts in verschiedene Glasfaserstecken sowie ein Zirkulator zu sehen, der das rückgestreute Licht selektiv über Glasfasern zum Photodetektor leitet.

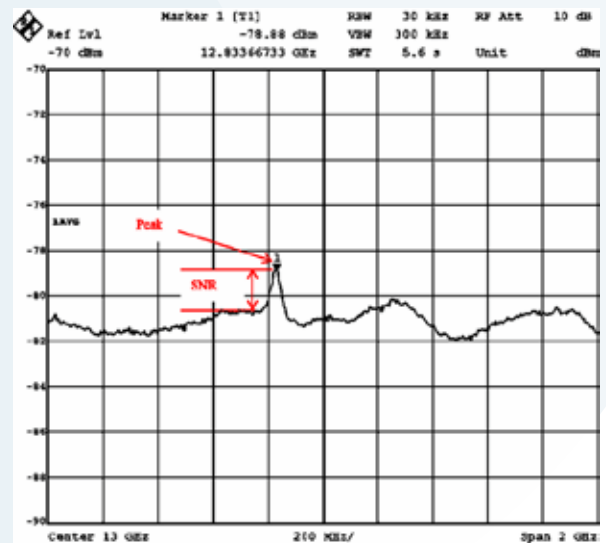
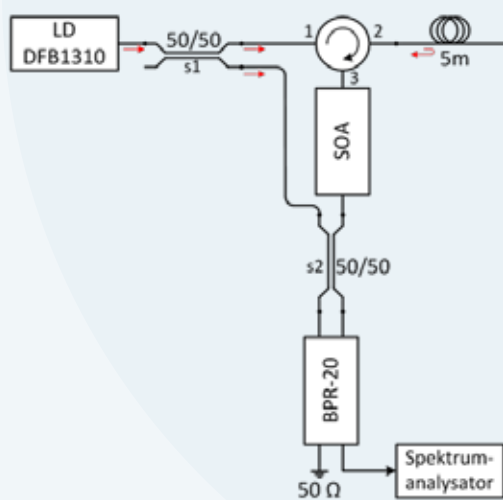


Abbildung 5: Blockschaltbild zur Messung eines Brillouin-Spektrums aus 6 m Glasfaser (links) und Messergebnis (rechts); Grafiken: R. Engelbrecht, R. Kruglov, POF-AC, TH Nürnberg

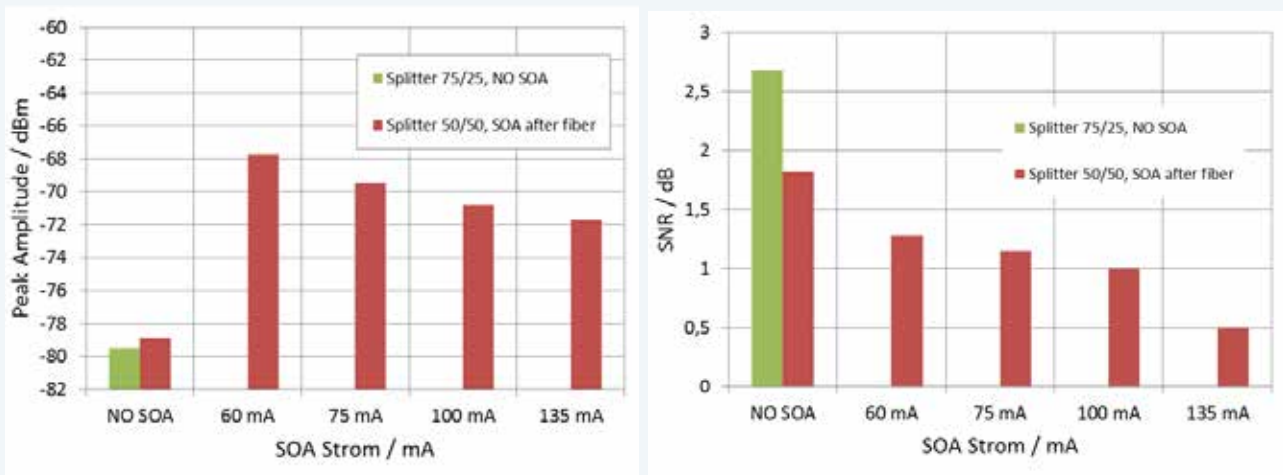
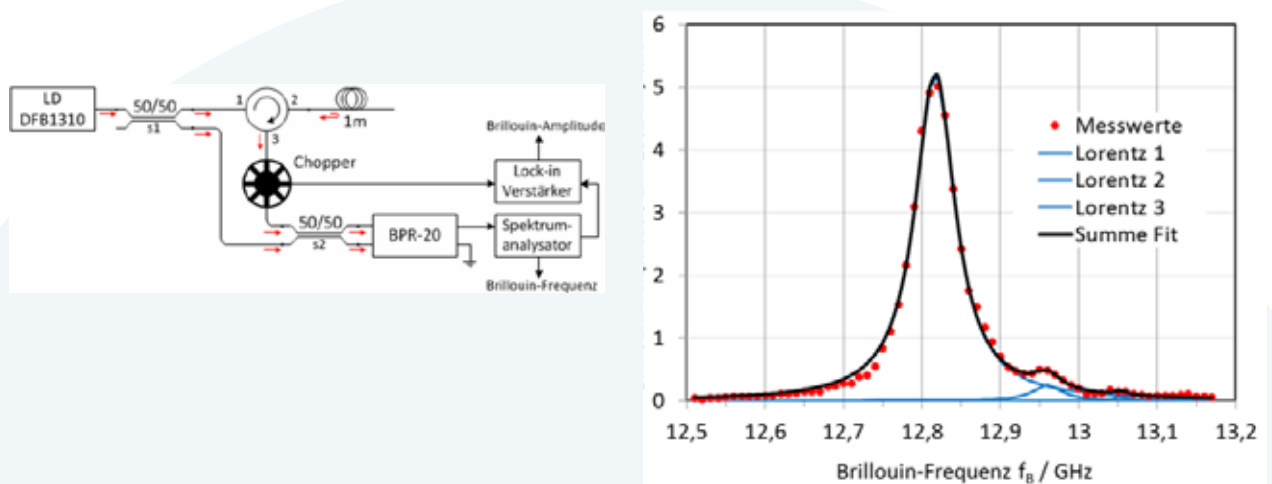


Abbildung 6: Peak-Amplitude (a) und Signal-Rausch-Verhältnis (b) einer Brillouin-Testmessung ohne optischen Halbleiterverstärker (SOA), sowie mit SOA bei verschiedenen Betriebsströmen; Grafiken: R. Engelbrecht, R. Kruglov, POF-AC, TH Nürnberg

Anstelle einer Avalanche-Photodiode (APD) wie in Abbildung 2 geplant, wird nun ein sogenannter Balanced Photoreceiver mit 20 GHz Bandbreite eingesetzt (BPR-20). Dieser besteht aus zwei Photodioden im Gegentaktbetrieb, sodass beide Ausgänge des 50/50-Kopplers s_2 zur Überlagerung von Laserdiode als LO und Brillouin-Rückstreuung als Signal genutzt werden können. Dies verbessert das Signal-Rauschverhältnis um den Faktor $\times 2$ und vermeidet eine Übersteuerung einer APD bei den für heterodyne Detektion benötigten hohen LO-Leistungen auf der Photodiode. Zusätzlich hat das ausgewählte Modell BPR-20 einen integrierten HF-Verstärker, sodass auf den HF-Verstärker (Amp) in Abbildung 2 vor dem Spektrumanalysator (ESA) verzichtet werden kann. Verglichen wird nun eine Messung des Spektrums der Brillouinfrequenzen f_B mit und ohne SOA. Abbildung 5 zeigt ein ausgewähltes Messergebnis. Auf einem breitbandigen Rauschen hebt sich die Brillouin-Streuung als kleine Spitze bei einer mittleren Frequenz von 12.83 GHz ab (Marker 1). Diese Frequenz sowie die Breite dieser Spitze sind durch die viskoelastischen Eigenschaften der untersuchten Glasfaser als Testobjekt bestimmt. Für die Systemoptimierung ist die Höhe („Peak“) dieser Spitze maßgeblich sowie der Abstand zum Rauschhintergrund („SNR“, signal-to-noise ratio). Abbildung 6 zeigt Ergebnisse ohne SOA sowie mit SOA bei verschiedenen Betriebsströmen. Wie bereits beschrieben, wird mit dem SOA die optische Leistung und damit die gemessene Peak-Amplitude auf der elektrischen Seite erhöht. Gleichzeitig macht sich aber das breitbandige optische Rauschen des SOA bemerkbar, sodass sich mit SOA der Signal-Rausch-Abstand verschlechtert. Ohne weitere Filterung des Rauschens bringt der SOA keine Verbesserung, sondern eine Verschlechterung der Brillouin-Messtechnik. Dies soll im Ausblick mit einem optischen Filter behoben und weiter untersucht werden.

Eine wesentliche Verbesserung hinsichtlich der Messung der Brillouin-Streuung aus immer kürzeren Strecken eines Testobjektes konnte durch Verwendung eines dem elektrischen Spektrumanalysator nachfolgenden Lock-In-Verstärkers erzielt werden. Bild 7 zeigt den Messaufbau sowie ein Messergebnis der Brillouin-Streuung aus 2 m Glasfaser (1 m zuzüglich 1 m Pigtail am Zirkulator), das sich im Vergleich zu Bild 5 erheblich besser vom Untergrund abhebt und fast perfekt einem theoretischen Lorentz-Profil (Lorentz 1) der Brillouin-Streuung entspricht.



(a)

(b)

Abbildung 7: Optimierter Aufbau zur Messung der Brillouin-Streuung aus kurzen Objektproben mit heterodyner Detektion und einem Lock-in-Verstärker (a), sowie gemessenes Spektrum der spontanen Brillouin-Streuung aus 2 m Glasfaser (b); Grafiken: R. Engelbrecht, R. Kruglov, POF-AC, TH Nürnberg

Um diese Verbesserung der Messtechnik zu erreichen, wird das rückgestreute Brillouin-Licht mit einem rotierenden Chopper-Rad in einer Freistrah-Stecke zwischen zwei Glasfaserstücken periodisch moduliert, d.h. abgeschattet. Der Lock-in-Verstärker wird mit dem Video-Ausgang des elektrischen Spektrumanalysators verbunden und misst dort hochselektiv Veränderungen im Rauschen, die synchron zur Modulation des Brillouin-Lichtes sind. Der Spektrumanalysator wirkt dabei als Filter für eine bestimmte elektronische Frequenz der Brillouin-Streuung f_B und mit dem Lock-in wird an dieser Frequenz die Amplitude bestimmt. Anschließend wird die Messung bei einer leicht veränderten Brillouin-Frequenz wiederholt, bis das ganze Brillouin-Spektrum abgerastert ist (rote Punkte in Bild 7). Dieses Messprinzip ist in der Radioastronomie als „Dicke-Radiometer“ bekannt (benannt nach dem Entwickler) und wird zur Messung von Mikrowellen-Spektren entfernter astronomischer Objekte eingesetzt. Durch Übertragung dieser Methode auf unseren Messaufbau wird alles Rauschen, das nicht von der Brillouin-Streuung kommt, effizient unterdrückt. Selbst schwache Rückstreuleistungen können jetzt mit großem Signal-Rausch-Abstand zum Untergrund gemessen werden.

Im Vergleich zur Messung der Brillouin-Streuung an 100 m Glasfaser in Bild 1, bei der zusätzlich die wesentlich effizientere stimulierte Brillouin-Streuung ausgenutzt wurde, zeigt Bild 7 aus nur zwei Meter einer Glasfaser und unter Verwendung der sehr schwachen spontanen Brillouin-Streuung sogar eine bessere Qualität der Messung. Der Unterschied der gemessenen Frequenzen resultiert aus der Verwendung eines Lasers bei 1550 nm in Bild 1 im Vergleich zu 1310 nm in Bild 7. Zusätzlich sind in Bild 7 zwei weitere Maxima (Lorentz 2 und Lorentz 3) zu erkennen, die von höheren akustischen Moden mit anderen viskoelastischen Merkmalen kommen. In Summe können die Messwerte mit drei theoretischen Lorentzkurven der Brillouin-Streuung modelliert werden. Eine vergleichbare Qualität von Brillouin-Messwerten ist in der Literatur bisher nur aus wesentlich längeren Faserstrecken und unter Verwendung der stimulierten Brillouin-Streuung als Messprinzip bekannt.

Dies liefert die Grundlage, um durch weitere Verbesserungen das Messsystem so weiter zu entwickeln, dass eine Freistrah-Messung auch an sehr kurzen Probeobjekten wie der humanen Hornhaut oder der Augenlinse möglich ist.

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Mit diesem Vorlauf-Forschungsprojekt konnte ohne die Umgebung einer unmittelbaren industriellen Umsetzung eine hochriskante und äußerst anspruchsvolle Fragestellung wissenschaftlich untersucht werden. Damit wurde am Institut POF-AC der TH Nürnberg ein neues Forschungsgebiet erschlossen: Die Messung der Brillouin-Streuung ermöglicht über die Motivation dieses Projekts hinaus zahlreiche weitere Anwendungen in der faseroptischen Sensorik. Dies zeigt, wie mit dem Konzept der Vorlauftorschung an der TH Nürnberg auch wissenschaftliche Grundlagenforschung initiiert werden kann.

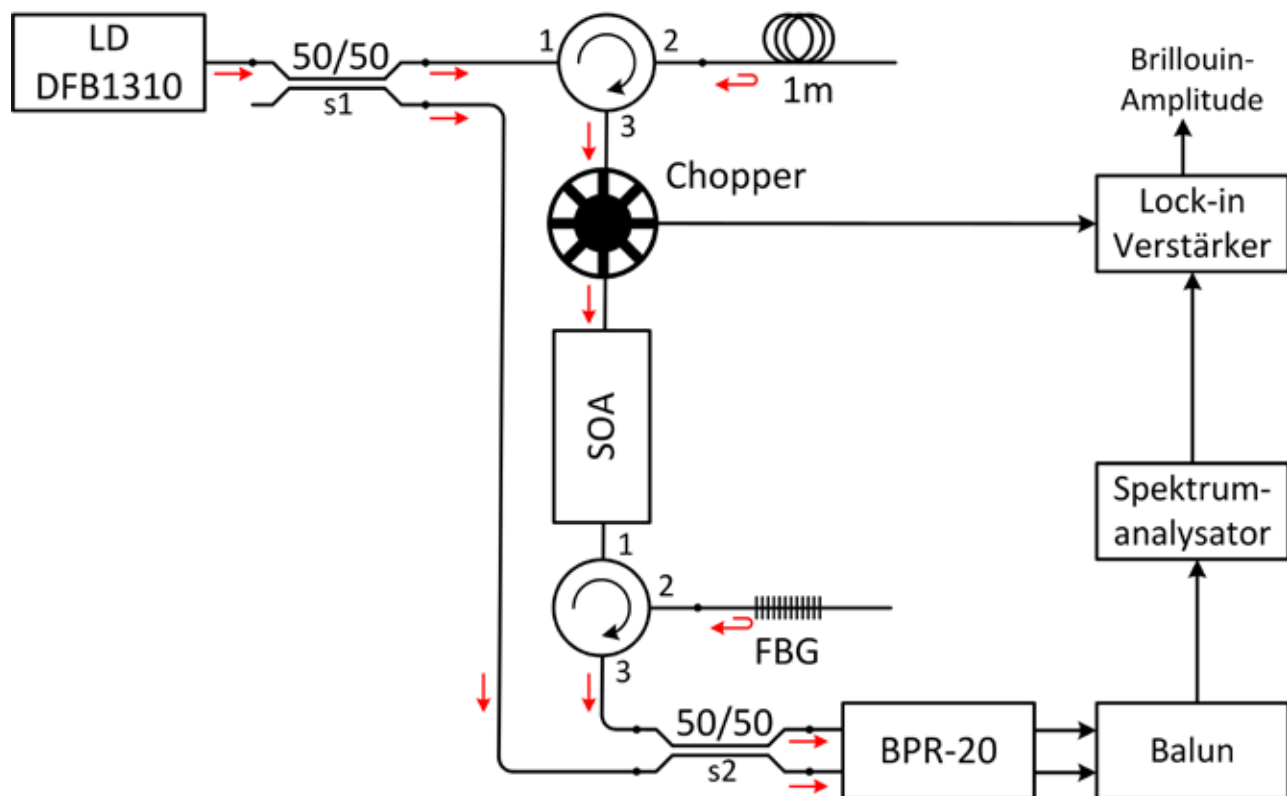


Abbildung 8: Konzept zur Weiterentwicklung durch spektrale Ausfilterung des SOA-Rauschens mit einem FBG;
Grafik: R. Engelbrecht, R. Kruglov, POF-AC, TH Nürnberg

Mit einem schrittweise optimierten Aufbau konnte ein Messkonzept validiert werden, was aus sehr kurzen Objektproben auswertbare Brillouin-Spektren liefert. Die sehr schwache Leistung der Brillouin-Streuung hat sich wie erwartet als große Herausforderung erwiesen. Diese konnte mit einer Lock-in-Technik, ähnlich einem radioastronomischen Dicke-Radiometer, erfolgreich angegangen werden. Auch ohne optischen Halbleiterverstärker (SOA) konnte gezeigt werden, dass das Systemrauschen nicht mehr vom elektronischen thermischen Rauschen der Photodioden und des Verstärkers im Balanced Receiver (BPR) bestimmt wird, sondern vom Quantenlimit des Schrotrauschens und ggf. des Intensitätsrauschens der Laserdiode auf der optischen Seite.

Eine gefilterte optische Verstärkung mit einem SOA soll eine weitere Verbesserung bringen (Abbildung 8). Hierzu wurden bereits Faser-Bragg-Gitter (FBGs) beschafft, die in Verbindung mit einem Zirkulator nur noch die gewünschten verstärkten Spektralanteile der Brillouin-Streuung zur Detektion gelangen lassen, aber das breitband-

dige optische Rauschen des SOA unterdrücken. Mit einem Balun wird in Abbildung 8 auf elektronischer Seite ein weiterer Gewinn erzielt, um den differentiellen Ausgang des Photodetektors (BPR) mit doppelter Amplitude am Spektrumanalysator messen zu können.

Die beschriebenen Weiterentwicklungen des Messaufbaus sollen über das aktuelle Vorlaufforschungsprojekt hinaus zunächst aus erwirtschafteten Eigenmitteln des Instituts POF-AC durchgeführt werden. Aufgrund der bisher erfolgversprechenden Ergebnisse, ist eine Antragstellung für weitere Fördermittel geplant. Hierbei sollen Partner aus dem medizinischen Bereich einbezogen werden.

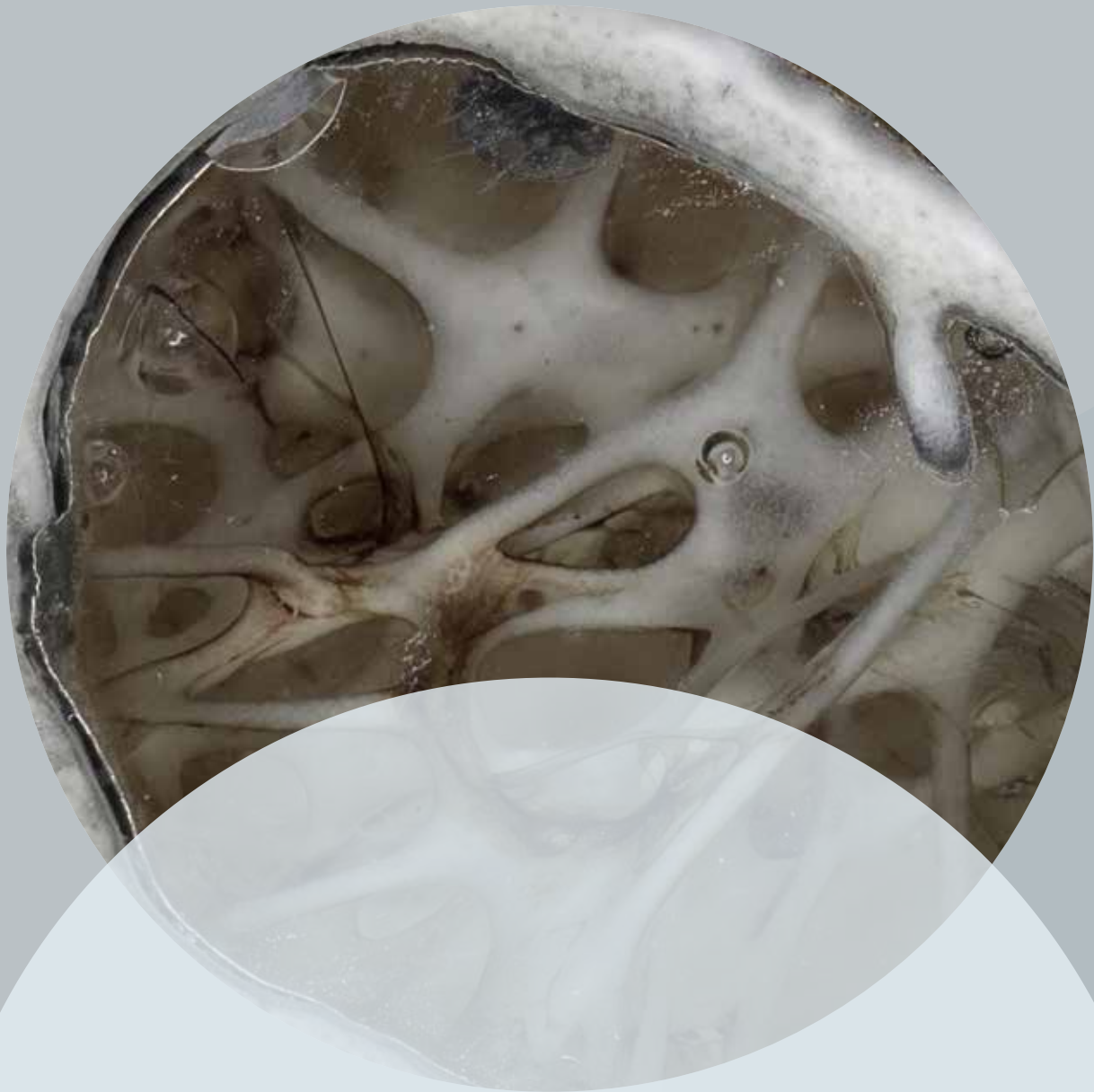
Konzeptstudien und Zwischenergebnisse wurden bisher auf zwei Workshops präsentiert [5,6]. Aufgrund der guten Messergebnisse sind Publikationen in renommierten Fachzeitschriften sowie internationalen Konferenzen geplant.

6. Literatur

- [1] R. Engelbrecht; Nichtlineare Faseroptik. Springer Vieweg Verlag, Berlin Heidelberg 2014.
- [2] G. Scarcelli und S. Hyun Yun; Confocal Brillouin microscopy for three-dimensional mechanical imaging. Nature Photonics, Vol. 2, Januar 2008, S. 39-42.
- [3] Z. Meng, A. J. Traverso, C. W. Ballmann, M. A. Troyanova-Wood und V. V. Yakovlev; Seeing cells in a new light: a renaissance of Brillouin spectroscopy. Advances in Optics and Photonics, Vol. 8, No. 2, Juni 2016, S. 300-327.
- [4] E. A. Boettner und R. Wolter; Transmission of the Ocular Media. – Investigative Ophthalmology and Visual Science, Vol. 1, No. 6, Dezember 1962, S. 776-783.
- [5] R. Engelbrecht, R. Kruglov und A. Bachmann; Möglichkeiten zur In-vivo Diagnostik der Augenlinse mittels optischer Brillouin-Streuung. 9. Forschungsworkshop, Paracelsus Medizinische Privatuniversität - Klinikum Nürnberg - Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm. 25. April 2018.
- [6] R. Engelbrecht, R. Kruglov und A. Bachmann; Anwendungen der optischen Brillouin-Streuung zur kontaktlosen Diagnostik in der Augenheilkunde. 17. efi-Fachkolloquium, Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm, 16. Mai 2018.







Vorarbeiten zur Strukturanalyse von Knochen im Hinblick auf bionische Struktur- konstruktionen PreBoneStructure

Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Hornfeck
Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik
Dr. Jens Helbig
Institut für Chemie, Material und Produktentwicklung
TH Nürnberg

In der Konstruktion sind neben bionisch inspirierten Funktionsmechanismen, wie zum Beispiel das Spinnenbeingelenk, auch bionisch inspirierte, mechanische Strukturen von technischen Leichtbauelementen von besonderem Interesse. In der Architektur sind solche Ansätze bereits realisiert, allerdings beruht hier vor allem die Form des Gebäudes auf biologischen Vorbildern, aber nicht die Struktur.

Wesentliche Projektziele

Um nun eine technische Umsetzung solcher Strukturen zu ermöglichen, ist es notwendig, über bionische Ansätze die Konstruktion durch Leichtbauweisen zu unterstützen. Von besonderem Interesse sind dabei die Knochen von Vögeln, da hier die Natur eine Bauweise entwickelt hat, in der Gewicht und Festigkeit in einmaliger Weise optimiert sind.

Dazu wurde die Struktur von Vogelknochen hinsichtlich ihrer mechanischen Kennwerte und Struktur anhand von Veröffentlichungen und mikroskopischen Verfahren untersucht und beschrieben. Das Forschungsprojekt zielt darauf ab, daraus ein Leichtbaukonzept zu erstellen, das auf den Knochen von Vögeln basiert.

1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	März bis Dezember 2018
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Institut für Chemie, Material und Produktentwicklung
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Hornfeck / Dr. Jens Helbig
Kontaktdaten	E-Mail: ruediger.hornfeck@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Schon im neunzehnten Jahrhundert haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler begonnen, sich mit der Struktur von Knochen auseinander zu setzen. Das Forschungsziel war, zu verstehen, wie die Natur ein Material erzeugt, das gleichzeitig fest, flexibel und leicht ist.

Der britische Ingenieur Cullman entdeckte als Erster das Prinzip der isostatischen Rippen im menschlichen Femur. Dem Belastungsschema folgend baut sich die Knochengewebestruktur masseoptimiert so auf, dass Hohlräume dort entstehen, wo Gewebematerial überflüssig ist. Dies führt zu einem extremen Leichtbau.

Diese Erkenntnis inspirierte den italienischen Architekt Pier Luigi Nervi in den fünfziger Jahren beim Bau der Wollfabrik Gatti in Rom zu seiner Deckenkonstruktion, basierend auf isostatischen Rippen. Ein solcher bionisch inspirierter Leichtbau hat sich im Bauwesen immer weiter etabliert. Das spektakulärste Beispiel ist das Olympiastadion München, in dem, mit der Dachkonstruktion nach dem Vorbild von Spinnweben, das bionische Prinzip direkt sichtbar wird.

Aber nicht nur in der Architektur wird das bionische Prinzip durch die Untersuchung von Knochenstrukturen, dem Erkennen der Wirkweise und der anschließenden Übertragung auf eine technische Anwendung realisiert. Die Anwendung des bionischen Prinzips durch die Übertragung des Knochenbaus von Vögeln auf den Flugzeugbau ist naheliegend. Damit ein Flugzeug fliegen kann, ist es erforderlich mit den Flügeln genügend Auftrieb zu erreichen, um die Masse des Flugzeugs in der Luft zu halten. Durch den extremen Leichtbau in den Flügeln können Masse und Materialvolumen eingespart werden – diese Lasteinsparung steht als zusätzliche Nutzlast zur Verfügung. Um ein mechanisches Versagen im Auftrieb auszuschließen, ist es erforderlich, bei der Materialeinsparung in den Flügeln die strukturelle Integrität des Flügels nicht zu beeinträchtigen. Modellierungen am Computer ergaben ein optimiertes Design eines Flugzeugflügels, das sehr stark an die Struktur von Vogelknochen erinnert.

Auch in anderen Branchen, wie zum Beispiel im Anlagenbau oder im Automobil werden extreme Leichtbaustrukturen immer bedeutender. Künftig wird ein entscheidender Wettbewerbsfaktor sein, hochfeste und hochsteife Bauteile mit zugleich einem möglichst geringen Gewicht konstruieren zu können. Das ermöglicht eine schnelle Be- und Entschleunigung sowie die Einsparung von Masse und damit Energie. Dies ist auch in der weiteren Entwicklung der Elektromobilität bedeutend, in der jede Gewichtseinsparung zu einer Erhöhung der Reichweite des Fahrzeuges führt.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Um die Leichtbauweise von Knochen, insbesondere der Vogelknochen besser zu verstehen und konstruktiv umsetzen zu können, sind genaue Kenntnisse der Knochenstruktur erforderlich. Das Forschungsprojekt zielt darauf ab, Vogelknochen hinsichtlich ihrer mechanischen Kennwerte und Struktur zu untersuchen und die neuen Erkenntnisse mit dem aktuellen Stand der Literatur abzugleichen. Daraus soll dann ein Leichtbaukonzept entwickelt werden, basierend auf den Knochen von Vögeln. Um dieses Gebiet schrittweise zu erschließen, wurden mit einer Konstruktionsgruppe aus dem sechsten und siebten Semester der Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik in einem Lehrforschungsprojekt bereits vorläufige Untersuchungen gestartet. In einem ersten Schritt haben die Studierenden den Prozess der Mazeration (Ablösung des Gewebes von den Knochen) von Taubenknochen erarbeitet und Zugversuche an Taubenknochen durchgeführt.

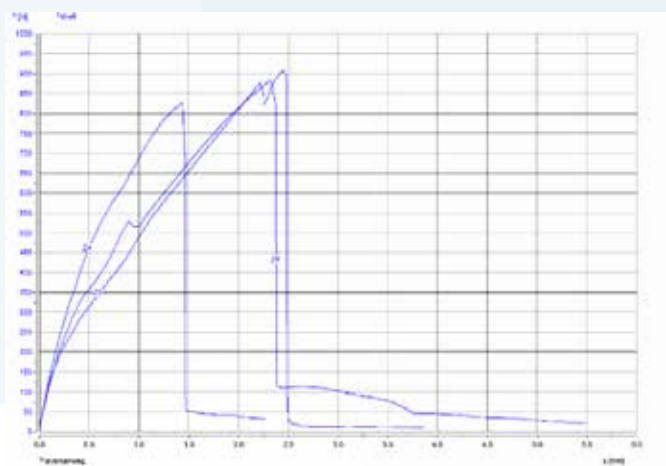


Abbildung 1: Präparierter Taubenknochen für Zugversuche und Ergebnis der Zugversuche; Foto und Grafik: Rüdiger Hornfeck

Für weitere Strukturuntersuchungen des Knochens ist das Verständnis des inneren Aufbaus von entscheidender Bedeutung. Als Voraussetzung ist es erforderlich, den Herstellungsprozess von gestapelten Schliffbildern zu beherrschen. Neben bildgebenden Verfahren wie der Computertomographie (CT) stellt die Abbildung von Knochen mittels Lichtmikroskopie eine der wichtigsten Möglichkeiten zur Darstellung von Knochenstrukturen dar. Das Ziel des Projekts ist die Etablierung der 3D-Rekonstruktion von Knochen aus Schnitten bzw. Schliffen von Mikroskopieaufnahmen. Das Forschungsteam hat von mazerierten Vogelknochen Schliffe hergestellt, mit denen ein dreidimensionales Bild der inneren Struktur der Knochen erstellt werden konnte. Eine Freeware-Software ermöglicht die Überführung der Daten aus den zweidimensionalen Schliffbildern in ein 3D-Modell. Die Eignung der Software wurde im Rahmen des Projekts untersucht. Die Herstellung von Dünnschliffen und das Zusammenführen der einzelnen Schliffbilder zu einem 3D-Modell ist ein alternatives Analyseverfahren zu den CT-Aufnahmen. Das Ziel ist, die Ergebnisse in späteren Projekten zur Verifikation der CT-Aufnahmen und zur eindeutigen Interpretation der Knochenstruktur einzusetzen, weil durch die spätere Anwendung beider Verfahren die gegenseitigen Schwächen eliminiert werden.

Es liegen bereits Untersuchungen über den inneren Tierknochenaufbau wie z. B. [2] vor. Diese Untersuchungen beziehen sich allerdings nur auf prinzipielle strukturelle Aussagen und beschreiben nicht die quantitativen Merkmale, sodass keine technische Ableitung der physikalischen Eigenschaften erfolgen kann. Das Vorlauforschungsprojekt zielte darauf, den Prozess der schichtweisen Abbildung und 3D-Rekonstruktion von Knochen zu etablieren. Dies ist für die Beantragung weiterer bionischer Forschungsprojekte von essenzieller Bedeutung, damit das Forschungsteam die handwerklichen Fähigkeiten als beherrschbar darstellen kann.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Zur Erzeugung von 3D-Modellen aus Mikroskopiebildern sind drei Voraussetzungen zu erfüllen: die Herstellung eines Präparats mit dem Knochen, die Herstellung von Schnitt- bzw. Schliffbildern in definierten Schichtdicken und abschließend die Verschmelzung der Schichtbilder zu einem 3D-Modell mittels einer geeigneten Software. Abbildung 5 zeigt einen Knochen einer Taube, nachdem durch Mazeration das Fleisch entfernt und der Knochen in der Mitte geteilt wurde.



Abbildung 2: Querschnitt eines Gelenkknochens einer Taube; Foto: Rüdiger Hornfeck

a. Herstellung eines Schliffpräparats

Für die Herstellung von Schliffpräparaten sind eine Vielzahl an verschiedenen Rezepten verfügbar, die aus der Materialographie bekannt sind. Prinzipiell lassen sich die Methoden in zwei verschiedene Verfahren unterteilen. Im Heißeinbetten wird das Präparat in einer Form fixiert und mit einem heißvernetzenden Harz, in der Regel Epoxidharz, umfüllt. Im Anschluss wird die Form in eine beheizbare Presse eingebracht, in der das Harz unter Druck und Temperatur aushärtet. Durch den Druck wird das Harz in alle Zwischenräume und Kavitäten gepresst, die Temperatur beschleunigt die Vernetzung des Harzes. Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass es möglich ist, in einer sehr kurzen Zeit eine blasenfrei eingebettete Probe zu erstellen, und dass die mechanischen Eigenschaften des Harzes relativ gut beeinflussbar sind. Dies ist ein wichtiger Aspekt, weil bei der Weiterverarbeitung von flexiblen und porösen Präparaten das Einbettmittel härter und steifer sein sollte als die Probe selber, um Beschädigungen zu vermeiden.

Allerdings sind solche Einbettverfahren oft mit der Gefahr verbunden, die Probe zu beschädigen, sofern die Festigkeit der Probe nicht für die Drücke in der Heißeinbettpresse geeignet ist. In der Abbildung 3 links ist zu sehen, dass die poröse und hohle Struktur nicht geeignet ist, um mit dem Heißeinbettverfahren eingebettet zu werden.



Abbildung 3: links: Zerdrückter Röhrenknochen nach dem Heißeinbetten. Rechts: Kalteingebettetes Knochenpräparat; Fotos: Rüdiger Hornfeck

Kalteinbetten ist die zweite Methode zur Einbettung der Präparate. Das Präparat wird in einer Form mit einem kalt aushärtenden, sehr dünnflüssigen Harz umgossen und dann in einer Vakuumkammer entgast. Das Harz härtet bei Raumtemperatur unter Vakuum aus. Das Vakuum entfernt die Gasblasen im Harz und lässt keine Hohlräume entstehen. Das Einbetten unter Vakuum birgt allerdings die Gefahr, dass durch ein zu starkes Vakuum durch das Entgasen von flüchtigeren Bestandteilen aus der Probe oder dem Harz sich neue Blasen bilden und die Probe zu schäumen beginnt. Ein weiterer Aspekt ist, dass das Verfahren deutlich mehr Zeit in Anspruch nimmt als das Heißeinbettverfahren. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass das Verfahren der Kalteinbettung besser geeignet ist, weil der Knochen nicht unter Druck belastet wird und daher nicht zerbrechen kann (siehe Abbildung 3 rechts).

b. Herstellen von Schlifflen bzw. Schnitten

Für die Herstellung der Schichten für die Erzeugung eines 3D-Modells ist es erforderlich, von den Präparaten mikroskopische Auflichtaufnahmen zu erzeugen, die dann übereinander gestapelt werden. Dazu werden von dem Präparat durch Abschleifen oder durch Mikrotom-Schnitte gleichmäßig dicke Schichten abgenommen. Das Schleifen und Polieren der Oberflächen ergibt in der Regel ein besseres Bild der Oberfläche, allerdings ist es nicht möglich, die Höhe der abgetragenen Schicht einzustellen. Für die spätere Fusion der Aufnahmen ist dies jedoch erforderlich, weil eine möglichst gleichmäßige Dicke aller Schichten benötigt wird. Mit dem Einsatz eines Mikrotom ist dieses Ziel besser zu erreichen, weil ein scharfes Messer in immer gleichen Schnittstärken eine dünne Scheibe von der Oberfläche des Präparats abnimmt. Ein unerwünschter Aspekt ist allerdings, dass das Messer ggf. Stücke aus dem Knochen herausreißt und dabei tiefe Spuren in der Oberfläche hinterlässt. Unter Abwägung der Versuchsergebnisse hat sich das Mikrotom dennoch für die Herstellung der Mikroskopbilder als besser geeignet erwiesen als das Herstellen von Schlifflen.

c. Zusammenführen von Schnittbildern zu einem 3D-Modell

Zum Erstellen von 3D-Modellen aus schichtartig hergestellten Schnittbildern steht kommerzielle und freie Software zur Verfügung, um mehrere Schnittbilder zusammenzuführen.

Eine im Bereich der Wissenschaft häufig eingesetzte Software ist das Programm ImageJ. Die Freeware läuft unter GNU Public License und wird vom US-amerikanischen Institute of Health betreut. Zu dieser Software steuern Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zur Lösung unterschiedlichster Aufgaben Plugins bei, die ebenfalls frei genutzt werden können. Mit dieser Software ist es möglich, Schnitte übereinanderzulegen. Am Beispiel eines humanen Oberschenkelknochens werden die Möglichkeiten der 3D-Modell-Erzeugung aus Schnittbildern gezeigt.

In Abbildung 4 sind 80 Schnitte durch einen humanen Beckenknochen und Oberschenkel zu sehen. In der Aufnahme sind die hellen Bereiche der Knochen deutlich zu erkennen. Die grauen Bereiche zeigen weiches Gewebe oder Artefakte. Mit ImageJ ist es möglich, die Bilder so zu bearbeiten, dass ein schwarzweißes Bild mit möglichst wenig Grauwerten entsteht. Durch die Bearbeitung entsteht idealerweise eine binäre Farbverteilung. Mit diesen bearbeiteten Bildern kann ein 3D-Modell erzeugt werden, durch das beliebige Schnitte gelegt werden können, auch in Richtungen, die nicht parallel zu der ursprünglichen Schnittrichtung liegen. Abbildung 5 zeigt das 3D-Modell mit verschiedenen Schnitten aus den 80 Schnittbildern.

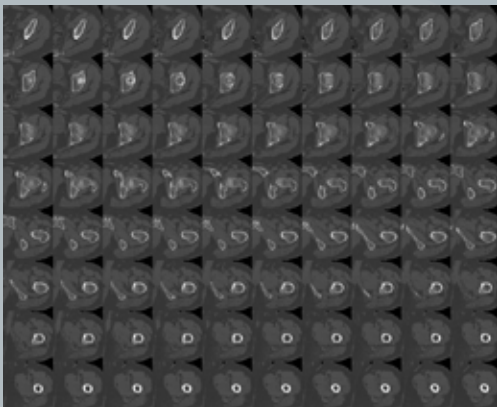


Abbildung 4: Montage von 80 Schnitten durch ein humanes Becken und einen humanen Oberschenkelknochen; Foto: Jens Helbig

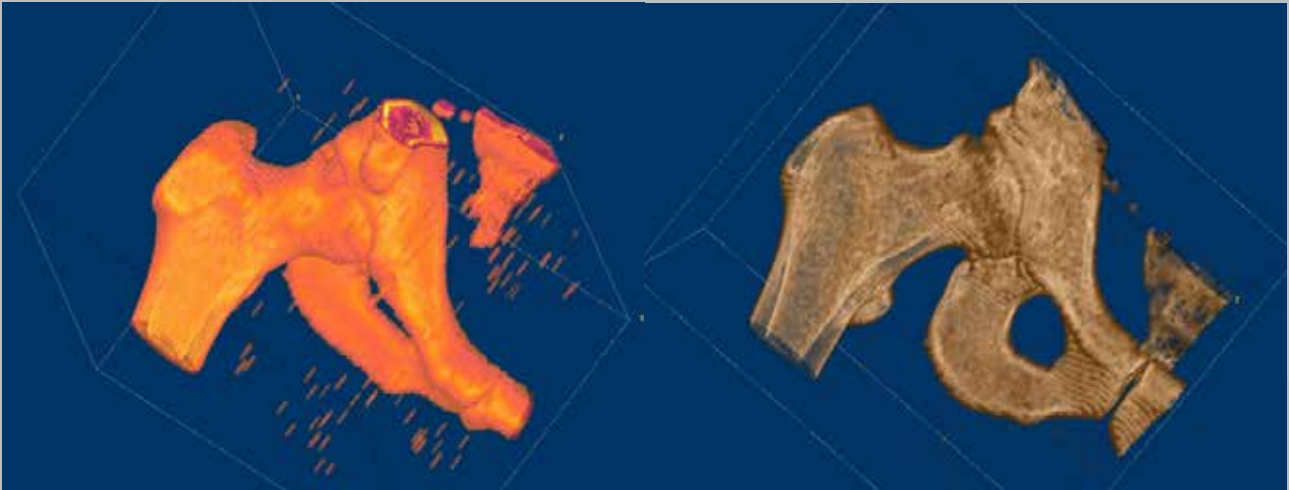


Abbildung 5: 3D-Modell eines Beckens mit Oberschenkelknochen, zusammgeführt aus 80 Schnittbildern; Grafiken: Jens Helbig

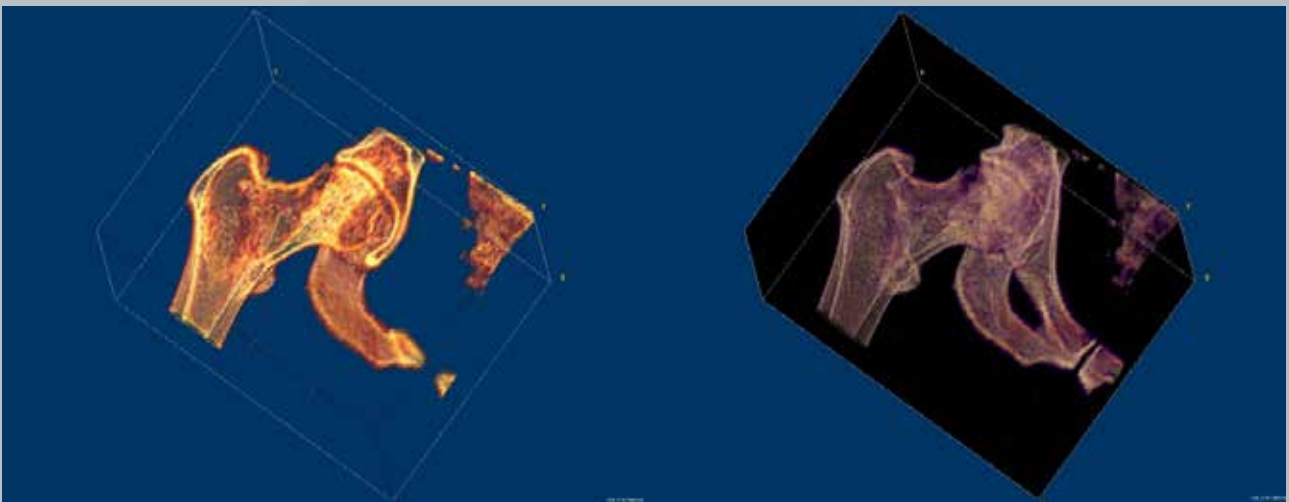


Abbildung 6: Schnittbilder durch das 3D-Modell senkrecht zu den ursprünglichen Aufnahmen; Grafiken: Jens Helbig

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

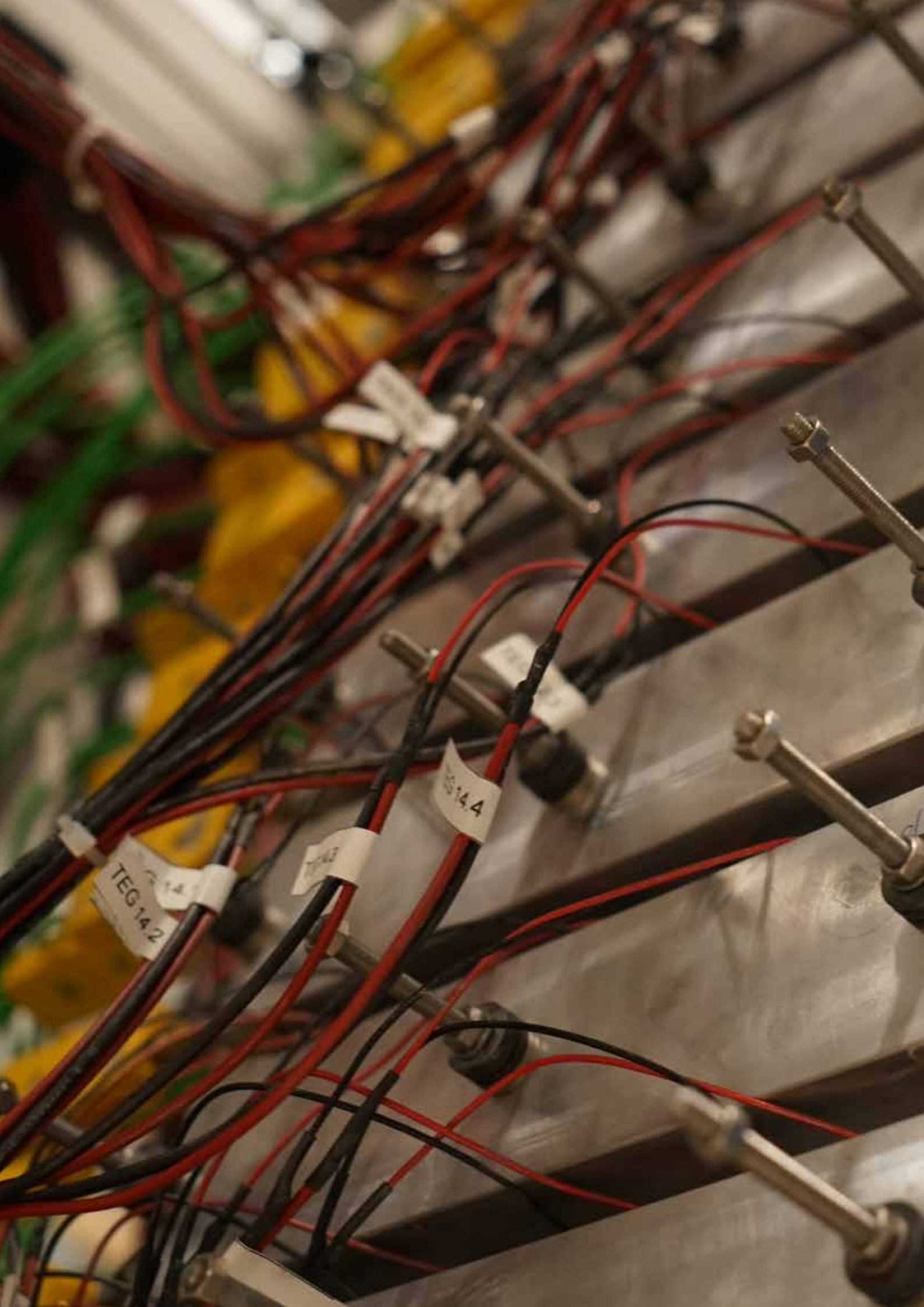
Mit dem eingeführten Verfahren zur Erzeugung von 3D-Modellen aus Mikroskopie-Schnittbildern steht nun ein Verfahren für die nächsten Schritte zur Strukturaufklärung von Knochen zur Verfügung. Das Ziel ist es, durch den Erkenntnisgewinn zur Beschaffenheit der Knochenstrukturen eine bionische Umsetzung zu realisieren. So zielt das Projekt darauf ab, aus den visualisierten Strukturen Modelle für eine konstruktive Umsetzung zu erarbeiten. Damit ist eine wichtige Voraussetzung zur Beantragung und für die Bewilligung von Forschungsprojekten erfüllt, die Analyse- und Simulationsprozesse von Knochen zu beherrschen. Neben der Anwendung in bionik-spezifischen Projekten ist diese Art von Strukturanalyse eine interessante Methode zur Darstellung von räumlichen Bauteilen aus der Werkstofftechnik, z.B. zur Visualisierung der Bioglas-Scaffolds oder der keramischen Heizer. Das Forschungsteam plant, weitere Forschungsprojekte zu beantragen, in denen die Knochenstrukturen von Tieren analysiert und technische Leichtbauprojekte daraus abgeleitet werden, um daraus materialsparende und damit ressourceneffiziente Konstruktionen zu entwickeln. Ansätze hierzu sind in [3] beschrieben. Dieses Thema ist eine konsequente Weiterentwicklung der Bionikkompetenz im OHM-CMP, mit der Perspektive, die wissenschaftliche Kompetenz der Beteiligten weiterhin zu entwickeln und Möglichkeiten für kooperative Promotionen

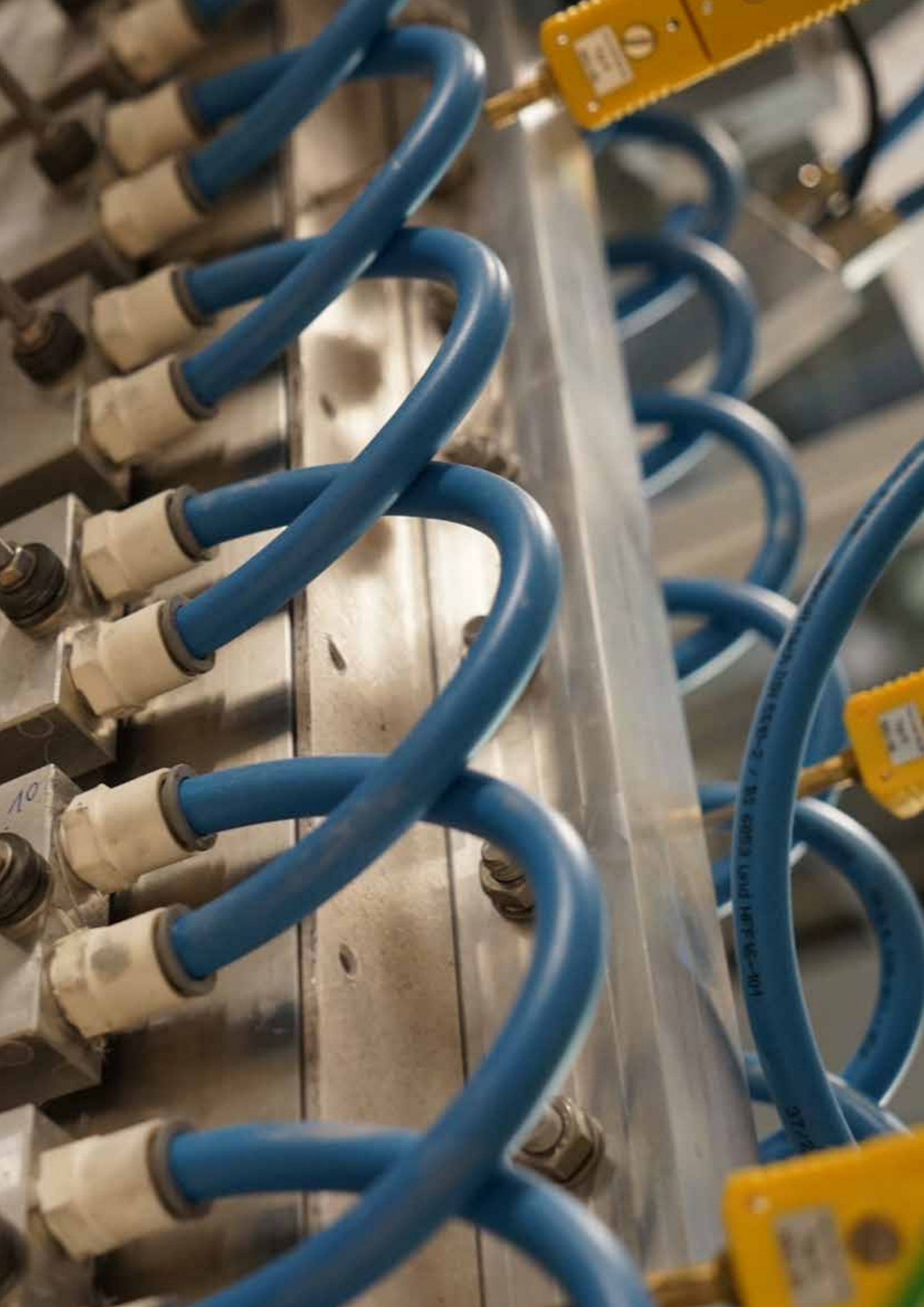
an der TH Nürnberg in diesem Fachgebiet zu eröffnen.

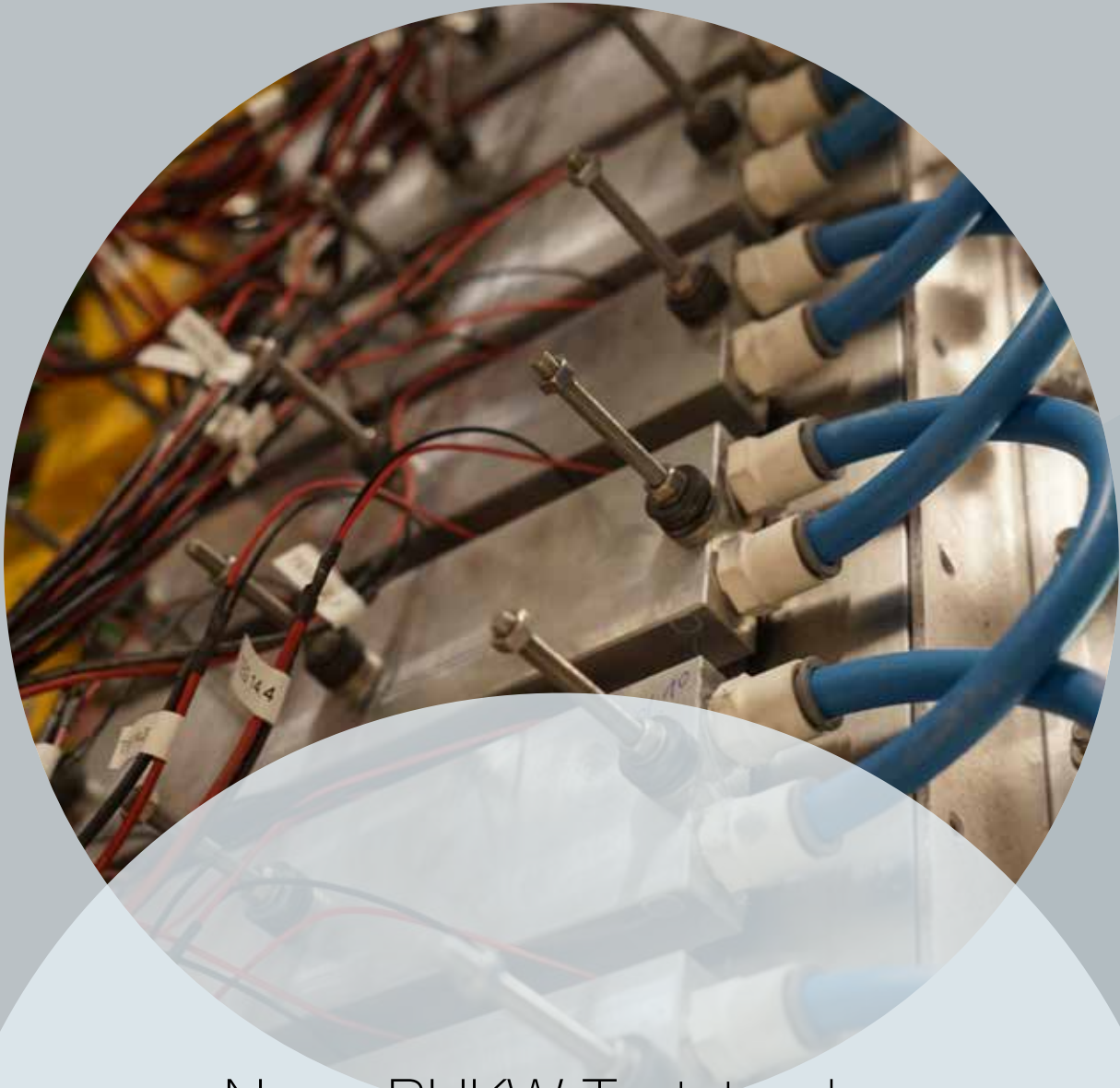
Optional könnte ein weiteres Forschungsprojekt in mehrere größere und kleinere Teilprojekte gegliedert werden. Das würde die Möglichkeit bieten, den Bearbeitungsprozess und die Komplexität des Projekts optimal zu steuern. Die Aufteilung in kleine und größere Projekte eröffnet die Option einer breit angelegten Kooperation mit mehreren wissenschaftlichen Organisationen.

6. Literatur

- [1] Rossmann, T.; Tropea, C. (Hg): Bionik Aktuelle Forschungsergebnisse in Natur-, Ingenieur-und Geisteswissenschaft, Springer-Verlag Berlin, 2005.
- [2] Nachtigall, W.: Bau-Bionik – Natur – Analogie – Technik. Springer-Verlag Berlin, 2003.
- [3] Ghose, S.: Why Everything About Design and Manufacturing Will Change in the Next Five Years. CAPU-niversity, June 2015







Nano-BHKW-Teststand –
Untersuchungen zur Realisierbarkeit eines
Blockheizkraftwerkes im Kleinstmaßstab
auf Basis thermoelektrischer Generatoren
für die Anwendung als stromproduzierende
Heizung in Einfamilienhäusern

Prof. Dr.-Ing Thomas Metz
Arne Stumpf, M. Sc.
Fakultät Verfahrenstechnik
TH Nürnberg

Mit Blockheizkraftwerken (BHKW) im Kleinstmaßstab (Nano-BHKW) können Besitzer von Einfamilienhäusern den Effizienzvorteil der Kraft-Wärme-Kopplung nutzen. Aktuelle Nano-BHKW-Systeme mit Gasmotor, Dampf- motor, Stirlingmotor oder Brennstoffzelle sind relativ kosten- und wartungsintensiv. Das Forschungsprojekt untersucht eine mögliche Alternative zu den bisherigen Systemen: Ein Nano-BHKW auf Basis thermoelektrischer Generatoren (TEG). Im Rahmen des Projekts werden die Vorteile dieses Systems gegenüber den bisher kommerziellen Systemen erforscht. Hierzu werden aktuell verfügbare TEG eingesetzt und eine Versuchsanlage in kommerziellem Maßstab mit einer elektrischen Leistung von ca. 300 Watt_{el} und einer Heizleistung von ca. 6 kW_{th} errichtet. Darüber hinaus soll auch das Potenzial in Entwicklung befindlicher TEG-Materialien und Herstellungsmethoden für diese Anwendung auf theoretischer Basis geprüft werden. Die Versuchsanlage wird mit Propan als Brennstoff betrieben. Die zu erforschende Technik ermöglicht auch den Einsatz anderer Brennstoffe wie Erdgas, Biogas, Heizöl oder Holzbrennstoffe. Bei positivem Projektergebnis strebt das Forschungsteam eine Entwicklung bis zur Marktreife in Kooperation mit der Industrie an.

Wesentliche Projektziele

1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	April 2018 bis März 2019
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Verfahrenstechnik
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Thomas Metz
Kontaktdaten	E-Mail: thomas.metz@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Grundsätzlich ist die Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) – die gemeinsame Erzeugung von Strom und Wärme – effizienter als die separate Erzeugung. Der Grund hierfür ist der höhere Wirkungsgrad der KWK-Kraftwerke durch die Nutzung der Abwärme, die im Falle der separaten Stromerzeugung als Verlustenergie ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird [1].

Üblicherweise wird die Wärme aus KWK-Anlagen in Ballungsgebieten über Nah- und Fernwärmenetze den lokalen Nutzern zu Verfügung gestellt. Hiervon können sowohl Industrie als auch Privatpersonen profitieren. Die Nachteile der Wärmenetze liegen in den Leitungsverlusten und den hohen Kosten für Bau und Wartung. Diese machen Fernwärmenetze in Regionen mit einer geringen Anschlussdichte unrentabel. Insbesondere in ländlichen Regionen ist die Versorgung von Wohngebieten mit Fernwärme wirtschaftlich schwierig. Die Nutzung von Heizwerken zur lokalen Wärmeversorgung mittels gemeindebetriebener Wärmenetze lässt den Vorteil des hohen Wirkungsgrads bei der KWK oftmals ungenutzt.

Um auch in ländlichen Regionen den Vorteil der KWK effizient nutzen zu können, wurden Nano-Blockheiz-

kraftwerke (BHKW) entwickelt. Diese decken einen Leistungsbereich von $< 2,5 \text{ kW}_{\text{el}}$ ab und generieren sowohl Wärme als auch Strom. Der Einsatz der Nano-BHKW in Ein-/Zweifamilienhäusern ist bisher aus verschiedenen Gründen problematisch:

Zum einen liefern die meisten Nano-BHKW auf dem Markt eine elektrische Leistung von 1 kW_{el} und höher. Dies ist für Ein- bzw. Zweifamilienhäuser stark überdimensioniert. Der jährliche Durchschnittsverbrauch eines Vier-Personen-Haushalts liegt nur bei ca. $340 \text{ W}_{\text{el}}$. In ländlichen Regionen überwiegt dabei der Einfamilienhausanteil. 80 Prozent dieser Häuser wurden vor 1995 gebaut und weisen dementsprechend einen durchschnittlichen Heizwärmebedarf von 6 kW_{th} auf [2]. Zum anderen übersteigen die Stromgestehungskosten der erhältlichen Nano-BHKW die Strombezugskosten der Energieversorger. Das liegt sowohl an den hohen Anschaffungskosten, wie auch den zum Teil hohen Betriebs-/Instandhaltungskosten und führt dazu, dass aktuell eine Fokussierung auf die Brennstoffzelle stattfindet. Derzeit werden Brennstoffzellensysteme in Deutschland intensiv gefördert [3]. Trotzdem ist ein wirtschaftlicher Betrieb oftmals nicht erzielbar. Ob sich für Brennstoffzellen über den Förderungszeitraum hinaus ein stabiler Markt entwickeln kann, bleibt deshalb aktuell fraglich.

Um die BHKW-Technologie für Einfamilienhäuser in der Breite nutzbar machen zu können, sollten kostengünstige Alternativen gesucht und entwickelt werden. Dabei ist es wichtig, dass unterschiedliche Brennstoffe eingesetzt werden können und dass eine Wirtschaftlichkeit möglichst ohne Förderung erzielbar ist.

Ein Nano-BHKW mit thermoelektrischen Generatoren (TEG) ist bei der Stromproduktion vom Brennstoff unabhängig, da die TEG mit allen bekannten Verbrennungssystemen kombinierbar sind. Der elektrische Leistungsbereich kann über die von den TEG genutzte Fläche auf das geforderte Niveau angepasst werden. Damit ist eine elektrische Leistung von $340 \text{ W}_{\text{el}}$ gut darstellbar. Die Nutzung in Einfamilienhäusern wäre damit unproblematisch, da der Strom so selbst genutzt werden kann und keine nennenswerte Netzbelastung durch eine Vielzahl unregelmäßiger Stromeinspeiser entsteht.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Das Projektziel ist die Vorentwicklung eines Nano-BHKWs mit thermoelektrischen Generatoren (TEG) für die Anwendung im Einfamilienhaus. Das Grundprinzip zeigt Abbildung 1. Anstatt Wasser wie in herkömmlichen Heizgeräten direkt über heißes Rauchgas in einem Wärmeübertrager zu erwärmen, werden TEG zwischen heißer und kalter Seite in den Wärmeübertrager integriert. Hierdurch wird ein Teil des Wärmestroms in elektrische Leistung umgewandelt.

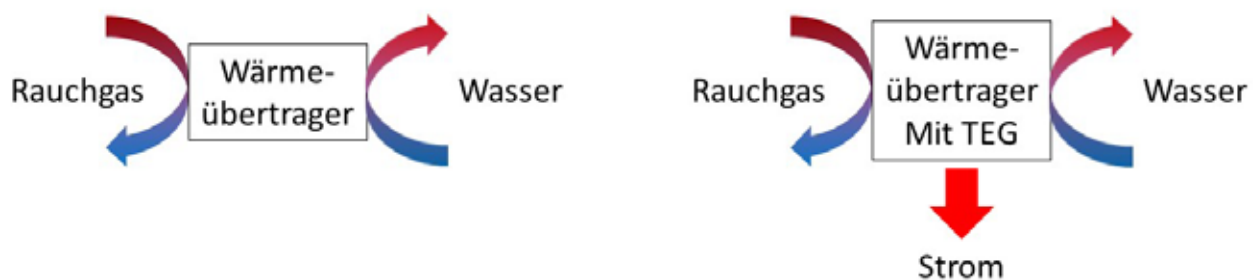


Abbildung 1: Prinzipskizze eines Wärmeübertragers in einer normalen Heizung (links) und einer Heizung mit TEG (rechts); Grafik: Arne Stumpf

Der wesentliche Kern des Projekts ist es, einen Teststand in kommerziellem Maßstab zu errichten und in Betrieb zu nehmen. Der Teststand dient der Überprüfung der theoretischen Modelle und soll verifizierte Aussagen über die Machbarkeit und die wirtschaftlich-technischen Vorteile gegenüber anderen Systemen, wie z.B. Brennstoffzellen-BHKW oder Motor-BHKW ermöglichen.

Als konkrete Ziele sind zu nennen:

- Die Ermittlung des konstruktiven Konzepts des Nano-BHKWs
- Die Ermittlung der Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit der Anlage
- Der Vergleich mit anderen Systemen
- Die Bestimmung des realen Wirkungsgrades und der Maximalleistung
- Die Bestimmung der Hürden bis zur Markteinführung eines solchen Systems
- Der Wissenstransfer zwischen Forschung, Lehre und Industrie

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Im Vorfeld des Vorlaufforschungsprojekts wurden bereits eine Literatur- und Marktrecherche durchgeführt und im Rahmen eines Projektkurses durch eine Gruppe Studierender mögliche Konzepte entwickelt. Außerdem wurde eine Bachelorarbeit mit dem Titel „Planung einer Versuchsanlage zur experimentellen Untersuchung eines Nano-BHKWs mit thermoelektrischen Generatoren“ durchgeführt. Die Verfeinerung und Umsetzung der Ergebnisse dieser Arbeit erfolgt im Rahmen des vorliegenden Vorlaufforschungsprojekts und eines weiteren Drittmittel-Projekts, gefördert durch die Firma STAEDTLER. Der Fokus der Arbeiten liegt auf der Entwicklung einer fundierten Basis für künftige Projekte zu dieser Thematik.

Im Rahmen der Bachelorarbeit wurden die theoretischen Grundlagen erarbeitet und eine Konstruktion des Wärmeübertragers mit TEG erstellt. Die Arbeit geht dabei von einer Feuerungswärmeleistung von $6 \text{ kW}_{\text{FWL}}$ aus. Diese Leistung entspricht in etwa dem Durchschnittsbedarf eines Vierpersonenhaushalts im Einfamilienhaus während der Heizperiode (Winter) in Deutschland. Dem erstellten theoretischen Modell nach kann aus der Feuerungswärmeleistung von $6 \text{ kW}_{\text{FWL}}$ eine elektrische Leistung von ca. $230 \text{ W}_{\text{el}}$ generiert werden.

Tabelle 1: theoretische Wirkungsgrade der Versuchsanlage

Wirkungsgrade η :	
η elektrisch	3,5 %
η thermisch	98,3 %
η gesamt, H_i	101,7 %

Aufgrund von konservativen Annahmen im theoretischen Modell können dabei auch höhere elektrische Wirkungsgrade erzielt werden. Ein weiteres Steigerungspotential besteht mit TEG, die sich aktuell noch in Entwicklung befinden. Generell wird jedoch deutlich, dass es sich bei der Nano-BHKW-Technik mit TEG nur um stromproduzierende Heizgeräte handeln kann und eine alleinige Stromproduktion ohne Wärmenutzung nicht sinnvoll ist. Die Abmessungen des Wärmeübertragers mit TEG betragen etwa $1\text{m} \times 0,35\text{m} \times 0,3\text{m}$ [4]. Dies zeigt eine vergleichsweise kompakte Bauform, was für den Einsatz in Heizungskellern durchaus attraktiv ist.

Im weiteren Verlauf des Vorlaufforschungsprojekts wurde auf der Basis der Bachelorarbeit die Konstruktion des Wärmeübertragers verfeinert. Abbildung 2 zeigt das Konstruktionsergebnis der Bachelorarbeit sowie die verfeinerte Version und ein Foto des realisierten Wärmeübertragers. Die Kernidee besteht darin, am oberen Ende des Wärmeübertragers den Gasbrenner zu platzieren, das erzeugte heiße Rauchgas vertikal nach unten über Rippen strömen zu lassen und die Wärme aus dem Rauchgas seitlich nach außen über TEG an den Wasserkreislauf abzuführen.

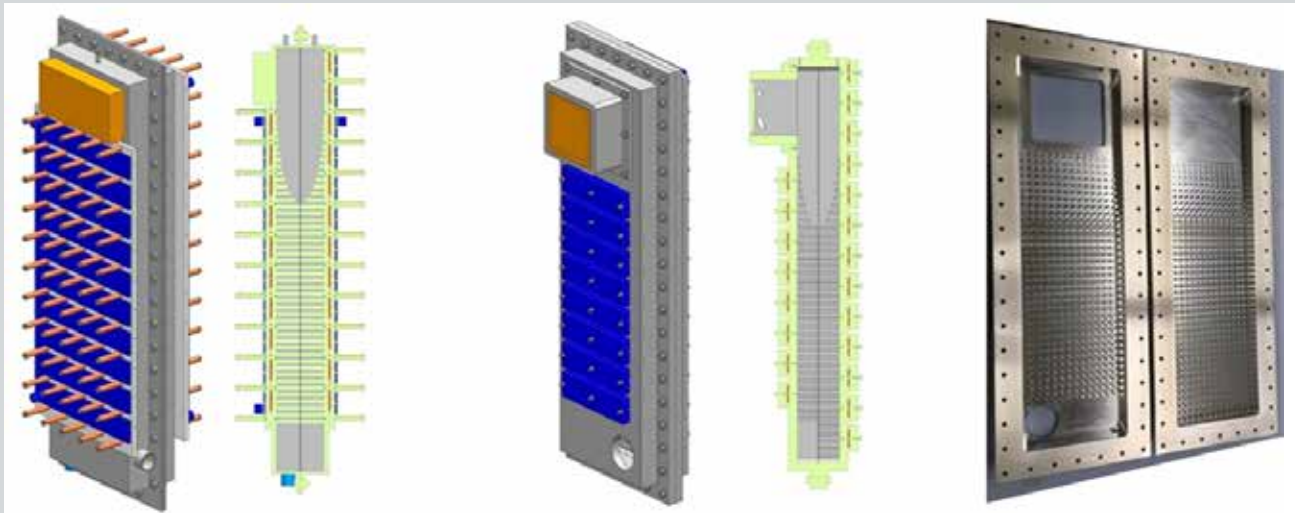


Abbildung 2: Entwurf und Schnittdarstellung des Wärmeübertragers der Bachelorarbeit (links) [4], Modell des gebauten Wärmeübertragers (Mitte) und Innenansicht des realen Wärmeübertragers (rechts); Grafik: Arne Stumpf

Üblicherweise werden Wärmeüberträger für Brennwertthermen aus einem Aluminium-Silicium-Sandguss gefertigt. Aus Kostengründen wurde der vorliegende Wärmeüberträger als Sonderanfertigung dagegen aus Vollmaterial gefräst. Dies beeinflusste sowohl die Werkstoffwahl als auch einige konstruktive Details. Des Weiteren wurden für die Peripherie der Anlage (Brenner, Steuerung, Pumpe, etc.) Komponenten eines kommerziellen Gasbrennwertgeräts beschafft. Auch die TEG sind kommerziell verfügbare Elemente. Die Schnittstellen des Wärmeübertragers wurden dementsprechend an die Gegebenheiten der angrenzenden Komponenten (Brenner, Abgasrohr, Kondensatablauf, TEG) angepasst.

Dem Modell nach wird die Dauertemperatur des Wärmeübertragers bis zu 250 °C betragen. Diese liegt deutlich über den gewöhnlichen Temperaturen für Wärmeüberträger in kommerziellen Brennwertthermen. Tabelle 2 zeigt eine Auswahl warmfester Aluminiumlegierungen. Aufgrund der Festigkeit, der chemischen Beständigkeit und der Spanbarkeit wurde der Werkstoff EN AW 5083 ausgewählt.

Tabelle 2: typische Festigkeitswerte einiger Aluminium Knetwerkstoffe im Kurzzeitversuch; Vorglühen 10.000 h bei Prüftemperatur (Quelle: ThyssenKrupp)

Werkstoff nach DIN EN 573.3 EN AW-	Zustand DIN EN 485.2	Prüftemperatur			
		200 °C		260 °C	
		R _m N/mm ²	R _{p0.2} N/mm ²	R _m N/mm ²	R _{p0.2} N/mm ²
1100 - Al99,0Cu	O/H111	40	25	30	20
3003 - AlMn1Cu	O/H111	60	30	40	25
3004 - AlMn1Mg	O/H111	95	65	70	50
5052 - AlMg2,5	O/H111	115	75	85	50
5454 - AlMg3Mn	H112	150	105	115	75
5083 - 4,5Mn0,7	O/H111	150	115	115	75

Die Temperatur von 250 °C in der Wärmeüberträgerwand entsteht wie im Folgenden beschrieben. Die elektrische Leistung eines TEG hängt direkt von der über den TEG anliegenden Temperaturdifferenz ab. Bei einem großen Wärmestrom durch den TEG wird mehr Strom generiert, als bei einem geringen Wärmestrom [5]. Jeder TEG besitzt eine werkstofflimitierte maximale Betriebstemperatur. Um die maximale elektrische Leistung mit einem TEG zu erreichen, muss eine möglichst große Temperaturdifferenz am TEG anliegen. Für die verwendeten TEG liegt die maximale Betriebstemperatur bei 230 °C. Nach Herstellerangaben wird bei Anlegen einer Temperaturdifferenz von 200 K (von 220 °C auf 20 °C) eine elektrische Leistung von ca. 13 W pro TEG erzeugt.

Der Temperaturverlauf zwischen Rauchgas und Wasser ist exemplarisch in Abbildung 3 dargestellt. Neben dem Wärmeleitwiderstand der TEG bestimmen eine Reihe weiterer Widerstände den gesamten Temperaturabfall zwischen Rauchgas und Wasser. Der größte Temperaturabfall besteht aufgrund des mäßigen Wärmeübergangs zwischen Rauchgas und Wand. Weitere wesentliche Temperaturabfälle treten an den Kontaktflächen zwischen TEG und Wärmeübertrager bzw. Kühler und zwischen Wasser und Kühloberfläche auf. Die Wärmeleitung in Wärmeübertrager und Kühler ist bei Verwendung von Aluminium sehr gut und verursacht daher nur sehr kleine Temperaturabfälle. Aus dem Diagramm geht hervor, dass die optimale Gestaltung der einzelnen Wärmeübergänge von zentraler Bedeutung für das Gesamtsystem ist.

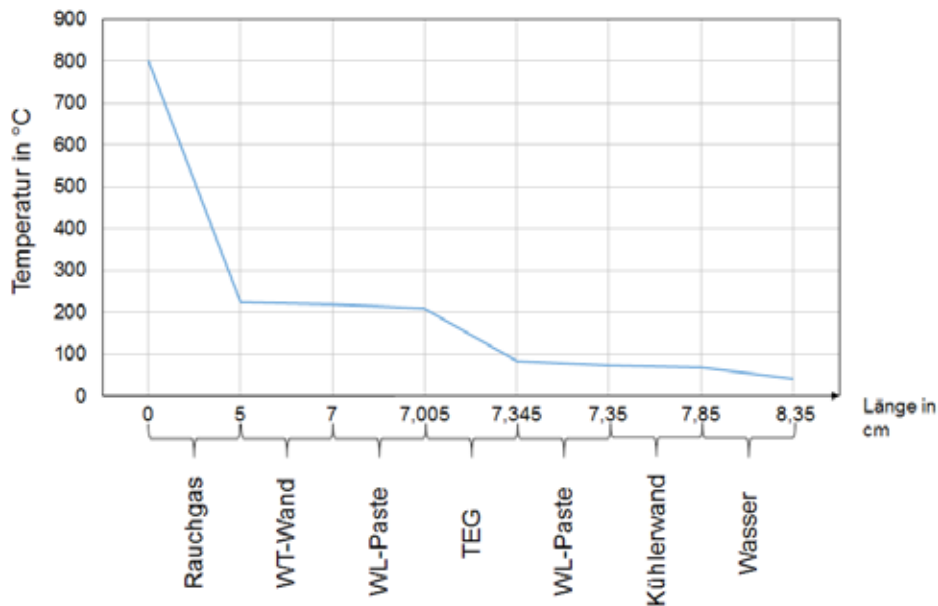


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Wärmedurchgangs nach der Modellrechnung (1-dimensional) zwischen Rauchgas und Wasser; Grafik: Arne Stumpf

Aus der ermittelten Temperaturdifferenz über die TEG lässt sich die elektrisch erzeugte Leistung an jeder Stelle im Apparat ermitteln. Das Ergebnis zeigt Abbildung 4. Zu sehen ist die erzeugte elektrische Leistungsdichte in Zusammenhang mit der Rauchgasabkühlung über der Fläche des Wärmeübertragers. Demnach wird die maximale elektrische Leistung in der Nähe des Brenners (links im Diagramm) erzeugt. Sobald die Rauchgastemperatur unter etwa 500 °C abfällt, sinkt auch die Temperaturdifferenz über die TEG und damit die erzeugte elektrische Leistung. Da die Temperaturdifferenz und elektrische Leistung nicht linear voneinander abhängen, wird ab etwa 0,5m kaum noch verwertbare elektrische Leistung erzeugt. Daraus wird ersichtlich, dass der Einsatz von TEG nur bei hohen Rauchgastemperaturen sinnvoll ist und bei geringeren Rauchgastemperaturen darauf verzichtet werden kann. Dies ist ein wesentlicher Punkt für die Optimierung der Wirtschaftlichkeit des Systems. Damit wird auch der Gesamtwirkungsgrad gegenüber Brennwertthermen ohne Stromproduktion nicht geschmälert, da die Abgastemperatur nicht erhöht wird.

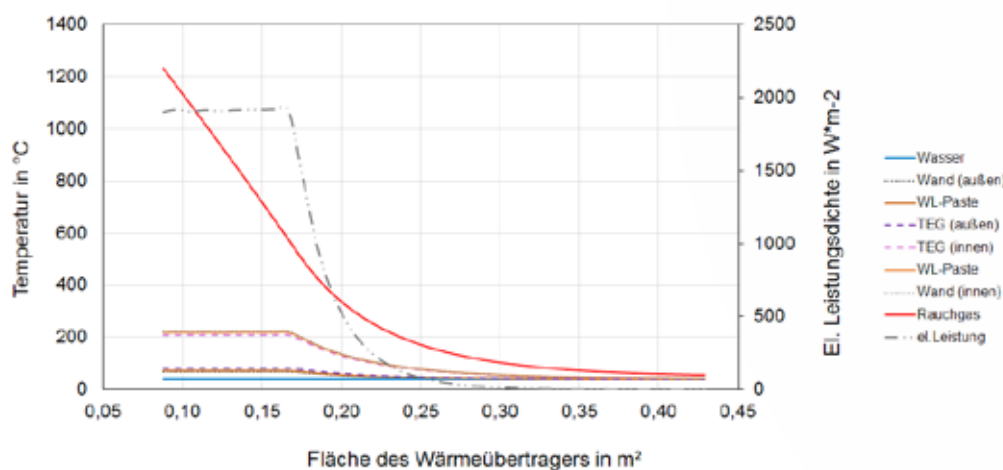


Abbildung 4: Temperaturverlauf zwischen Rauchgas und Wasser sowie generierte elektrische Leistungsdichte aufgetragen über der Fläche des Rauchgaspfades im Konvektionsteil des Wärmeübertragers; Grafik: Arne Stumpf

In Abbildung 5 ist ein Übersichts-Fließbild der Versuchsanlage dargestellt. Das Gas wird über eine Gasregelstrecke mit Luft gemischt und dem Brenner zugeführt. Dieser befindet sich am Kopf des Wärmeübertragers. Der primäre Kühlwasserkreislauf gibt die im Nano-BHKW freigesetzte Wärme über einen Plattenwärmeübertrager (W01) an einen Sekundärkreislauf im Labor ab (anstelle von Heizkörpern in einem Wohnhaus). Beide Kreisläufe sind mit Wasser befüllt. Der Primärkreislauf wird mittels Durchflusssensoren und Temperatursensoren überwacht. Die Wandtemperaturen im Wärmeübertrager werden ebenfalls gemessen.

Die elektrische Verschaltung der TEG ist eine Mischung aus Reihen- und Parallelschaltung. Je vier bis acht TEG werden in Reihe geschaltet. Diese Reihen werden wiederum parallelgeschaltet. Diese Art der Verschaltung soll zum einen zu hohe Spannungen und Stromstärken vermeiden, zum anderen sollen nur die TEG in Reihe geschaltet werden, die in etwa die gleiche Leistung liefern, um sich gegenseitig nicht negativ zu beeinflussen. Die generierte elektrische Leistung wird an elektronische Lasten abgegeben und dabei exakt gemessen. Die Messdaten werden automatisiert erfasst und ausgewertet.

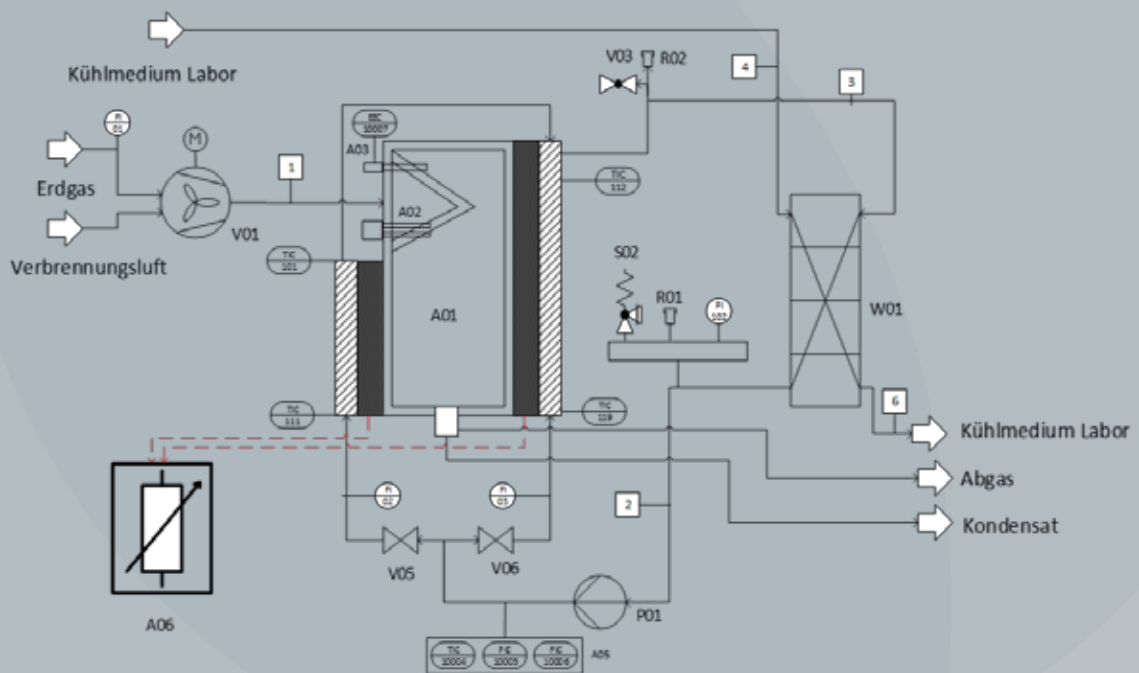


Abbildung 5: Übersichts-Fließbild der Versuchsanlage; Grafik: Arne Stumpf

Die Versuchsanlage befindet sich aktuell in der Fertigstellung und wird in Kürze in Betrieb genommen.



Abbildung 6: Bild der Versuchsanlage während der Montage (links), Detailansicht der Rippen im Wärmeübertrager (Mitte oben), Kühler mit eingebautem Thermoelement (rechts oben); TEG (Mitte); Kühler im eingebauten Zustand mit TEG (Mitte unten); elektronische Lasten (rechts unten); Fotos: Arne Stumpf

Abbildung 7 zeigt eine Sensibilitätsanalyse der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Wesentliche Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit sind die Jahres-Betriebsstunden und die Zusatzinvestitionskosten einer Brennwerttherme mit TEG-Technik gegenüber einer herkömmlichen Brennwerttherme ohne TEG-Technik. Liegen die Stromgestehungskosten unterhalb der üblichen Strombezugskosten im Privatkundenbereich von ca. 30 ct/kWh, ist ein wirtschaftlicher Betrieb möglich (Bereich unterhalb der roten Linie im Diagramm). D.h. um wirtschaftlich zu sein, darf eine Anlage bei 3000 Betriebsstunden im Jahr nicht mehr als 3000 € Zusatzinvestkosten verursachen. Nach aktuellem Kenntnisstand kann dieses Ziel erreicht werden. Eine erste Hochrechnung der Wirtschaftlichkeit für eine Serienfertigung ergibt, dass sich eine Anlage nach ca. zehn Jahren amortisiert hat. Der Berechnung werden dabei 3000 Betriebsstunden pro Jahr und ein Strompreis von 29ct*kWh⁻¹ zugrunde gelegt. Der generierte Strom wird dabei zu 100 Prozent selbst verbraucht.

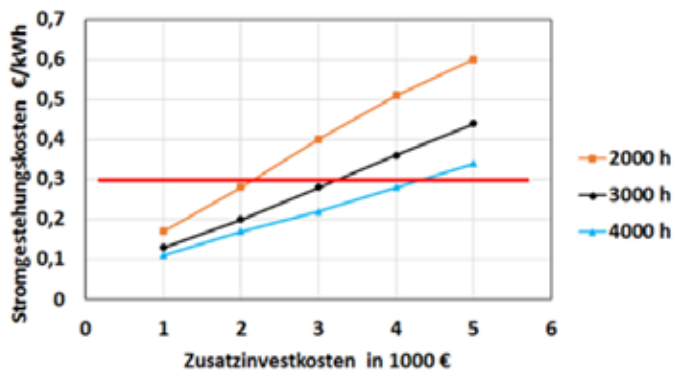


Abbildung 7: Stromgestehungskosten der modifizierten Brennwerttherme; Grafik: Arne Stumpf

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Wie bereits erwähnt, wurde im Rahmen des Projekts eine Bachelorarbeit („Planung einer Versuchsanlage zur experimentellen Untersuchung eines Nano-BHKWs mit thermoelektrischen Generatoren“) abgeschlossen, die eine grundsätzliche technische Machbarkeit eines Nano-BHKWs mit einem theoretischen Modell bestätigt.

Die aktuell in der Fertigstellung befindliche Versuchsanlage dient der Verifizierung der theoretischen Aussagen.

Parallel dazu sind weitere Bachelorarbeiten im Rahmen des Themenkomplexes in Arbeit. In einer Bachelorarbeit wird die Verifizierung der Abhängigkeit der elektrischen Leistung eines TEGs von bestimmten äußeren Faktoren untersucht. Im Anschluss an diese Bachelorarbeit soll ein Praktikumsversuch für die Studierenden der Fakultät Verfahrenstechnik erarbeitet werden, um ihnen das Themenfeld und die Funktionsweise der Thermoelektrizität während des Studiums näherzubringen. In einer weiteren Bachelorarbeit wird in Kooperation mit einem externen Partner die Strömung und der Wärmedurchgang im Wärmeüberträger des Nano-BHKWs in 3D simuliert. Ein studienbegleitender Projektkurs bearbeitet zusätzlich definierte Teilbereiche des Themenkomplexes „Nano-BHKW mit TEG“. Die Studierenden erarbeiten unter anderem Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen, Recyclingkonzepte für TEG und mögliche Optimierungen des theoretischen Modells wie auch der Versuchsanlage.

Im September 2018 wurden die bisherigen Ergebnisse der Forschungsarbeit hinsichtlich der Entwicklung „Nano-BHKW mit TEG“ auf dem 2. Netzwerktreffen des Bayerischen Wissenschaftsforums in Waischenfeld vorgestellt und diskutiert.

Aktuell ist ein wissenschaftlicher Mitarbeiter bis April 2019 mit der Bearbeitung und Entwicklung des Themas beschäftigt. Dabei liegt der Fokus auf der Inbetriebnahme der Versuchsanlage und der Verifizierung und Anpassung des theoretischen Modells für die Versuchsanlage. Zum Ende der Projektlaufzeit ist eine entsprechende Veröffentlichung geplant.

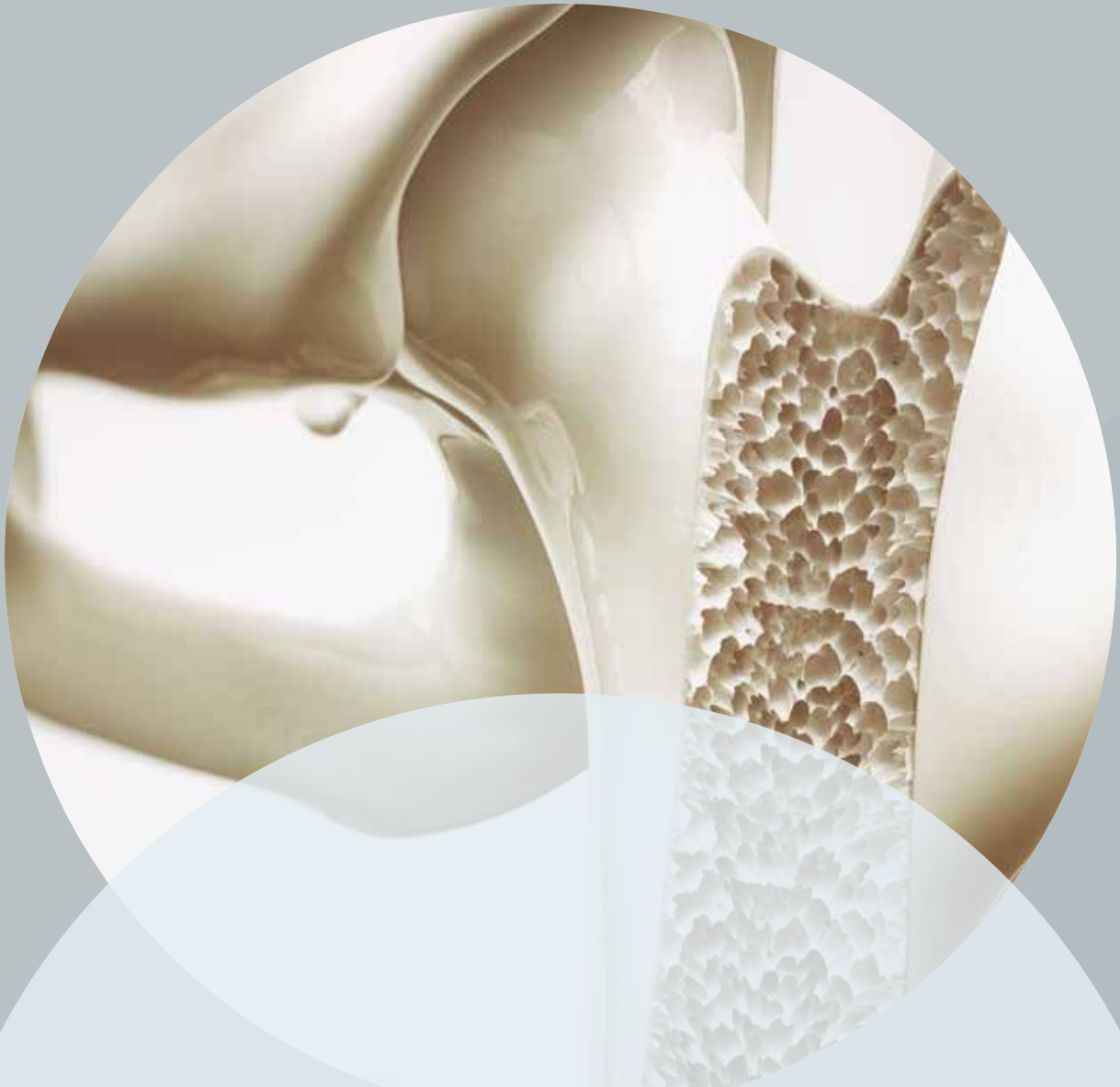
Eine weitere Finanzierung über den genannten Zeitraum hinaus ist bislang nicht gesichert. Kontakte zu Firmen aus dem Bereich der Brenner- und Heizungstechnologie bestehen und sollen in künftigen Projekten ausgebaut werden. Das Ziel der gesamten Forschungstätigkeiten ist es, die Technik bis zur kommerziellen Reife zu entwickeln.

6. References

- [1] W. Suttor, M. Jöhler, and D. Weisenberger, Das Mini-Blockheizkraftwerk: Eine Heizung die auch Strom erzeugt ; mit neuen Gesetzen und Fördermaßnahmen ab 1.1.2009, 5th ed. Heidelberg, 2009.
- [2] J. Seifert, J. Hartan, and A. Meinzenbach, Mikro-BHKW-Systeme für den Gebäudebereich. Berlin [u.a.], 2013.
- [3] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, “Fünfter Monitoring-Bericht zur Energiewende,”
- [4] A. Dilling, “Planung einer Versuchsanlage zur experimentellen Untersuchung eines Nano-BHKWs mit thermoelektrischen Generatoren,” vol. 2018.
- [5] Dr. Christian Stiewe and Prof. Dr. Eckard Müller, “Anwendungspotential thermoelektrischer Generatoren in stationären Systemen Chancen für NRW,” Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), 2013.







Osteo-TrainSim – Entwicklung und
Finite-Element-Simulation von zielgerichteten
Trainingsmethoden zur Vorbeugung
von Osteoporose bedingten Frakturen
durch mechanisch stimuliertes
Knochenwachstum

Prof. Dr.-Ing. Areti Papastavrou
Ina Schmidt, M. Sc.
Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik
TH Nürnberg

Knochen ist ein lebendes Material und der Knochenumbau ein lebenslanger Prozess. Ein Ziel dieses Projekts ist es, die Knochenstruktur und ihre Umwandlungsprozesse möglichst realitätsnah zu modellieren. Verschiedene relevante Belastungszustände sollen mit Finiten-Element-Methoden simuliert werden. Die Extremlasten, die zu Frakturen führen, sollen recherchiert bzw. in Zusammenarbeit mit Orthopädinnen und Orthopäden sowie Sportmedizinerinnen und -medizinern definiert werden, ebenso spezielle Lasten, die für die Bestimmung des biomechanischen Frakturrisikos bedeutend sind. Basierend darauf zielt das Projekt darauf ab, Belastungen in Form von zielgerichteten Trainingsübungen als Stimulation für ein Remodeling zu modellieren, sodass die Knochenfestigkeit nachhaltig zur Vermeidung von Osteoporose bedingten Frakturen umgebildet, entwickelt, untersucht und simuliert werden kann.

Wesentliche Projektziele

1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2018
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Areti Papastavrou
Kontaktdaten	E-Mail: areti.papastavrou@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Osteoporose zählt laut der Weltgesundheitsorganisation WHO zu den zehn bedeutendsten Erkrankungen der Gegenwart weltweit, zudem gilt sie mit ihren Folgekosten als eine der teuersten. Die Osteoporose ist in einer alternden Gesellschaft eine weit verbreitete Alterserkrankung der Knochen. Die Verminderung der Knochendichte führt zur Reduktion der Knochenfestigkeit. Damit geht ein erhöhtes Frakturrisiko einher, das exponentiell mit dem Lebensalter steigt. Die häufigsten in diesem Zusammenhang auftretenden peripheren Frakturen betreffen u.a. den Oberschenkel (proximaler Femur) und den Oberarm (proximaler Humerus).

Nicht nur der heranwachsende Knochen, sondern auch der erwachsene Knochen ist noch einem ständigen Umbauprozess unterworfen, wobei Osteoplasten neue Knochensubstanz im sogenannten Remodeling neubilden. Dies erlaubt dem Knochen, auf veränderte Belastungen durch eine erhöhte Dichte und damit höhere Festigkeit zu reagieren. In diesem Kontext ist unter mechanischen Gesichtspunkten interessant, inwiefern beim Remodeling die Bildung neuer Knochenbälkchen (Trabekel) durch Belastungsanforderungen aus frühzeitigen Trainingsübungen derart stimuliert werden kann, dass sie später klassischen Frakturen „gewachsen“ sein können.

Im klinischen Alltag erfolgt die Diagnose von Osteoporose und damit die Abschätzung eines Frakturrisikos mittels einer Knochendichtemessung durch Dual-Röntgen-Absorptiometrie (DXA) oder quantitative Computertomogra-

QCT). CT-Bilder erlauben nicht nur eine Aussage über die Knochenquantität (Knochenmasse), sondern auch über die Knochenqualität (Mikroarchitektur, Mikrorisse,...), die ebenso einen wesentlichen Einfluss auf die Belastbarkeit des Knochens hat. Die CT-Daten bilden die Basis für Finite-Element-Modelle, mit denen die Knochenfestigkeit numerisch unter gegebener Last bestimmt und analysiert werden kann. Die Bildauflösung beeinflusst die Güte der FE-Modelle und damit der berechneten Ergebnisse. Klinische QCT-Aufnahmen liefern Bilder mit Pixelgrößen von größer 300 μm für humane Knochen in vivo, während HR-pQCT-Bilder für humane Radiuschichten im Bereich von etwa 100 μm und μCT -Scans von Biopsien im Bereich von etwa 10 μm liegen. Liegt der Fokus auf der trabekulären Knochenstruktur, finden üblicherweise μFE -Modelle Anwendung, bei denen die Bildvoxel in Finite-Volumenelemente überführt werden. Bei einer makroskopischen Betrachtung der Knochen werden hingegen meist hFE-Modelle verwendet, bei denen die Informationen gemittelt, d.h. homogenisiert werden. Die Simulation liefert eine Aussage hinsichtlich der Steifigkeit und der ultimativ ertragbaren Belastung und eröffnet die Möglichkeit zur Untersuchung der Art und des Ortes des Versagens. In Verbindung mit auftretenden Extremlasten durch z.B. Fallen, Springen etc. kann ein biomechanisches Frakturrisiko als Verhältnis der auftretenden zu den ultimativen Lasten definiert werden. Um dieses Risiko zu minimieren, müssen die ultimativen Lasten maximiert werden.

Durch das Remodeling, d.h. die stimulierte Zunahme der Knochendichte steigt die Belastbarkeit. Die Aktivierung der Osteoplasten erfolgt u.a. durch einen mechanischen Stimulus. Neben hydrostatischem Druck und elastischen Deformationen (in mikroskopischer Größenordnung) gelten die hormonelle und die biochemische Stimulation sowie elektromagnetische Reize als weitere Stimuli für diesen Knochenumbauprozess.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes soll, als Initialprojekt, die Knochenstruktur sowie das Remodeling möglichst realitätsnah modelliert werden. Das Ziel ist es, das formulierte theoretische Modell mit Finiten Element-Methoden in ein numerisches Modell umzusetzen. Basierend auf dem numerischen Modell plant das Forschungsteam, einen Programmcode zu entwickeln und zu implementieren, der auch zukünftige Weiterentwicklungen des Modells sowie umfangreiche Simulationen von verschiedensten Problemstellungen bzw. Lastszenarien ermöglicht.

Das Forschungsteam zielt darauf ab, das implementierte Modell anhand von Benchmark-Problemen aus der Literatur zunächst zu validieren. Anschließend erfolgt die Simulation von verschiedenen relevanten Belastungszuständen.

Das Forschungsteam plant, aus der Recherche die Extremlasten, die für die Bestimmung des biomechanischen Frakturrisikos bedeutend sind, in Zusammenarbeit mit Orthopädinnen und Orthopäden bzw. Sportmedizinerinnen und -medizinern zu definieren. Basierend darauf kann die Untersuchung und Simulation von Belastungen in Form von zielgerichteten Trainingsübungen erfolgen. Sie sind eine Stimulation für das Remodeling, das die Knochenfestigkeit nachhaltig zur Vermeidung von Osteoporose bedingten Frakturen umbildet.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Die Modellierung des physikalischen Knochenumbauprozesses erfolgte im Forschungsprojekt Osteo-TrainSim unter Berücksichtigung des Wolffschen Gesetzes als Kontinuumsvorgang im Kontext der Thermodynamik offener Systeme. Diese Vorgehensweise basiert auf der Arbeit von Kuhl und Steinmann [1] und erlaubt einen Massenaustausch über die Grenzen eines Referenzvolumens. Dies ermöglicht ein lokales Massenwachstum und damit die Zunahme der Dichte. Die Änderungsrate der Massendichte steht in der Massenbilanz im Gleichgewicht mit der lokalen Massenquelle und dem Massenzufluss. Als Stoff- bzw. Materialgesetz für den Knochen wurde für die Helmholtzsche Energie [1] eine Neo-Hooke Energie gewählt. Die Knochendichte entwickelt sich isotrop als Reaktion auf die mechanische Belastung. Das somit vorliegende System von gekoppelten partiellen Differentialgleichungen wird mit der Finite-Elemente-Methode approximativ gelöst. Die primären Unbekannten sind hierbei die Deformation und die Dichte. Die Massenbilanz wird lokal auf der Ebene der Integrationspunkte gelöst, während das Deformationsproblem in Form der Impulsbilanz global gelöst wird. Auf diese Art entsteht ein gestaffelter Algorithmus.

Der Algorithmus wurde in Matlab implementiert. Es folgte die mechanische Simulation des in [1] definierten quasi-eindimensionalen Benchmark-Problems sowie die Analyse und Bewertung der mechanischen Antwort der Knochenprobe infolge der Belastung. Das Benchmark-Problem für eine Knochenprobe ist in der Abbildung 1 dargestellt. Die Ergebnisse der Simulation mit dem im Forschungsprojekt entwickelten Programm stimmen mit den Ergebnissen aus der Literatur [1] überein. Damit ist der neue Code validiert.

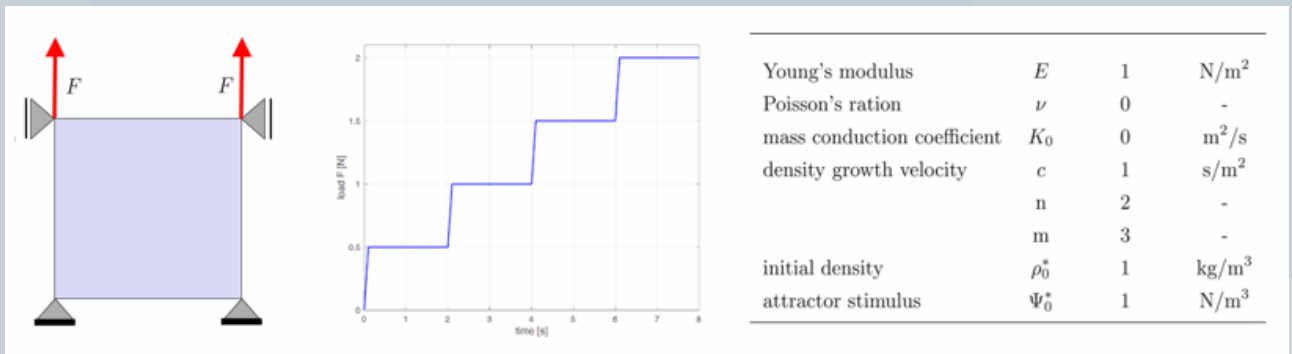


Abbildung 1: Benchmark-Problem [1]: Probekörper, Lastentwicklung, Referenzparameter. Grafik: Areti Papastavrou

Anhand des ersten Benchmark-Problems wurde die zeitliche Entwicklung relevanter Größen untersucht. In Abbildung 2 sind links die zeitliche Evolution der Kraft (blau), der Verschiebung (grün) und der relativen Dichte (schwarz) aufgezeichnet. Die Verschiebung bzw. Deformation springt in jeder Lastperiode am Anfang mit der Laststeigerung und konsolidiert dann. Die relative Dichte nimmt kontinuierlich von Lastperiode zu Lastperiode zu und konvergiert in jeder Periode gegen einen Sättigungswert. Insbesondere ist die Evolution des biologischen Stimulus interessant. Dieser ist in Abbildung 2 rechts als blaue Kurve dargestellt und konvergiert in jeder Lastperiode gegen den Attraktor-Stimulus, einen Materialparameter des Knochens, der hier mit dem Wert 1 gewählt wurde. Die freie Energie Ψ_0 (schwarz) zeigt qualitativ ein ähnliches Verhalten wie die Verschiebung.

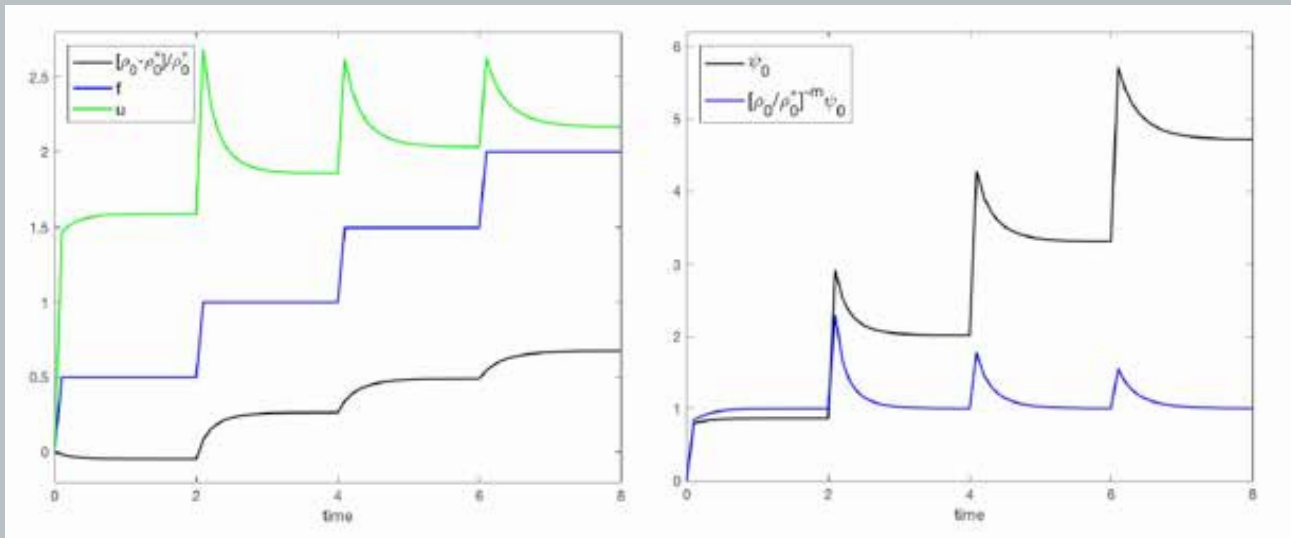


Abbildung 2: Zeitliche Entwicklung der relativen Dichte, Kraft und Deformation (links) und des biologischen Stimulus und Attraktor-Stimulus (rechts).
Grafik: Areti Papastavrou

Des Weiteren hat das Forschungsteam verschiedene Parameter des Modells variiert. Ausgewählte Ergebnisse für die Parameter n und m , die Ausgangsdichte und den Attraktor-Stimulus sind in Abbildung 4 dargestellt.

Aus der Studie der verschiedenen Modellparameter folgte die Erkenntnis, dass der wesentliche Parameter, der die Entwicklung der Dichte steuert, der Attraktor-Stimulus ist. Wie der Abbildung 3 rechts zu entnehmen ist, nimmt die relative Dichte in der ersten Lastperiode zunächst ab, wenn der Wert des Attraktor-Stimulus mit 1 oder größer gewählt wird. Da es sinnvoll ist, dass die Dichte auch in der ersten Lastperiode unter Last zunimmt, muss der Wert des Attraktor-Stimulus entsprechend mit einem Wert kleiner als 1 vorgesehen werden.

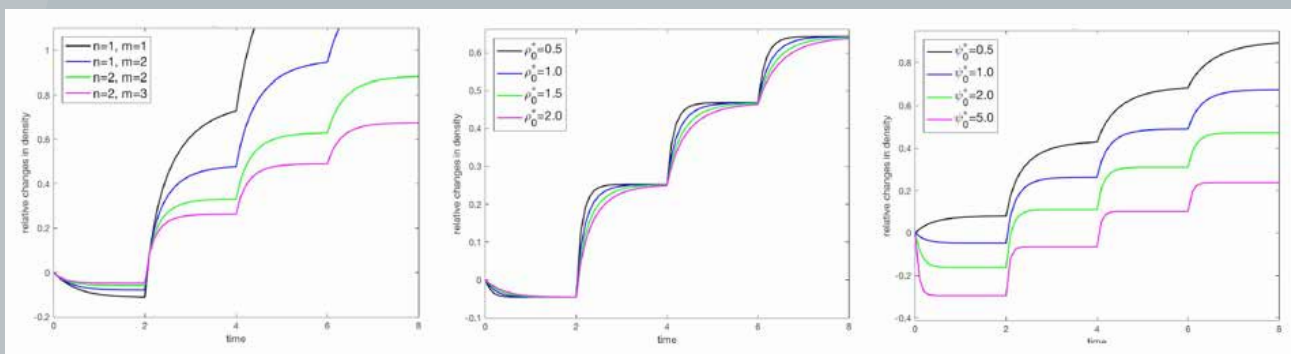


Abbildung 3: Parameterstudie für die relative Dichte in Abhängigkeit der Parameter n und m (links), der initialen Dichte (mittig) und des Attraktor-Stimulus (rechts). Grafik: Areti Papastavrou

Der Knochen ist generell kein homogenes Material. Aufgrund der trabekulären Struktur des Knochens ist die Dichte nicht überall die gleiche. Um im neuen Modell diesem Fakt und der Unsicherheit der Verteilung der Materialparameter Rechnung zu tragen, hat das Forschungsteam angenommen, dass insbesondere der Attraktor-Stimulus über den Knochen bzw. die Probe zufallsverteilt ist.

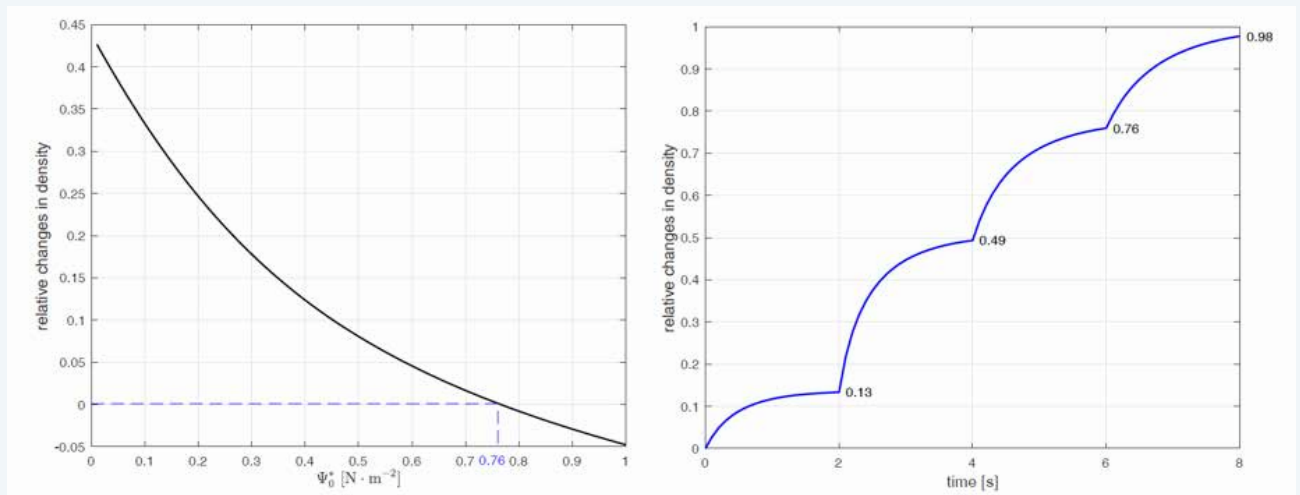


Abbildung 4: Studie für die relative Dichte in Abhängigkeit des Attraktor-Stimulus (links) und der relativen Dichte über die Zeit mit dem gewählten Attraktor-Stimulus der Größe 0.38 (rechts). Grafik: Areti Papastavrou

In Abbildung 4 ist eine Studie für die Abhängigkeit der relativen Dichte vom Attraktor-Stimulus zum Zeitpunkt am Ende der ersten Lastperiode zu sehen. Für einen Wert von 0.76 des Attraktor-Stimulus ändert sich die Dichte nicht, d.h. die relative Dichte ist 0. Für kleinere Werte des Attraktor-Stimulus ergeben sich zum konkreten Zeitpunkt größere Dichten und damit eine Zunahme an Knochenmasse. Für größere Werte als 0.76 ist eine Abnahme der Knochendichte sichtbar. Aufgrund dieser Beobachtung wurde die Vorgabe für anschließende Simulationen geändert: um einen Knochenabbau zu vermeiden, soll der Attraktor-Stimulus an jeder Stelle einen Wert von kleiner 0.76 annehmen. In Abbildung 4 ist rechts für das Benchmark-Problem die zeitliche Entwicklung der relativen Dichte unter Einstellung des Wertes 0.38 für den Attraktor-Stimulus zu sehen.

Die Unsicherheit der materiellen Parameter wird zunächst über eine Zufallsvariable für den Attraktor-Stimulus eingeführt. Basierend auf der vorherigen Studie wählte das Forschungsteam eine Gauß-Verteilung und legte den Mittelwert mit 0.36 fest, wobei die maximale Standardabweichung nur so groß sein darf, dass der Attraktor-Stimulus nicht größer als 0.76 wird und damit kein Knochen abgebaut wird. Es wurden für das Benchmark-Problem für verschiedene Standardabweichungen mit verschiedenen Netzdichten jeweils 1000 zufällige Proben simuliert. Aus den Ergebnissen konnte das Forschungsteam die Verteilungen für die relative Dichte bestimmen. Diese zeigten für eine zunehmende Elementanzahl Konvergenz gegen die Ergebnisse für einen konstanten Attraktor-Stimulus mit dem Mittelwert. Naturgemäß resultiert eine größere Standardabweichung bei der Attraktor-Stimulus-Variable auch in eine größere Standardabweichung in der Verteilung der relativen Dichte.

Das Knochenwachstum ist ein komplexer Prozess über die Lebenszeit. Die Änderungsrate der Knochendichte ist neben anderen Faktoren wie der mechanischen Beanspruchung und dem Hormonhaushalt auch altersassoziiert. Das Forschungsteam ging zunächst von einer generellen Tendenz der Anpassung des Knochenwachstums an das Alter aus. Es ist anzunehmen, dass sich die Dichte des Knochens grundsätzlich während der Lebenszeit zunehmend langsamer ändert. Das Forschungsteam hat zwei alternative Funktionen für den Attraktor-Stimulus in Abhängigkeit von der Zeit (Lebensalter) umgesetzt. Die erste Funktion entspricht einer Stufenfunktion (siehe Abbildung 5, links), die zweite Funktion verfügt über ein Sättigungsverhalten (siehe Abbildung 5, rechts). Die neuen Funktionen sind jeweils in grün gezeichnet und der alten konstanten Funktion in blau gegenübergestellt.

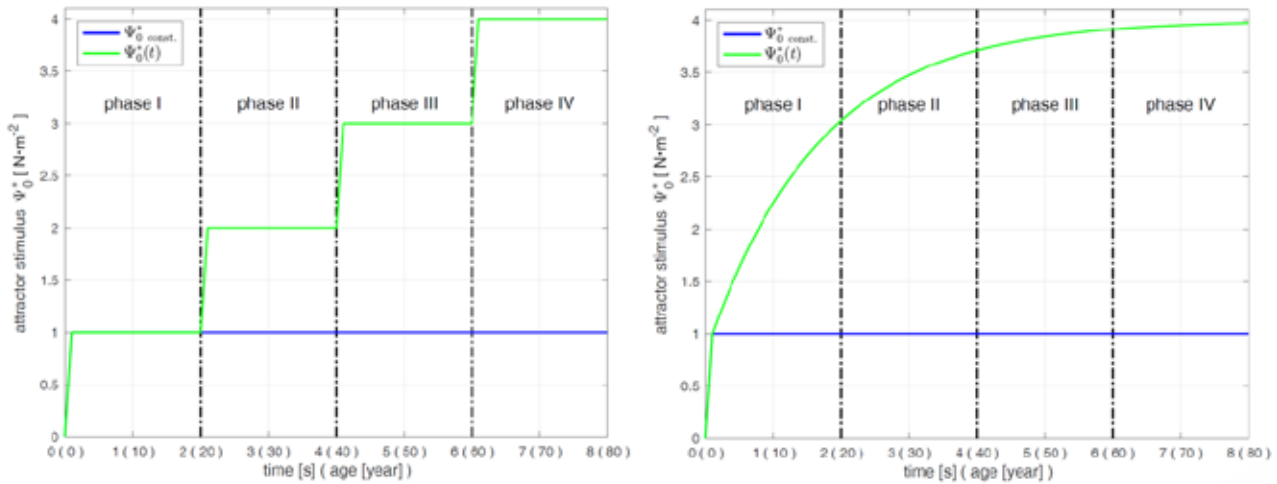


Abbildung 5: Lebenszeitabhängige Funktionen für den Attraktor-Stimulus: Stufenfunktion (links) und Sättigungsfunktion (rechts). Grafik: Areti Papastavrou

Die Entwicklung der relativen Dichte über die Zeit für beide Funktionen ist in Abbildung 6 (oben) dargestellt, sowie die Entwicklung der Deformation (Abbildung 6, unten).

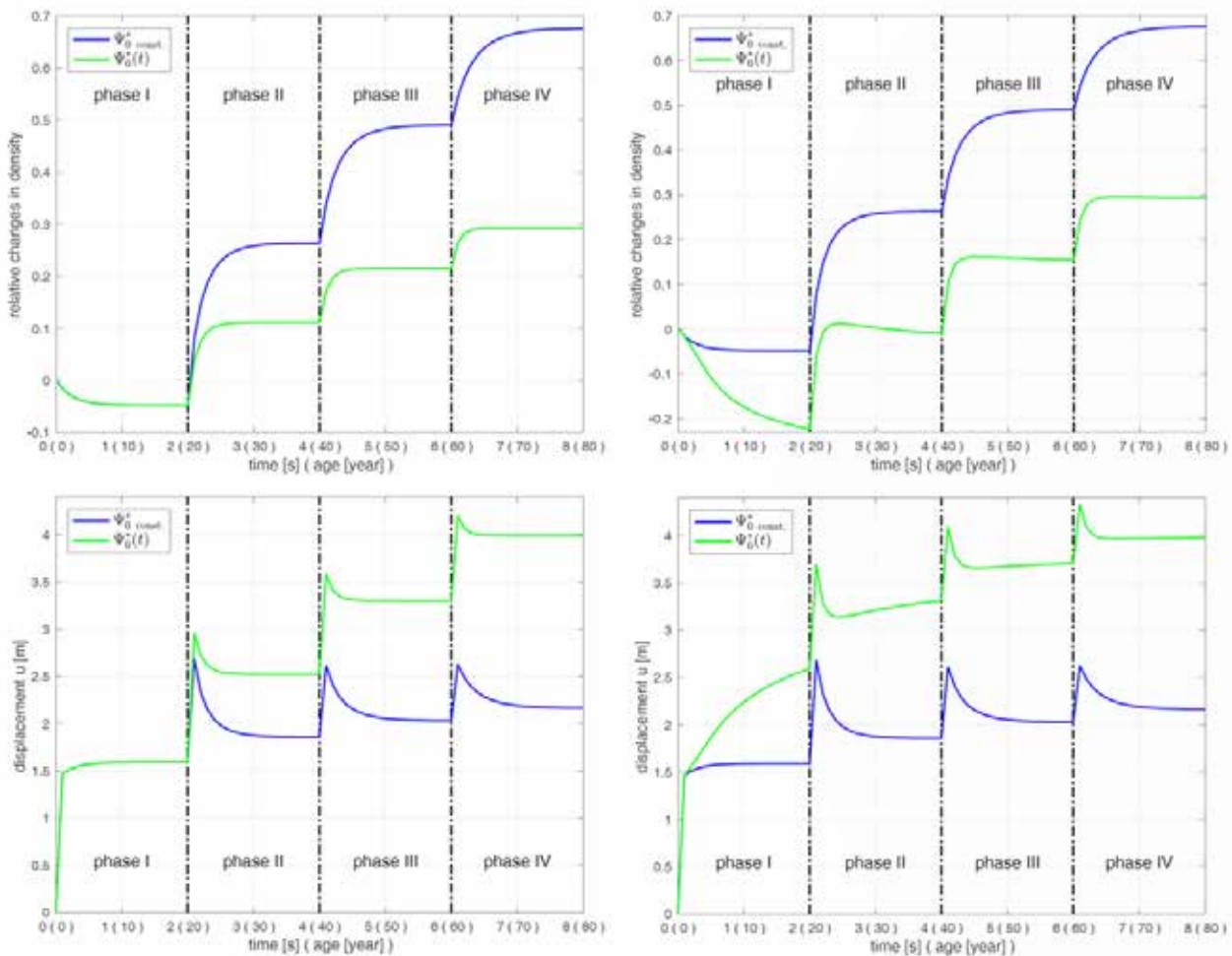


Abbildung 6: Relative Dichte-Evolution (oben) und Deformationsevolution (unten) mit der Stufenfunktion (links) bzw. Sättigungsfunktion (rechts) für den Attraktor-Stimulus. Grafik: Areti Papastavrou

In der Abbildung 6 entsprechen die grünen Verläufe den neuen Ergebnissen und die blauen der Referenzlösung. Deutlich ist das Phänomen der verlangsamten Dichteentwicklung mit zunehmendem Alter zu erkennen. Einhergehend damit nimmt die Verformung mit dem Alter zu. Der Knochen wird also mit steigendem Alter empfindlicher gegenüber Belastungen, da seine Festigkeit infolge abnehmender Dichte nachlässt.

Die am Benchmark bereits angewendeten neuen Modelle wurden auch bei der Validierung anhand von in der Literatur verfügbaren (experimentellen) Referenzergebnissen unterzogen. Ein klassisches Beispiel ist das des Oberschenkelknochens (Femur). In Abbildung 7 sind die im Projekt berechneten Ergebnisse für die relative Dichte dargestellt. Die Simulation von Kuhl und Steinmann stimmen mit denen aus dem aktuellen Forschungsprojekt überein. Die simulierte Dichteverteilung passt qualitativ zu der Röntgenaufnahme.

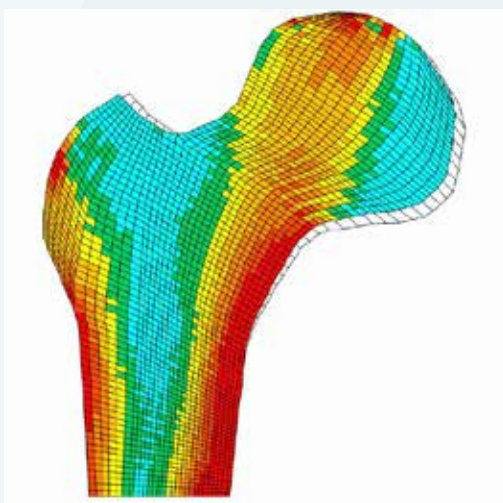


Abbildung 7: Femur - aktuelle relative Dichteverteilung. Grafik: Areti Papastavrou

Um realitätsnahe Simulationen vornehmen zu können, waren reale Geometriemodelle erforderlich. Das Klinikum Nürnberg hat als Kooperationspartner eine Vielzahl von anonymisierten Bilddaten zur Verfügung gestellt. Im Rahmen von Masterprojekten [3], [4], [5] wurden verschiedene frei verfügbare Software Tools zur Segmentierung und Aufbereitung von medizinischen Bilddaten im DiCOM-Format für FE-Analysen mittels ANSYS Workbench getestet. Das Ziel war die Bewertung dieser Tools hinsichtlich der Verwendbarkeit in diesem bzw. Folgeprojekten. Leider erwiesen sich die getesteten „freeware“-Tools ITC, Seg3D und Slicer3D als nicht bedienungsfreundlich, nicht auflösend genug und damit als nicht geeignet. Auch eine Bildverarbeitung mittels Matlab war in der gegebenen Zeit nicht zufriedenstellend möglich.

Zwei weitere Masterprojekte [6], [7] verfolgten darum einen anderen Ansatz, um ein geeignetes Geometriemodell des Humerus zu erzeugen. Ein anatomisches Knochenmodell wurde mittels eines 3D-Scanners aufgenommen. Mit der Software POLYWORKS, die am OHM-CMP (Institut für Chemie, Material- und Produktentwicklung, TH Nürnberg) vorhanden ist, wurde über eine Punktwolke ein Oberflächennetz und schließlich ein exportierbares Oberflächenmodell erzeugt. Dieses Modell wurde in der CAD-Software CREO in ein Volumenmodell überführt, das dann schließlich in der FE-Software ANSYS Workbench und auch der Multiphysics Software COMSOL vernetzt werden konnte, siehe Abbildung 8.

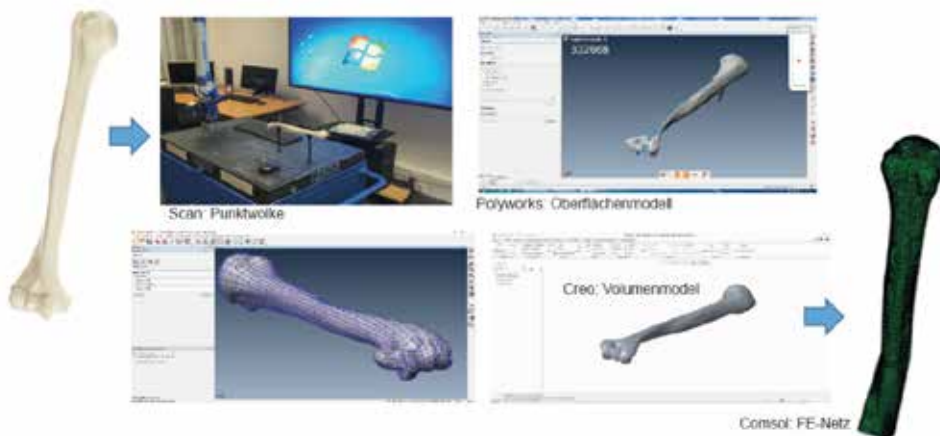


Abbildung 8: Erstellungsprozess vom anatomischen Humerus-Modell zum Finite-Element-Netz. Grafik: Areti Papastavrou

Diese FE-Volumennetze bilden die Grundlage für erste Simulationen des Humerus in ANSYS Workbench im Rahmen der Masterprojekte und bieten einen Input für die Humerus-Simulationen im eigens entwickelten Matlab-Code im Kontext des Forschungsprojektes.

Insbesondere wurde die implementierte FE-Modellierung anhand der erzeugten Referenzgeometrie des Humerus mit einem Beispiel aus der Literatur [8] abgeglichen. Die Definition der Lasten und der Randbedingungen werden entsprechend Dahan et al. [8] formuliert. Dort ist auch die Verteilung der Verzerrungen, wie sie von Dahan et al berechnet wurden, und experimentelle Ergebnisse angegeben. Zum Vergleich ist Abbildung 9 die im Forschungsprojekt ermittelte Spannungsverteilung dargestellt. Da sich diese Rechnung auf den elastischen Anteil beschränkt, sind die Ergebnisse vergleichbar. Es lässt sich eine qualitative Übereinstimmung der Zonen höherer Verzerrungen bei Dahan et al. und Zonen höherer Spannungen in der aktuellen Simulation erkennen, siehe Abbildung 9 rote Bereiche.

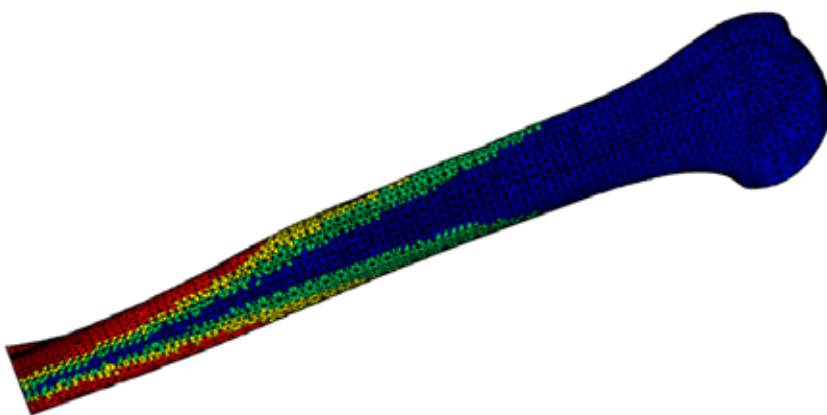


Abbildung 9: Humerus – aktuelle Spannungsverteilung. Grafik: Areti Papastavrou

Nach der Validierung des neuen Programms anhand von Literaturbeispielen wurden die Lasten variiert. Ziel des Projekts ist es, ein Trainingsprogramm zu entwickeln, dass zur Stimulation des Knochen-Remodelings zur Vorbeugung von osteoporosebedingt Frakturen beiträgt. Ausdauersport in Form von regelmäßigem zügigen Gehen, Laufen, Treppensteigen oder Wandern eignen sich zur Osteoporose-Prophylaxe, weil auf diese Weise das

Körpergewicht das Skelett belastet und das Knochen-Remodeling angeregt wird. Als effektiver haben sich in der Praxis High-Impact-Belastungen in Form von intensitätsbetontem Krafttraining und Schnellkrafttraining, z. B. Gerätetraining oder Sprungsequenzen erwiesen. Wichtig sind wiederholte, also dynamische Kraftimpulse auf den Knochen.

Anhand des Femurs wurden eine moderate konstante Last (Ausdauertraining, Abbildung 10 (links): blaue Linie) und ein Lastzyklus aus Kraftimpulsen höherer Intensität (High-Impact-Krafttraining, Abbildung 10 (links): braune Linie) angesetzt und die Ergebnisse verglichen, siehe Abbildung 10. In den Verteilungen der relativen Dichte ist zu erkennen, dass sich nach wenigen Kraftimpulsen die Regionen der Dichtezunahmen zwar ähneln, aber durch das Impulstraining in den relevanten Bereichen deutlich höhere Dichten erzielt werden. Dieses Verhalten ist auch im weiteren Verlauf des Trainings zu beobachten. Die Dichten nehmen jeweils zu und konvergieren gegen einen Endzustand.

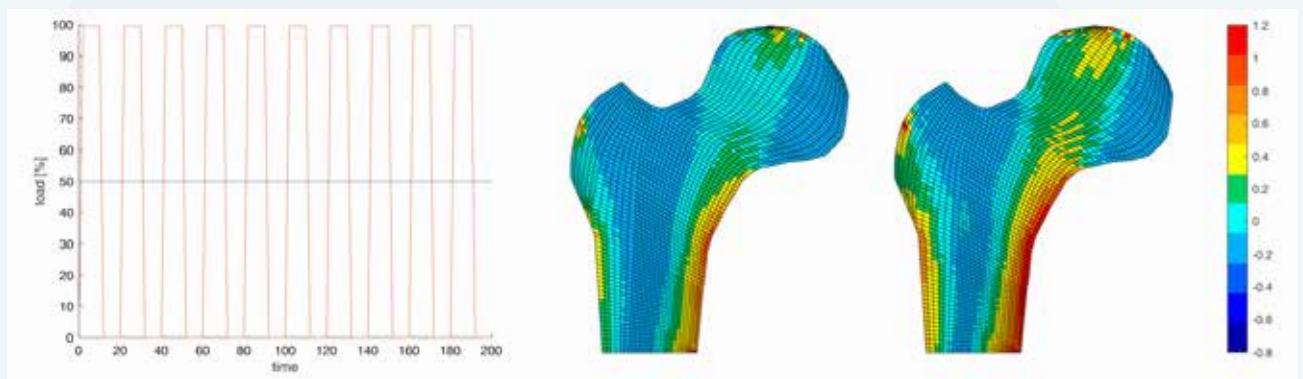


Abbildung 10: Femur – Belastung (links), relative Dichteverteilungen aus Ausdauertraining (mittig) und Krafttraining (rechts) bei $t=30$.
Grafik: Areti Papastavrou

In der verbleibenden Bearbeitungszeit des Forschungsprojekts plant das Forschungsteam eine auswertende Diskussion mit den kooperierenden Medizinerinnen und Medizinern. Dabei sollen neben den relevanten Materialparametern die Lasten für ein zielgerichtetes Trainingsprogramm genauer definiert werden. Des Weiteren ist angedacht, mögliche Anschlussprojekte zur Vorbeugung von Osteoporose bedingten Frakturen zu formulieren.

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Die im Rahmen des Projektes neu entwickelten und erstellten Modelle und erste vielversprechende Simulationsergebnisse wurden im Rahmen eines Plenarvortrages auf der MECOM 2018 (XII Argentine Congress on Computational Mechanics, 6. bis 9. November 2018) vorgetragen [10].

Auf Basis der ersten Erkenntnisse und Ergebnisse wurde ein Antrag bei der STAEDTLER Stiftung für ein Folgeprojekt zur Erstellung eines erweiterten Kontinuumsmodells zur numerischen Analyse von Knochenumbauprozessen unter Berücksichtigung mechanischer Stimuli sowie Knochenstoffwechsellaspekten beantragt. Die Bewilligung dieses Projektantrages erfolgte im Oktober 2018 und stellt die Fortbeschäftigung der wissenschaftlichen Mitarbeiterin Ina Schmidt, M. Sc. und Aufnahme eines Promotionsvorhabens sicher.

Im August 2018 reiste die Projektkoordinatorin an die University of Cape Town, Südafrika, um sich mit dortigen

gen Kollegen auszutauschen. In Absprache mit den Fachkollegen Prof. Sudesh Sivarasu, Professor für Biomedical Engineering und Leiter des Orthopaedic Research Labs, Prof. Stephen Roche, Professor für Orthopaedics und Chirurg am Groote Schuur Hospital, Cape Town, sowie Co-Leiter des Orthopaedic Research Labs und Prof. Daya Reddy, Professor am Department of Mathematics and Applied Mathematics, Inhaber des South African Research Chair in Computational Mechanics und Direktor des Centre for Research in Computational and Applied Mechanics (CERECAM) wurde ein Initialprojekt „Computational Bone Remodeling: A Multi-Scale Perspective on the Aseptic Loosening of the Glenoid in Total Shoulder Arthroplasty“ abgestimmt. Es ist eingebettet in eine interdisziplinäre Kollegengruppe bestehend aus Ingenieuren, Mathematikern und Ärzten sowie in ein Umfeld aus einem Labor für Medizintechnik, einem Kompetenzzentrum für Numerische Mathematik und Angewandte Mechanik sowie verschiedene klinische Einrichtungen. Dieses Projekt zielt darauf ab, das längerfristige Kollaborationsinteresse auf dem Gebiet der computergestützten Biomechanik mit Anwendungen in der Prothetik anzuschließen.

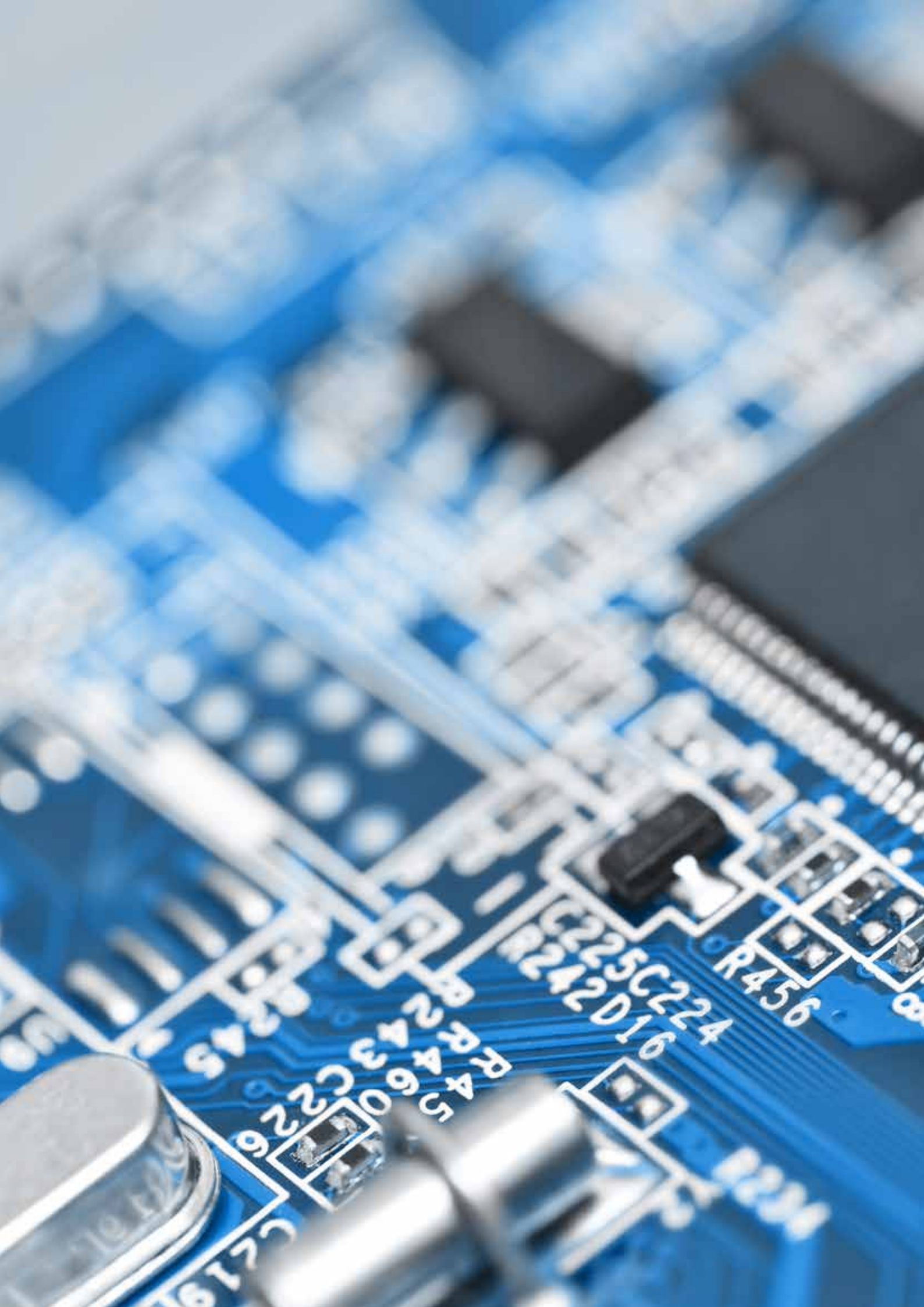
Kooperationspartner des Vorlauforschungsprojektes Osteo-TrainSim sind das Klinikum Nürnberg in Person von Dr. med. Markus Geßlein und der Lehrstuhl für Technische Mechanik der FAU, dort insbesondere Prof. Paul Steinmann und Kefu Deng [9]. Aus der Diskussion der bislang erzielten Ergebnisse werden im weiteren Projektverlauf die relevanten medizinischen Parameter identifiziert und validiert werden.

Derzeit werden Publikationen über die bereits erzielten Resultate vorbereitet. Für die Einreichung adressierte Journale sind: Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering oder Osteoporos.

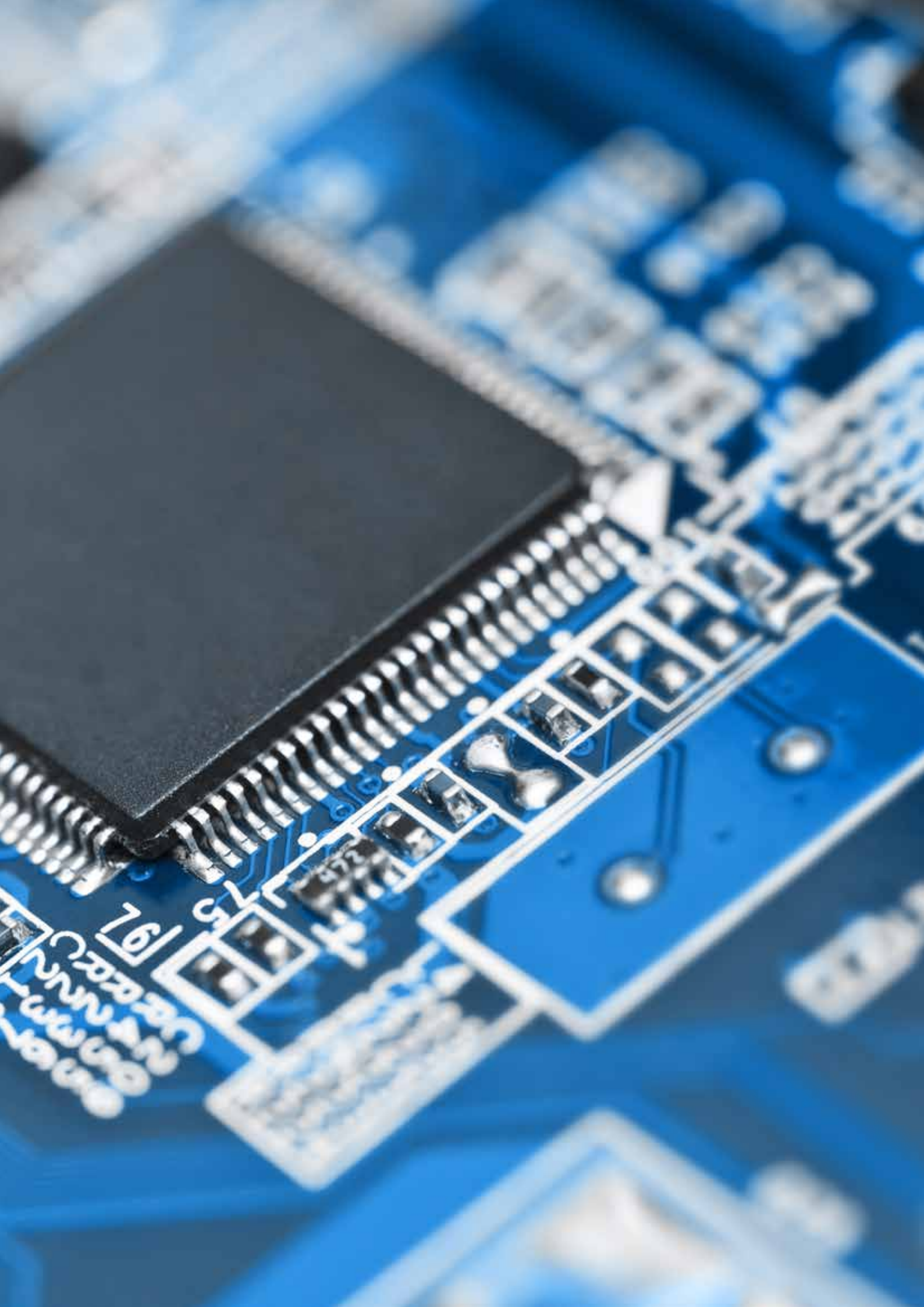
6. Literatur

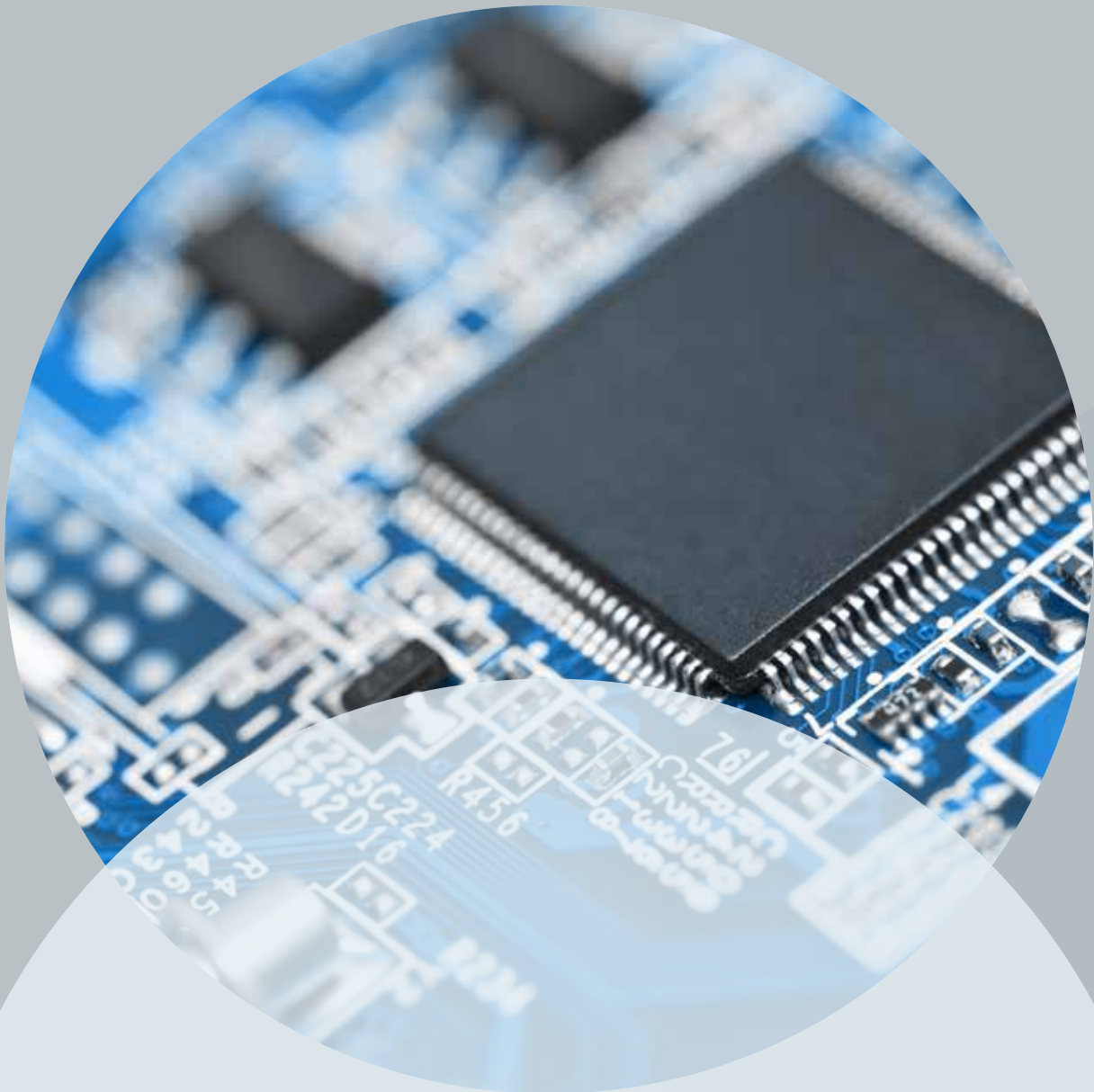
- [1] Ellen Kuhl, Paul Steinmann: Theory and numerics of geometrically non-linear open system mechanics, Int. J. Numer. Meth. Engng. 2003; 58:1593–1615 (DOI: 10.1002/nme.827)
- [2] Christopher Jacobs et al: Numerical instabilities in bone Remodeling simulations: The advantages of a node-based finite element approach, J. Biomechanics, 1995, Vol. 28, No. 4, 449-459
- [3] Katrin Henning: Vergleich von nichtkommerziellen Softwaretools zur Aufbereitung medizinischer Bilddateien für die Verwendung in ANSYS, Masterprojekt, TH Nürnberg, 2017
- [4] Elisabeth Pilney: Gegenüberstellung und Bewertung verschiedener Softwarewerkzeuge zur Aufbereitung medizinischer Bilddateien für FEM-simulationen (Matlab), Masterprojekt, TH Nürnberg, 2017
- [5] Max Straub: Recherche und Tests zur Aufbereitung medizinischer Bilddateien für die Verwendung in Simulationsprogrammen (ANSYS), Masterprojekt, TH Nürnberg, 2017
- [6] Mustafa Altok: Entwicklung und Umsetzung eines Modells des Humerus zur Verwendung im Simulations-programm ANSYS, Masterprojekt, TH Nürnberg, 2018
- [7] Harold Lenou Zapfack: Finite Element Analysis of special loading conditions of different discretisations of the humerus with ANSYS, Masterprojekt, TH Nürnberg, 2018
- [8] Gal Dahan, Nir Trabelsi, Ori Safran, Zohar Yosibash: Verified and validated finite element analyses of humeri, J. Biomechanics, 2016, Vol. 49, 1094-1102
- [9] Kefu Deng: Modellierung und Simulation des Knochenumbaus, Bachelorarbeit, LTM, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2018
- [10] Areti Papastavrou, Kefu Deng, Paul Steinmann: Computational Bone Remodelling Revisited, Plenarvortrag, XII Argentine Congress on Computational Mechanics, Tucuman, 2018





C1919
C226
C220
C222
R450
R451
R452
R453
R454
R455
R456
R242
R243
R244
R245
R246
R247
R248
R249
R250
R251
R252
R253
R254
R255
R256
R257
R258
R259
R260
R261
R262
R263
R264
R265
R266
R267
R268
R269
R270
R271
R272
R273
R274
R275
R276
R277
R278
R279
R280
R281
R282
R283
R284
R285
R286
R287
R288
R289
R290
R291
R292
R293
R294
R295
R296
R297
R298
R299
R300
R301
R302
R303
R304
R305
R306
R307
R308
R309
R310
R311
R312
R313
R314
R315
R316
R317
R318
R319
R320
R321
R322
R323
R324
R325
R326
R327
R328
R329
R330
R331
R332
R333
R334
R335
R336
R337
R338
R339
R340
R341
R342
R343
R344
R345
R346
R347
R348
R349
R350
R351
R352
R353
R354
R355
R356
R357
R358
R359
R360
R361
R362
R363
R364
R365
R366
R367
R368
R369
R370
R371
R372
R373
R374
R375
R376
R377
R378
R379
R380
R381
R382
R383
R384
R385
R386
R387
R388
R389
R390
R391
R392
R393
R394
R395
R396
R397
R398
R399
R400
R401
R402
R403
R404
R405
R406
R407
R408
R409
R410
R411
R412
R413
R414
R415
R416
R417
R418
R419
R420
R421
R422
R423
R424
R425
R426
R427
R428
R429
R430
R431
R432
R433
R434
R435
R436
R437
R438
R439
R440
R441
R442
R443
R444
R445
R446
R447
R448
R449
R450
R451
R452
R453
R454
R455
R456
R457
R458
R459
R460
R461
R462
R463
R464
R465
R466
R467
R468
R469
R470
R471
R472
R473
R474
R475
R476
R477
R478
R479
R480
R481
R482
R483
R484
R485
R486
R487
R488
R489
R490
R491
R492
R493
R494
R495
R496
R497
R498
R499
R500
R501
R502
R503
R504
R505
R506
R507
R508
R509
R510
R511
R512
R513
R514
R515
R516
R517
R518
R519
R520
R521
R522
R523
R524
R525
R526
R527
R528
R529
R530
R531
R532
R533
R534
R535
R536
R537
R538
R539
R540
R541
R542
R543
R544
R545
R546
R547
R548
R549
R550
R551
R552
R553
R554
R555
R556
R557
R558
R559
R560
R561
R562
R563
R564
R565
R566
R567
R568
R569
R570
R571
R572
R573
R574
R575
R576
R577
R578
R579
R580
R581
R582
R583
R584
R585
R586
R587
R588
R589
R590
R591
R592
R593
R594
R595
R596
R597
R598
R599
R600
R601
R602
R603
R604
R605
R606
R607
R608
R609
R610
R611
R612
R613
R614
R615
R616
R617
R618
R619
R620
R621
R622
R623
R624
R625
R626
R627
R628
R629
R630
R631
R632
R633
R634
R635
R636
R637
R638
R639
R640
R641
R642
R643
R644
R645
R646
R647
R648
R649
R650
R651
R652
R653
R654
R655
R656
R657
R658
R659
R660
R661
R662
R663
R664
R665
R666
R667
R668
R669
R670
R671
R672
R673
R674
R675
R676
R677
R678
R679
R680
R681
R682
R683
R684
R685
R686
R687
R688
R689
R690
R691
R692
R693
R694
R695
R696
R697
R698
R699
R700
R701
R702
R703
R704
R705
R706
R707
R708
R709
R710
R711
R712
R713
R714
R715
R716
R717
R718
R719
R720
R721
R722
R723
R724
R725
R726
R727
R728
R729
R730
R731
R732
R733
R734
R735
R736
R737
R738
R739
R740
R741
R742
R743
R744
R745
R746
R747
R748
R749
R750
R751
R752
R753
R754
R755
R756
R757
R758
R759
R760
R761
R762
R763
R764
R765
R766
R767
R768
R769
R770
R771
R772
R773
R774
R775
R776
R777
R778
R779
R780
R781
R782
R783
R784
R785
R786
R787
R788
R789
R790
R791
R792
R793
R794
R795
R796
R797
R798
R799
R800
R801
R802
R803
R804
R805
R806
R807
R808
R809
R810
R811
R812
R813
R814
R815
R816
R817
R818
R819
R820
R821
R822
R823
R824
R825
R826
R827
R828
R829
R830
R831
R832
R833
R834
R835
R836
R837
R838
R839
R840
R841
R842
R843
R844
R845
R846
R847
R848
R849
R850
R851
R852
R853
R854
R855
R856
R857
R858
R859
R860
R861
R862
R863
R864
R865
R866
R867
R868
R869
R870
R871
R872
R873
R874
R875
R876
R877
R878
R879
R880
R881
R882
R883
R884
R885
R886
R887
R888
R889
R890
R891
R892
R893
R894
R895
R896
R897
R898
R899
R900
R901
R902
R903
R904
R905
R906
R907
R908
R909
R910
R911
R912
R913
R914
R915
R916
R917
R918
R919
R920
R921
R922
R923
R924
R925
R926
R927
R928
R929
R930
R931
R932
R933
R934
R935
R936
R937
R938
R939
R940
R941
R942
R943
R944
R945
R946
R947
R948
R949
R950
R951
R952
R953
R954
R955
R956
R957
R958
R959
R960
R961
R962
R963
R964
R965
R966
R967
R968
R969
R970
R971
R972
R973
R974
R975
R976
R977
R978
R979
R980
R981
R982
R983
R984
R985
R986
R987
R988
R989
R990
R991
R992
R993
R994
R995
R996
R997
R998
R999
R1000





CoBo – Entwicklung einer
„System-on-a-Chip“
Echtzeitberechnungsplattform zur Regelung
leistungselektronischer Systeme

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Wagner
Andreas Geiger, M. Sc.
Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik
TH Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Definition, Spezifikation, Aufbau und Inbetriebnahme einer sehr schnellen, echtzeitfähigen Rechner-Plattform auf Basis hoch-performerter System-On-Chip-Module. Das ermöglicht die Realisierung von Folgeprojekten mit einer Vielzahl von Anwendungen aus dem Bereich der Leistungselektronik und mit Applikationen z. B. in der Energietechnik, Elektromobilität und in der allgemeinen Regelungstechnik.

1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2018
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Bernhard Wagner
Kontaktdaten	E-Mail: bernhard.wagner@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Der Kern der Arbeitsgruppe ‚Antriebsregelung‘ in der Fakultät efi ist der Betrieb und die Regelung von elektrischen Maschinen. Neben einer passenden Leistungselektronik (die unsere Projektpartner entwickeln) wird eine geeignete Rechen-Elektronik („ControlBoard“) benötigt, siehe Abbildung 1. Die aktuellen Entwicklungen der Leistungselektronik gehen in Richtung schnell schaltender Bausteine (~100 kHz, SiC), während die im kostensensiblen Automotive-Bereich verfügbare Rechenleistung stark ansteigend ist. Das umfasst höhere Taktraten, Multicore-Prozessoren auch in Mikrocontrollern und eine extrem schnelle FPGA-Hardware. Somit ist es nun möglich, in der Antriebsregelung Arbeitsgebiete und Forschungsfelder zu erschließen, die bislang nur schwer realisierbar erschienen, z. B.

- Iterativ lernende Oberschwingungs-Unterdrückung
- Ausfallsichere / redundante Mehrphasen-Antriebe
- Hochdrehzahlantriebe (> 100.000 rpm)
- Akustik-Design von Antrieben (derzeit erste Untersuchungen im Projekt MaTE (Bayern Innovativ))

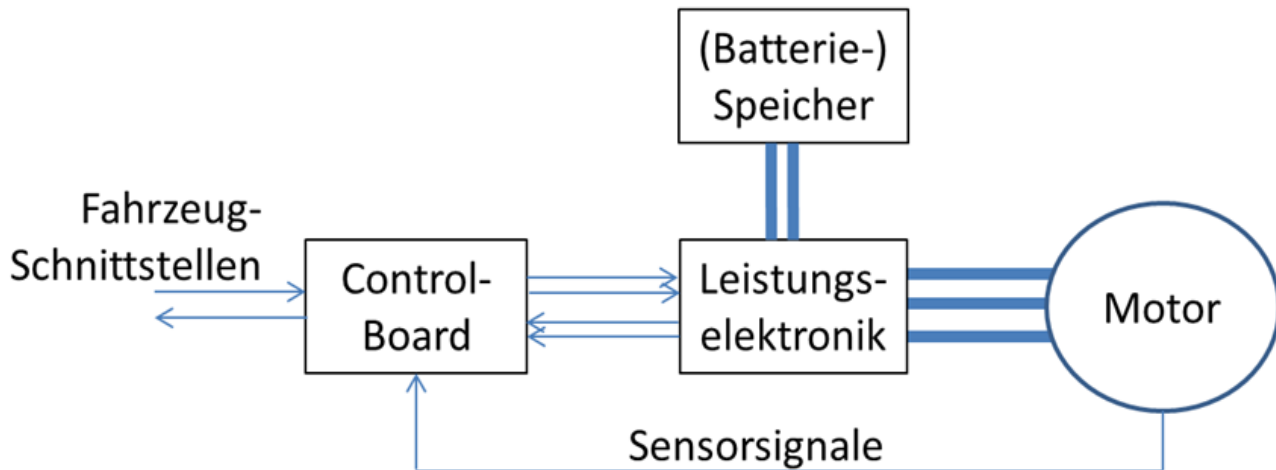


Abbildung 1: Typisches Blockschaltbild einer Antriebsregelung; Grafik: Andreas Geiger

Etliche Projektanfragen der Arbeitsgruppe gehen in diese Richtung. In vielen Projekten stellen die Partner ein Control-Board, jedoch verfügt derzeit keiner unserer Partner über ein Control-Board, mit dem die genannten Untersuchungen durchgeführt werden könnten.

Das Institut ELSYS sowie Prof. Dr. Flaviu Popp-Nowak (Fakultät efi) arbeiten auch an der Nutzung solcher hochperformanter Control-Boards. Im Rahmen eines vorangegangenen Vorlaufforschungs-Projekts („SoC-R“) entstand eine Rechner-Plattform, mit ARM-Doppelcore und FPGA (FPGA = sehr schneller Logik-Prozessor), die einen SoC-Baustein nutzt („System-on-Chip“). Das Control-Board aus „SoC-R“ kann nicht unverändert eingesetzt werden, weil einige Features nicht vorgesehen sind, die jedoch für die Arbeitsgruppe ‚Antriebsregelung‘ sowie für ELSYS und deren Projektpartner wichtig sind.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Das Ziel ist es, eine Rechnerplattform zu entwickeln, mit der die Arbeitsgruppe ‚Antriebsregelung‘ entscheidende Entwicklungsschritte realisieren kann. Das umfasst auch, die angestrebten Projekte im Bereich elektrischer Antriebe zu akquirieren und dazu den Projektpartnern ein aktuelles, hoch-performantes Control-Board anbieten zu können, basierend auf dem Vorlaufforschungs-Projekt „SoC-R“.

- Prozessor-Basis: Wechsel auf aktuelleres SoC (System-on-Chip) mit ARM-Multicore-Prozessor und FPGA (höhere Rechenleistung, erweiterter Temperaturbereich, zusätzliche Schnittstellen)
- Hardwaredesign: Trägerplatine mit aufgestecktem SOC-Board (Fa. Trenz, Abbildung 2)
- Integration von Hardware-Sicherheits-Features auf dem Control-Board, die in Automotive- und Luftfahrt-Projekten gefordert sind (Safe Torque Off, redundante Abschalt- und Sensorpfade, allpoliger Kurzschluss/ Free-wheeling in Hardware über CPLD ...)
- Anpassung auf Hochvolt-Antriebe (Integration von galvanischer Trennung, Kriechstrecken, ...)
- Spannungsversorgung und Schnittstellen für Automotive- bzw. Luftfahrt-Projekte geeignet auslegen
- Erstellung von Software-Basisfunktionalitäten für die angestrebten Projekte (Mehrphasen-PWM, hochauflösende Geberauswertung im FPGA, Clarke- und Park-Transformation im FPGA ...)
- Inbetriebnahme im Labor und an einem Antriebsprüfstand



Abbildung 2: Aufsteckmodul der Firma Trenz Electronic mit dem leistungsstarken Xilinx Zynq UltraScale+ MPSoC (Quelle: <http://trenz-electronic.de>)

Im Rahmen des Vorlaufforschungsprojekts wird das neue Control-Board in einer Prüfstands-Variante erstellt, die einen großen Funktionsumfang bereitstellt. Das umfasst u.a. viele Schnittstellen und Debug-Möglichkeiten. In zukünftigen Projekten wird ausgehend von dem Referenzdesign eine Anpassung an die konkreten Randbedingungen durchgeführt, wie beispielsweise der Einsatz möglichst kleiner Umrichter zur Integration in den Antriebsstrang.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Das Vorhaben über die Entwicklung einer hoch-performanten Echtzeitberechnungsplattform ist auf großes externes Interesse gestoßen. Dadurch hat sich die bisherige hochschulinterne Kooperation, bestehend aus dem Institut ELSYS, Prof. Popp-Nowak und dem Antragsteller, um zwei weitere Projektpartner erweitert. So beteiligt sich nun auch die Technische Universität München (Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme und Leistungselektronik, Prof. Dr. Ralph Kennel) und die Universidad de Santiago de Chile (Departamento de Ingeniería E-léctrica, Dr.-Ing. Felix Rojas).



Abbildung 3: Stakeholder des CoBo-Forschungsvorhabens; Grafik: Andreas Geiger

Dieses internationale Kooperationsprojekt trägt den Namen „Ultra-Zohm“ und wird durch die TH Nürnberg geleitet. Die Beiträge der einzelnen Partner bestehen aus Schaltplan- bzw. PCB-Layout-Entwicklungen, sowie die Softwareerstellung, die untereinander ausgetauscht und im Rahmen eines Repositoriums verwaltet werden. Durch den identischen Workflow (MATLAB/Simulink Codegenerierung mit HDL Coder für den FPGA und Embedded Coder für die ARM CPU + Xilinx Vivado mit SDK zur Implementierung) und die definierten Schnittstellen nutzen alle Partner dieselben Software-Module, z.B. Low Level Treiber, Kommunikation über Ethernet/CAN/SPI/. Somit testen die Projektbeteiligten den Code mehrfach, das ermöglicht einen nachhaltigen Einsatz des Codes. Dies beschleunigt den Entwicklungsprozess, wodurch eine angestrebte Zielapplikation bei jedem Projektpartner in kürzerer Zeit erreicht werden kann.



Abbildung 4: Projekttreffen des internationalen Konsortiums am Energie Campus Nürnberg; Foto: Sebastian Wendel

Im Rahmen der Projekttreffen hat die Arbeitsgruppe zunächst eine Anforderungsliste (Requirements) an die neue Echtzeitberechnungsplattform definiert, die Aspekte aller Projektpartner (aber auch Erfahrungswerte aus bestehenden Projekten mit Industriepartnern) beinhaltet.

- Flexible Control Board Plattform für den Prüfstandseinsatz
- Skalierbare I/O-Schnittstellen (zur Regelung dreiphasiger Antriebe, aber auch mehrphasigen Antriebssystemen, sowie Multilevel-Convertern)
- Automotive und Aerospace spezifizierte Bauteilauswahl
- Hohe Datenübertragungsraten zu einem PC (zur Visualisierung von Signalen, als auch Parametrisierung)
- Redundante Signalpfade
- Sicherheitsabschaltmechanismen durch Hardware-Logik (u.a. den Einsatz eines CPLDs)
- Ausreichend Rechenleistung im FPGA des SoCs für eine 100 kHz Stromregelung
- Einbinden des Control Boards in Automatisierungsprogramme
- Hochfrequentes Abtasten von Stromsensoren, Drehgebersystemen und Drehmomentmessaufnehmer
- Eingänge für Standard-Temperaturmesssysteme (PT100, NTC, KTY, ...)
- Isolierte Kommunikationsschnittstellen (CAN, UART, Ethernet)

Abgeleitet aus den Anforderungen erwies sich ein modulares Steckkarten-Konzept als wirtschaftlichste Lösung. Abhängig von der Projektspezifikation kann das Trägerboard mit mehreren Highspeed-Analog-Digital-Converter-Steckkarten versehen werden. Im Bereich der Multilevel-Converter steigt der Bedarf an zeitsynchron auszugebende PWM-Signale. Für diesen Anwendungsfall können mehrere Digital-IO-Steckkarten in das Racksystem eingeschoben werden – das betrifft die Forschungsteams der TU München und der Universidad de Santiago de Chile.

Das Konzept bietet ein hohes Maß an Flexibilität, so muss zu Evaluationszwecken von beispielsweise neuen High-Speed-ADC-Chips oder optischen Transceivern lediglich die Einsteckkarte neu entwickelt werden und nicht das gesamte Prozessor-System. Eine große Herausforderung bestand darin, die Schnittstellen so zu definieren, dass ein zukunftsfähiges Basis-System entsteht und den Anforderungen der externen Schaltungstechnik auf den Steckkarten hinsichtlich der Signalqualität zum SoC und Spannungsversorgung gerecht wird.

Das im Rahmen der Vorlauforschung erarbeitete Trägerboard nutzt alle I/O-Pins des Xilinx Zynq UltraScale+ Chips, wodurch bei vollbesetzten Steckkartenplätzen Projekte mit nachfolgenden Anforderungen abgedeckt werden können:

- Bis zu 150 zeitsynchrone PWM-Ausgänge (verteilt auf fünf Digital-Steckplätze)
- Bis zu 30 LVDS-High-Speed-ADCs oder 60 Single-Ended-Slow-Speed-ADCs (verteilt auf drei Analog-Steckplätze)

Um die Potenziale des eingesetzten Xilinx Zynq UltraScale+ Systems noch besser kennen zu lernen, wurde eine dreitägige Inhouse Schulung durch einen von Xilinx autorisierten Schulungspartner (Firma PLC2) durchgeführt. Im Mittelpunkt standen die komplexe Rechenarchitektur der Xilinx Zynq UltraScale+ Familie und individuelle Fragestellungen zum Ultra-Zohm-Vorhaben. Die Schulung stärkte die eigene Kompetenz im Umgang und dem Design einer eigenen SoC-Plattform und regte neue Ideen für Methoden im regelungstechnischen Themengebiet an, die erst durch das neue Control-Board System untersucht werden können.

Abbildung 5 visualisiert aktuelle Forschungsthemen, für die eine leistungsstarke und flexible Berechnungsplattform benötigt werden. Im Bereich des Condition Monitorings ist es erforderlich, physikalische Größen hochauflösend zu messen und zur weiteren Datenverarbeitung zu digitalisieren, während Multilevel Umrichter eher eine Vielzahl an I/Os benötigen. Bei elektrischen Antrieben für die Luftfahrt- und Automobilindustrie steht die Zuverlässigkeit im Vordergrund, die durch eine Redundanz in Hard- und Software verbessert werden kann und demnach ein mehrkerniges Prozessorsystem verlangt.

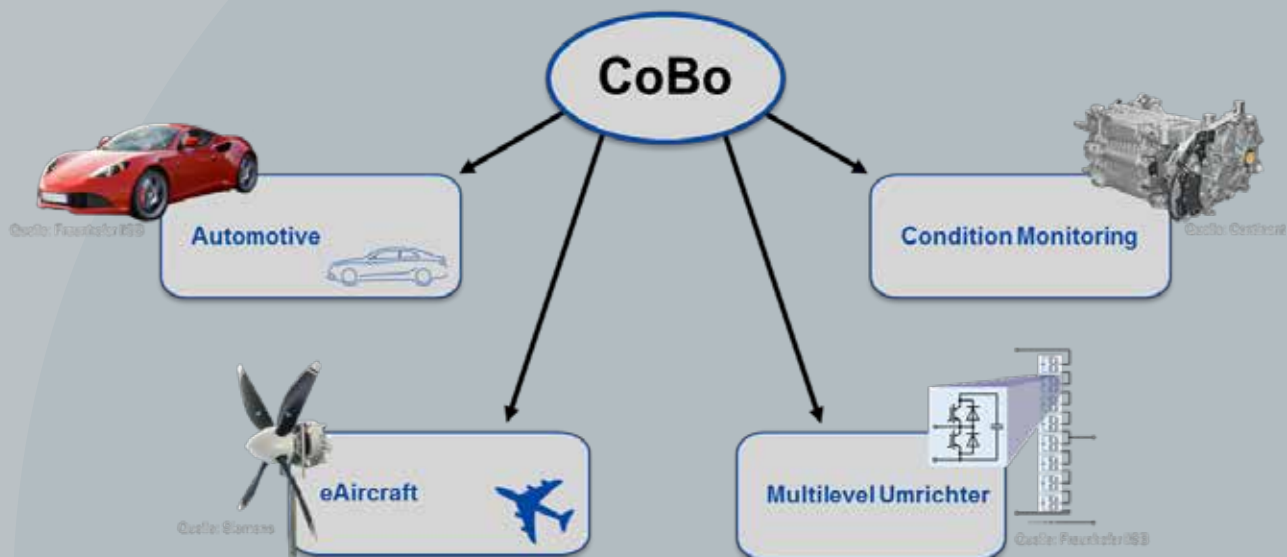


Abbildung 5: Zutreffende Forschungsfelder auf Basis der Control-Board Plattform; Grafik: Andreas Geiger

Abbildung 6 zeigt den aktuellen Stand des ControlBoards aus dem CAD-System, das gerade gefertigt wird:

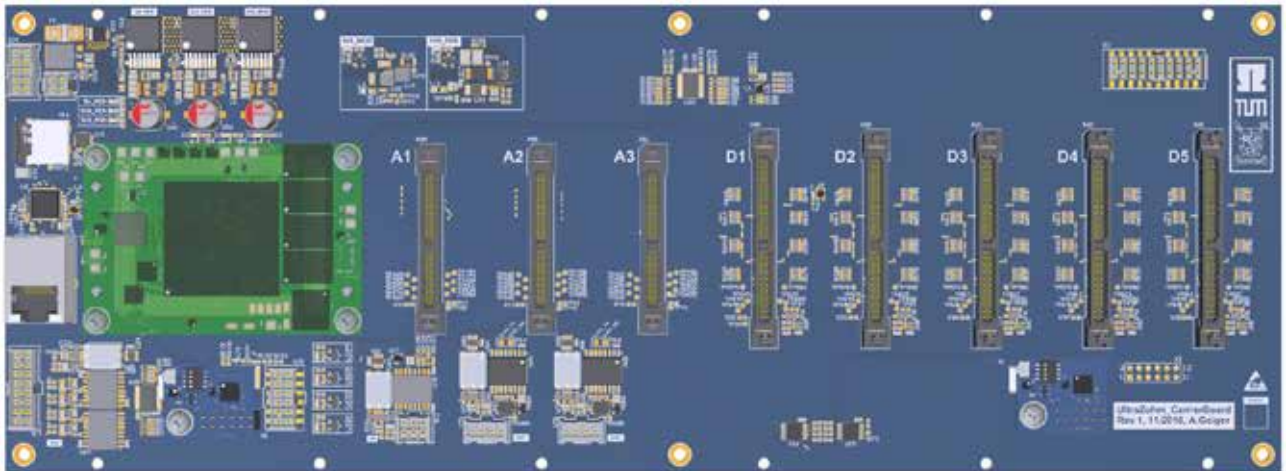


Abbildung 6: CAD-Modell des Control-Boards.; Grafik: Andreas Geiger

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Das neue Control-Board soll u. a. für Forschungsprojekte im Zusammenhang mit dem Fraunhofer IISB eingesetzt werden. Es existieren Kontakte in die Automotive-Elektronik-Gruppe und in eine neu gegründete Gruppe, die sich mit elektrischen Antrieben in Luftfahrt-Anwendungen befasst. Beide Gruppen benötigen die neuen Features. Mit dem neuen Control-Board ist es auch möglich, Nachfolgeprojekte zu aktuellen Automotive-Vorhaben anzubieten, u.a. Akustik-Design und schnell schaltende Mehrphasenmaschinen.

Die Arbeitsgruppe strebt die Veröffentlichung von einigen Aspekten der neuen Prozessorplattform an, z. B. die Untersuchung von Rechenzeitvorteilen bei FPGA-Nutzung bei typischen antriebstechnischen Aufgabenstellungen. Die Publikationen zu den eigentlichen wissenschaftlichen Untersuchungen (Mehrphasenantriebe, Regelung mit hohen Schaltfrequenzen, Condition Monitoring etc.) werden durch das neue Control-Board als Arbeitsplattform erst ermöglicht. Zugleich begünstigt diese Plattform die Forschungsarbeiten in den laufenden Dissertationen an der TH Nürnberg, TH München und Universidad de Santiago de Chile.

Weiterhin sind auch die anderen Beteiligten (ELSYS, Prof. Dr. Flaviu Popp-Nowak, TU München, Universidad de Santiago de Chile) an der Weiterentwicklung in ihrem Sinne interessiert, um dadurch eine geeignete, verbesserte Plattform für ihre Projekte zu erhalten. Eine solche Plattform ist auch für andere Applikationen äußerst interessant, z. B. für die mobile Robotik.

Neben den genannten konkreten Vorteilen des neuen Control-Boards sieht der Antragsteller einen wichtigen positiven Effekt darin, dass die Kooperation und der Austausch innerhalb der TH Nürnberg zwischen der Arbeitsgruppe ‚Antriebsregelung‘, dem Institut ELSYS und Prof. Dr. Flaviu Popp-Nowak, sowie extern zu den Projektpartnern der TU München und der Universidad de Santiago de Chile sich positiv entwickelt und alle Beteiligten in der Realisierung künftiger Projekte unterstützt.



Impressum

Vorlaufforschung 2018

Herausgeber:

Der Präsident der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
Keßlerplatz 12
90489 Nürnberg

Redaktion:

Hochschulkommunikation
Technische Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm
Postfach 210320, 90121 Nürnberg

Bildnachweis:

- © Oliver Kussinger: Titel / Rücktitel, 2 / 3
- © Melanie Scheller: 5
- © Petra Simon: 8 / 9, 110
- © STEPHAN MINX: 10
- © Georgios Bikas: 16 / 17, 18
- © MIND AND I - stock.adobe.com: 28 / 29, 30
- © nd3000 - stock.adobe.com: 38 / 39, 40
- © vicu9 - stock.adobe.com: 50 / 51, 52
- © Rüdiger Hornfeck: 64 / 65, 66
- © Jasmin Bauer: 74 / 75, 76
- © crevis - stock.adobe.com: 86 / 87, 88
- © Marek Brzezinski lab74.pl: 100 / 101, 102

Stand:

Februar 2020







ISSN 1867-4585