



Vorlauftforschung 2019/2020

Schriftenreihe

Hrsg.: Der Präsident der TH Nürnberg, Prof. Dr. Niels Oberbeck





Vorlauftforschung
der TH Nürnberg
2019/2020

Vorlaufforschung

Editorial

Prof. Dr. Tilman Botsch
Vizepräsident für Forschung und Transfer

Berichte zur Vorlaufforschung

2013 wurde das Projekt Vorlaufforschung als Initiative der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm gegründet und hat sich seither außerordentlich gut darin bewährt, forschungsaktive Professorinnen und Professoren in Instituten, Kompetenzzentren oder Fakultäten und insbesondere auch Neuberufene auf dem Weg von der Idee zum förderfähigen Konzept zu unterstützen. Die Unterstützung ist als Anschubfinanzierung zu verstehen mit dem Ziel der Erarbeitung von wissenschaftlichen Forschungs- und Entwicklungsanträgen zur Einwerbung von Drittmitteln aus der Industrie, von Stiftungen oder aus staatlichen Forschungsprogrammen.



Auch in den Jahren 2019 und 2020 stießen die beiden Ausschreibungen zur Vorlaufforschung auf große Resonanz innerhalb der Hochschule. 2019 wurden 24 Anträge mit einem Antragsvolumen von 807.008 € eingereicht, im Jahr 2020 waren es 25 Anträge mit einem Gesamtvolumen von 799.466 €. Die beeindruckende thematische Vielfalt der Anträge spiegelt das enorme FuE-Potential der TH Nürnberg wider und die große Anzahl der Anträge zeigt das starke Engagement der Professorinnen und Professoren, die an unserer Hochschule aktiv Forschung und Entwicklung betreiben.

Wie in den vergangenen Jahren bewertete eine interdisziplinär aus Mitgliedern des Sachverständigenausschusses Wissens- und Technologietransfer sowie weiteren Professorinnen und Professoren zusammengesetzte Begutachtungsgruppe die eingegangenen Anträge und wählte 2019 neun und 2020 elf Projekte für eine Förderung aus. In beiden Jahren zusammen wurden 678.786 € für die Bearbeitung von 20 Projekten der Vorlaufforschung bewilligt.

Die Berichte zu den Projekten der Jahre 2019 und 2020 sind in dem vorliegenden Band zusammengefasst. Fast alle Fakultäten unserer Hochschule sind mit Vorhaben der Vorlaufforschung vertreten und demzufolge sind interessante und zukunftsweisende Themen aus den unterschiedlichsten Disziplinen zu finden. Recycling, Prozesseffizienz und Smart Energy spielen auf den folgenden Seiten genauso eine Rolle wie Digital Empathy, Nachbarschaftsstärkung, 3D-Druck und vieles mehr. Ganz sicher finden Sie beim Lesen der Projektberichte viele inspirierende Ideen und Erkenntnisse. Ich wünsche Ihnen dabei viel Freude und Wissensgewinn.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Tilman Botsch'.

Prof. Dr. Tilman Botsch
Vizepräsident für Forschung und Transfer



SEWU INDUSTRIAL

Prüfung
nach BGV A3
nächste Prüfung

Technische Maßnahme
Nummer
Sicherheits-Übersicht

INFORS HT

Modell	HT 1000	0010
Typ	HT 1000	0010
U.S. & Inc.	1000 (1000)	0010
Weg	1000 (1000)	0010
Code	1000 (1000)	0010
Code	1000 (1000)	0010

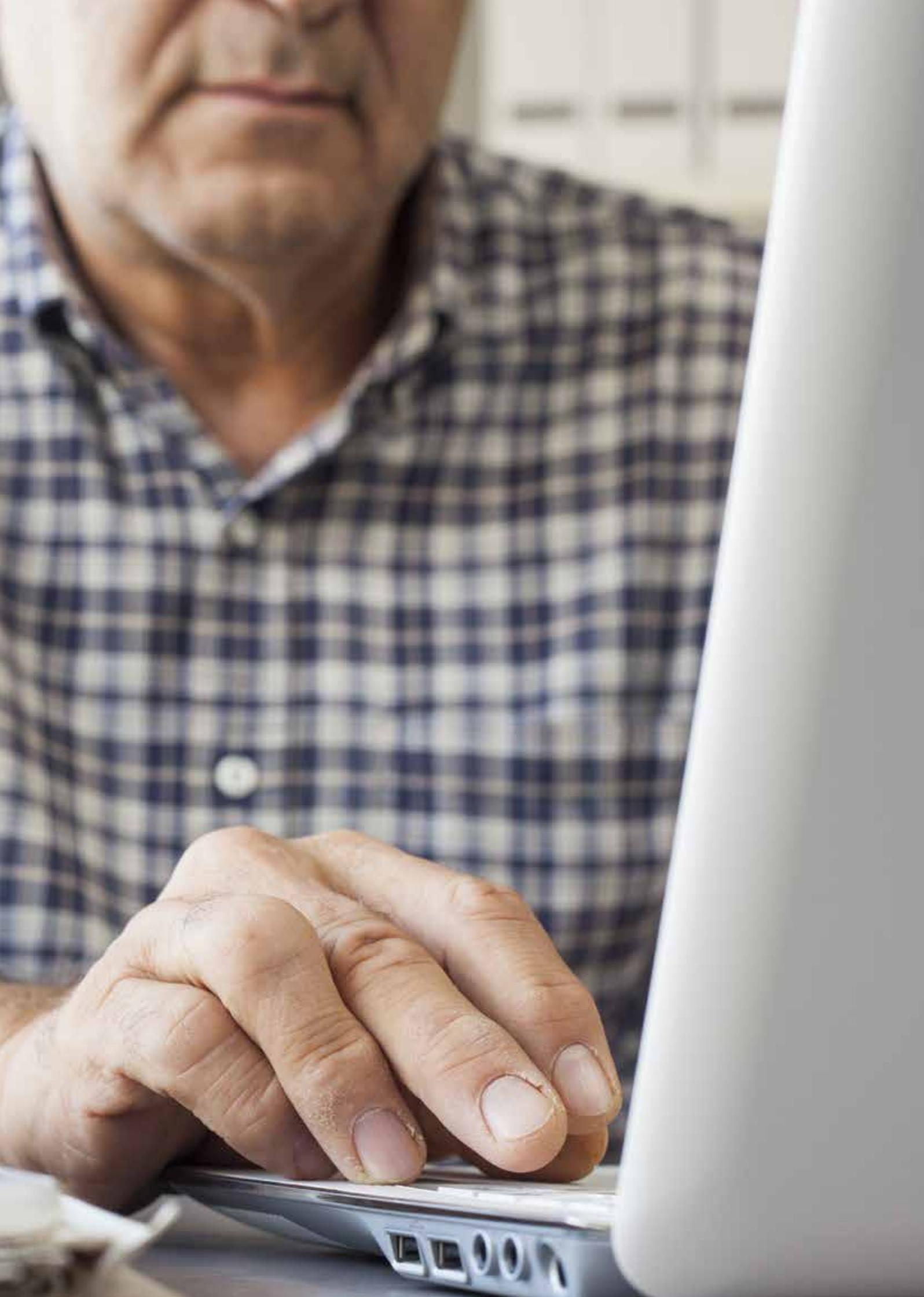
CE

A photograph of two scientists in a laboratory. A woman with blonde hair in a ponytail, wearing safety glasses and a white lab coat, is smiling and looking towards a man. The man is also wearing safety glasses and a white lab coat, and is looking down at something in his hands. They are both wearing teal gloves. The background is a blurred laboratory setting with a computer monitor and other equipment.

Vorlaufforschung
der TH Nürnberg
2019

Embedding and Printing (EmbPrint)	66
Prof. Dr. Marcus Reichenberger Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik, TH Nürnberg	
<hr/>	
BioPolyKon – Produktion des Biopolymers PHB im kontinuierlichen Verfahren	78
Prof. Dr.-Ing. Stephanie Stute, Felix Berthold, M. Sc. Fakultät Verfahrenstechnik, TH Nürnberg	
<hr/>	
Einflussfaktoren auf die Extraktion von bromidhaltigen Flammschutzmitteln aus komplex gebundenen Dämmstoffen	88
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Teipel, Thomas Fehn, M. Sc. Fakultät Verfahrenstechnik, TH Nürnberg Prof. Dr. Martin Elsner Fakultät Angewandte Chemie, TH Nürnberg	
<hr/>	
Steigerung der Recruitingkompetenz und -effizienz durch den Einsatz apparativer Diagnostik und (non-)digitaler Qualitätsaudits im HRM	96
Prof. Dr. Raphael Verstege, Andreas Kopp M. A. Fakultät Betriebswirtschaft, TH Nürnberg	







Digitale Nachbarschaft – Chancen und Grenzen in der Praxis. Eine multimethodische Pilotstudie.

Prof. Dr. Sabine Fromm
Prof. Dr. Doris Rosenkranz
Désirée Patrik, M. A.
Leonie Schreibeis, B. A.
Fakultät Sozialwissenschaften
TH Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Die Frage, welchen Beitrag Nachbarschaft zu privaten sozialen Netzwerken ebenso wie zu Daseinsvorsorge und sozialer Kohäsion leisten kann, wird aktuell in unterschiedlichsten Kontexten diskutiert. Dabei kommt digitalen Angeboten zur Stärkung von Nachbarschaften eine wachsende Bedeutung zu. Die Pilotstudie untersucht, welche Typen von digital gestützten Nachbarschaftshilfen es bislang regional, national und international gibt, was über den gesellschaftlichen Nutzen dieser Angebote bekannt ist und welche neuen Akteure in diesem Feld neben „klassische“ Anbieter der Daseinsvorsorge treten. Dabei wird auch deutlich, dass diese Entwicklung zahlreiche soziale, datenschutzrechtliche und ökonomische Fragen aufwirft.

1. Projektdaten

Fördersumme	35.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2019
Fakultät	Sozialwissenschaften
Projektleitung	Prof. Dr. Sabine Fromm Prof. Dr. Doris Rosenkranz
Kontaktdaten	sabine.fromm@th-nuernberg.de doris.rosenkranz@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Vor dem Hintergrund aktueller gesellschaftlicher Veränderungen wie dem demografischen Wandel und der Frage nach Potenzialen gesellschaftlichen Zusammenhalts (Kohäsion) angesichts wachsender soziodemografischer, ökonomischer und politischer Spaltungstendenzen – gewinnt „Nachbarschaft“ zunehmend an Bedeutung für politische Akteurinnen und Akteure, aber auch für die Bewohnerinnen und Bewohner städtischer und ländlicher Quartiere selbst (Fromm/Rosenkranz 2019; Fromm/Rosenkranz/Didyk 2019).

Dabei sind zwei Aspekte von besonderer Relevanz:

- Demografische Indikatoren und Indikatoren sozialer Netzwerke zeigen unter anderem einen steigenden Anteil von Ein-Personen-Haushalten, einen geringeren Umfang privater Netzwerke, hohe berufliche und damit oft räumliche Mobilität vorhandener Kinder, steigende Anzahl von Kinderlosen, eigene Freundeskreise nicht vor Ort etc. Gleichzeitig ist es der große Wunsch vieler Menschen, möglichst lange (auch im Alter) selbstständig im gewohnten Lebensumfeld (in den eigenen vier Wänden) bleiben zu können. Wenn familiäre Netzwerke jedoch erodieren und familiäre und andere soziale Netzwerke weniger stark räumlich angebunden sind, stellt sich die Frage, wie konkrete Hilfebedarfe im Alltag künftig abgedeckt werden und welchen Beitrag dazu Nachbarschaften leisten können.
- Auch über diese Fragen der privaten Lebensführung und der (kommunalen) Daseinsvorsorge hinaus, richten sich Erwartungen und Hoffnungen auf Nachbarschaften: Diskutiert wird das Potenzial von Nachbarschaften in Hinblick auf die Überwindung tatsächlicher oder wahrgenommener gesellschaftlicher Spaltungstendenzen. (Wie) kann Nachbarschaft dazu beitragen, dass gesellschaftliche Kohäsion trotz wachsender Heterogenität der Bevölkerung (Ethnien, Lebensstile etc.) erhalten oder gestärkt wird?

Die Bedeutung dieser Fragestellungen zeigt sich unter anderem darin, dass Nachbarschaft etwa im Koalitionsvertrag der aktuellen Bundesregierung (Presse- und Informationsamt der Bundesregierung 2018) als wichtige Hilfestruktur beschrieben wird, mit einem großen Potenzial für die Stärkung des gesellschaftlichen Zusammenhalts.

Mit der Pilotstudie nehmen die Forschenden die Entwicklung hin zu einer „digitalen Transformation“ von Nachbarschaftsangeboten in den Blick. Ausgangssituation ist, dass „analoge“ Nachbarschaftshilfen aktuell zunehmend durch digitale Angebote ergänzt werden und neue Akteure und Angebote neben diese klassischen Formen treten. Bisher ist wenig darüber bekannt, welche Struktur und welche gesellschaftliche Bedeutung diese Angebote haben: Unklar ist, wie die Angebotslandschaft regional, national und international aussieht. Wie sieht das Portfolio aus, welche Akteure treten auf und welche Ziele werden verfolgt? Welche (datenschutz-)rechtlichen, aber auch politischen Fragen stellen sich? Was können diese Angebote tatsächlich leisten? Und wo liegen ihre sozialen, datenschutzrechtlichen und ökonomischen Grenzen?

Bezogen auf die Adressatinnen und Adressaten geht es auch um die Frage, was diese Angebote in Bezug auf ihren behaupteten Nutzen tatsächlich leisten. So ist es zum Beispiel von Bedeutung, ob solche digitalen Angebote sozial selbstselektiv sind, also im Sinne eines „bonding social capital“ (Putnam 2001) vor allem Beziehungen innerhalb homogener Gruppen stärken oder ob sie als „bridging social capital“ dazu beitragen können, ganz unterschiedliche Gruppen der Bevölkerung zusammenzubringen (zum Beispiel verschiedene Altersgruppen, Ethnien).

3. Ziele des Forschungsprojekts

Die skizzierten Fragestellungen sollten in der Pilotstudie weiterentwickelt und erste Erkenntnisse dazu gewonnen werden. Konkrete Ziele der Pilotstudie sind:

- Entwicklung von Indikatoren und darauf aufbauend einer vorläufigen Typologie von digitalen Nachbarschaftsangeboten: Welche Dimensionen sind zur Unterscheidung digitaler Nachbarschaftsangebote relevant? Welche Indikatoren können entwickelt und erfasst werden? Wie können diese Indikatoren zur Entwicklung einer Typologie genutzt werden? Wie lassen sich konkrete Angebote in diese Typologie einordnen?
- Einschätzung der möglichen Beiträge digitaler Nachbarschaftsangebote zur Entwicklung sozialer Netzwerke und sozialer Kohäsion: Welche Erkenntnisse gibt es zur Nutzung dieser Angebote? Inwiefern tragen sie zur Entwicklung von „bridging“ oder „bonding social capital“ bei?
- Einschätzung der möglichen Beiträge zur Daseinsvorsorge: Welche neuen Akteure treten hier auf? Welche Geschäftsmodelle finden sich? Welche Kooperationen im Bereich Public-Private-Partnership lassen sich identifizieren? Welche Zusammenhänge gibt es in vergleichender Perspektive mit unterschiedlichen Ausprägungen des Welfare-Mix?
- Einschätzung der datenschutzrechtlichen Fragen, die sich im Zusammenhang mit der Nutzung dieser Angebote stellen: Welche Nutzerdaten werden erfasst? Wie werden diese Daten genutzt?
- Multiplikation der Ergebnisse und Vorbereitung eines oder mehrerer Anschlussprojekte

4. Herangehensweise

Zur Bearbeitung der Forschungsfragen wurde ein Mixed-Methods-Ansatz gewählt:

- Desk Research und inhaltsanalytische Auswertung zu Angebots-, Träger- und Finanzierungsstruktur von digitalen Nachbarschaftsplattformen: Ziel war die systematische Erfassung von digitalen oder digital gestützten Angeboten, die sich explizit auf Nachbarschaften beziehen; dabei wurden Angebote, Akteure und Plattformen unterschiedlicher räumlicher Reichweite (von lokal bis international) berücksichtigt. Methodisch angelehnt an ein „Theoretical Sampling“ im Sinne der Grounded Theory wurde sukzessive ein Korpus von Studien, Selbstdarstellungen (Websites), Pressemitteilungen und anderen Textsorten aufgebaut; aus dem gesichteten Material wurden iterativ Dimensionen und Indikatoren zur systematischen Beschreibung und Erfassung der Angebote entwickelt und durch weiteres Material ergänzt beziehungsweise weiterentwickelt. Als Ergebnis entstand eine vorläufige Typologie der Angebote auf Basis mehrerer Indikatoren (siehe unten).

- Systematischer Review des Forschungsstands zu Nutzerstruktur und -verhalten: Um Informationen zum Forschungsstand über die Nutzung digitaler Nachbarschaftsangebote zu erhalten, wurden Nutzerstudien aus verschiedenen Ländern recherchiert und systematisch ausgewertet.
- Leitfadengestützte Interviews mit Expertinnen und Experten zu Fragen des Datenschutzes, kommunaler Planung und technischer Umsetzung: Hier ergab sich die Möglichkeit einer moderierten Diskussion zwischen einem leitenden kommunalen Akteur und dem Gründer einer digitalen Plattform, die zahlreiche Anknüpfungspunkte für die Weiterentwicklung der Fragestellung generierte.

Die Länderauswahl der internationalen Recherche orientiert sich an der in der vergleichenden Wohlfahrtsstaatsforschung geläufigen Unterscheidung von Wohlfahrtsregimes, also jeweils spezifischen institutionellen Arrangements (vgl. etwa Esping-Andersen 1990; Ferragina und Seeleib-Kaiser 2016; Seeleib-Kaiser 2016).

- Deutschland galt lange Zeit geradezu als Prototyp des konservativen Wohlfahrtsregimes, wird jedoch aufgrund der wohlfahrtsstaatlichen Transformationen in den 1990er und frühen 2000er Jahren aktuell eher dem liberalen Cluster zugeordnet (Seeleib-Kaiser 2016)
- Als Beispiel für das liberale Modell wurden die USA und Kanada ausgewählt
- Die Niederlande und Österreich repräsentieren konservative Wohlfahrtsmodelle
- Die Schweiz wird unterschiedlichen Kategorien zugeordnet – als Beispiel für das liberale Modell bei Esping-Andersen, als „hybrid“ etwa bei Bonoli/Häusermann (2011).

In einer geplanten Weiterentwicklung des Projekts wird untersucht, welche Funktionen digitale Nachbarschaftsplattformen in unterschiedlicher Rechtsform und Trägerschaft als Beispiel im sich verändernden Welfare-Mix übernehmen.

5. Ergebnisse

Auf Basis der ermittelten Angebotslandschaft (n = 51 Angebote) entwickelte das Team acht indikatorengestützte Dimensionen zur Beschreibung der Angebote und zur Entwicklung einer Typologie.

Digitale Nachbarschaftsplattformen – Dimensionen und Typen

Dimension	Beschreibung
Ziele	<p>Die meisten Plattformen verfolgen mehrere Zielsetzungen in unterschiedlicher Gewichtung; diese werden teilweise explizit formuliert, teilweise erschließen sie sich erst aus einer Analyse des Portfolios und der Selbstdarstellung.</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Ökonomische Ziele/Gewinnorientierung: der Anbieter will (früher oder später) Geld mit der Plattform verdienen. Dazu entwickelt er unterschiedliche Geschäftsmodelle ■ Gesellschaftliche Veränderungen bewirken: Mitgestaltung des gesellschaftlichen Wandels; dabei Sicherung einer Position im Welfare Mix, etwa Public-Private-Kooperationen ■ Ausbau lokaler Versorgungsstrukturen: Bereitstellung von Diensten, die dazu beitragen sollen, Hilfe vor Ort zu ermöglichen und/oder die lokale Wirtschaft zu stärken ■ Ressourcenschonung durch Förderung nachbarschaftlicher Vernetzung und/oder lokaler Sharing Ökonomie

Portfolio	<p>Hinsichtlich ihres Portfolios finden sich einerseits Unterschiede hinsichtlich der Art der Angebote, andererseits hinsichtlich ihrer Zahl oder der Dominanz einzelner Angebotsarten. Unterschieden werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Kommunikation: Ermöglichung von Kontaktaufnahme und Kommunikation zwischen Usern ■ Nachbarschaftshilfe: Kommunikation von Hilfesuchen und -angeboten sowie die Vermittlung von Hilfen (niedrigschwellig & alltagsnah) zwischen Bewohnerinnen und Bewohnern eines Quartiers ■ Marktplatz / Sharing: Möglichkeiten, Gegenstände zu kaufen, zu verkaufen, zu leihen, zu verleihen oder zu tauschen ■ Informationen: Bereitstellung lokaler beziehungsweise regionaler Informationen, die für die (jeweilige) Nachbarschaft relevant sind oder sein könnten ■ Veranstaltungen: Hinweise auf Events, Veranstaltungen etc. in der Nähe (etwa lokaler Veranstaltungskalender) ■ Stärkung lokaler Ökonomie: Möglichkeiten der Selbstdarstellung lokaler Wirtschaftstreibender ■ Sicherheit(smeldungen): Funktionen, um als sicherheitsrelevant wahrgenommene Beobachtungen/Ereignisse zu kommunizieren; entweder durch Bewohnerinnen und Bewohner eines Quartiers oder durch die Polizei ■ Sonstige Funktionen: einzelne, plattformspezifische Angebote
Intendierte Zielgruppe(n)	<p>Es werden unterschiedliche Zielgruppen angesprochen:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Nachbarn allgemein: Bewohner eines abgegrenzten Quartiers, keine sozialstrukturell definierte Zielgruppe ■ „Silver Surfer“: Angebot speziell für Ältere, meist mit konkreter Angabe wie „Rentner“, „Senioren“ oder „Ü55“ ■ Bewohner einer konkreten Nachbarschaft ■ Hilfebedürftige: Vereinsamte, alleinstehende, körperlich beeinträchtigte Personen
Rechtsform/ Trägerstruktur	<p>Grob lassen sich hier drei Formen unterscheiden:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Privatwirtschaftlich / gewinnorientierte Angebote, vor allem in den Rechtsformen GmbH, AG, Inc., LLC ■ Gemeinnützige Angebote, vor allem eingetragener Verein, anerkannt gemeinnützig, gGmbH, NPO ■ Hybride Angebote, also zusammengehörige Teilangebote, in unterschiedlichen Rechtsformen

Finanzierung	<p>Mit der Dimension Finanzierung wird erfasst, aus welchen Mitteln die Anbieter den Betrieb der Plattform finanzieren. Es wird hauptsächlich nach gewinnorientierten und nicht-gewinnorientierten Einnahmequellen unterschieden. Dabei gibt es Überschneidungen mit der Dimension Trägerstruktur; allerdings kommt es hier vor, dass auch ein Verein (nicht-gewinnorientierte Trägerstruktur) Einnahmen durch ein gewinnorientiertes Konzept (etwa durchz.B. Werbung) generiert. Weiterhin gibt es einige Fälle, in denen sich ein Angebot nicht nur durch Werbung, sondern auch durch Spenden, Mitgliedsbeiträge, Gewerbeprofiling und eine Fundraising-Aktion finanziert. In diesen Fällen treffen mehrere Ausprägungen der Finanzierung zu. Demnach ist ein Verdichten mit der Dimension Trägerstruktur nicht geeignet. Es lassen sich grob vier Formen unterscheiden:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Einnahmen durch wirtschaftliche Tätigkeit: Verkauf von Produkten, Dienstleistungen oder Zusatzfunktionen; Leistung gegen Entgelt (Werbung, Sonderfunktionen, Pro-Mitgliedschaft) ■ Nicht-gewinnorientierte Einnahmequellen: Spenden, Mitgliedsbeiträge, Aufwandsentschädigung, kostendeckend ■ Projektfinanzierung: Investoren, Anschubfinanzierung, Fördergelder, Fundraising, Crowdfunding – einmalige größere Einnahmen ■ Unklar: keine Informationen zugänglich
Regionale Reichweite	<p>Obwohl alle Angebote ihre Nutzergruppen als Bewohnerinnen und Bewohner konkreter Nachbarschaften oder Quartiere ansprechen, unterscheiden sie sich darin, wo sie als Anbieter auftreten. Das Spektrum reicht hier von internationalen Angeboten (Nachbarschaften in mehreren Ländern) bis zu lokalen Angeboten (nur je eine einzelne Stadt/Quartier)</p>
Digitalisierungsgrad	<p>Wie zentral ist die digitale Plattform für das Portfolio des Anbieters? Hier lassen sich zwei Pole unterscheiden, zwischen denen die Angebote eingeordnet werden können:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Dominant digital: Zentral für das Angebot ist die Plattform selbst; über sie laufen jegliche Kommunikationen und Informationsangebote. Zwar wird nachbarschaftliche Vernetzung auch im „real life“ als Ziel definiert, doch soll die Plattform zentral für diese Vernetzung bleiben. ■ Dominant analog: Digitale Formen werden lediglich als Hilfsmittel genutzt. Häufig bestand bereits ein „analoges“ Angebot, das nun um digitale Formen erweitert wird, sei es, um die Reichweite zu vergrößern, sei es, weil sich die Anbieter gezwungen sehen, auf den „Digitalisierungszug“ aufzuspringen. Die Online-Plattform erscheint quasi als „Anhängsel“.
Erfassung und Verarbeitung personenbezogener Daten	<p>Um die Angebote zu nutzen, werden unterschiedliche Anforderungen an die Bereitstellung von personenbezogenen User-Daten gestellt.</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Anonyme Nutzung möglich: Erforderlich ist lediglich die Angabe eines frei wählbaren Benutzernamens und einer E-Mailadresse ■ Registrierung unter Angabe einzelner personenbezogener Angaben: gefragt wird etwa nach dem Klarnamen oder dem Geburtsdatum ■ Verifizierbare personenbezogene Angaben: die Angaben werden nicht nur abgefragt, sondern müssen belegt werden, zum Beispiel durch Einscannen des Ausweises oder sonstiger Nachweise der Identität ■ Keine Angaben auffindbar ■ Zusätzlich zur Registrierung über die Plattform bieten manche Angebote die Möglichkeit, sich mit einem Facebook- oder Google-Account anzumelden, was letztlich die Weitergabe der Daten an diese Anbieter beinhaltet

Auf Basis dieser Dimensionen entwickelte das Team eine Typologie, der sich fast alle Angebote eindeutig zuordnen lassen und die in Abbildung 1 dargestellt wird.



Abbildung 1: Typologie digitaler Nachbarschaftsplattformen; Eigene Darstellung

Digitale Nachbarschaftsplattformen und ihre Nutzer

Obwohl viele Anbieter ihre Bedeutung für die Vernetzung und wechselseitige Unterstützung von Nachbarn betonen, gibt es tatsächlich erst sehr wenige empirische Studien dazu. In Deutschland lassen sich hier die Studien zu SONIAnetz (Becker et al. 2019) sowie die VHW-Studie „Vernetzte Nachbarn“ (Schreiber/Göppert 2018) anführen. Die Ergebnisse daraus lassen vermuten, dass „bridging social capital“ eher nicht gestärkt wird.

In den USA gibt es eine längere Forschungstradition zu Communités. Die bisher ausgewerteten Studien untersuchen diesbezüglich die Kommunikation der Nutzerinnen und Nutzer untereinander oder das generelle Nutzerverhalten auf den jeweiligen Nachbarschaftsplattformen. Im Fokus stehen auch Themen wie die Nutzergewinnung oder die Nachhaltigkeit der so geknüpften Kontakte. Jedoch beziehen sich viele amerikanische Studien nicht nur auf Nachbarschaftsplattformen an sich, sondern auf alle Online-Plattformen, wie zum Beispiel auch

Facebook und Twitter, wodurch eine Auswertung in Bezug auf die Digitalisierung nachbarschaftlicher Beziehungen schwierig ist. Auf Basis der analysierten Nutzerstudien zeigt sich, dass digitale Nachbarschaftsplattformen als Katalysatoren für soziale Vernetzung und neue Bekanntschaften dienen können. So wird an einigen Stellen diverser Studien zwar erwähnt, dass neue Kontakte durch die Plattformen möglich sind. Jedoch fand keine explizite Untersuchung statt, die sich näher mit der Beziehungsgestaltung von Plattformnutzerinnen und -nutzern untereinander beschäftigte.

Die bisherigen Recherchen lassen den Schluss zu, dass sowohl im deutschsprachigen als auch im englischsprachigen Raum noch großer Forschungsbedarf vorhanden ist. Ähnlich scheint die Datenlage in den anderen bisher betrachteten Ländern zu sein; hier sind weitere Auswertungen erforderlich.

6. Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Die bisher geleisteten Analysen zeigen erhebliche Forschungsdesiderate: Offen sind hier zunächst zahlreiche Fragen der Datenerfassung und -verarbeitung (Datenschutz und Datensicherheit). Darüber hinaus kristallisierte sich im Verlauf des Projekts immer deutlicher heraus, dass hier möglicherweise neue Akteurskonstellationen im Bereich der kommunalen Daseinsvorsorge entstehen, deren Potenziale und Risiken einer weiteren Untersuchung bedürfen. Damit stellen sich exemplarisch für die untersuchten digitalen Angebote viele Fragen zu den Rahmenbedingungen von Public-Private-Partnerships unter Bedingungen der digitalen Transformation der Gesellschaft; dies betrifft nicht nur Fragen der Datensicherheit, sondern zum Beispiel auch eines möglichen Agenda Settings durch kommerzielle Anbieter über die Anbindung an kommunale Entscheidungsorgane. Weiterhin ist bisher wenig über den tatsächlichen Nutzen solcher Angebote für soziale Kohäsion oder die Entwicklung von „bonding“ oder „bridging social capital“ bekannt. Auch hier besteht erheblicher Forschungsbedarf. Es ist geplant, für die weitere Bearbeitung dieser Fragestellungen Drittmittel einzuwerben und ein interdisziplinär angelegtes Forschungsprojekt mit Beteiligten aus Sozialwissenschaften, Recht und Informatik zu entwickeln.

Erste Verwertungen der bisher nur vorläufigen Ergebnisse ergaben sich bereits aus dem starken Interesse kommunaler Akteure an der Thematik: So haben die Forschenden erste Erkenntnisse zu digitalen Nachbarschaftsplattformen u.a. im Sozialreferat der Stadt Nürnberg vorgestellt.

Im Frühjahr 2020 wurden Ergebnissen des Projekts im Nachrichtendienst des Deutschen Vereins für öffentliche und private Fürsorge publiziert.

7. Literatur

Becker, Dietmar; Brüstle, Karoline; Gaugisch, Petra; Gündogdu, Ramazan; Kunze, Christophe; Renyi, Madeleine; Unrath, Simon; Wilhelm, Paul; Will, Birgit; Will, Manfred (2019): SONIANetz - Aufbau eines Hilfemix mittels digitaler Vernetzung von Beratungs- und Unterstützungsangeboten. Abschlussbericht. Kirchheim unter Teck.

Bonoli, Giuliano; Häusermann, Silja (2011): Swiss welfare reforms in a comparative European perspective: between retrenchment and activation. In: Trampusch, Christine; Mach, André (Hrsg.), Switzerland in Europe: continuity and change in the Swiss political economy. London u.a.: Routledge, S. 186-204.

Esping-Andersen, Gøsta (1990): The Three Worlds of Welfare Capitalism. Cambridge: Polity Press.

Ferragina, Emanuele; Seeleib-Kaiser, Martin (2016): Welfare regime debate: past, present, futures? Policy and Politics: Policy Press. <https://halshs.archivesouvertes.fr/halshs-01347336>, zuletzt geprüft am 25.11.2019.

Fromm, Sabine; Rosenkranz, Doris (2019): Unterstützung in der Nachbarschaft. Struktur und Potenzial für gesellschaftliche Kohäsion. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Fromm, Sabine; Rosenkranz, Doris; Didyk, Olga: Mehr Potenzial im Engagement – Zur Bedeutung informellen Engagements für Wohlfahrt und soziale Kohäsion. In: Nachrichtendienst des Deutschen Vereins für öffentliche und private Fürsorge, 09/2019, S. 419–424.

Fromm, Sabine; Patrik, Désirée; Rosenkranz, Doris (2020): Digitale Nachbarschaftsplattformen brauchen analoge Rahmenbedingungen, Nachrichtendienst des Deutschen Vereins für öffentliche und private Fürsorge 04/2020

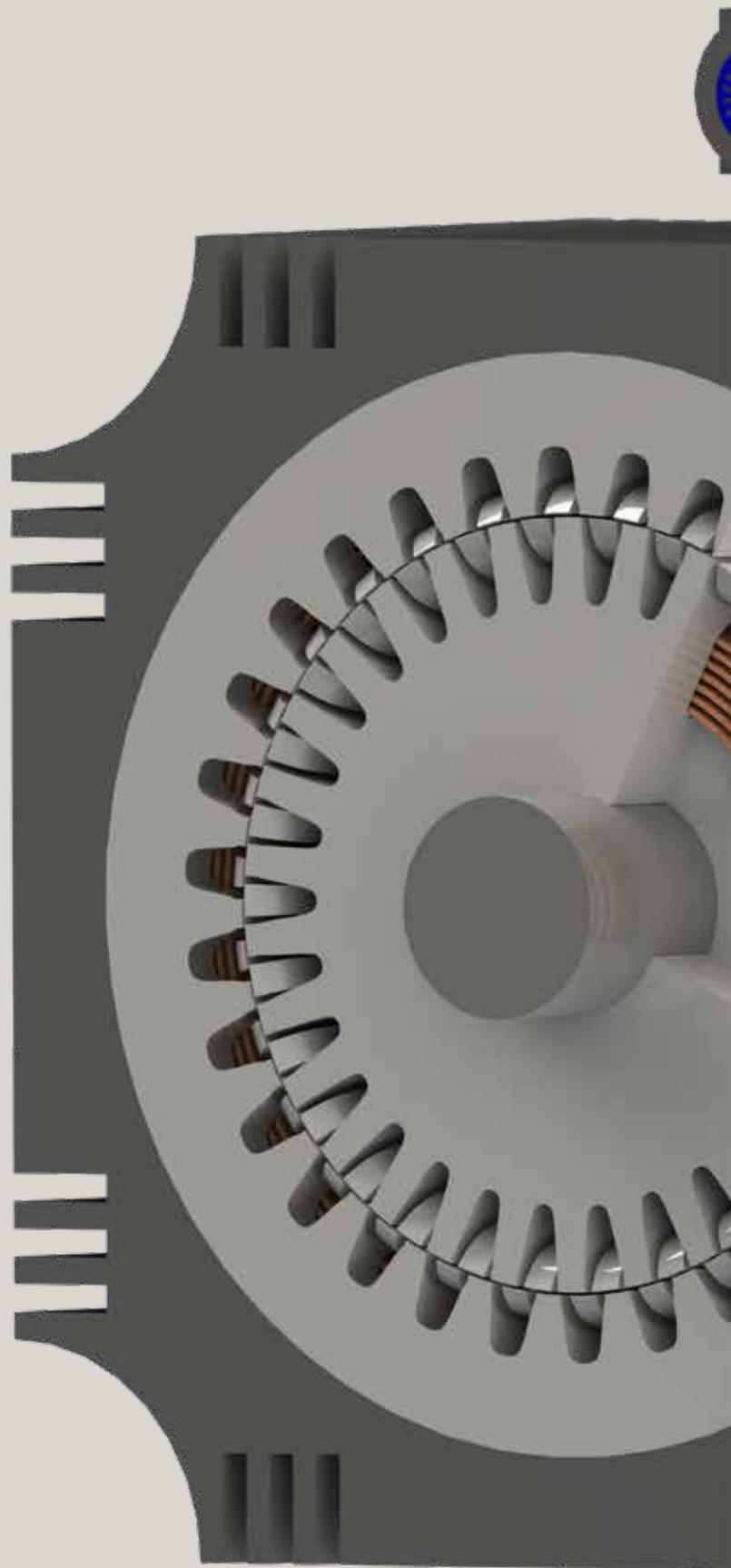
Deutscher Bundestag – Onlinedienste (2018): Ein neuer Aufbruch für Europa. Eine neue Dynamik für Deutschland. Ein neuer Zusammenhalt für unser Land. Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD. 19. Legislaturperiode.

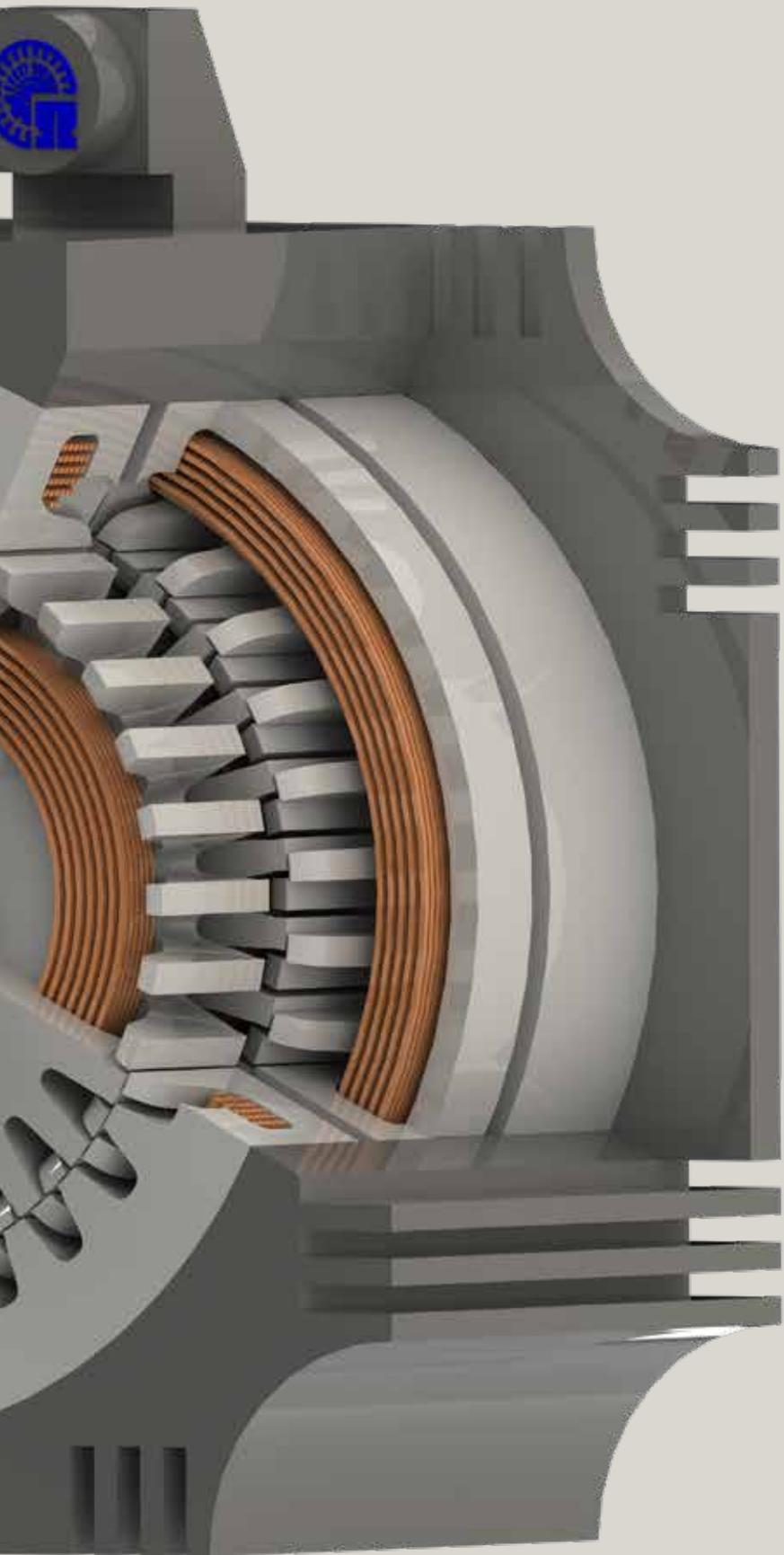
<https://www.bundesregierung.de/resource/blob/656734/847984/5b8bc23590d4cb2892b31c987ad672b7/2018-03-14-koalitionsvertrag-data.pdf?download=1>, zuletzt geprüft am 25.11.2019.

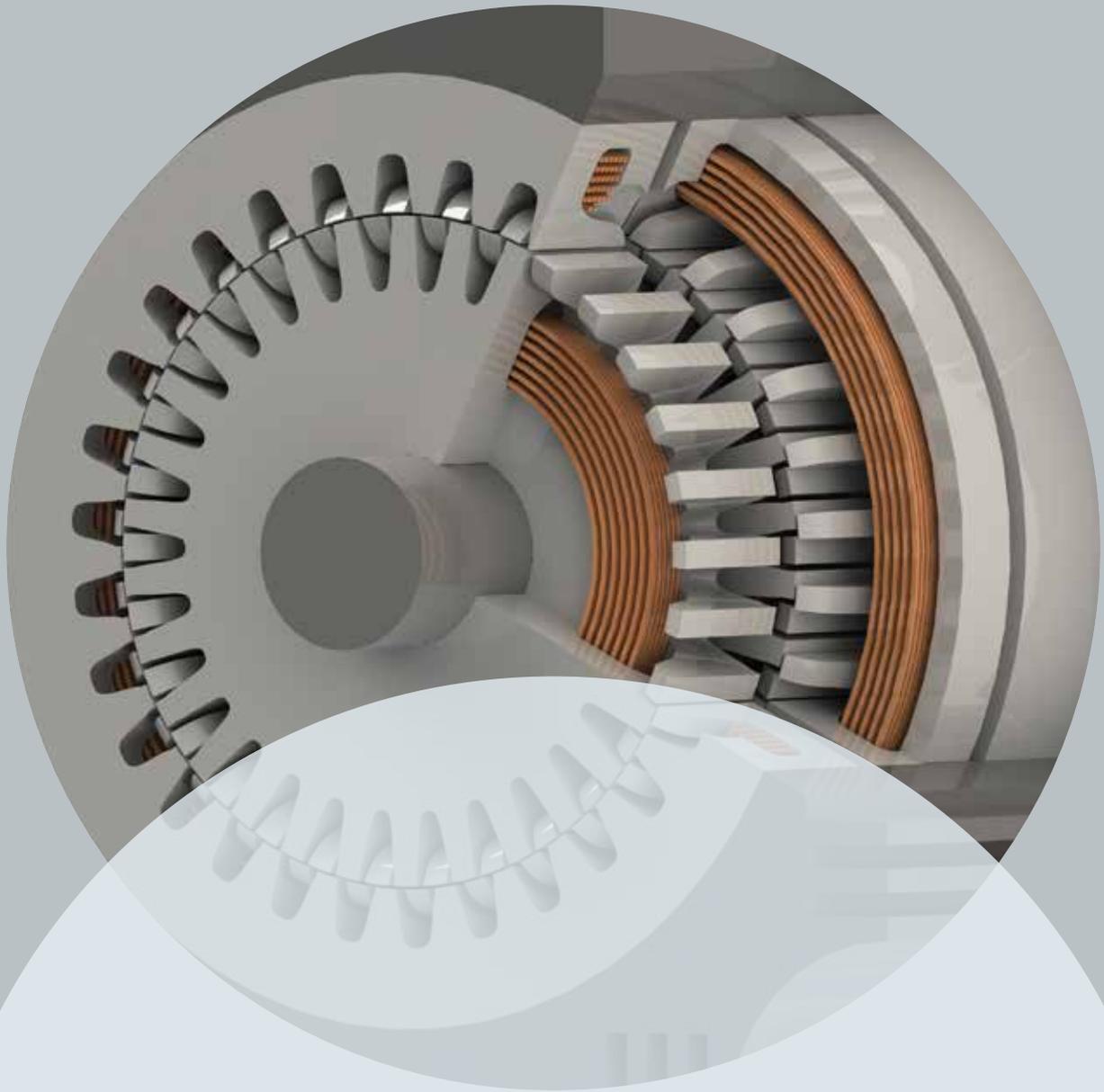
Putnam, Robert (2001): Bowling Alone: The Collapse and Revival of American Community. New York: Simon & Schuster Paperbacks.

Schreiber, Franziska; Göppert, Hannah (2018): Wandel von Nachbarschaft in Zeiten digitaler Vernetzung. Berlin: vhw - Bundesverband für Wohnen und Stadtentwicklung e.V.

Stand: Juli 2020







FreT: Fremderregte Transversalflussmaschine

Prof. Dr. Andreas Kremser

Lukas Rabenstein, M. Sc.

Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik

TH Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Im Rahmen der Vorlaufforschung führt das Forschungsteam die Maschinenkonzepte „Fremderregte Synchronmaschine“ und „Transversalfflussmaschine“ zusammen. Die fremderregte Transversalfflussmaschine vereint die Vorteile beider Maschinentopologien. So sind ähnlich große Drehmomentdichten wie bei permanent-erregten Transversalfflussmaschinen zu erwarten. Zusätzlich kann durch die Fremderregung der Rotorfluss frei gewählt werden, wodurch ein Phasenstellerbetrieb ermöglicht wird und die Maschine auch im Feldschwächbereich eine hohe Effizienz aufweist. Der Nachteil der fremderregten Synchronmaschine gegenüber einer permanent-erregten, die Stromwärmeverluste im Rotor, wird aufgrund des transversalen Aufbaus und des dadurch möglichen großen Wicklungsquerschnitts abgemildert. Durch den Einsatz von weichmagnetischen Kompositwerkstoffen (soft magnetic composit, SMC) wird der komplexe mechanische Aufbau der Transversalfflussmaschine stark vereinfacht.

1. Projektdaten

Fördersumme	35.000 Euro
Laufzeit	März bis Dezember 2019
Fakultät / Institut	Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik Institut ELSYS
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Andreas Kremser
Kontaktdaten	andreas.kremser@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Die Maschinentopologie „fremderregte Synchronmaschine“ wird heutzutage häufig bei großen Kraftwerksgeneratoren eingesetzt. Hier nutzt man die einstellbare Rotorerregung dazu, den Phasenwinkel der generierten Spannungen einzustellen und somit im Stromnetz Blindleistung regeln zu können. Weiter finden diese Maschinen zum Teil Einsatz in Automotive-Anwendungen. Zwar weisen sie verglichen mit permanent-erregten Synchronmaschinen eine geringere Leistungsdichte und einen schlechteren maximalen Wirkungsgrad auf [1], sie bieten jedoch den Vorteil, die Felderregung bei hohen Drehzahlen reduzieren beziehungsweise im Fehlerfall abstellen zu können. Der schlechtere Wirkungsgrad resultiert aus der elektrischen Erregung des Rotors und den daraus entstehenden Stromwärmeverlusten [1]. Positiv daran ist jedoch der Verzicht auf Seltene-Erden-Magneten. Die Transversalfflussmaschine bietet aufgrund ihres Aufbaus die Möglichkeit, eine sehr große Polzahl bei vergleichsweise niedrigen Stromwärmeverlusten zu realisieren [2]. Dies führt zu Maschinen mit einer großen Drehmomentdichte. Nachteilig daran ist, dass mit steigender Motordrehzahl n und somit steigender Frequenz f .

$$f = n \cdot p \quad (1)$$

die auftretenden Eisenverluste (2)

$$P_{Fe} = \int_V k_h \cdot f \cdot \hat{B}^2 + k_c \cdot f^2 \cdot \hat{B}^2 + k_{exc} \cdot f^{1.5} \cdot \hat{B}^2 dV \quad (2)$$

nach [3] überproportional ansteigen, weshalb die Transversalfflussmaschine nur für kleine Drehzahlen geeignet ist. Führt man beide Maschinenkonzepte, wie in Abbildung 1 dargestellt, zur fremderregten Transversalfflussma-

schine mit SMC-Magnetkreis zusammen, entsteht eine Maschine mit großer Drehmomentdichte, welche auch für größere Drehzahlen geeignet ist.

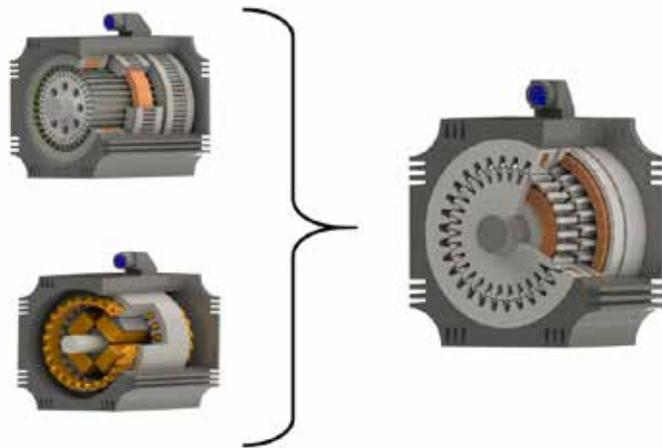


Abbildung 1: Zusammenführung der Maschinenkonzepte Transversalflussmaschine (links oben) mit der fremderregten Synchronmaschine (links unten) zur fremderregten Transversalflussmaschine (rechts). Grafik: Lukas Rabenstein

3. Ziele des Forschungsprojekts

Die Arbeiten im Rahmen der Vorlaufforschung zielen auf die Entwicklung eines Konzepts einer fremderregten Transversalflussmaschine bis zum Technology Readiness Level (TRL) 3: „Nachweis der Funktionstüchtigkeit einer Technologie“ ab. Dieses Konzept beinhaltet grundsätzliche Betrachtungen hinsichtlich der Materialien und des Maschinendesigns. Zur Auslegung der Maschine soll ein automatisiertes, parametrierbares 3D-Finite-Elemente-Methode (FEM) Modell erstellt werden. Hierfür ist eine Schnittstelle zwischen den Programmen Mathworks-Matlab und ANSY-Electronics Desktop zu entwickeln. Um die Ergebnisse der Simulation bewerten zu können, werden verschiedene Maschinentopologien als Vergleich herangezogen.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Für die Umsetzung des Forschungsprojekts legt das Forscherteam zunächst das Konzept einer fremderregten Transversalflussmaschine fest. Als entscheidendes Designmerkmal wird der Einsatz von SMC-Materialien für die weichmagnetischen Bauteile angesehen. Dies eröffnet der Maschinentopologie den Einsatz bei höheren Drehzahlen und vereinfacht zusätzlich die Fertigung erheblich. Weiter wird ein dreisträngiger Aufbau der Maschine festgelegt, damit auf konventionelle Frequenzumrichter zur Ansteuerung zurückgegriffen werden kann. Dabei sind die Stränge, wie bei Transversalflussmaschinen üblich, nicht magnetisch gekoppelt. Dadurch ergibt sich ein Aufbau wie in Abbildung 2 links dargestellt. Die Strangelemente des Stators und des Rotors bestehen aus Ringspulen, die von einer Klauenpolanordnung aus SMC umgriffen werden. Von einer permanenterregten Transversalflussmaschine mit SMC-Klauenpolanordnung ist bekannt, dass es nützlich ist, die einzelnen Stränge zu segmentieren (siehe Abbildung 2 rechts) [4]. Dies bietet die Möglichkeit der Staffelung, wodurch Drehmoment-Oberschwingungen reduziert werden können. Weiter werden die einzelnen Statorelemente kleiner, wodurch ein größerer Bohrungsdurchmesser gewählt werden kann, was sich positiv auf das Drehmoment auswirkt.



Abbildung 2: Axialschnitt einer unsegmentierten (links) und einer segmentierten (rechts) dreisträngigen fremderregten Transversalflussmaschine (Skizze). Grafik: Lukas Rabenstein

Automatisierte Modellgenerierung

Die im Weiteren vorgestellten Erkenntnisse und Ergebnisse beruhen auf der dreidimensionalen numerischen Feldrechnung (3D Finite-Elemente-Methode). Um diese effizient zu nutzen, ist eine automatisierte, parametrierbare Modellerstellung entwickelt worden. Diese ist durch eine Kopplung der Programme ANSYS-Maxwell (3D FEM) und Mathworks Matlab realisiert. In Matlab werden die notwendigen Geometrie- und Simulationsparameter definiert. Anschließend führen die Forschenden die Geometrierstellung sowie die Modell-Konfiguration in Maxwell durch eigens entwickelte Funktionen durch. Anschließend werden die in Maxwell gewonnenen Feldgrößen zurück an Matlab übergeben, ausgewertet und der Benutzerin beziehungsweise dem Benutzer zur Verfügung gestellt. Der automatisierten Modellerstellung liegen weitestgehend Geometrieparameter zugrunde, die wichtigsten sind dabei in Abbildung 3 skizziert. Neben der axialen Länge l_s , der Stator- (h_s) beziehungsweise Rotorhöhe (h_R) und dem Bohrungsradius R_B sind auch die Kurven für die Gestaltung der Klaue (1) und der Flussbarriere (2) skizziert. Bei der Gestaltung der Flussbarriere ist auf das Verhältnis zwischen Klauenbreite a und der Weite der Flussbarriere b zu achten. Hier muss zwischen einer möglichst breiten Klaue und einer möglichst weiten Flussbarriere abgewogen werden.

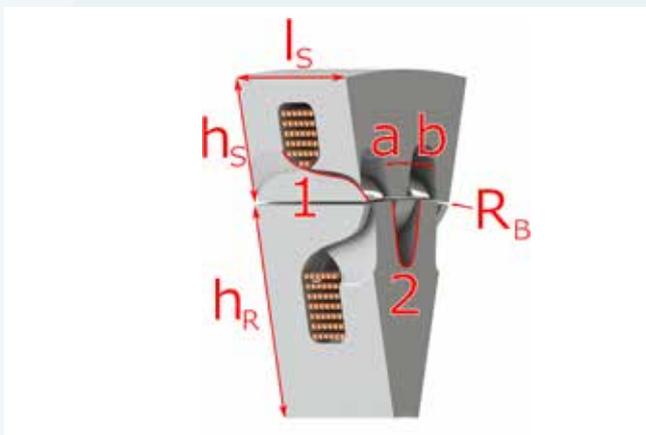


Abbildung 3: Geometrieparameter der fremderregten Transversalfussmaschine. Grafik: Lukas Rabenstein

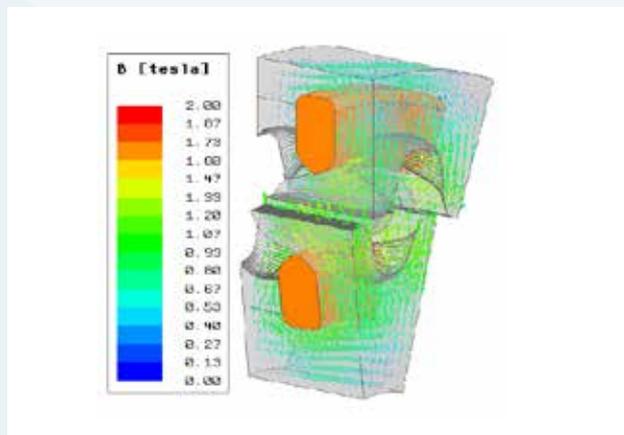


Abbildung 4: Automatisiert erstelltes 3D-FEM-Modell mit dargestellten Flussdichtevektoren. Grafik: Lukas Rabenstein

Berechnung

Nach der automatisierten Modellgenerierung wird eine fremderregte Transversalfussmaschine berechnet. Als Referenz dient eine permanenterregte Synchronmaschine vom Typ Oswald TF20.45-16, die gleichzeitig die Außenmaße festlegt. So wird der Außendurchmesser auf 400 mm und die aktive Maschinenlänge auf 360 mm festgelegt. Die in Abbildung 3 skizzierten Parameter sind:

- Länge eines Strangsegments $l_s = 60$ mm
- Höhe des Stators $h_s = 60$ mm
- Höhe des Rotors $h_R = 75$ mm
- Luftspaltradius $R_B = 140$ mm

Abbildung 4 zeigt das automatisiert erstellte 3D-FEM-Modell der fremderregten Transversalfussmaschine mit den berechneten Flussdichtevektoren. Die numerische Feldrechnung wird jeweils nur für die kleinste Symmetrieeinheit der Maschine (ein Polpaar eines Stranges) durchgeführt, wodurch die Rechenzeit je Betriebspunkt auf etwa zehn bis 20 Stunden begrenzt wird. In der nachgelagerten Auswertung werden die Ergebnisse des einen Polpaars auf die gesamte Maschine hochgerechnet. Zur Bestimmung des Betriebspunktes führt das Team zwei Simulationen durch. Zunächst werden sowohl die Rotor- als auch die Statorwicklung mit Gleichstrom (DC) gespeist und der Rotor um eine doppelte Polteilung gedreht. Dadurch kann das erreichte Drehmoment abgeschätzt und der Kommutierungswinkel für die Wechselstromsimulation (AC) abgelesen werden. Abbildung 5 zeigt den Spitzenwert des erreichten Drehmomentes der DC-Simulation. Es ist zu erkennen, dass für die gewählten Geometrieparameter, bei gleicher elektrischer Erregung, ein maximales Drehmoment je Strang mit der Polzahl $2p = 40$ von 566 Nm erreicht werden kann. Weiter ist zu erkennen, dass die optimale Polzahl von der

Erregung abhängig ist. Dieses Ergebnis ist nur für den untersuchten Parametersatz gültig, da entscheidende Größen wie Sättigung und Streuung stark von den Geometrieparametern abhängig sind.

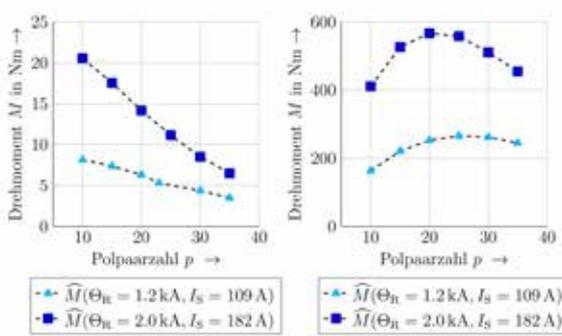


Abbildung 5: Maximales Drehmoment der DC-Simulation je Polpaar (links) und je Strang (rechts). Grafik: Lukas Rabenstein

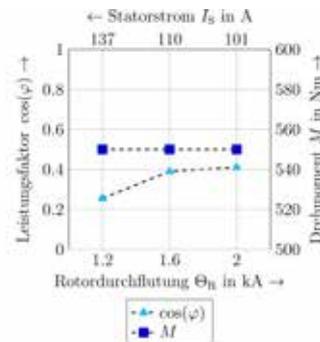


Abbildung 6: Leistungsfaktor der fremderregten Transversalfeldmaschine für verschiedene Erregungen. Grafik: Lukas Rabenstein

Nachdem mit der DC-Simulation die optimale Polzahl und der richtige Kommutierungswinkel ermittelt wurden, wird die AC Simulation durchgeführt. Hier wird dem Simulationsmodell ein sinusförmiger Strom in den Stator eingeprägt. Die AC Simulation liefert die Flussverkettung der Statorspule zurück. Mit dieser können in der nachgelagerten Auswertung die Strang- (U_U, U_V, U_W) sowie die Leiterspannungen (U_1, U_2, U_3) bestimmt werden. Die Windungszahl ist dabei so ausgelegt, dass sich eine effektive Leiterspannung von 400 V ergibt. In Abbildung 7 sind die elektrischen Größen Strom und Spannung der berechneten fremderregten Transversalfeldmaschine dargestellt. Weiter ist der zu erwartende Drehmomentverlauf der einzelnen Strangsegmente sowie der gesamten Maschine dargestellt. Die Segmentierung der einzelnen Stränge ist mit den Indizes 1 beziehungsweise 2 gekennzeichnet. Das zweite Strangsegment weist zum ersten einen Winkelversatz von 180° (elektrisch) auf. Dadurch kompensiert sich der asymmetrische Drehmomentverlauf. Im Drehmomentverlauf der Maschine (Index Mg) ist ein deutliches Pendelmoment erkennbar, dies kann eventuell durch einen anderen Winkelversatz der Segmente oder durch regelungstechnische Verfahren reduziert werden. Der Leistungsfaktor der Maschine ist in Abhängigkeit zur Rotordurchflutung und Statorstrom in Abbildung 6 für einen Betriebspunkt dargestellt. Der Leistungsfaktor ist deutlich geringer und lässt sich in einen kleineren Bereich einstellen als bei konventionellen fremderregten Synchronmaschinen. Dies ist auf Sättigungs- und Streueffekte im Magnetkreis zurückzuführen.

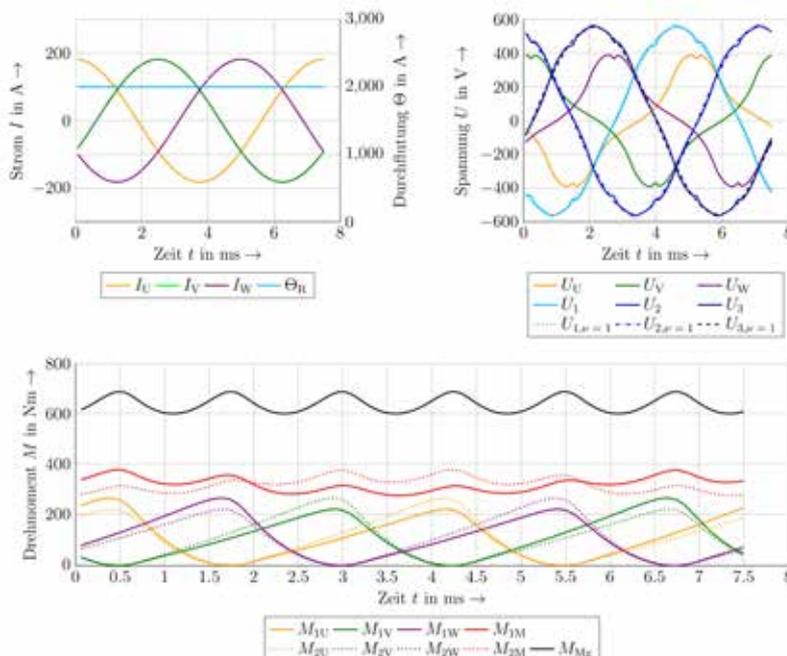


Abbildung 7: Ergebnisse der AC-Simulation. Grafik: Lukas Rabenstein

Zur Bewertung der fremderregten Transversalfflussmaschine (FreT) vergleichen die Forschenden sie sie mit einer permanenterregten Synchronmaschine (PMSM) sowie einer permanenterregten Transversalfflussmaschine (PM-TFM). Einige wichtige Kenngrößen sind in Tabelle 1 aufgelistet. Für die PMSM sind die Typenschilddaten der oben genannten Referenzmaschine Oswald TF20.45-16 dargestellt, die Daten für die PM-TFM liefert eine Simulation aus dem Forschungsprojekt BlauPower, da hierfür keine geeignete Referenzmaschine am Markt zu finden war. Die erwartungsgemäß hohe Drehmomentdichte der fremderregten Transversalfflussmaschine konnte nicht erreicht werden und liegt unterhalb der Drehmomentdichte von PMSM beziehungsweise PM-TFM. Dies ist damit zu begründen, dass die Polzahl aufgrund von Sättigungs- und Streuungseinflüssen nicht beliebig hoch gesteigert werden konnte (siehe Abbildung 5). Dennoch konnte gezeigt werden, dass die auftretende Verlustleistung P_V durch den transversalen Aufbau von Rotor und Stator vergleichsweise gering ist. Durch den Wicklungsaufbau aus Ringspulen und der Gestaltung des Magnetkreises aus SMC-Klauenpolen bietet die fremderregte Transversalfflussmaschine einen einfachen mechanischen Aufbau. Dies ist gerade im Vergleich zu permanenterregten Transversalfflussmaschinen, deren Magnetkreis aus laminiertem Elektroblech gefertigt ist, ein erheblicher Vorteil in der Fertigung.

	FreT	PMSM	PM-TFM
M in Nm	638	1004	954
n in min^{-1}	450	450	450
P in kW	30.1	47.3	45.0
P_V in kW	3.1	3.3	2.2
U in V	400	400	400
I_S in A	145	83	360
θ_R in A	2000	-	-
η in %	90	93	95
p	20	8	36
f in Hz	150	60	270
$\cos(\varphi)$	0.34	0.9	0.2

Tabelle 1: Vergleich der fremderregten Transversalfflussmaschine (Simulationsdaten) mit einer PM-Synchronmaschine (Typenschilddaten) und einer PM-Transversalfflussmaschine (Simulationsdaten). Quelle: Lukas Rabenstein

Konzeptionierung des induktiven Übertragers

Bei der Konzeptionierung des induktiven Übertragers für die Speisung der Rotorerregung werden zwei Konzepte skizziert. Bei Maschinen mit relativ kleinem Bohrungsradius R_B empfiehlt es sich, den Übertrager axial an den Stator beziehungsweise den Rotor anzufügen. Ist der Bohrungsradius groß, so kann der Übertrager in den Bau- raum des Rotors radial integriert werden. Beide Varianten sind in Abbildung 8 skizziert.

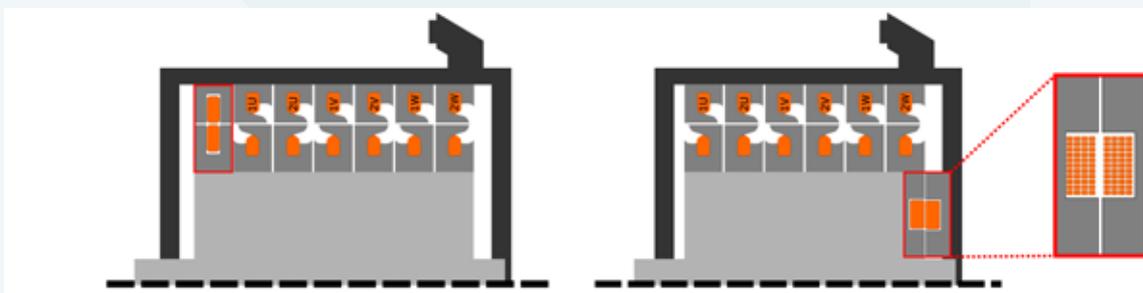


Abbildung 8: Konzept des induktiven Übertragers, rechts axial angefügt, links radial integriert Grafik: Lukas Rabenstein

Die Primärspule L_p bildet zusammen mit dem Primärkondensator C_p einen Reihenschwingkreis, somit muss von außen lediglich die übertragene Wirkleistung zugeführt werden. Wie von elektrischen Schaltnetzteilen bekannt, kann die Baugröße der Spulen durch eine erhöhte Frequenz der Primärströme I_p verringert werden. Der sekundärseitige Reihenschwingkreis aus Spule L_s und Kondensator C_s ist auf die Resonanzfrequenz des primärseitigen Reihenschwingkreises abgestimmt. Dies führt zu einem möglichst energieeffizienten System, wie es in Abbildung 9 skizziert ist. Nach dem Sekundärschwingkreis wird der Strom gleichgerichtet und den Rotorspulen zugeführt.

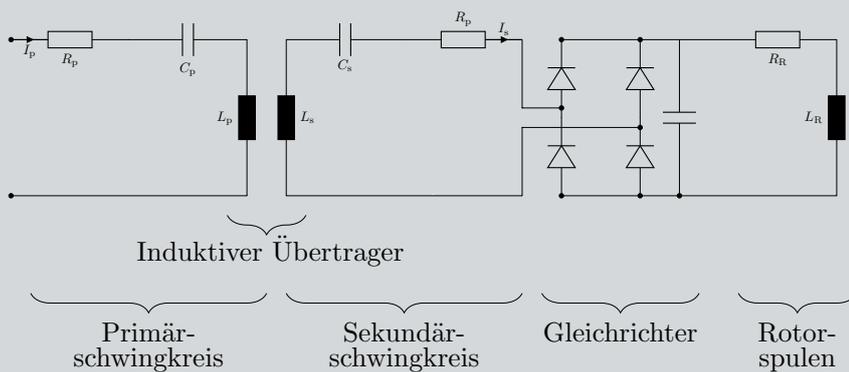


Abbildung 9: Elektrisches Schaltbild des induktiven Übertragers. Grafik: Lukas Rabenstein

5. Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Die Vorlauforschung hat der TH Nürnberg und dem Institut ELSYS den Einstieg in das Maschinenkonzept der fremderregten Transversalflossmaschine geliefert. Auf diesen Erkenntnissen aufbauend sind weitere Forschungsaktivitäten geplant. Hierfür werden aktuell mögliche Förderprojekte sowie Projektpartner gesucht.

Funktionen, welche für die automatisierte Modellerstellung und Modellauswertung entstanden sind, wurden in das institutseigene Maschinenberechnungsprogramm integriert. Dies erleichtert die automatisierte Modellbildung für andere Maschinentopologien erheblich.

Die Erkenntnisse aus der Vorlauforschung stellen die Forschenden der Öffentlichkeit im Rahmen eines Beitrags an der „Electric Drives Production Conference (EIDPC) 2020“ zur Verfügung. Diese Konferenz bietet sich besonders durch den Schwerpunkt auf die Produktion elektrischer Maschinen an.

6. Literatur

- [1] A. Binder, Elektrische Maschinen und Antriebe. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017.
- [2] H. Weh, "New permanent magnet excited synchronous machine with high efficiency at low speeds," in Proceedings of the International Conference on Electrical Machines, 1988, 1988.
- [3] G. Bertotti, "General properties of power losses in soft ferromagnetic materials," IEEE Trans. Magn., vol. 24, no. 1, pp. 621–630, 1988.
- [4] F. Dreher, "Entwurfs- und Optimierungsprozesse für Torque-Antriebe mit transversaler Flussführung," Dissertation, Universität Stuttgart, 2015.









CaSoTex

Computerunterstützte Analyse Sozialwissenschaftlicher Texte

Prof. Dr. Robert Lehmann
Fakultät Sozialwissenschaften
Prof. Dr. Jens Albrecht
Fakultät Informatik
TH Nürnberg
Sigrid Zauter
Institut für E-Beratung
TH Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Ziel war die Erforschung der Einsatzmöglichkeiten computerlinguistischer Methoden und maschineller Lernverfahren zur automatisierten Analyse sozialwissenschaftlicher Texte. Die Datengrundlage bildeten digital vorliegende Beiträge aus moderierten, sozialen Beratungsforen. Anhand konkreter sozialwissenschaftlicher Fragestellungen zu Wirkungszusammenhängen in der Onlineberatung sollte untersucht werden, inwiefern Computer-Linguistik und maschinelle Lernverfahren qualitative Analysen unterstützen beziehungsweise ergänzen können, wo die Grenzen der Verfahren liegen und wie bei deren Einsatz vorzugehen ist. Im Projekt generierten die Forschenden erste konkrete Erkenntnisse, der Forschungsverbund vergrößerte sich, Praxis-Forschungsprojekte wurden beantragt und es entstanden weitere Überlegungen zu größeren Forschungsprojekten. Die aktuellen Ergebnisse sind vielversprechend. Überwachte Lernverfahren können mit ausreichend vielen und gut vorbereiteten Trainingsdaten interpretierbare und verwertbare Erkenntnisse liefern.

1. Projektdaten

Fördersumme	35.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2019
Fakultät	Fakultät Sozialwissenschaften, Institut für E-Beratung
Projektleitung	Prof. Dr. Robert Lehmann
Kontaktdaten	robert.lehmann@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

In den Sozialwissenschaften ist die Analyse von Texten eine zentrale Quelle wissenschaftlicher Erkenntnis. Innerhalb der sozialwissenschaftlichen Methodologie wird nach dem qualitativen Paradigma mit der Inhaltsanalyse versucht, durch menschliche Subjekte die Subjektivität anderer Menschen zu erschließen. Dies stellt einen sehr aufwändigen Prozess dar, der nach wie vor dem Vorwurf ausgesetzt ist, er produziere keine objektiven Daten. Vor diesem Hintergrund erscheint es spannend, umfangreiche Textquellen nicht nur von Menschen, sondern auch mit Methoden der Künstlichen Intelligenz analysieren zu lassen. So könnte einerseits die Subjektivität der Texte berücksichtigt werden und andererseits die entstehenden Erkenntnisse aus Analysen sehr großer Stichproben gespeist werden.

Im Bereich der deutschsprachigen Sozialen Arbeit und Beratung kommen diese Ansätze bisher kaum zum Einsatz. Lediglich Ghanem et al. 2018 und Eckl & Ghanem (i.Dr.) stellen Ansätze von maschinellem Lernen bei der Textanalyse vor. Im internationalen Kontext wurde bereits in einigen Arbeiten zur Erkennung von Symptomen psychischer Erkrankungen und emotionaler Befindlichkeiten mit maschinellen Lernverfahren geforscht (Asai, Li, Stepanov & Tan, 2017; Yates, Cohan & Goharian, 2017), teilweise auf der Basis von Transkripten realer Beratungssituationen (Atkins et al. 2014) oder unterstützt durch akustische Daten (Xiao et al. 2015). Anwendungen des in der Sozialen Arbeit weit verbreiteten Motivational Interviewings (Miller & Rollnick, 2015) untersuchten Tanana et al. (2018) und Lord et al. (2015). Im Bereich der Onlineberatung verwendeten Althoff et al. (2016) maschinelle Lernverfahren bei der Analyse von SMS-basierter Beratung. Mit den Methoden des Natural Language Processing wurden ebenfalls erste Versuche im Beratungsbereich durchgeführt (zum Beispiel Albright et al. 2013). Dabei stützen sie sich auf relativ wenige Textkorpora aus englischsprachigen Transkripten (Pérez-Rosas et al. 2017).

Die Verbesserungen, die Forschende im Bereich des Natural Language Processings (NLP) mittels maschineller Lernverfahren in der jüngsten Vergangenheit erreichten, sind leider meist nur für die englische Sprache dokumentiert. Für spezifische Inhalte deutschsprachiger Onlineberatungsinhalte liegen aktuell keine Ergebnisse vor. Ein großes Problem ist hierbei die Verfügbarkeit verlässlich klassifizierter Trainingsdatensätze.

Als Feld für erste Versuche mit diesen Möglichkeiten eignet sich die psychosoziale Onlineberatung sehr gut. Dort werden Menschen mit unterschiedlichsten sozialen und/oder gesundheitlichen Problemen sowohl in geschützten 1:1-Kommunikationen als auch in öffentlichen, pseudonymisierten Foren beraten. Solche öffentlichen Beratungsforen existieren bereits seit kurz vor der Jahrtausendwende. Ein Beispiel mit langer Tradition ist die Onlineberatung der bke (Bundeskongferenz für Erziehungsberatung). Hier gibt es seit über zehn Jahren Beratungsverläufe zu Fragen rund um Familie und Erziehung mit rund 71.000 Beiträgen und ebenso vielen Nutzerinnen und Nutzern. Im Rahmen der bestehenden Forschungsk Kooperation sind diese Beratungsverläufe bereits Gegenstand unterschiedlicher Fragestellungen.

Bisher wurden diese großen Datensätze fast ausschließlich mit den Methoden der qualitativen Sozialforschung untersucht. Dadurch gelang es zwar, subjektive Sinnzusammenhänge zu extrahieren, allerdings waren in den entsprechenden Studien nur relativ kleine Stichproben möglich. Um belastbare Aussagen zu Wirkungszusammenhängen in der Onlineberatung zu generieren, sind automatische Analysen großer Datenbestände nötig.

3. Ziele des Forschungsprojekts

3.1. Sozialwissenschaftliche Fragestellungen

Die Möglichkeiten von maschinellem Lernen in der Analyse von Beratungstexten erscheinen aktuell vielversprechend, sind jedoch zumindest im deutschsprachigen Kontext noch kaum erforscht. Daher war die erste und zentrale Fragestellung des Projekts, welche Analysequalität mit den verschiedenen Formen des maschinellen Lernens erreicht werden kann. Dazu galt es, die verschiedenen Techniken an öffentlich zugänglichen Beratungsforen zu erproben.

Inhaltlich sollte in diesem Projekt untersucht werden, inwieweit Qualitätsmerkmale professioneller psychosozialer Beratung und insbesondere der Variante der Onlineberatung im Handeln der Beratenden im Beratungsforum nachweisbar sind.

In der Theorie der Onlineberatung unterscheidet man verschiedene Beratungsphasen und -formen. Daher sollte überprüft werden, inwieweit diese theoretischen Konstrukte in der praktischen Onlineberatung wiederzufinden sind. Weiterhin wird im Fachdiskurs davon ausgegangen, dass die praktische Verwendung der theoretischen Annahmen zur optimalen Gestaltung von Beratungsantworten (etwa in Bezug auf den Umgang mit den thematisierten Problemen und Emotionen) zu einem besseren Beratungsergebnis führt (vgl. Engelhardt 2018). Auch dieser Aspekt sollte anhand der empirischen Ergebnisse der verschiedenen Analyseverfahren überprüft werden.

3.2. Computerlinguistische Fragestellungen

Für die Analyse sozialwissenschaftlicher Texte, konkret von Konversationen zwischen Beratenden und Hilfesuchenden, ist ein möglichst tiefes Verständnis bestimmter sprachlicher Aspekte erforderlich. Diese Aspekte umfassen unter anderem die thematisierten Probleme, die Art der Äußerungen (Frage, Antwort, Feedback, Bestätigung, Zurückweisung, Ratschlag usw.), Emotionen (Trauer, Schmerz, Freude, Wut), psychosoziale Verhaltensweisen und Merkmale (Empathie, Depression) sowie Phasen im Beratungsprozess. Die besten Ergebnisse für derartige Analysen liefern überwachte Lernverfahren, die einen manuell annotierten Trainingskorpus benötigen (vgl. Yadollahi, 2017; Sailunaz, 2018).

Unüberwachte Lernverfahren wie Topic Modeling werden eingesetzt, um diskutierte Themen durch Wortverteilungen zu bestimmen (Blei, 2012). Darüber hinaus setzen viele maschinelle Lernverfahren sogenannte Word

Embeddings ein, welche die kontextbezogene Semantik von Wörtern abbilden sollen (Mikolov u.a. 2013). Darüber, ob und inwiefern sich diese Verfahren auch für sozialwissenschaftliche Texte eignen, gibt es bisher nur wenig Erkenntnisse und diese auch nur im englischen Sprachraum. Im Rahmen des Projektes sollten die Forschenden die Einsetzbarkeit dieser Verfahren und deren Praktikabilität für sozialwissenschaftliche Analysen erforschen.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

4.1. Aufbau der Datenbasis

Die Datenbasis für das Projekt bilden die Nutzerbeiträge in öffentlichen psychosozialen Beratungsforen. Für die Auswertungen wurden die Beiträge aus verschiedenen Foren maschinell extrahiert und in einer gesicherten Datenbank abgelegt. Der im Rahmen des Projektes entstandene Prozess zur Datenakquise und -bereitstellung läuft vollautomatisch und lässt sich unkompliziert und schnell auf andere Datenquellen erweitern.

Abbildung 1 zeigt eine Übersicht über die größten erfassten Foren und die jeweilige Anzahl der Beiträge, in Abbildung 2 ist die zeitliche Aktivität in den drei größten Foren dargestellt. In allen Foren ist zu beobachten, dass in den letzten Jahren die Aktivität abnimmt. Eine mögliche Ursache ist, dass Ratsuchende verstärkt Smartphones zur Kommunikation nutzen und sich Communities suchen, die eine bessere mobile Nutzung ermöglichen. Mögliche Communities wie beispielsweise Facebook werden üblicherweise nicht von Beratenden begleitet und sind aus Sicht des Datenschutzes als problematisch einzuschätzen. Für eine wirkliche Ursachenanalyse ist allerdings eine gesonderte Studie im Nachgang erforderlich.

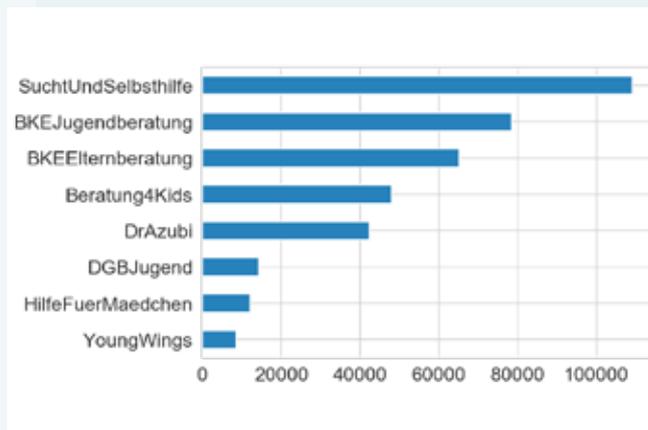


Abbildung 1: Psychosoziale Online-Foren der Datenbasis mit der Gesamtzahl der erfassten Beiträge. Eigene Darstellung

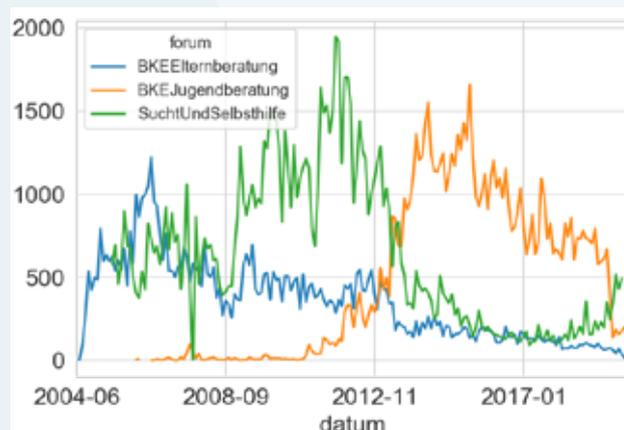


Abbildung 2: Zeitliche Aktivität in den drei größten Online-Foren. Eigene Darstellung

„Selbstverletzendes Verhalten“ in Beratung4Kids



Abbildung 3: Worthäufigkeiten in den Sub-Foren. Eigene Darstellung

„Rund um Schule“ in der BKE Jugendberatung



Abbildung 3 gibt einen kleinen Einblick in die diskutierten Themen in solchen Foren. Die dargestellten Wordclouds visualisieren die Worthäufigkeiten aus zwei Foren, nachdem in mehreren Schritten häufig auftretende, aber in dem Kontext bedeutungslose Worte entfernt wurden.

4.2. Analysen der Nutzergruppen

In den Beratungsforen können drei Gruppen von Nutzerinnen und Nutzern unterschieden werden: Ratsuchende, professionelle Beratende und beratende Ehrenamtliche beziehungsweise Peers. Letztere sind Nutzer, die häufig aufgrund persönlicher Erfahrungen „auf Augenhöhe“ beraten. Eine sozialwissenschaftliche Fragestellung war, ob es mit dieser Datenbasis und geeigneten Verfahren möglich ist, professionelles Beratungshandeln von Beiträgen Ehrenamtlicher zu unterscheiden.

Erste Ergebnisse zeigen, dass Peers tatsächlich anders als professionelle Beratende kommunizieren. Bei der Analyse von Stichproben entstand der Eindruck, dass die Ansprachen persönlicher sind und sich auch sprachlich unterscheiden. Daher wurde untersucht, ob es maschinell erfassbare Unterscheidungsmerkmale zwischen professionellen Beratenden und Peers gibt. Dafür wurden zunächst verschiedene statistische Analysen durchgeführt. Eine erste Untersuchung befasste sich mit dem „Ich-Bezug“ der Äußerungen. Mithilfe des linguistischen Wörterbuches LIWC (Wolf u.a., 2008) wurden bestimmte Schlüsselwörter in die Kategorien „Selbst“ und „Anderer“ eingeteilt (zum Beispiel „ich“, „mir“, „mein“ vs. „du“, „dein“, „euer“ etc.). Dabei zeigte sich, dass der relative Anteil Ich-bezogener Äußerungen bei den Peers etwa doppelt so hoch ist wie bei den professionellen Beratenden. Eine weitere Analyse verwendete Lesbarkeitsindizes, das heißt linguistische Metriken, mit der die Lesbarkeit beziehungsweise Verständlichkeit eines Textes gemessen werden soll (vgl. Groeben, 1982). Lesbarkeitsindizes werden anhand einfacher syntaktischer oder morphologischer Merkmale wie Wort- und Satzlänge oder Silbenzahl gebildet. Beispiele dafür sind der Flesch-Reading-Index, der Lesbarkeitsindex LIX oder die Wiener Sachtextformel. Bei allen drei Indizes wurde deutlich, dass die Texte der Peers einfacher lesbar und damit tendenziell verständlicher sind. Dabei wird allerdings weder die Qualität noch die Relevanz der Inhalte beachtet.

Nachdem die statistischen Analysen deutliche Differenzen aufzeigten, wurde mit maschinellem Lernen ein Klassifikationsmodell darauf trainiert, professionelle Beratende von den Ratsuchenden zu unterscheiden. Hierbei stellte sich die Frage, ob anhand der vorhandenen Daten zu einem gegebenen Textbeitrag automatisch bestimmt werden kann, ob er von einem Ratsuchenden oder von einem Beratenden stammt. Dafür wählten die Forschenden das klassische Vorgehen für Text Mining, bei dem die Texte nach dem Bag-of-Words-Modell vektorisiert wurden (Aggarwal, 2018). Die besten Ergebnisse lieferte die Klassifikation durch eine Support-Vector-Machine (SVM). Die Vorhersagegenauigkeit (Accuracy) betrug dabei über 90 Prozent. Das Modell lernte dabei interessanterweise, die Texte genau daran zu unterscheiden, ob sie eher im sachlich-professionellen Stil oder umgangssprachlich verfasst wurden.

Die hier produzierten Ergebnisse decken sich teilweise mit der Erwartung aus sozialwissenschaftlicher Sicht. Professionelle Beratende erlernen bereits früh, dass das Einbringen von eigenen Erfahrungen nur unter sehr spezifischen Bedingungen eine sinnvolle Intervention ist (Wälte & Borg-Laufs 2018). Ein weiterer wichtiger Qualitätsfaktor ist die Verständlichkeit der Antworten der Beratenden. Hier besteht eine ambivalente Anforderung an professionelle Kräfte: Einerseits sollen sie Fachwissen korrekt an die Zielgruppe weitergeben, andererseits aber auf einem verständlichen Sprachniveau. Hier ist in zukünftigen Studien zu prüfen, inwieweit das Lesbarkeitsniveau innerhalb dieser beiden Anforderungen sinnvoll abgewogen ist.

4.3. Inhaltsanalyse mit statistischen und unüberwachten Verfahren

Eine Fragestellung war, inwiefern unüberwachte Lernverfahren auf diesem Datenbestand Erkenntnisse liefern können. Bei einer Topic-Analyse (Blei, 2012) wird ein Modell darauf trainiert, eine vorgegebene Anzahl von Themen (Topics) zu identifizieren. Ein Topic ist dabei eine Wahrscheinlichkeitsverteilung von Worten, und jedes Dokument setzt sich aus verschiedenen Topics zusammen. Leider konnten mit diesem Analyseverfahren keine aussagekräftigen Ergebnisse erzielt werden, da sich die Diskussionen innerhalb eines Forums sehr stark ähneln und die Topics dadurch nicht scharf genug trennbar sind, um eine Interpretation zu ermöglichen. Dies kann als Hinweis gewertet werden, dass die vorgegebene thematische Untergliederung der Foren im Wesentlichen eingehalten wird.

Mit einem ähnlichen Ansatz, dem Mixed Membership Markov Model (Michael, 2012), wurde versucht, unüberwacht ein Konversationsphasen-Modell zu lernen, um Beiträge Phasen zuordnen zu können. Das einfache Phasenmodell umfasste dabei vier Phasen, welche als Problemschilderung, Problemexploration, Problemlösung und Abschluss interpretierbar sein sollten. Hierbei zeigte sich, dass die Konversation in den untersuchten Foren aufgrund der Offenheit des Forums häufig nicht in trennbaren Phasen erfolgt. Viele Threads hören unvermittelt auf, bei anderen werden durch weitere Nutzerinnen und Nutzer neue Aspekte eingebracht. Die Ergebnisse blieben zu unscharf für eine sinnvolle Interpretation. Dennoch erscheint das eingesetzte Modell aussichtsreich für bilaterale Konversationen zwischen genau einem oder einer Beratenden und einem Ratsuchenden, wie sie beispielsweise in der Mailberatung zu finden sind.

Weitere Untersuchungen haben sich mit der Frage befasst, inwiefern weitere Merkmale der Konversation, beispielsweise ein Perspektivenwechsel, Reaktionen auf Stimmungen oder die Kreativität der Lösungsvorschläge, automatisch erkannt werden können. Hier zeigte sich, dass unüberwachte oder auf Wörterbüchern basierende Verfahren keine aussagekräftigen Ergebnisse liefern und die Erstellung eigener Trainingsdaten und der Einsatz überwachter Lernverfahren unabdingbar ist.

4.4. Semantische Analyse mit Word Embeddings

Word Embeddings (zum Beispiel Word2Vec, Mikolov u.a. 2013) sind Vektorrepräsentationen von Wörtern, welche Wörter mit ähnlichen Bedeutungen ähnliche Vektoren abbilden. Dabei wird ein neuronales Netz darauf trainiert, die Ähnlichkeit von Wörtern anhand der Kontexte, in denen sie auftreten, zu erlernen. Wort-Vektoren ermöglichen auch semantische Assoziationen. Ein mit den Forenbeiträgen der bke-Elternberatung trainiertes Modell lieferte beispielsweise folgende Assoziation: Das Wort „spielen“ verhält sich zu „Sohn“ wie die Wörter „aufreizend“ und „schminken“ zu „Tochter“. Diese Analyse bestätigt sozialwissenschaftliche Erkenntnisse über typische Problemsituationen von Eltern bei Söhnen und Töchtern in der Pubertät. Auch wenn das Modell keine überraschenden Ergebnisse liefert, so zeigt sich doch, dass hier durchaus Potenzial für weitergehende Untersuchungen vorhanden ist.

4.5. Einsatz überwachter Lernverfahren für die Zuordnung sozialwissenschaftlicher Kategorien

Eine Kernfragestellung des Projekts beschäftigte sich damit, inwieweit die aus der qualitativen Sozialforschung stammende inhaltliche Kategorisierung von Texten mit maschinellen Verfahren möglich ist. Insbesondere sollte geklärt werden, inwiefern es möglich ist, ein Modell auf die Erkennung von komplexen psychosozialen Sinngehalten von Texten zu trainieren, wie etwa Empathie. Um hier überwachte maschinelle Lernverfahren einsetzen zu können, war zunächst die Erstellung eines möglichst großen Korpus an Trainingsdaten erforderlich.

Erstellung des Kategoriensystems und Annotation von Trainingsdaten

Da die Fragestellungen, die diesem Projekt zugrunde lagen, komplexe inhaltliche Bewertungen der Texte erforderten, mussten auch die Trainingsdaten inhaltliche Tiefe und subjektive Bedeutungszusammenhänge abbilden. Daher nutzten die Forschenden die Methode der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2015) in einer dem Forschungsgegenstand angepassten Form zur Erstellung der Trainingsdaten. Aufbauend auf wissenschaftlichem Wissen zu Wirkungsfaktoren in der Beratung (Grawe 2000, Wälte & Borg-Laufs 2018), Spezifika der Onlineberatung (Engelhardt 2018, Reindl 2018) und relevanten psychologischen Konstrukten (beispielsweise Empathie, vgl. Paulus 2016) wurde ein initiales Kategoriensystem zur Klassifikation der Textstellen entwickelt. Das Kategoriensystem umfasst insgesamt rund 50 feingranulare Einzelkategorien, eingeteilt unter anderem in die Gruppen „Formalitäten“ (Anrede, Verabschiedung), „Grundhaltungen“ (Empathie, Sorge um andere), „Wirkfaktoren“ (Problemdarstellung, Handlungsempfehlung) und unterschieden nach Beratender beziehungsweise Beratendem und Klientin beziehungsweise Klient.

In einem iterativen Prozess analysierte ein Team aus Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern zunächst parallel identische Forenbeiträge mit diesem Kategoriensystem. Dabei wurden in den Forenbeiträgen Textstellen markiert und den einzelnen Kategorien zugeordnet. Übereinstimmungen und Unterschiede zwischen den Zuord-

nungen der einzelnen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler wurden in gemeinsamen Reflexionssitzungen diskutiert und zur Präzisierung und Überarbeitung des Kategoriensystems genutzt. So sollte sichergestellt werden, dass bei allen beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern ein möglichst identisches Verständnis der einzelnen Kategorien vorlag, um eine möglichst hohe Intercoderreliabilität zu erreichen. Nach der parallelen Analyse von 28 Foren-Threads wurde am 16.05.2019 das finale Kategoriensystem fertiggestellt. Mit diesem analysierten und kategorisierten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler bis zum 31.07.2019 insgesamt 8800 Textstellen in 306 Foren-Threads. Für die Annotation der Texte wurde die Software WebAnno genutzt.

Ergebnisse überwachter Lernverfahren

Erste Ergebnisse mit diesen Trainingsdaten sind vielversprechend. So konnten beispielsweise die Kategorien „Problemdarstellung“, „Empathie für Klient*in“ und „Handlungsempfehlung“ ohne spezifische Optimierungen mit einer Genauigkeit (F1-Score) von circa 70 Prozent vorhergesagt werden. Als Lernverfahren wurde dabei eine Support Vector Machine verwendet. Die eigentlichen Untersuchungen verschiedener Lernverfahren (insbesondere neuronale Netze) beginnen aber aktuell gerade, so dass noch deutliche Verbesserungen zu erwarten sind. Für die Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass die Trainingsdaten in Bezug auf die Kategorien sehr schief verteilt sind (Abbildung 4). Während zu allgemeineren Wirkfaktoren – zum Beispiel „Bewertung, Deutung“ (B-W-01-C-1) oder „allgemeine fachliche und sachliche Erklärungen“ (B-W-06-1-A) – etwa 200 Trainingsbeispiele vorhanden sind, gibt es bei vielen Kategorien weniger als zehn Trainingsbeispiele. Diese werden dementsprechend auch schlecht erkannt. Zudem ist die inhaltliche Vielfalt bei Kategorien wie „Bewertung, Deutung“ sehr groß, so dass trotz vieler Trainingsbeispiele nur ein relativ niedriger F1-Score von rund 0,5 erreicht wurde. Dennoch besteht die berechtigte Hoffnung, dass es möglich ist, das Vorkommen dieser Kategorien im gesamten Datensatz der psychosozialen Beratungsforen zu erfassen, wenn die Trainingsdaten in ausreichender Zahl bereitgestellt werden.

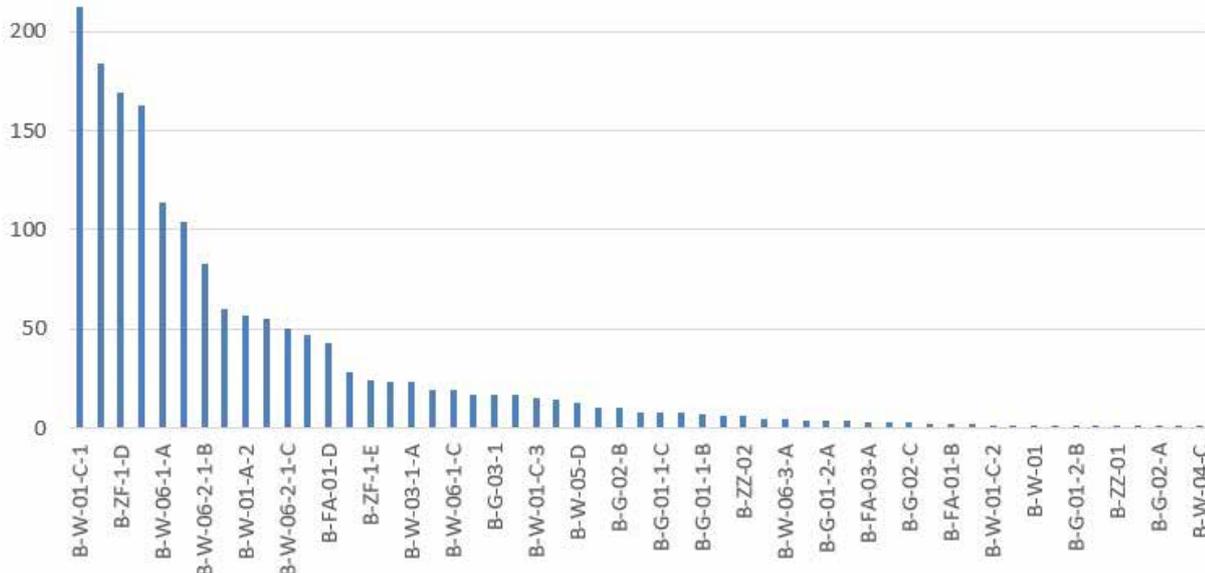


Abbildung 4: Anzahl der Trainingsdatensätze (annotierte Textpassagen) pro Kategorie bei den Berater-Kategorien. Eigene Darstellung

Die Kernfragestellung dieses Projektes kann aktuell positiv beantwortet werden: Es scheint möglich, psychosoziale Kategorien automatisiert zu erkennen, sofern hinreichend viele Trainingsdaten vorhanden sind. Es liegen erstmals einige Beispiele für den erfolgreichen Einsatz maschineller Lernverfahren bei der Identifikation komplexer psychosozialer Inhalte in deutschsprachigen Texten vor.

4.6. Allgemeine Einschätzung der Ergebnisse

Eine vertiefte Analyse der Foren zum Zusammenhang zwischen dem Vorkommen bestimmter professioneller Beratungselemente und dem Erfolg der Beratung stieß auf einige Hindernisse. Durch die uneinheitliche Verteilung

der Kodierungen im Trainingsdatensatz konnte das maschinelle Lernverfahren nicht auf das gesamte Kategoriensystem angewandt werden. Weiterhin erwies sich die Klassifikation von Beratungsthreads hinsichtlich des erfolgreichen Abschlusses als schwierig. Während in anderen Studien die Ratsuchenden aktiv zur Bewertung der Beratung aufgerufen wurden (Althoff et al. 2016), liegen in den typischen Beratungsthreads keine expliziten Informationen zum Abschluss vor. Zwar wurde bei der Erstellung des Trainingsdatensatzes eine Expertenbeurteilung des Beratungserfolges vorgenommen, diese wurde jedoch auf Basis der professionellen Gesamteinschätzung des Threads erstellt und eignete sich nicht als Grundlage für maschinelle Lernverfahren. Daher liegen hier nur teilweise verwertbare Daten vor. Diese deuten jedoch darauf hin, dass Zusammenhänge zwischen dem Einsatz professioneller Techniken und dem Beratungserfolg vorliegen.

Auch wenn im bisherigen Projektverlauf die inhaltlichen sozialwissenschaftlichen Forschungsfragen noch nicht restlos beantwortet werden konnten, sind die Ergebnisse zu den forschungsmethodischen Fragestellungen ausgesprochen vielversprechend. Es hat sich gezeigt, dass maschinelle Lernverfahren wichtige Erkenntnisse zur sprachlichen Gestaltung von Beratungstexten liefern können. Systematische Analysen mit diesen Methoden können wertvolle Hinweise zur methodischen Gestaltung von Beratungshandeln liefern.

Besonders aussichtsreich sind die Ergebnisse der überwachten Lernverfahren. Liegen ausreichend viele, gut vorbereitete Trainingsdaten vor, so ist es möglich, die qualitative Inhaltsanalyse, die in den Sozialwissenschaften bisher lediglich bei kleinen Stichproben realisierbar war, auf sehr große Textkorpora anzuwenden. Damit können statistische Zusammenhänge in einer deutlich größeren inhaltlichen Tiefe analysiert werden als bisher. Diese Erkenntnisse sind nicht auf die Analyse von Onlineberatungsforen beschränkt. So können zukünftig andere Formen sozialwissenschaftlich relevanter Daten analysiert werden, insbesondere auch Beratungs- und Prozessdokumentationen aus den verschiedenen Bereichen der Sozialen Arbeit.

Während des Verlaufs dieses interdisziplinären Projektes zeigte sich, dass die Vorbereitung der Daten und die Interpretation der Ergebnisse am besten in enger Zusammenarbeit von Informatik und Sozialwissenschaften erfolgt. Die Durchführung der Datenanalysen durch geeignete Methoden der Informatik führte zu Ergebnissen, deren inhaltliche Bewertung nur durch die Sozialwissenschaft sinnvoll möglich ist. In einem iterativen Prozess entwickeln die Beteiligten gemeinsam das Projekt weiter, um mithilfe besserer Trainingsdaten und optimierter Algorithmen schrittweise zu immer besseren Ergebnissen zu kommen.

5. Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Im Rahmen des Projekts wurde eine Infrastruktur entwickelt, die alle professionellen deutschsprachigen psychosozialen Beratungsforen in einer Datenbank für weitere Analysen bereithält und diese automatisiert aktualisiert. Dieses Nebenprodukt ist eine wichtige Grundlage für weitere Forschungsprojekte des Instituts für E-Beratung. Aktuell wird die Datenbank bereits in einem Auftragsforschungsprojekt zu religiös motiviertem Extremismus verwendet. Auch in Zukunft wird sie Grundlage von Auftrags- und Lehrforschungsprojekten an den Fakultäten Informatik und Sozialwissenschaften sein. Typische Themenstellungen können hier Vergleiche der professionellen mit unmoderierten Foren sein oder Zeitverlaufs- und Topic-Analysen.

Der Trainingsdatensatz soll nach einer formalen und inhaltlichen Aufbereitung für weitere Studien an beiden Fakultäten eingesetzt werden. Hier können Fragestellungen wie die Übertragbarkeit der Kategorien aus dem Erziehungsberatungsforum auf thematisch andere Foren bearbeitet werden oder unterschiedliche maschinelle Lernverfahren verglichen werden.

Bereits im Rahmen des Projekts präsentierten die Forschenden Zwischenergebnisse bei der Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Soziale Arbeit. Dort konnten sie auch Kontakt zum Lehrstuhl für Digital Humanities der Universität Passau aufbauen, mit dem die Kooperation in Zukunft vertieft werden soll. CaSoTex wurde außerdem auf dem Fachforum Onlineberatung im September 2019 einem interessierten Fachpublikum vorgestellt. Auf dem Fachforum treffen sich jährlich Online-Beratungsexpertinnen und -experten aus dem deutschsprachigen

Raum und diskutieren Trends und Standards in der digital gestützten Beratung. Weiterhin reichten die Forschenden Publikationen mit den Ergebnissen des Projekts bei den Tagungen „Digital Humanities im deutschsprachigen Raum“ in Paderborn und „Gegenwart und Zukunft sozialer Dienstleistungsarbeit, Chancen und Risiken der Digitalisierung in Sozialer Arbeit, Pflege und Erziehung“ in Nürnberg ein. Eine Rückmeldung steht jeweils noch aus. Eine Publikation der Projektergebnisse in der Fachzeitschrift *beratungsjournal.de* ist aktuell in Vorbereitung, weitere Publikationen in beiden Bereichen, Sozialwissenschaft und Informatik, sind für das Jahr 2020 geplant.

Die Erkenntnisse und Zwischenergebnisse aus CaSoTex sind bereits jetzt in einen erfolgreichen Antrag bei der Staedtler-Stiftung eingeflossen. Im Rahmen des Projekts „DIA – Digitale Assistenz in der psychosozialen Beratung“ setzen die beteiligten Professorinnen und Professoren ihre interdisziplinäre Kooperation fort. Weitere Anträge, die auf den Inhalten und Ergebnissen von CaSoTex aufbauen, wurden in den BMBF Förderlinien „Adaptive Technologie für die Gesellschaft – Intelligentes Zusammenwirken von Mensch und Künstlicher Intelligenz“ und „Förderung von Forschung an Fachhochschulen zur Verbesserung der Lebensqualität in Stadt und Land durch soziale Innovationen (FH-Sozial)“ gestellt. Eine Rückmeldung steht noch aus.

Für die zukünftige Nutzung im Bereich der Onlineberatung ist die Anwendbarkeit der Verfahren auf Beratungsverläufe aus 1:1-Beratungskonversationen sehr wünschenswert. In diesem Bereich erfolgt meist noch eine intensivere Beratung als in Foren. Da in diesen Beratungen jedoch personenbezogene Daten anfallen, ist derzeit ein Zugriff auf Bestandsdaten aus datenschutzrechtlicher Sicht problematisch. Aktuell arbeitet das Projektteam einerseits an technischen Lösungen für eine Anonymisierung der Daten, um weitere Analysen zu ermöglichen. Weiterhin wird im Kontakt mit Kooperationspartnern des Instituts für E-Beratung dafür geworben, bei zukünftigen Beratungen das Einverständnis der Ratsuchenden einzuholen, ihre Beratungsverläufe mit maschinellen Lernverfahren auszuwerten. Perspektivisch erhoffen wir uns so, die sehr vielversprechenden Methoden der computerunterstützten Textanalyse auch in anderen Bereichen anwenden zu können.

6. Literatur

Aggarwal, C. C. (2018): *Machine Learning for Text*, Springer.

Albright, D., Lanfranchi, A., Fredriksen, A., Styler IV, W. F., Warner, C., Hwang, J. D. et al. (2013). Towards comprehensive syntactic and semantic annotations of the clinical narrative. *Journal of the American Medical Informatics Association*, 20(5), 922–930.

Althoff, Tim; Clark, Kevin & Leskovec, Jure (2016): Largescale analysis of counseling conversations: An application of natural language processing to mental health. *Transactions of the Association for Computational Linguistics*, 4, S. 463–476.

Asai, Akari; Li, Vivian; Stepanov, Daniela & Tan, Wang-Chiew (2017): A Data-Driven Approach to Understanding Happiness. *Widening NLP Workshop (WinNLP)*.

Atkins, D. C., Steyvers, M., Imel, Z. E. & Smyth, P. (2014). Scaling up the evaluation of psychotherapy: evaluating motivational interviewing fidelity via statistical text classification. *Implementation Science*, 9(1), 49.

Blei, D. M. (2012): Probabilistic Topic Models, *Communications of the ACM*, 55 (4), S. 77-84.

DeMasi, O., Hearst, M. A. & Recht, B. (Hrsg.) (2019): *Towards Augmenting Crisis Counselor Training by Improving Message Retrieval (Proceedings of the Sixth Workshop on Computational Linguistics and Clinical Psychology)*.

Eckl, M & C. Ghanem (i.Druck). Big Data, quantitative Textanalyse und Forschung in der Sozialen Arbeit. In N. Kutscher, T. Ley, U. Seelmeyer, F. Siller, A. Tillmann, & I. Zorn. *Handbuch Soziale Arbeit und Digitalisierung*.

Engelhardt, Emily M. (2018): *Lehrbuch Onlineberatung*. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht.

Ghanem, Christian; Kollar, Ingo; Fischer, Frank; Lawson, Thomas R. & Pankofer, Sabine (2018): How do social work novices and experts solve professional problems? A microanalysis of epistemic activities and the use of evidence. *European Journal of Social Work*, 21 (1), S. 3–19.

Grawe, K. (2000): *Psychologische Therapie* (2. Korr. Auflage). Göttingen: Hogrefe.

Groeben, N. (1982): *Leserpsychologie: Textverständnis - Textverständlichkeit*. Münster: Aschendorff.

Lord, S. P., Sheng, E., Imel, Z. E., Baer, J. & Atkins, D. C. (2015). More than reflections: empathy in motivational interviewing includes language style synchrony between therapist and client. *Behavior therapy*, 46(3), 296–303.

Mayring, P. (2015). *Qualitative Inhaltsanalyse* (12., überarb. Aufl.). Weinheim [u.a.]: Beltz.

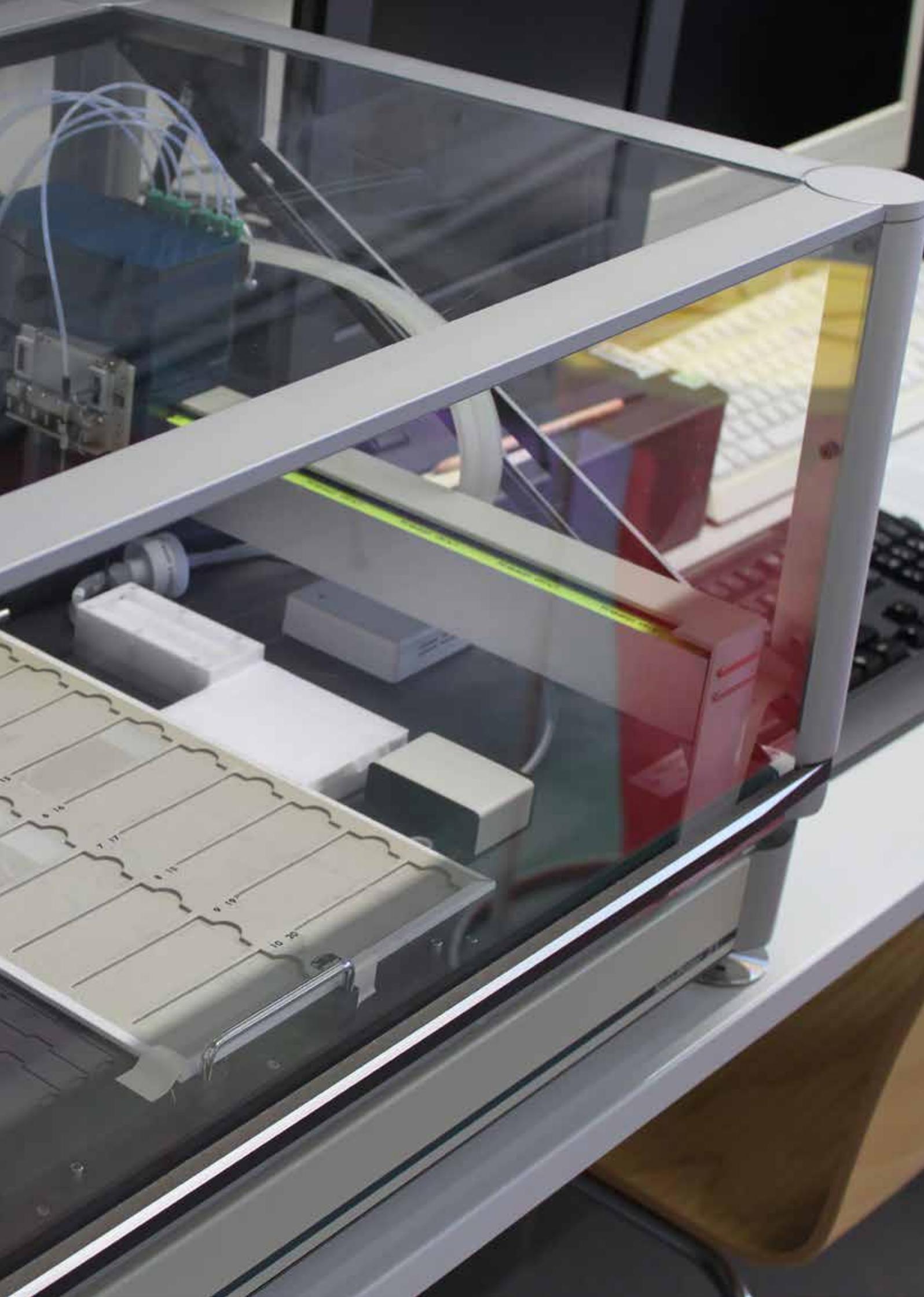
Mikolov, T.; Sutskever, I.; Chen, K.; u. a. (2013). Distributed Representations of Words and Phrases and Their Compositionality. In: *Proceedings of the 26th International Conference on Neural Information Processing Systems - Volume 2. NIPS'13. USA: Curran Associates Inc.*, 3111–3119.

Miller, William R. & Rollnick, Stephen (2015): *Motivierende Gesprächsführung: Motivational Interviewing: 3. Auflage des Standardwerks in Deutsch*. Freiburg im Breisgau: Lambertus.

Paul, M. J. (2012). Mixed Membership Markov Models for Unsupervised Conversation Modeling. *Proceedings of the 2012 Joint Confe-*

- rence on Empirical Methods in Natural Language Processing and Computational Natural Language Learning (EMNLP), Jeju Island, Korea.
- Paulus, C. (2016). Empathie und die Big Five. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.22028/D291-23416>
- Pérez-Rosas, Verónica; Mihalcea, Rada; Resnicow, Kenneth; Singh, Satinder; Ann, Lawrence; Goggin, Kathy J. et al. (2017): Predicting counselor behaviors in motivational interviewing encounters. In: Proceedings of the 15th Conference of the European Chapter of the Association for Computational Linguistics: Volume 1, Long Papers (S. 1128–1137).
- Reindl, Richard (2018): Zum Stand der Onlineberatung in Zeiten der Digitalisierung. *Fachzeitschrift für Onlineberatung und computervermittelte Kommunikation*, 14, S. 16–26.
- Sailunaz, K., Dhaliwal, M., Rokne, J. et al. (2018): *Social Network Analysis and Mining* 8(28). <https://doi.org/10.1007/s13278-018-0505-2>.
- Tanana, Michael J.; Soma, Christina S.; Srikumar, Vivek; Atkins, David C. & Imel, Zac E. (2018): Development and evaluation of ClientBot: A patientlike conversational agent to train basic counseling skills. *Journal of Medical Internet Research*. Advance online publication, 10.
- Wälte, D. & Borg-Laufs, M. (Hrsg.) (2018): *Psychosoziale Beratung. Grundlagen, Diagnostik, Intervention (Grundwissen Soziale Arbeit, Band 24, 1. Auflage)*. Stuttgart: Kohlhammer Verlag. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=5245934>.
- Wolf, M., Horn, A., Mehl, M., Haug, S., Pennebaker, J. W. & Kordy, H. (2008). Computergestützte quantitative Textanalyse: Äquivalenz und Robustheit der deutschen Version des Linguistic Inquiry and Word Count. *Diagnostica*, 2, 85-98.
- Xiao, B., Imel, Z. E., Georgiou, P. G., Atkins, D. C. & Narayanan, S. S. (2015). „Rate My Therapist“: Automated Detection of Empathy in Drug and Alcohol Counseling via Speech and Language Processing. *PloS one*, 10(12), e0143055.
- Yates, Andrew; Cohan, Arman & Goharian, Nazli (2017): Depression and selfharm risk assessment in online forums. arXiv preprint arXiv: 1709.
- Yadollahi A., Shahraki A.G., Zaiane O.R. (2017): Current state of text sentiment analysis from opinion to emotion mining. *ACM Computing Surveys*, 50(2):25:1–25:33.







Proteasescreening – Entwicklung einer routinetauglichen Methode zum Profiling von Proteasen im Serum für die klinische Labordiagnostik

Prof. Dr. Ralf Lösel
Anna-Theresa Buttinger
Dominik Werzinger, B. Sc.
Fakultät Angewandte Chemie
TH Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Verschiedene Erkrankungen, darunter Tumore und einige Infektionskrankheiten, führen zum anomalen Auftreten von Proteasen (Peptid spaltende Enzyme) im Blutkreislauf. Die Erfassung dieser Proteasen könnte wertvolle diagnostische Informationen liefern. Massenspektrometrische Methoden zur parallelen Messung mehrerer Proteaseaktivitäten wurden in den letzten Jahren publiziert, sind jedoch wegen der Komplexität kaum für den Routineeinsatz geeignet. Ziel dieses Projekts war die Entwicklung eines Testsystems, das fluoreszierende Proteasesubstrate in hinreichend hoher Dichte auf einem Glasträger vereinigt, um die Auswertung mit den bereits in vielen klinischen Laboratorien vorhandenen Lesegeräten zu ermöglichen und so die Etablierung der Methode durch die Einsparung von Investitionskosten voranzutreiben.

1. Projektdaten

Fördersumme	32.000 Euro
Laufzeit	März 2019 – Dezember 2019
Fakultät	Angewandte Chemie
Projektleitung	Prof. Dr. Ralf Lösel
Kontaktdaten	ralf.loesel@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage und Ziele des Forschungsprojekts

In einer Reihe von Arbeiten wurde von anderen Arbeitsgruppen die Messung des Profils, das heißt der relativen Enzymaktivitäten, verschiedener Proteasen (Protein spaltende Enzyme) in menschlichem Serum beschrieben. Verschiedene Tumore sowie einige Krankheitserreger sezernieren charakteristische Proteasen, die – anders als die normalen Proteasen des Verdauungssystems – selektiv sind und sich deshalb anhand der Spaltungsaktivität auf ihre jeweiligen Substrate bestimmen lassen. Diese Arbeiten setzen isotoopenmarkierte Peptide ein, deren Fragmente mittels Massenspektrometrie bestimmt werden. Vorteile dieses Verfahrens sind die hohe Empfindlichkeit (niedrige Nachweisgrenze) sowie in dieser Variante die Möglichkeit des Multiplexing, das heißt in einem Ansatz können durch Einsatz einer Mischung verschiedener Substrate die Aktivitäten mehrerer oder vieler Proteasen gleichzeitig gemessen werden. Voraussetzung ist hierbei die Unterscheidbarkeit der Produkte, die durch entsprechendes Design der Substratpeptide erreicht wird. Die Produkte zeigen dann unterschiedliche Massen, die daher nebeneinander ohne gegenseitige Störungen quantifiziert werden können. Diese Methode liefert zuverlässige Ergebnisse, die Geräte sind aber sehr teuer, wartungsintensiv und benötigen speziell ausgebildetes Personal. Aus diesem Grund werden massenspektrometrische Techniken bisher nur in Ausnahmefällen in der Routinediagnostik angewendet.

Alternativ werden in anderen Fragestellungen seit längerer Zeit Arrays verwendet, bei denen die verschiedenen Reaktionen nicht gemeinsam in Lösung, sondern nebeneinander auf einer festen Phase stattfinden. Die Identität der Substrate ist in diesem Fall nicht durch die Masse codiert, sondern durch die Position auf dem Träger der festen Phase. Häufig wird Glas als feste Phase verwendet, da dieses Material bei richtiger Behandlung nur sehr geringe unspezifische Wechselwirkungen zeigt und hervorragende optische Eigenschaften hat. Die Detektion der enzymatischen Reaktion erfolgt photometrisch oder fluorimetrisch. Lesegeräte für die Auswertung von mikroskopischen Objektträgern stehen in sehr vielen Laboren der Pathologie oder Immunologie zur Verfügung. Diese können entweder ohne oder mit sehr geringen Anpassungen für die hier zu entwickelnden Tests

verwendet werden. Durch die Nutzung der bestehenden technischen Ausstattung und die damit wegfallenden Investitionskosten ließe sich das Prinzip wesentlich schneller auf breiter Basis etablieren. Auch die bereits am Markt vertretenen Firmen könnten ihre Produktpalette um derartige Testverfahren erweitern.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines Systems, das die Bestimmung der Proteaseaktivitäten mittels Fluoreszenzmessung, die wesentlich einfacher und robuster als Massenspektrometrie und somit routinetauglich ist, ermöglicht. Bei diesem Verfahren werden die verschiedenen Peptide nebeneinander auf einer Oberfläche, meistens aus Glas, immobilisiert. Wenn die Peptide an einem Ende einen Fluoreszenzfarbstoff tragen und am anderen Ende einen Quencher (ein Molekül, das die Fluoreszenz hemmt), kann mit hoher Sensitivität die Spaltung der jeweiligen Peptide gemessen werden. Das Verfahren wurde bereits in ähnlicher Weise zur Bestimmung der Substratspezifität einer einzelnen Protease eingesetzt. Hier sollen mehrere Proteasen parallel bestimmt werden.

Kritische Punkte sind hierbei insbesondere:

- hinreichende Kapazität für Substratmoleküle
- möglichst geringe Streuung der Menge der aufgetragenen Peptide

Um die Menge der funktionellen Gruppen, die für die Kopplung der Peptide zur Verfügung stehen, quantifizieren zu können, will das Forschungsteam außerdem geeignete Verfahren identifizieren oder entwickeln. Dabei soll der zu erwartende große Messbereich abgedeckt werden.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Das Projekt besteht aus mehreren Arbeitspaketen:

- Entwicklung eines geeigneten Verfahrens zur Funktionalisierung eines festen Trägers
- Design und Synthese von Reagenzien zur Quantifizierung der funktionellen Gruppen
- Synthese markierter Peptide, die zum Profiling der ausgewählten Proteasen geeignet sind
- Anheftung der Peptide an den funktionalisierten Träger
- Demonstration der Funktionsfähigkeit des Systems

Als fester Träger wurden wegen der bereits geschilderten Vorteile kommerzielle Glas-Objektträger für die Mikroskopie verwendet. Um die Anheftung der Peptide zu ermöglichen, mussten chemisch reaktive Gruppen eingeführt werden (Funktionalisierung). Wegen der notwendigen räumlichen Auflösung musste diese Funktionalisierung als Punktraster erfolgen. In der Literatur sind zahlreiche Verfahren zur Funktionalisierung von Glas beschrieben; fast alle verwenden substituierte Alkoxy-Silane. Im nächsten Schritt können die Peptide entweder direkt an die neu eingeführten funktionellen Gruppen angehängt oder aber das Biotin-Avidin-System genutzt werden. Die konzipierten Reaktionswege sind in Abbildung 1 zusammengefasst.

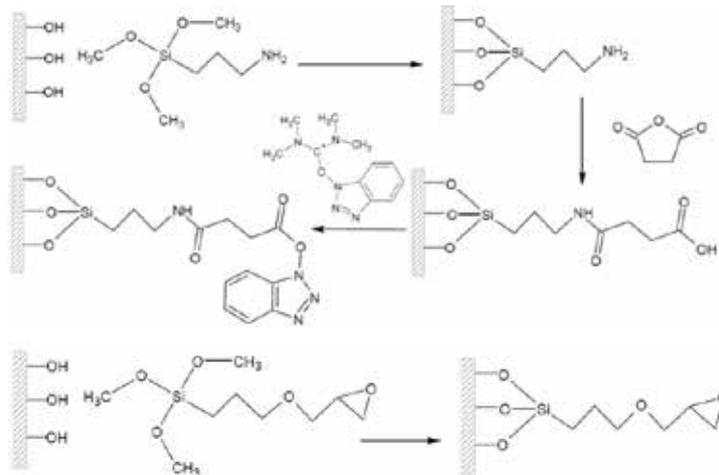


Abbildung 1: Schema der Reaktionswege zur Erzeugung einer funktionalisierten Oberfläche auf Glas. Die aktivierte Form kann dann direkt mit einem Protein (Avidin) oder der Aminofunktion eines Peptids reagieren und diese irreversibel binden. Die Epoxidgruppe (untere Zeile) kann direkt ohne vorherige Aktivierung mit Nucleophilen, also auch den Aminogruppen von Proteinen, reagieren. Schema: R. Lösel

Die Effizienz der Derivatisierung der Glasoberfläche durch Silane hängt wesentlich von der Art des Alkoxy-Rests, dem Lösungsmittel und den Reaktionsbedingungen ab. In der Literatur werden vorwiegend Trimethoxy- und Triethoxysilane verwendet; die beschriebenen Lösungsmittel sind sehr zahlreich. In diesem Projekt setzte das Forschungsteam Trimethoxy- und Triethoxysilane ein und wählte als funktionelle Gruppen die Amino- und die Epoxifunktion aus.

Das Biotin-Avidin-System umfasst zwar gegenüber der direkten Immobilisierung der Peptide zwei zusätzliche Schritte (Anheftung von Avidin und Biotinylierung der Peptide), durch die extrem hohe Affinität der Wechselwirkung kann jedoch bei Einsatz des Peptids in unterstöchiometrischer Menge der Einfluss wechselnder Dichte an funktionellen Gruppen gering gehalten werden. Zur Quantifizierung der Dichte der funktionellen Gruppen synthetisierten die Beteiligten Detektionsreagenzien (Farbstoffe beziehungsweise Fluorophore mit geeigneten reaktiven Resten). Hierbei wurde Carboxy- und Biotin-Derivate des Fluoresceins sowie des noch nicht in der Literatur beschriebenen Farbstoffs Carboxyphenolphthalein hergestellt (Strukturen nicht dargestellt).

Im Verlauf des Projekts zeigte sich, dass die Lösungsmittel Ethanol und Toluol die besten Ergebnisse lieferten. Lösungen der Derivatisierungsreagenzien in Ethanol zeigten jedoch schlechtere Stabilität. Das in der Literatur ebenfalls häufig eingesetzte Tetrahydrofuran (THF) hingegen ergab entgegen den Erwartungen deutlich schlechtere Ergebnisse, insbesondere im Hinblick auf die Anzahl der auf die Oberfläche aufgetragenen funktionellen Gruppen. Die Aminogruppen tragenden Silane ergaben durchgängig deutlich höhere Effizienz der Derivatisierung als die Silane mit Epoxygruppe (Abbildung 1, untere Zeile). Auch wenn die Messung nur indirekt, das heißt durch Quantifizierung des immobilisierten Avidins, erfolgte, sind die Ergebnisse valide.

Zur Erzeugung des Punktrasters verglichen die Mitarbeitenden verschiedene Verfahren unterschiedlicher Komplexität: Manuelles Auftragen der Silanlösungen mit Mikropipetten, Auftragen durch Drucktechnik mit Gummistempeln sowie der Einsatz von Folienschablonen erlaubten nur sehr niedrige Punktdichten. Zudem war die beobachtete Streuung der erreichbaren Funktionalisierungsdichte unbefriedigend, ebenso wie die Homogenität innerhalb der Funktionalisierungspunkte. Ein weiterer Versuch wurde mit dem Pipettierroboter Precision XS (Abbildung 2, Labor für Biochemie, Prof. Dr. Ronald Ebbert) unternommen. Wider Erwarten zeigte auch dieses Gerät schon im oberen Nanoliter-Bereich unerwartet schlechte Reproduzierbarkeit und Homogenität der Auftragung.

Während des Projekts konnte das Team überraschend ein Nano-Plotter-Gerät (Abbildung 3) günstig erwerben. Mit diesem Gerät war es möglich, Volumina bis in den unteren Nanoliter-Bereich mit hinreichender Reproduzierbarkeit auf die Glasträger aufzubringen.



Abbildung 2: Pipettierroboter Precision XS (Bio-Tek). Foto: R. Lösel

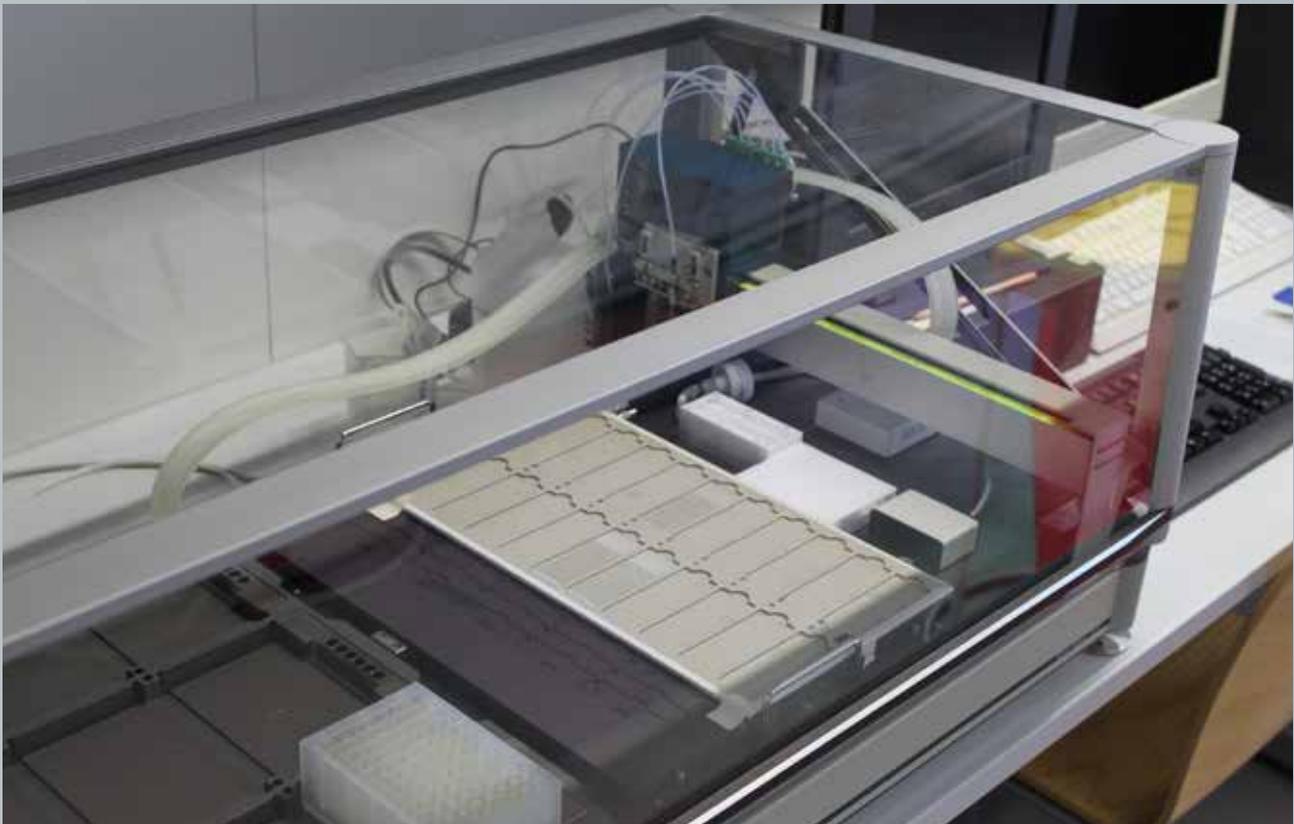


Abbildung 3: Nano-Plotter (GeSiM), Foto: R. Lösel

Nach der Derivatisierung erfolgte die Messung der Menge der funktionellen Gruppen sowie der statistischen Streuung durch Messung der Fluoreszenz- beziehungsweise Farbtintensität an einem Chemi-Doc MP Imager (Bio-Rad, Labor für Biochemie, Prof. Dr. Ronald Ebbert). Der Vorgang umfasste Reaktion beziehungsweise Inkubation mit den geeigneten Farb- oder Detektionsreagenzien in über hundertfachem Überschuss, mehrfaches Waschen und Auslesen der Fluoreszenz- beziehungsweise Farbtintensitäten.

Ein unerwarteter Befund war der große Einfluss der Vorbehandlung der Glasoberfläche auf die Streuung der Menge der immobilisierten funktionellen Gruppen. Auch die als „gereinigt“ kommerziell bezogenen Objektträger zeigten ohne zusätzliche gründliche Reinigung starke Variationen der Derivatisierungsausbeute (Abbildung 4).

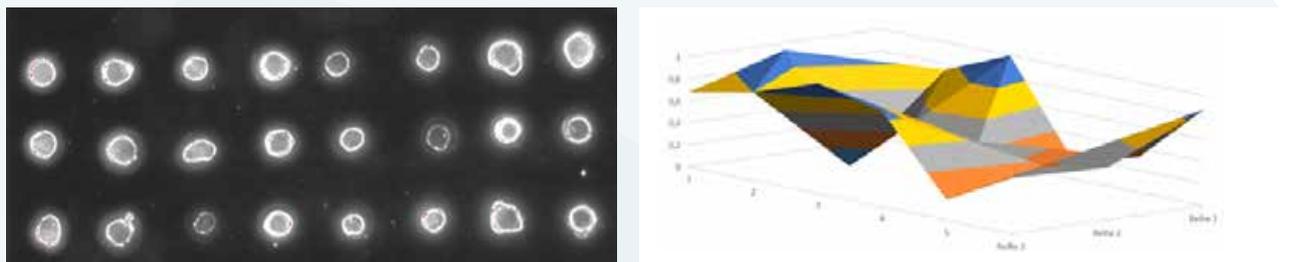


Abbildung 4: (links): Fluoreszenzintensitäten eines Arrays niedriger Dichte (halbmanuelle Auftragung, Ausschnitt) vor der Optimierung. Die Messung erfolgte mit Biotin-Fluorescein nach Derivatisierung mit Aminopropylsilan und Anheftung von Avidin. (Bild: A. Buttinger) (rechts): graphische Darstellung der Signalintensitäten

Als optimales Verfahren zur Derivatisierung der Objektträger zur Erzeugung eines Punktrasters hoher Dichte mit ausreichender Menge funktioneller Gruppen und niedriger Standardabweichung der Funktionalisierungsdichte erwies sich folgendes Vorgehen: Reinigung der Glasoberfläche mit Schwefelsäure/H₂O₂, Spotten einer 5-Prozent-Lösung von Triethoxy-Aminopropylsilan in trockenem Toluol im Nano-Plotter, nach Lufttrocknen Inkubation auf einer Heizplatte bei 200°C für 60 Minuten.

Anhand einer Literaturrecherche identifizierte das Team einen Satz von Peptidsequenzen, die differentiell von verschiedenen Proteasen gespalten werden. Diese Sequenzen sind (von C- nach N-Terminus) VSNRIPRE, SAKAVGGA, VGHAEEQT, QSLEPSLT und DAADYPKW. Aus synthesesetechischen Gründen wurde allen Sequenzen am C-Terminus ein Glycinrest und am N-Terminus ein Aspartatrest hinzugefügt.

Zugunsten einer hohen Nachweisempfindlichkeit verwendeten die Beteiligten das Prinzip der Fluoreszenzlöschung. Hierbei wird die Fluoreszenz eines Fluorophors an einem Ende der Peptidkette durch ein anderes Molekül (Quencher) am anderen Ende der Peptidkette gelöscht. Erst nach Spaltung des Peptids kann der Quencher wegdiffundieren und die Fluoreszenz wird sichtbar. Die Intensität der Fluoreszenz reflektiert so direkt das Ausmaß der Spaltung und somit die Proteaseaktivität.

Für dieses Projekt wählte das Forschungsteam das gut dokumentierte Paar EDANS (Fluorophor) / Dabcyl (Quencher) aus. Die Synthese der Peptide fand an einer festen Phase (SPPS, solid phase peptide synthesis) in Einwegspritzen mit poröser Fritte statt. Bei diesem Verfahren sind keine speziellen Geräte erforderlich, was die Kosten stark verringert. Die Synthese wurde derart gestaltet, dass der Fluorophor und die Biotingruppe unmittelbar benachbart waren, sodass der Fluorophor nach der Peptidspaltung an der festen Phase verbleibt. Überraschenderweise fiel die Ausbeute der Kupplungsschritte bei Synthese einiger Peptide nach Einbau der Dabcyl-Gruppe stark ab, sodass die Synthesestrategie verändert werden musste. Die Reinheit und Identität der hergestellten Peptide wurden mittels HPLC und Massenspektrometrie (ESI-MS und MS/MS am Bruker micr-OTof QII) überprüft.

Alle markierten Peptide konnten in ausreichenden Mengen (einige Milligramm) und Reinheiten über 80 Prozent hergestellt werden. Aufgrund unzureichender Qualität eines kommerziellen Ausgangsstoffs verzögerte sich dieser Meilenstein jedoch erheblich.

Die erhaltenen markierten und biotinylierten Peptide wurden nach Konzentrationsbestimmung auf eine Konzentration verdünnt, die etwa fünffach unter der berechneten Kapazität des an die Oberfläche immobilisierten Avidins lag. Um die Reproduzierbarkeit weiter zu verbessern, wurde jedes Peptid mehrfach (fünf- bis zehnfach) an verschiedenen nicht nebeneinander liegenden Positionen des Arrays aufgebracht. Das Ergebnis wird dann als Mittelwert aller Replikate desselben Peptids ermittelt. Dieser Ansatz kompensiert sowohl eine mögliche systematische Drift der Messwerte durch ungleiche Bedingungen an verschiedenen Seiten des Glasträgers als auch zufällige Schwankungen.

Erste Messungen mit den fertigen Arrays, allerdings noch nicht mit „echten“ Patientenproben, zeigen die erwartete differentielle Spaltung der verschiedenen Peptide.

5. Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Die vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass die Übertragung des Funktionsprinzips auf das besser routinetaugliche Objektträger-Format möglich ist. Eine Publikation über das Verfahren und die hierzu entwickelten Detektionsreagenzien bereitet das Forschungsteam gegenwärtig vor. Parallel dazu wird die Möglichkeit einer Schutzrechtsanmeldung geprüft.

Im Rahmen des Projekts war es leider nicht mehr möglich, ausreichend viele Patientinnen und Patienten zu gewinnen, die eine Blutprobe für ein Validierungsexperiment zur Verfügung stellen. Daher wird der nächste Schritt in Kooperation mit dem Klinikum Nürnberg eine Pilotstudie mit einer überschaubaren Zahl (10 bis 20) von klinischen Proben sein, um den erwarteten diagnostischen Mehrwert des Verfahrens zu bestätigen.

Zur kommerziellen Verwertung des Verfahrens nahmen die Beteiligten Gespräche mit einem Hersteller von Auslesegeräten auf. Die Übertragung auf ein vollautomatisiertes System würde mittelfristig die breite Anwendbarkeit der Methode noch deutlich verbessern; hierzu muss allerdings wegen der anderen Geometrie der Messbeziehungsweise Proben-Gefäße eine andere technische Lösung zum Auftragen der Peptide gefunden werden. Der Nano-Plotter ist hier nicht anwendbar.

Im Rahmen dieses Projekts wurden folgende Abschlussarbeiten angefertigt:

Art	Autor/in	Titel	Status
Abschlussarbeit M. Sc.	Dominik Werzinger	Synthese von markierten Peptiden zur Messung der Proteaseaktivität	abgeschlossen
Abschlussarbeit B. Sc.	Anna-Theresa Buttinger	Funktionalisierung von Oberflächen zur Immobilisierung von Biomolekülen	abgeschlossen









NeKoEis – Netzdienliche Betriebs- und Regelstrategien für Kompressionskälteanlagen mit Eisspeichern zur Gebäudekühlung

Prof. Dr.-Ing. Frank Opferkuch
Nuremberg Campus of Technology

Ziel dieses Vorhabens ist die Vorlaufforschung an einer netzdienlichen Betriebs- und Regelstrategie für Kompressionskälteanlagen mit Eisspeichern zur Gebäudekühlung. Die Schwerpunkte liegen einerseits auf der Entwicklung eines Simulationsmodells für ein System mit Photovoltaikanlage, Kompressionskälteanlage und Eisspeicher zur Gebäudeklimatisierung und andererseits auf der Projektierung und dem Aufbau einer Versuchsanlage aus fünf Modulen im Labor für vollautomatisierte, transiente Tests an solchen Systemen. In diesem Vorhaben wurden zeitdiskrete Verhaltensmodelle aller Komponenten in MODELICA® entwickelt und ein multiphysikalisches Systemmodell in DYMOLA erstellt. Zur Modellierung des Eisspeichers haben die Forschenden zahlreiche ortsdiskrete Simulationen in ANSYS CFX sowie Simulationsrechnungen an kontinuierlichen analytischen Modellen für den Phasenwechsel in unterschiedlichen Speichergeometrien durchgeführt. Auf Basis eines in diesem Vorhaben entwickelten Lastprofils für Strom und Kälte eines Wohngebäudes als Use-Case konnten die Anforderungen an den Speicher wie Kapazität und Leistung ermittelt und in einen Prototyp umgesetzt. Erste Ergebnisse zeigen ein großes Potenzial für Eisspeicher, in klimatisierten Prosumer-Gebäuden Spitzenlasten zu reduzieren und damit die Netzbelastung zu senken. Dieses Vorhaben liefert damit die Voraussetzungen für weitergehende, detailliertere Untersuchungen und einen nachfolgenden Förderantrag.

Wesentliche Projektziele

1. Projektdaten

Fördersumme	34.797 Euro
Laufzeit	Januar bis November 2019
Institut	Nuremberg Campus of Technology
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Frank Opferkuch
Kontaktdaten	frank.opferkuch@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage und Ziele des Forschungsprojekts

An der technisch-wissenschaftlichen Forschungsplattform Nuremberg Campus of Technology (NCT) ist die Forschungsprofessur und Arbeitsgruppe für dezentrale Energiewandlung und -speicherung der TH Nürnberg angesiedelt. Die Ziele dieser interdisziplinären Forschungseinrichtung liegen in der Forschung und Weiterentwicklung von Technologien, die dazu beitragen, den aktuellen Megatrend der Urbanisierung nachhaltig und sozioökonomisch verträglich zu gestalten („Engineering for Smart Cities“). Ende dieses Jahrhunderts werden laut Prognosen 85 Prozent der Weltbevölkerung, das heißt 9,5 Milliarden Menschen, in Städten leben. Die dazu erforderliche Verdopplung der urbanen Infrastrukturen stellt die Städte vor enorme ökonomische Herausforderungen. Durch neuartige Technologien wie modellgestützte, intelligente Regelungsstrategien können teure Infrastrukturen – etwa die Energienetze – kosteneffizienter betrieben und Investitionskosten gesenkt werden. Die Arbeitsgruppe Energie- und Speichertechnologien am NCT erforscht Verfahren zur Effizienzsteigerung bei der Kälteerzeugung, neue Methoden zur Abwärmenutzung, die Optimierung von thermischen Energiespeichern sowie die Integration von erneuerbaren Energien und elektrochemischen Energiespeichern in zelluläre Energiesysteme. Zudem besitzt das Team Erfahrung in der energetischen Bilanzierung, Modellierung und numerischen Simulation von energietechnischen Systemen und im Aufbau und Betrieb von anwendungsorientierten Versuchsanlagen im Technikumsmaßstab.

Das geplante Vorhaben ist im Bereich der Energietechnik für klimatisierte Prosumer-Gebäude angesiedelt und hat die Entwicklung eines intelligenten Regelungsverfahrens für Kompressionskälteanlagen (KKA) mit Eisspei-

chern zum Ziel, die mit Photovoltaikstrom betrieben werden sollen. Weltweit steigt der Bedarf nach technisch erzeugter Kälte zur Gebäudeklimatisierung an. Gründe für diese Zunahme liegen in einer verdichteten Bebauung von Städten (Urbanisierung), dem Bevölkerungswachstum, einer fortschreitenden technischen Entwicklung in zahlreichen Ländern und im Klimawandel. Mit 20 Prozent haben elektrisch angetriebene Kompressionskälteanlagen einen sehr großen Anteil am weltweiten Strombedarf. Der Lastgang von Kälteanlagen bei der Gebäudeklimatisierung sorgt für hohe Lastspitzen, die häufig zusätzlich noch beim Betrieb mit PV-Strom zeitlich zur Erzeugung versetzt treten. Durch den Einsatz von Energiespeichern lassen sich Amplituden und Anzahl der Lastspitzen (Peak Shaving) und damit auch die Belastung der Versorgungsnetze reduzieren.

Bei Kälteanlagen kann dazu entweder die Antriebsenergie (Strom) oder die Endenergie (thermische Energie, hier in Form von Kälte) gespeichert werden. Abhängig von der Leistungsziffer der Kälteanlagen muss etwa das fünf- bis zehnfache an thermischer Energie im Vergleich zu elektrischer Energie gespeichert werden. Die spezifischen Kosten von elektrochemischen Energiespeichern (Batterien) sind allerdings derzeit noch um den Faktor zehn höher als die von thermischen Speichern. Ein entscheidender Nachteil von thermischen Energiespeichern bei der Gebäudeklimatisierung sind deren geringe volumetrische Energiedichte und damit das große Bauvolumen. Durch die Nutzung von Latentwärme, wie beim Eisspeicher, kann das Bauvolumen deutlich verkleinert werden, allerdings steigen damit auch die Investitionskosten und die Komplexität der Anlagentechnik. Hier existieren derzeit noch Forschungsfragen nach dem Optimum in Art, Kapazität und Leistung von Energiespeichern bei der Gebäudeklimatisierung mit Photovoltaikstrom und nach einer möglichst kostenoptimalen Betriebsstrategie.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Ziel dieses Vorhabens ist es, im Sinne einer Vorlaufforschung die grundlegenden Eigenschaften solcher Systeme zu ermitteln sowie die experimentellen und simulativen Voraussetzungen zu schaffen, um die Forschungsfrage weiter schärfen und damit eine weitergehende, drittmittelfinanzierte Forschung auf diesem Gebiet in der Arbeitsgruppe etablieren zu können. Ein strategisches Ziel, das über den Umfang dieses Vorhabens hinausgeht, ist der Entwurf einer modellprädiktiven Regelung für den Energiespeicher in ein System bestehend aus elektrischer Versorgung aus erneuerbaren Energien (Photovoltaik), Wechselrichter, Kälteanlage, Speichern sowie thermischen und elektrischen Verbrauchern und Prognosen für die Belastung des Stromnetzes.

Das Arbeitsziel auf der experimentellen Seite des Vorhabens ist der Aufbau einer Versuchsanlage, um so die Forschungsfrage zu bearbeiten. Im Einzelnen gehören dazu die Projektierung und der Aufbau eines Eisspeichers, die Integration des Speichers in ein Gesamtsystem aus Photovoltaiksimulation, Kompressionskälteanlage, Hydraulikmodul, Wechselrichter mit Batteriespeicher, einer elektronischen Last zur Simulation des Netzanschlusses und ein Messdatenerfassungs- und Regelungssystem.

Das Arbeitsziel auf der simulativen Seite ist die Erstellung eines Systemsimulationsmodells als digitaler Zwilling der Versuchstechnik, das für virtuelle Studien zur Klärung der Forschungsfrage herangezogen werden kann, aber auch dazu eingesetzt werden soll, den Prototyp eines geeigneten Eisspeichers zu dimensionieren und zu bauen. Ein Teilziel ist es dabei, für den Eisspeicher ein vereinfachtes Verhaltensmodell zu entwickeln, das dessen transientes Verhalten auch in Teilzyklen wiedergibt. Die Modellbildung soll in MODELICA® auf der Simulationsplattform DYMOLA so erfolgen, dass es später mit Messwerten validiert werden kann.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Das aufzubauende Gesamtsystem, in das die Forschenden den Eisspeicher integrieren, besteht aus mehreren Komponenten: ein elektronisches Netzgerät mit digitaler Schnittstelle als Gleichstromquelle, um den Tagesgang einer PV-Anlage abbilden zu können; eine elektronische Last mit digitaler Schnittstelle als Wechselstromsenke, die den elektrischen Verbrauch des zu untersuchenden Gebäudes und den Netzanschluss darstellen soll; eine digital ansteuerbare Kompressionskälteanlage, die über ein Hydraulikmodul an die Versorgungstechnik des Labors angebunden ist und die Kälte je nach Bedarf des zu testenden Gebäudes zur Verfügung stellt oder den Eisspeicher belädt; ein Wechselrichter mit Batteriemodul wandelt die Gleichspannung der Photovoltaikanlage in

Wechselspannung um, versorgt damit die einzelnen Komponenten mit elektrischer Energie oder belädt bei einem Überschuss die Lithium-Ionen-Batterie.

Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau eines Prosumer-Gebäudes, das in der Zusammensetzung der Komponenten dem hier angenommenen Use-Case entspricht und für den Aufbau des Simulationsmodells und der Versuchsanlage maßgeblich ist.

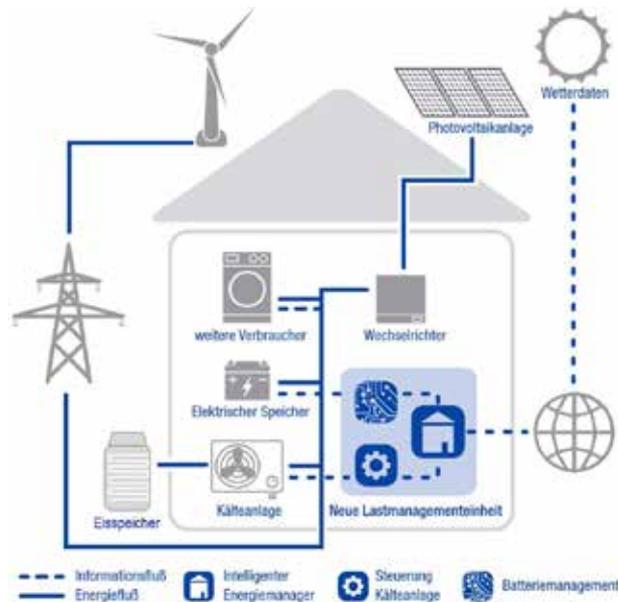


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des zellulären Energiemanagementsystems mit Lastmanagementeinheit zur effizienten Regelung. Grafik: Team NeKoEis

Mit dem Eisspeicher soll eine bereits vorhandene Versuchstechnik so ergänzt werden, dass die Forschenden im Labor einen mehrtägigen, transienten Betrieb der Kälteanlage mit PV-Strom experimentell untersuchen können. Das Ziel ist dabei, den Kältebedarf eines Gebäudes stets decken zu können. Die Methode, die dazu entwickelt wird, ist eine optimierte, modellprädiktive Regelungsstrategie, die abhängig von prognostizierenden Wetterdaten und weiteren Faktoren die einzelnen Komponenten effizient regelt. In Abbildung 1 ist der schematische Aufbau des Gesamtsystems sowie die Energie- und Informationsflüsse der jeweiligen Komponenten zu erkennen. In Abbildung 2 ist ein CAD-Modell des Gesamtsystems zu sehen, das im Technikum Rednitzhembach (Standort SR der TH Nürnberg) aufgebaut wird.



Abbildung 2: Aufbau der Versuchsanlage (Messdatenerfassung und Steuerung, simulierte PV-Quelle und elektronische Last, Batterie und Wechselrichter, Kälteanlage, Eisspeicher, Hydraulikmodul v.l.n.r.). Foto: Tim Neiertz

Ein netzdienliches Lastmanagement (Demand Side Management) stellt eine dynamische Wechselwirkung zwischen Verbrauchern und dem Stromnetz dar und kann dazu beitragen, die Belastung der Netze und die Integration erneuerbarer Energien zu verbessern.

Diese netzorientierte Betriebsweise von Verbraucher und Speichern steht im Fokus dieses Forschungsvorhabens. Ziel ist es, bei einem Überangebot an PV-Strom mit der Kälteanlage Kälte „auf Vorrat“ zu erzeugen und diese in Form von Eis im Eisspeicher zu speichern. Steht aufgrund von ungünstigen Wetterbedingungen nicht genügend Leistung durch die Photovoltaikanlage zur Verfügung, soll die Antriebsleistung der KKA reduziert und der Kältebedarf aus dem Eisspeicher gedeckt werden. Bei dieser Art der Betriebsweise steigt die Schwierigkeit der Regelung des Eisspeichers, da das Be- und Entladen nicht täglich in Vollzyklen erfolgt, sondern meist in Teilzyklen mit unterschiedlichen Energiemengen und Zeitdauern. Die Be- und Entladung hängt von mehreren Faktoren ab. Beispiele sind verfügbarer Eigenstrom aus volatilen Quellen, erneuerbare Energien im Stromnetz, der Ladezustand des Eisspeichers und der wetter- und benutzungsabhängige Bedarf des Gebäudes. Da es in den Prognosen der Eisbildung und des Schmelzens von Eis im Speicher bei Teilbelastung und bei prädiktiven Regelungsverfahren für zelluläre Energiemanagementsysteme erheblichen Forschungsbedarf gibt, stellt die Durchführung dieses Projekts eine wichtige Grundlage für einen Folgeantrag dar.

Auch für die effiziente und regenerative Energieversorgung von Prosumer-Gebäuden können thermische Energiespeicher eine große Hilfe sein. Thermische Energie, auch Kälte zur Klimatisierung, für die zu einem gewissen Zeitpunkt kein Abnehmer zur Verfügung steht, kann gespeichert und zu einem anderen Zeitpunkt wieder abgegriffen werden. Des Weiteren können durch eine netzdienliche Betriebsweise der elektrisch angetriebenen Kälteerzeuger Lastspitzen reduziert oder vermieden werden.

Da die Verfügbarkeit des Photovoltaikstroms und der Kältebelastung des Gebäudes über den Tagesgang hinweg phasenverschoben auftritt, können Energiespeicher dazu beitragen, mögliche Versorgungslücken zu schließen. Bei den thermischen Energiespeichern unterscheidet man zwischen sensiblen und latenten Speichern. Je nachdem, ob sich die Speichertemperatur unter oder über Umgebungstemperatur befindet, spricht man von Kälte- oder Wärmespeicher. Weitere Einteilungsmöglichkeiten sind die Speicherdauer (zum Beispiel Kurzzeitspeicher oder saisonale Speicher), der Temperaturbereich (Niedertemperatur bis hin zu Hochtemperatur) und mobile beziehungsweise stationäre Speicher (1).

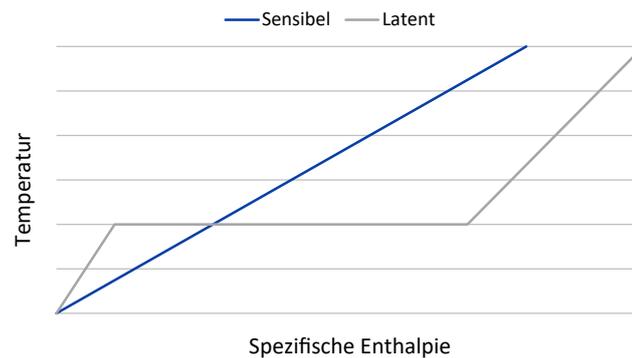


Abbildung 3: Vergleich der Wärmekapazitäten zweier unterschiedlicher Materialien – einfaches Material (sensible Wärmespeicherung) und Phasen-Wechsel-Material (latente Wärmespeicherung). Grafik: Team NeKoEis

Bei sensiblen Wärmespeichern resultiert aus einer Enthalpieänderung eine fühlbare Änderung der Temperatur. Die Energiespeicherung hängt von der Wärmekapazität, der Masse des Speichermediums und der Temperaturdifferenz ab. Bei latenten Wärmespeichern wird zusätzlich die Enthalpieänderung bei dem Phasenwechsel genutzt. Die Temperatur bleibt dabei konstant, weshalb Latentwärmespeicher bei kleinen Temperaturdifferenzen rund um den Phasenwechselpunkt eine deutlich größere Menge Energie speichern können (siehe Abbildung 3). Durch Verwendung von sogenannten Phasen-Wechsel-Materialien kann bei gleichbleibendem Volumen die Speicherkapazität erhöht oder bei gleichbleibender Speicherkapazität das Volumen reduziert werden. Durch Einbringung des Eisspeichers ergeben sich verschiedene Szenarien, wie das Gebäude gekühlt und der Eisspeicher be- oder entladen werden kann.

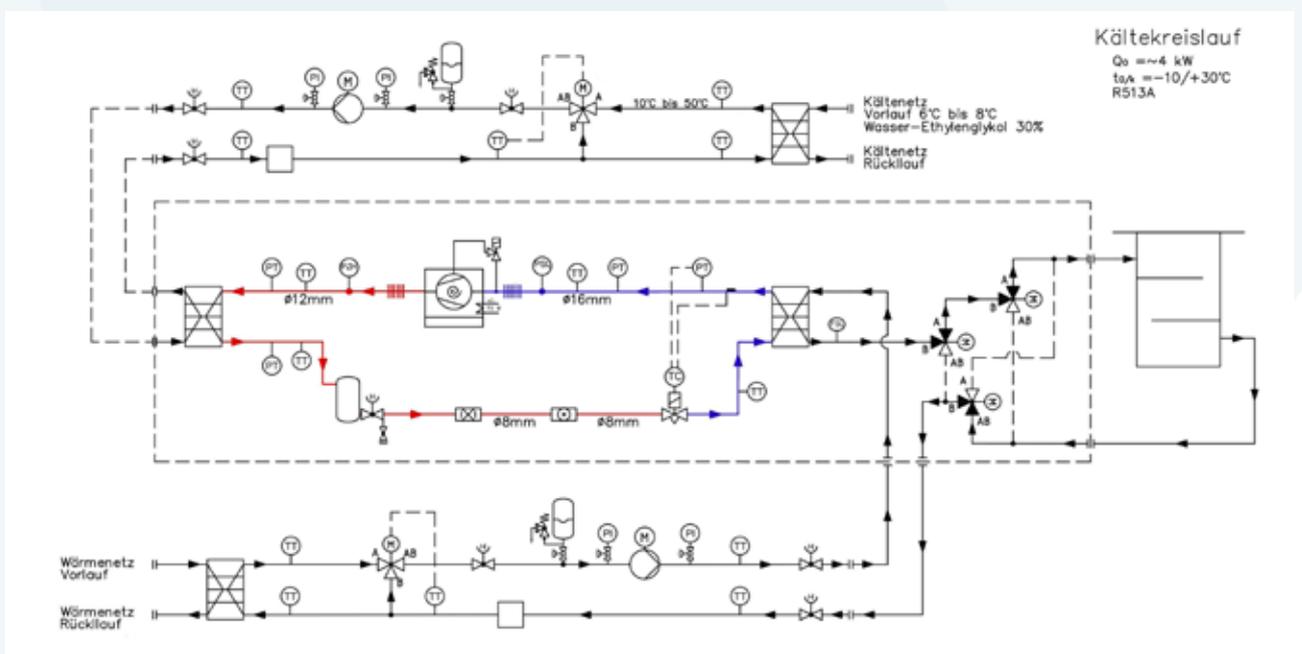


Abbildung 4: Hydraulische Verschaltung des Gebäudenetzes mit der Kälteanlage, dem Hydraulikmodul und dem Eisspeicher. Grafik: Team NeKoEis

Es wurden drei verschiedene Betriebsarten des Speichers definiert, die bei Prosumer-Gebäuden auftreten können:

- das Gebäude wird direkt durch die Kälteanlage gekühlt
- die Kälteanlage belädt den Eisspeicher
- der Eisspeicher wird entladen und kühlt das Gebäude

Diese drei Szenarien sind von verschiedenen Faktoren, wie zum Beispiel der Kühllast innerhalb des Gebäudes oder der Solareinstrahlung und damit der Photovoltaikleistung, abhängig. Fällt keine Kühllast an, aber solare Ein-

strahlung, die für PV-Strom sorgt, kann der Eisspeicher beladen werden. Reicht die Kälteanlage nicht zur Gebäudekühlung aus, da zu wenig Leistung von der Photovoltaik-Anlage anfällt, wird der Eisspeicher entladen. Je nach Regelungsstrategie kann auch der Fall eintreten, dass die Kälteanlage das Gebäude direkt kühlt. Für die drei Steuerungsszenarien mussten drei zusätzlich Ventile zwischen Kälteanlage und Eisspeicherbeziehungsweise Hydraulikmodul installiert werden. Die Kälteanlage sowie das Hydraulikmodul werden durch die Firma KKT Innovations GmbH & Co. KG hergestellt.



Daten des Use-Cases (klimatisiertes Prosumer-Gebäude):

Passivhausstandard mit 4 Personen und Nord-Süd-Ausrichtung

Kühlfläche: 168,4 m², COP_{Kälteanlage}: 2,5, Kühlung ab 22 °C

PV-System: A = 26 m², Neigung = 11°, Betrieb im MPP, η = 18 %

U-Werte [W/(m²*K)]: Wand = 0,127; Boden = 0,129; Dach = 0,095; Fenster = 0,61

Leistungen [kJ/h]: P_{Personen} = 1080; P_{Licht} = 5148; P_{Bildschirme} = 1008; P_{Kochen} = 7200

► Heizbedarf: 1890,4 kWh/a; Kühlbedarf: 1033,9 kWh/a; PV-Ertrag: 2099,0 kWh/a

Abbildung 5: Darstellung des untersuchenden Gebäudes mit Simulationsrandbedingungen und Ergebnissen. Grafik: Team NeKoEis

Zur Auslegung des Eisspeichers ist als Use-Case ein typisches Wohngebäude als Prosumer nach Abbildung 5 herangezogen worden. Als Testfall wurde ein Vier Personen-Haushalt in einem Passivhaus mit Nord-Süd-Ausrichtung definiert. Die Kühlfläche des Hauses beträgt 168 m². Die installierte Photovoltaikanlage hat eine Fläche von 26 m² und ist um 11 Grad Richtung Süden geneigt. Die Photovoltaikanlage wird im MPP (Maximum Power Point) betrieben. Aus der Gebäudesimulation wurde die jährliche PV-Leistung, die benötigte Kühllast sowie die Innentemperatur des Gebäudes ermittelt. Diese Parameter wurden zur Dimensionierung der Kälteanlage sowie des Eisspeichers herangezogen. Anhand der Umgebungstemperatur und der Einspeisetemperatur des Wasser-Glykol-Gemisches von -10 °C in den Eisspeicher konnte ein COP Wert für die Kälteanlage ermittelt werden. Aus der erzeugten Leistung der Photovoltaikanlage und des ermittelten COPs berechnet sich die ideale tatsächliche Kälteleistung, die mit der Kompressionskälteanlage erzeugt werden kann. Die Differenz zwischen dieser und der Kühllast des Gebäudes kann bei einem Wert größer als null in den Eisspeicher eingespeichert werden. Bei einem Wert kleiner als null muss der Eisspeicher zur Gebäudekühlung entladen werden. Summiert man nun diese Differenz am Beispiel einer Referenzwoche im Sommer auf, ergibt sich die Energie, die mit dem Eisspeicher mindestens aufgenommen werden muss. In diesem Use-Case entspricht das etwa 10 kWh. Durch Nutzung des Phasenwechsels von flüssig zu fest kann in diesem Fall rund 10 mal so viel Energie aufgenommen werden wie bei einem sensiblen Speicher. Aufgrund von Wärmeverlusten, von technischen Mindestanforderungen und da der Eisspeicher für weitere Forschungsvorhaben, wie zum Beispiel zur Verwendung als saisonaler Speicher, eingesetzt werden soll, ist eine Bauart der Firma Mefa Energy Systems GmbH ausgewählt worden. Der Eisspeicher hat eine prismatische Form, ist in Platten/Behälter-Bauweise aufgebaut, hat ein Volumen von rund 500 Litern und eine Kapazität von 30 kWh (Kälte bei 0 °C). Innerhalb des Eisspeichers sind sechs Absorber eingebaut, die als Plattenwärmetauscher ausgeführt sind. Damit ist eine Entladeleistung von circa 2,5 kW – was den Anforderungen des Use-Cases entspricht – möglich. Der Eisspeicher wird mit einem internen Schmelzsystem betrieben. Das bedeutet, dass der Wärmeübertrager in Wasser eingetaucht ist und sich die Eisschicht um den Wärmeübertrager aufbaut. Das Wasser-Glykol-Gemisch strömt dabei durch den Wärmeübertrager und nimmt Wärme auf (Eisspeicher wird geladen) oder gibt Wärme ab (Eisspeicher wird entladen). Mit Hilfe von Thermoelementen können die lokalen Temperaturen des Eisspeichers beim Be- und Entladen erfasst werden. Zur Überprüfung der theoretischen Berechnungen und der späteren Versuche aus dem Versuchsstand wurde ein Simulationsmodell des Systems aus Speicher sowie Be- und Entladeeinrichtung mithilfe einer objektorientierten Modellierung in DYMO-LA erstellt, um die Austauschbarkeit und Wiederverwendbarkeit von einzelnen Komponenten sowie die Erweiterbarkeit des Systemmodells zu erleichtern. So kann das Systemmodell leicht mit weiteren Komponenten, wie zum Beispiel einem elektrischen Speicher, erweitert oder angepasst werden.

Für erste, grundlegende Betrachtungen besteht das System aus einer Quelle (Photovoltaikanlage), die den produzierten PV-Strom über einen Wechselrichter je nach Bedarf an eine Kälteanlage weiterleitet oder in das Stromnetz einspeist. Sollte der produzierte Strom zur Deckung der Kältebelastung des Haushaltes nicht ausreichen, so wird die Differenz aus dem Netz bezogen. Die Kälteanlage wandelt den Strom über einen vorgegebenen COP in thermische Energie, in diesem Fall Kälte, um. Diese wird zur Deckung des Kühlbedarfs des Gebäudes verwendet. Überschüssige Kälte wird in den angeschlossenen Eisspeicher eingespeichert. Sollte die durch den PV-Strom produzierte thermische Energie nicht ausreichen, so wird zunächst der Speicher geleert, bevor das Stromnetz belastet wird.

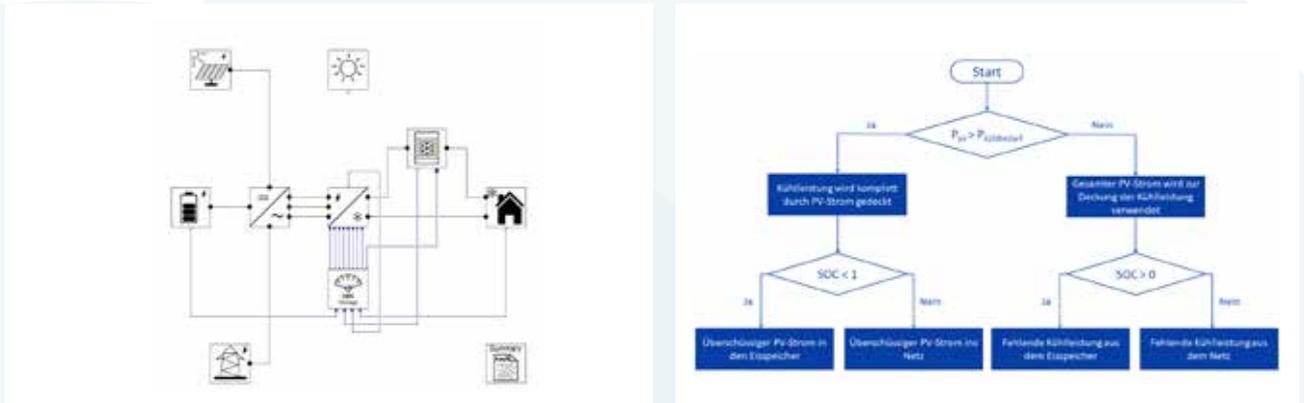


Abbildung 6: links: Dymola-Modell des Energiesystems, rechts: Steuerung des Energiesystems. Grafik: Team NeKoEis

Das Regelungskonzept im Modell ist im rechten Teil von Abbildung 6 als einfacher Entscheidungsbaum dargestellt. Das Ziel ist eine möglichst autarke Versorgung durch den PV-Strom und den Eisspeicher, sodass ein Bezug aus dem Stromnetz nur als letzte Lösung durchzuführen ist.

Es handelt sich dabei zunächst um ein idealisiertes Modell, bei dem Umwandlungs-, Lade- und Entlade- sowie Speicherverluste vernachlässigt wurden. Der PV-Ertrag sowie der Kühlbedarf des Gebäudes wurden aus Voruntersuchungen einer Referenzwoche im August als Lastprofile vorgegeben, der COP der Kälteanlage ist mit einem Wert von vier als konstant festgelegt. Die elektrische Last des Haushaltes spielt hier zunächst keine Rolle. Eine Begrenzung der Lade- beziehungsweise Entladeleistungen ist nicht vorgegeben. Durch eine Integration der ein- und ausgespeicherten Speicherleistung kann die aktuelle Speicherkapazität bestimmt werden. Wird diese durch die vorgegebene Maximalkapazität geteilt, erhält man den Ladezustand (State of Charge = SOC) des Speichers.

Durch die relativ große PV-Fläche ist der Stromertrag in der Sommer-Referenzwoche (60,7 kWhel beziehungsweise 242,8 kWhth mit $COP = 4$) deutlich höher als der Kühlbedarf des Gebäudes (28,2 kWhth). Trotzdem ist bei einer Simulation ohne Speicherung ein Netzbezug von 3,6 kWhel nötig. Das liegt an der zeitlichen Verschiebung zwischen Erzeugung und Bedarf (siehe Abbildung 7 links), die bei den fluktuierenden erneuerbaren Energien grundsätzlich auftritt. Dieses Ergebnis verdeutlicht den Bedarf an Speichertechnologien.

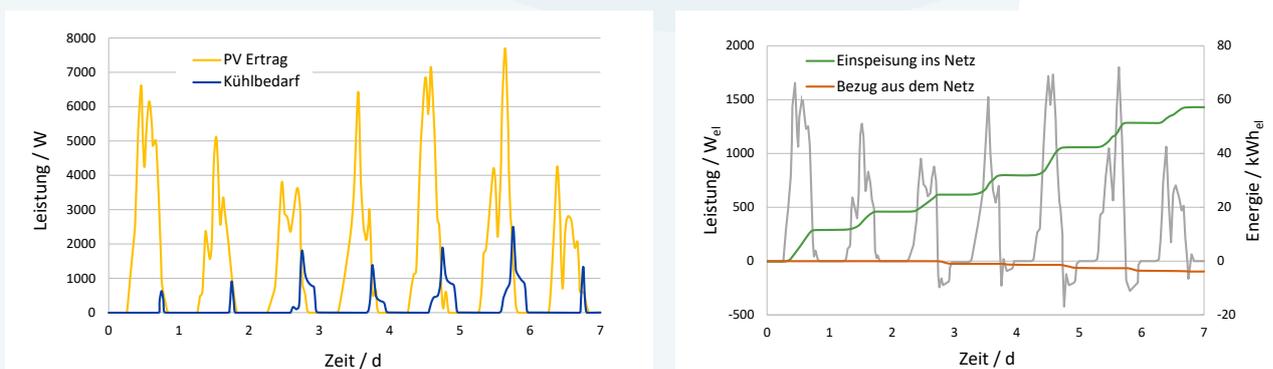


Abbildung 7: links: Ertrag der Photovoltaikanlage und Kühlbedarf des Gebäudes, rechts: Netzleistung und Energie ohne Speicher. Grafik: Team NeKoEis

Wird nun der Eisspeicher zugeschaltet, so kann der zusätzliche Strombedarf aus dem Stromnetz in der Testwoche komplett vermieden werden. Zusätzlich ist nach Ablauf der sieben Testtage ein Nettobetrag von 30,7 kWh thermischer Energie in Form von Kälte gespeichert. Es werden noch 46,0 kWh in das Stromnetz eingespeist. Eine Anpassung der Komponenten Photovoltaikanlage bezüglich Fläche und Eisspeicher bezüglich Speicherkapazität würden weitere Verbesserungen hinsichtlich der Effizienz bringen. Aufgrund von Nichtberücksichtigung der elektrischen Last des Gebäudes ist die PV-Anlage überdimensioniert. Durch Einbringung von einer Batterie als elektrischen Speicher sowie durch Berücksichtigung der elektrischen Last können hier realistischere Ergebnisse erzielt werden. Wie in Abbildung 8 links zu sehen ist, ist der Eisspeicher für die betrachtete Referenzwoche überdimensioniert, da die PV-Anlage deutlich mehr elektrische Leistung erzeugt als die Kälteanlage zur Kühlung des Gebäudes benötigt. Werden jedoch intelligente Regelungsstrategien berücksichtigt, die eine Effizienzsteigerung versprechen, kann ein größer dimensionierter Eisspeicher von Vorteil sein, da die Kälteanlage ausgeschaltet wird und die Kühlung ausschließlich über den Eisspeicher erfolgen kann.

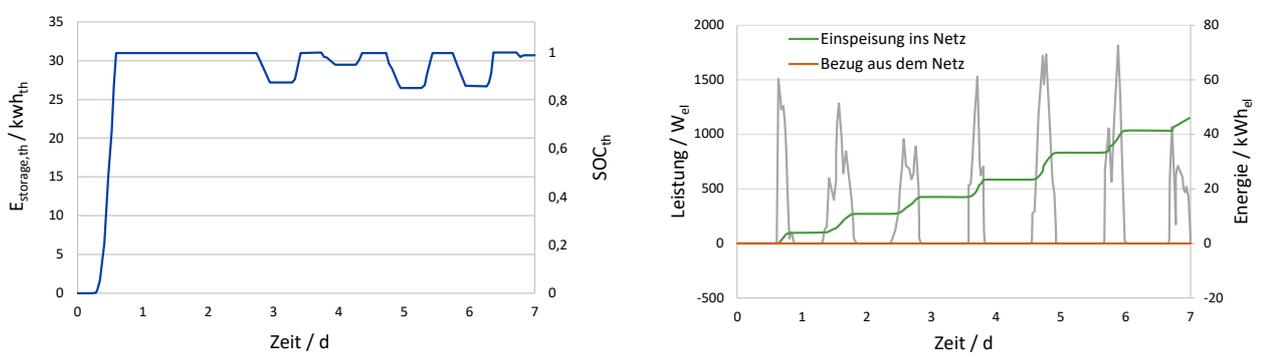


Abbildung 8: links: SOC und gespeicherte Energie des Eisspeichers, rechts: Netzleistung und Energie mit Speicher. Grafik: Team NeKoEis

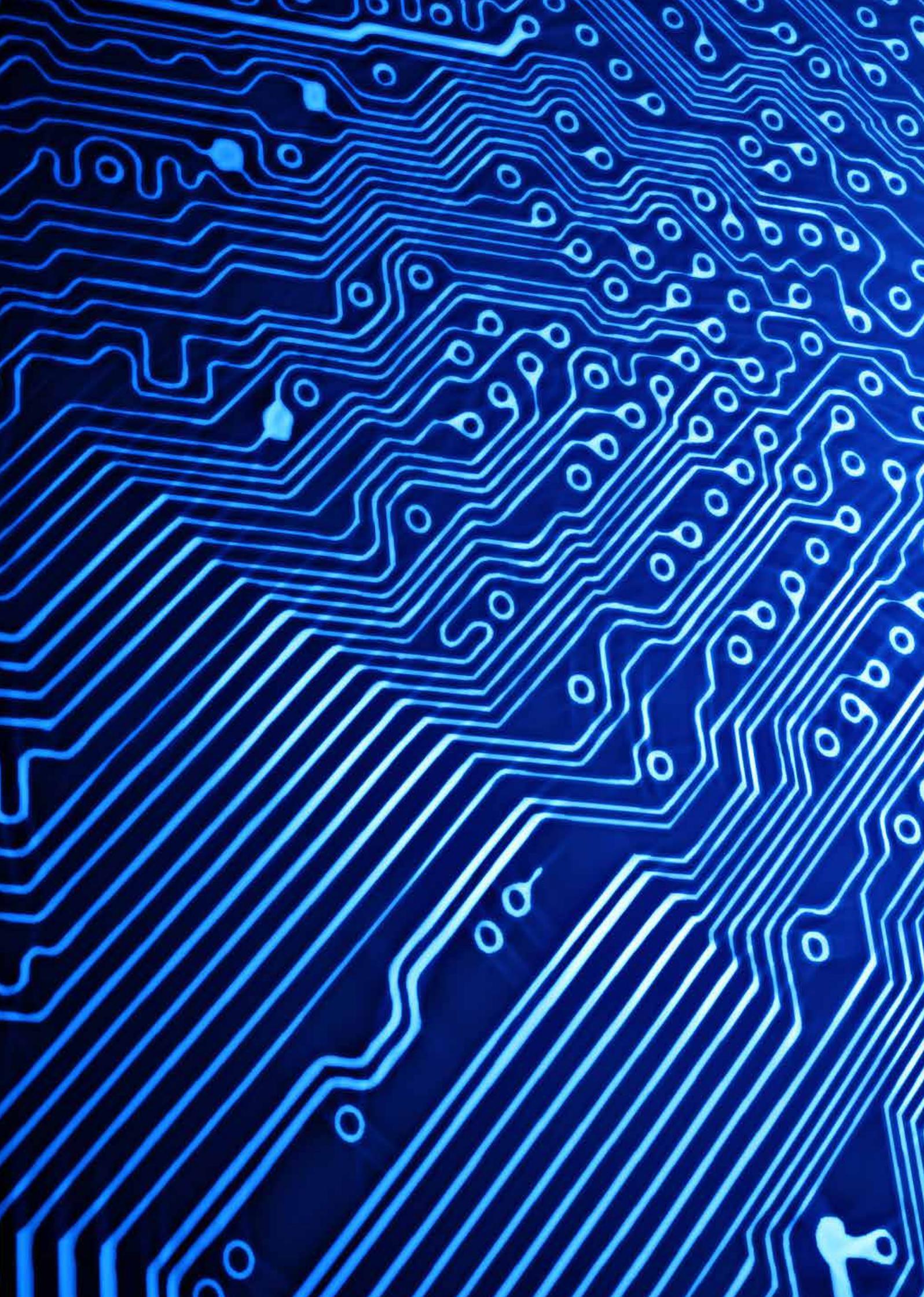
5. Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

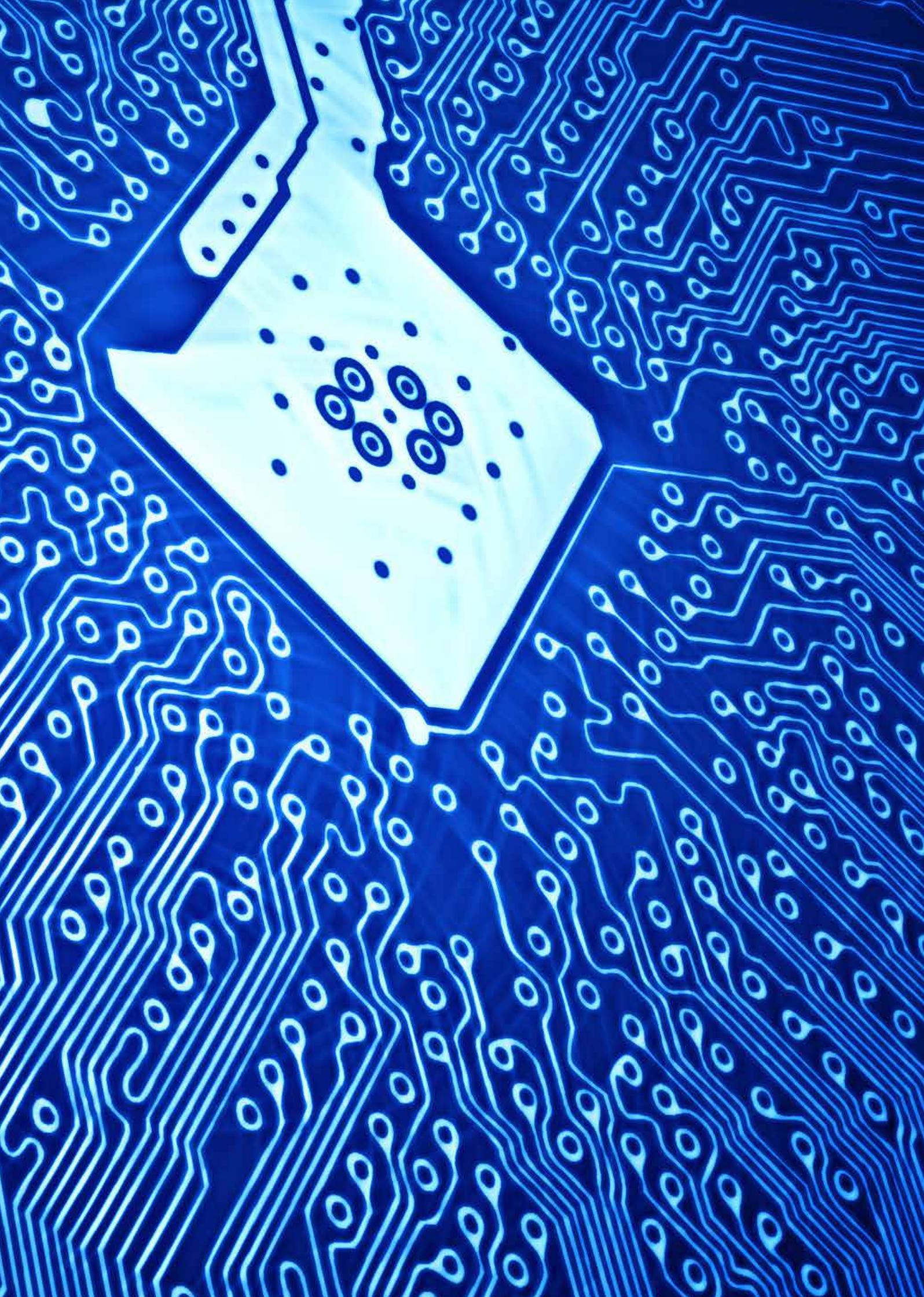
Durch die Förderung dieses Vorlauftforschungsprojektes konnten die experimentellen und simulativen Voraussetzungen für eine weitergehende Forschung und einen Förderantrag geschaffen werden. Ziel dieses Förderantrags wird Entwicklung einer modellprädiktiven Regelung sein. Hierfür müssen die Eisbildung und das Schmelzverhalten von Eis im Speicher bei Teilbelastung sowie der Informationsaustausch (Prädiktion) für Stromnetze in zelluläre Energiesysteme untersucht werden. Ein Thema, das einer wissenschaftlichen Mitarbeiterin oder einem wissenschaftlichen Mitarbeiter eine Finanzierung und die Möglichkeit zu einer kooperativen Promotion bieten soll. Vor allem kleinere und mittlere Unternehmen aus den Bereichen der Energie- und Versorgungstechnik kommen als Kooperationspartner in Frage. Durch das Technologietransferprojekt InnoProSys ist die Antragstellerin oder der Antragsteller mit einer Reihe von Firmen aus dem Bereich der Energietechnik in der Metropolregion Nürnberg vernetzt. Mögliche Förderprogramme für das Folgeprojekt sind unter anderem Hochtechnologien für das 21. Jahrhundert (Bayerische Forschungstiftung), KMU-innovativ: Ressourceneffizienz und Klimaschutz (BMBF), 7. Energieforschungsprogramm (BMW), Horizont 2020 – Rahmenprogramm für Forschung und Innovation (EU), Forschung für nachhaltige Entwicklungen (FONA3) (Rahmenprogramm) (BMBF) sowie das Promotions-Stipendium der Deutschen-Bundesstiftung Umwelt.

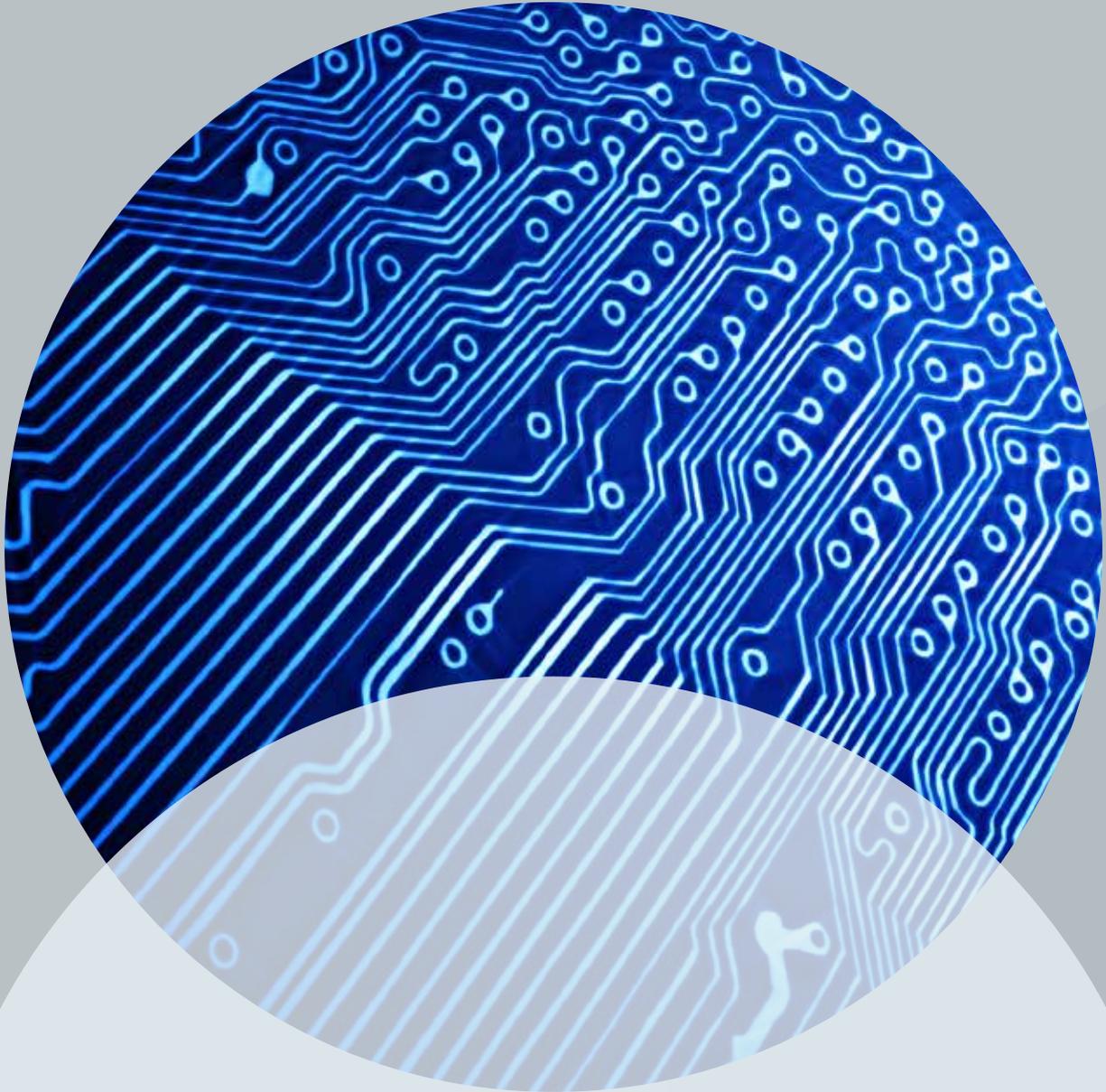
Das erstellte Simulationsmodell soll in einem nächsten Schritt optimiert und an die Messdaten angepasst werden. Optimierungspotenzial besteht bei den Speicherverlusten und der örtlich detaillierten Abbildung des Erstarrens und Schmelzens von Eis im Eisspeicher (2), um so den Ladezustand des Speichers in einem dynamischen Modell besser darstellen zu können. Ein weiteres Ziel könnte die Erweiterung des Eisspeichermodells auf andere PCM-Materialien und unterschiedliche geometrische Bauformen des Speichers sein.

6. Literatur

1. Sterner M., Stadler I.: Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration. Berlin: Springer-Verlag, 2017.
2. Günzel S.: Thermische Modellierung und Simulation eines Kältespeichers mit makroverkapselten Phasen-Wechsel-Material. s.l.: Master Thesis, TH Nürnberg, 2019.







Embedding and Printing (EmbPrint)

Prof. Dr. Marcus Reichenberger
Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik
TH Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Mehr und mehr Produkte des täglichen Lebens sind mit Sensoren, Aktoren, Antennen und Displays ausgestattet, um zu kommunizieren und mit der Welt zu interagieren. Um die dafür erforderliche Funktionsintegration zu erreichen, müssen innovative Aufbautechniken eingesetzt werden. Im Rahmen des Projektes wird untersucht, inwiefern die Technik der mechatronisch integrierten Baugruppen – die zahlreiche Vorteile wie die Miniaturisierbarkeit oder die Integration von Elektronik in Strukturbauteilen bietet – mit der aus der planaren Leiterplattentechnik bekannten Einbetttechnik für elektronische Bauteile sowie der Technik der gedruckten Elektronik erfolgreich kombiniert werden kann. Die Vorteile dieser Kombination liegen in einer weiter gesteigerten Integrationstiefe für entsprechend aufgebaute mechatronische Systeme. Die Studie soll den Nachweis des Proof of Concept liefern, also die prinzipielle Machbarkeit belegen.

1. Projektdaten

Fördersumme	33.000 Euro
Laufzeit	Februar bis Dezember 2019
Fakultät / Institut	Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik, Institut OHM-CMP
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Marcus Reichenberger
Kontaktdaten	marcus.reichenberger@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Das Einbetten elektronischer Bauteile (Component Embedding) in herkömmliche Leiterplatten anstelle der Bestückung von Bauelementen auf Leiterplattenoberflächen (Oberflächenmontage) ist seit Ende der 1990er Jahre Gegenstand umfangreicher internationaler Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Mittlerweile sind erste Serienprodukte auf dem Markt erhältlich, von einem flächendeckenden Einsatz dieser Technologie ist man allerdings noch weit entfernt. Beim Component Embedding werden ursprünglich für die Oberflächenmontage konzipierte elektronische Bauteile mittels Löt- oder Klebeverbindungen auf Innenlagen von Leiterplatten aufgebracht. Durch Anpassung der Leiterplattenherstellung (Lagenaufbau und Pressprozesse) wird so ein funktionsintegrierter, nach außen planarer Schaltungsträger realisiert.

Neben der herkömmlichen Leiterplattentechnik wird seit Jahren ein steigendes Interesse für mechatronisch integrierte Module (Mechatronic Integrated Devices, MID) verzeichnet. Diese Baugruppen können mechanische, elektrische/elektronische sowie weitere Funktionen beinhalten. Sie werden meist komplett additiv gemäß nachfolgender (vereinfachter) Prozessfolge hergestellt: Kunststoffspritzguss, Funktionalisierung mit einem Leiterbild, Komplettierung durch Bestückung mit elektronischen Bauteilen. Mittlerweile gibt es Ansätze, auch keramische Grundmaterialien einzusetzen, was den Anwendungsbereich von MID auch im Bereich der Leistungselektronik ermöglichen könnte. Ebenso wie in der traditionellen Leiterplattenproduktion werden notwendige elektronische Bauteile auf der Moduloberfläche bestückt, so dass auch hier durch das Einbetten der Bauelemente Vorteile – wie etwa der mechanische Bauteilschutz, Manipulationsschutz, bessere Wärmeableitung etc. – zum Tragen kommen können. Anders als bei den planaren Leiterplatten müssen die Bauteile in Kavitäten gesetzt, dort fixiert und anschließend mit dem Leiterbild kontaktiert werden. Über erste prototypische, meist manuelle Realisierungen hinausgehende systematische Untersuchungen zum Einbetten elektronischer Bauteile in additiv hergestellte mechatronisch integrierte Module existieren heute nicht.

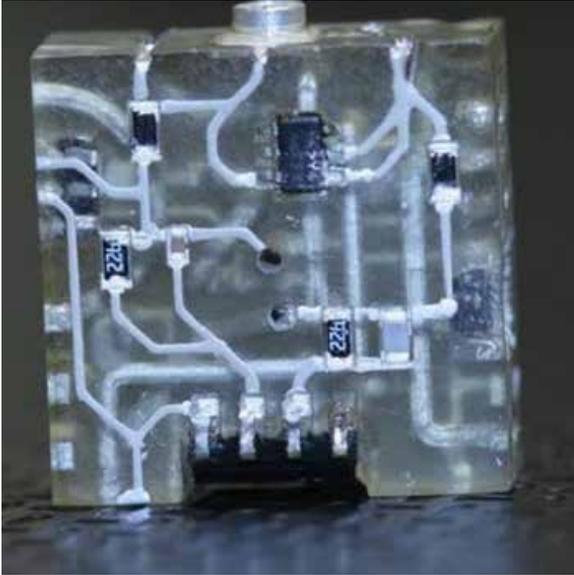


Abbildung 1: Prototypische Realisierung einer Baugruppe mit eingebetteten Bauteilen (Quelle: E. Macdonald et al.: 3D Printing for the Rapid Prototyping of Structural Electronics, IEEE Access, Volume 2, 2014, Seiten 234 – 242)

3. Ziele des Forschungsprojekts

Da heute bisher nur wenige Erkenntnisse zum Einbetten elektronischer Bauteile in spritzgegossene Schaltungs-träger vorliegen, sind grundlegende Untersuchungen zu diesen Fragestellungen notwendig. Im Rahmen dieses Vorlauforschungsprojektes sollen weitergehende Untersuchungen zur Machbarkeit des oben genannten Ansatzes durchgeführt werden. Da hierbei keine übergreifende Untersuchung der denkbaren alternativen Ansätze erfolgen kann, untersuchen die Forschenden im Projekt exemplarisch den Einsatz der herkömmlichen und digitalen Drucktechnik (Dispensen und Piezo Jetting) für die Kontaktierung der eingebetteten elektronischen Bauteile mittels elektrisch leitfähiger Pasten (Abbildung 2).

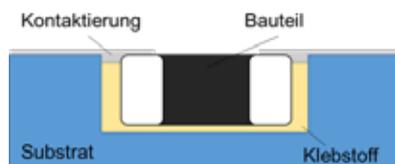


Abbildung 2: Prinzipskizze zur Illustration des Vorhabens. Grafik: Reichenberger

Im Projekt erarbeitet das Team vor diesem Hintergrund Antworten auf zwei grundlegende Fragen:

- Unter welchen Bedingungen lassen sich ausgewählte Packungsformen elektronischer Bauteile mittels angepasster Einbettmaterialien in Kavitäten fixieren? Voraussetzung für das Einbetten ist das Vorhandensein von Kavitäten in den additiv hergestellten Trägerbaugruppen. So sind zunächst unter Berücksichtigung mechanischer Bauteiltoleranzen ein Trägerkörper zu entwerfen und ein Werkzeugeinsatz zu konstruieren. Mit Unterstützung eines externen Partners werden dann spritzgegossene Prüfkörper hergestellt. Parallel wird – abgestimmt auf den Prüfkörperwerkstoff – ein potenziell geeignetes Einbettmaterial unter Berücksichtigung technologischer und materialkundlicher Aspekte wie Benetzungsverhalten, thermische Beständigkeit oder thermischer Ausdehnungskoeffizient ausgewählt und beschafft. Anschließend wird in methodisch und strukturiert durchgeführten Prozessuntersuchungen der Einbettprozess entwickelt. Ziel ist dabei eine reproduzierbare Einbettung mit möglichst komplett umlaufender Spaltüberbrückung zwischen Bauteil und Kavität. Untersuchungen mittels Laseroberflächenprofilometrie oder metallographischer Schlitte können Aufschluss über die Natur des Einbetergebnisses geben.
- Besteht das Potenzial, mit Einsatz von Piezojet- oder anderen digitalen Auftragsverfahren eine sichere elektrische Kontaktierung zu ermöglichen? Nach Erreichen von Teilziel 1 liegen Trägerkörper mit eingebetteten elektronischen Bauteilen vor. Nachfolgend wird untersucht, ob und wie eine sichere elektrische Kontaktierung der

eingebetteten Bauteile erfolgen kann. Dabei greifen die Forschenden auf alternative Druckverfahren zurück. In Abhängigkeit von resultierendem Materialwulst und Bauteilhöhe werden die sich ergebende Druckqualität (Linienbreite, Ausbluten) sowie die Güte der elektrischen Anbindung bewertet. Auf Basis dieser Ergebnisse kann man einschätzen, ob und gegebenenfalls unter welchen zusätzlichen Randbedingungen, die im Rahmen dieses Kurzprojektes nicht näher analysiert werden können, ein Umsetzungspotenzial besteht.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Die Vorgehensweise bei der Bearbeitung des Projekts lässt sich in vier Phasen einteilen:

- Konstruktion und Beschaffung des polymeren Testkörpers als Substrat für die Einbettuntersuchungen
- Anforderungsanalyse, Recherche, Auswahl und Beschaffung eines geeigneten Einbettmaterials
- Durchführung und Auswertung der Einbettuntersuchungen
- Durchführung und Auswertung der Kontaktierungsuntersuchungen

Im Folgenden soll kurz auf die beiden ersten Punkte eingegangen werden, bevor die eigentlichen Technologieuntersuchungen und deren Ergebnisse diskutiert werden.

Als Testkörper wurde ein quadratischer Körper mit einer Kantenlänge von 60 mm und einer Dicke von 2 mm entworfen und nach Abstimmung mit einem Dienstleister aus der glasfaserverstärkten, duroplastischen Formmasse Duresco NU 6110 T des Hersteller Duresco GmbH im Spritzgussprozess hergestellt. Die Wahl fiel auf dieses Material, da es infolge seines relativ geringen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von etwa 25 ppm/K – 30 ppm/K eine gute Anpassung an die entsprechenden Eigenschaften elektronischer Bauteile aufweist. Eine Übersichtsdarstellung des Testkörpers findet sich in Abbildung 3. Der Körper verfügt über Kavitäten für das Einbetten elektronischer Bauteile des Typs CR1206 (Größe 3,2 mm x 1,6 mm x 0,5 mm) sowie für weitere elektronische Bauteile, die allerdings aufgrund zu hoher Bauteilkosten im Laufe der Projektbearbeitung keine Berücksichtigung finden konnten.

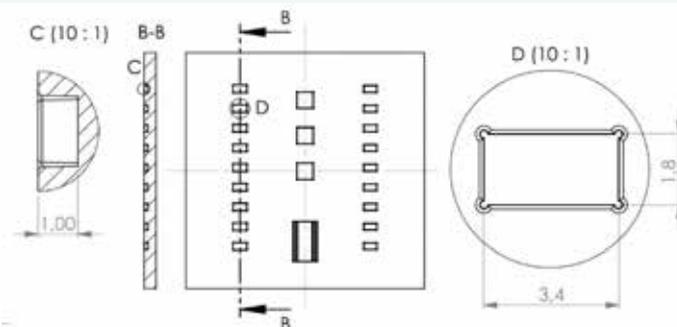


Abbildung 3: Skizze des konstruierten Testkörpers mit Kavitäten. Grafik: Schirmer

Parallel zur Beschaffung der Testkörper haben die Forschenden im Zuge der Marktrecherche ein geeignetes Einbettmaterial identifiziert. Nach einer Vorauswahl wurden drei potenziell geeignete Klebstoffe in Hinblick auf eine Verwendung näher analysiert. Die an den Fixierklebstoff gestellten wesentlichen Anforderungen waren ein relativ niedriger thermischer Ausdehnungskoeffizient, ein gutes Haftvermögen auf unterschiedlichen Materialien sowie eine mögliche UV-Härtbarkeit des Materials. Die Wahl fiel letztlich auf das Material Vitralit DU 5134 der Firma Panacol-Elosol GmbH. Es ist speziell zum Fixieren elektronischer Bauteile geeignet und weist von allen recherchierten Materialien mit knapp 50 ppm/K den niedrigsten thermischen Ausdehnungskoeffizienten auf. Der Klebstoff ist aufgrund seiner niedrigen Viskosität mittels Dispensen gut in Kavitäten applizierbar sowie bei einer Wellenlänge von 365 nm - 405 nm und einer Leistung von 40 mW/cm² UV-härtbar.

Im weiteren Projektverlauf hat das Team dann die Grundlagen für das Einbetten der chipförmigen Bauteile erarbeitet. Dabei standen zunächst die Bestimmung der erforderlichen Klebstoffvolumina sowie die Entwicklung des Dosierprozesses für den ausgewählten Fixierklebstoff im Zentrum der Untersuchungen. Unter Berücksichtigung von Bauteil- und Schaltungsträgertoleranzen sowie Klebstoffschwindung beim Aushärten wurde das theoretisch

zu applizierende Klebstoffvolumen ermittelt, mit dem ein komplettes Einbetten des Bauteils ohne Klebstoffaustritt an der Schaltungsträgeroberseite möglich ist. Unter Berücksichtigung maschinenspezifischer Parameter des eingesetzten Dispenssystems Musashi Super Sigma X-V2 konnte dieses Zielvolumen $V = 0,5 \text{ mm}^3$ relativ prozesssicher erzielt werden. Nach Ermittlung der grundsätzlich geeigneten Dispensparameter galt es, eine geeignete Einbett- und Aushärtestrategie unter Berücksichtigung der im Labor vorhandenen Ausstattung für Bauteilplatzierung und UV-Aushärtung des Klebstoffs zu entwickeln. Dabei wurde ausschließlich der Ansatz des Klebstoffdispensens mit nachfolgender Bauteilbestückung verfolgt.

Um eine sichere elektrische Verbindung der eingebetteten Bauteile zu ermöglichen, müssen diese nach dem erfolgreichen Einbetten mithilfe einer applizierten Leitpaste kontaktiert werden. Zur Sicherstellung dieser Verbindung ist es eine unabdingbare Anforderung an die eingesetzte Einbettstrategie, dass beim Bestückvorgang der Spalt zwischen Kavität und Bauteil annähernd komplett ohne Fehlstellen gefüllt wird, ohne die Oberseite des Bauteils zu verunreinigen. Besonders wichtig ist die Einhaltung dieser beiden Bedingungen im Bereich der Anschlusskontakte der Bauteile. Beim Vorliegen von nicht gefüllten Spalten im Anschlussbereich besteht nämlich beim späteren Applizieren des Anschlusses und der Leiterbahn das Risiko eines unkontrollierten Verfließens des Leitmaterials infolge der Kapillarwirkung. Funktionsverlust ist die Folge.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass zum einen die Dosiergenauigkeit des Dispenssystems begrenzt ist und zum anderen die Abmessungen der Bauteile und Kavitäten herstellbedingten Schwankungen unterworfen sind. Zudem wird der in die Kavität applizierte Klebstoff infolge seiner geringen Dichte und Viskosität im nicht gehärteten Zustand einem in die Kavität bestückten Bauteil zunächst keinen Widerstand gegen das Einsinken des Bauteils entgegensetzen. Die Verschmutzung der Bauteilanschlusskontakte durch überlaufenden Klebstoff ist dabei eine nicht vermeidbare Konsequenz. Anders als industrielle Präzisionsbestückssysteme verfügt das im Labor vorhandene manuelle Bestückssystem nicht über die Möglichkeit des verzögerten Bauteilabsetzens beispielsweise nach UV-Härtung des Klebstoffs. Insofern galt es, eine Lösung zu finden, mit der ein optimales mittleres Dosiervolumen appliziert werden kann und die ein Einsinken der Bauteile vermeidet, dennoch aber eine sichere Fixierung und vollständige Aushärtung des Klebstoffs ermöglicht. Im Zuge systematischer Prozessuntersuchungen konnten die Wirkzusammenhänge bei Dispensen, manuellem Bestücken und UV-Aushärten sehr gut erfasst und auf dieser Basis eine letztlich geeignete Strategie sowie der dazu gehörige Fertigungsprozess im Labormaßstab entwickelt werden. Die ausgewählte Prozessvariante zeichnet sich durch das Dispensen dreier identischer Klebstoffvolumina mit einem Gesamtvolumen $V = 0,5 \text{ mm}^3$ aus, die unmittelbar vor der Bauteilbestückung kurz angehärtet werden, um die Klebstoffviskosität zu erhöhen. Bei Platzieren der Bauteile steigt infolge der Volumenverdrängung das Klebstoffniveau in der Kavität an, eine Benetzung der Bauteilmetalisierungen oder ein weiteres Absinken des Bauteils werden allerdings, soweit dies im Labormaßstab sichergestellt werden kann, vermieden. Der beschriebene Lösungsweg sowie die eingesetzten Parameter sind in Abbildung 4 dargestellt.

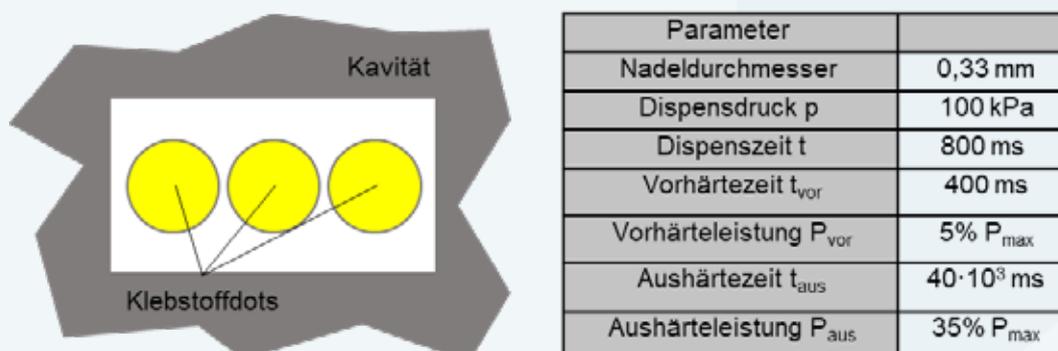


Abbildung 4: Illustration der Dosierstrategie und Auflistung der Dosierparameter. Grafik: Güroglu, Hahn, Pach, Pest

In der abschließenden Untersuchung wurden 45 Bauelemente gemäß der beschriebenen Strategie in fünf Substrate eingebettet und das Ergebnis durch visuelle Inspektion bewertet. Die Forschenden haben festgestellt, dass

bei in Summe 90 inspizierten Bauteilanschlüssen 78 Bereiche akzeptable bis gute Klebstofffüllung im kompletten Anschlussbereich aufwiesen. Bei zwölf untersuchten Bereichen konnte keine ausreichende Füllung und damit deutliche Spaltbildung zwischen Substratkavität und Bauteilanschluss attestiert werden. Zur Illustration sind in Abbildung 5 zwei Ergebnisse gegenübergestellt. Während auf der rechten Abschlusseite der linken Abbildung ein nicht mit Klebstoff ausgefüllter Hohlraum zu erkennen ist, sind in der rechten Abbildung keine Fehler in den besonders kritischen Anschlussbereichen des Bauteils zu erkennen. Ein Verfließen des später aufgetragenen Leitmaterials ist hier ausgeschlossen.

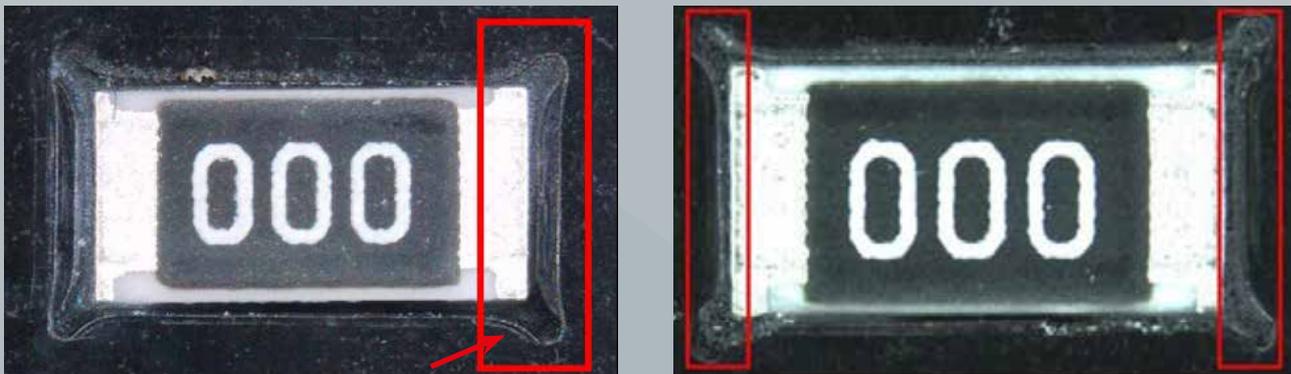


Abbildung 5: Gegenüberstellung eines unzureichenden (links) und eines perfekten Einbattergebnisses (rechts) im Anschlussbereich des CR 1206. Foto: Güroglu, Hahn, Pach, Pest

Zur Bewertung der tatsächlichen Füllhöhe sind visuelle Beurteilungen allerdings nicht geeignet. Diese können in einem ersten Ansatz Gut-/Schlecht-Entscheidungen ermöglichen, ersetzen allerdings nicht einen exakten Messprozess. Zur Bewertung bieten sich unterschiedliche Verfahren an, wobei die Entscheidung auf die Vermessung mittels Weißlichtinterferometrie fiel. Bei diesem Verfahren kann berührungslos eine zerstörungsfreie 3D-Vermessung der Oberflächenstruktur durchgeführt werden. Das Verfahren zeichnet sich durch eine hohe Auflösung in z-Richtung aus, die beim eingesetzten Messsystem Nanofokus μ scan etwa $0,1 \mu\text{m}$ beträgt. Die laterale Auflösung beträgt dagegen je nach Messeinstellung $1 \mu\text{m}$ bis $100 \mu\text{m}$. In der nachfolgenden Abbildung 6 ist exemplarisch das Ergebnis der erfolgreichen Bauteileinbettung nach dem oben beschriebenen Verfahren zunächst in der 3D-Ansicht eines Bauteils sowie daneben als mittig durchgeführter Linienscan eines weiteren Bauteils illustriert.

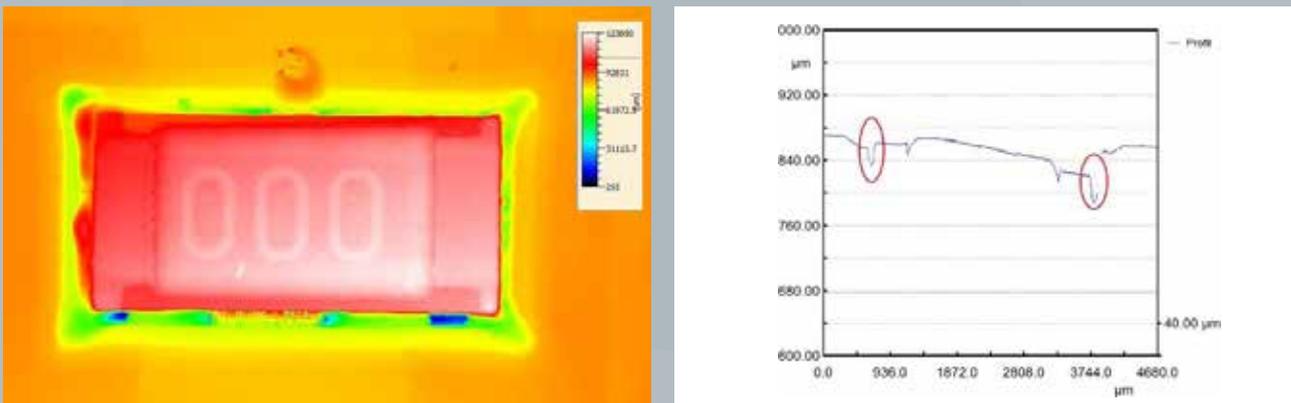


Abbildung 6: Übersichtsdarstellung eines eingebetteten Bauteils im 3D-Oberflächenscan (links), Liniensmessungen der Oberfläche eines zweiten Bauteils (rechts). Foto: Güroglu, Hahn, Pach, Pest

Es ist gut erkennbar, dass das Widerstandsbauteil zwar leicht über der Kavität steht, jedoch sind alle Spalte vollständig mit Kleber gefüllt. Lediglich die blau dargestellten Bereiche an der unteren Kante markieren kleine, allerdings unkritische Fehlstellen außerhalb des Anschlussbereiches. Im mittig durchgeführten Linienscan sieht man in diesem Ergebnis, dass der Spalt zwischen Bauteil und Kavitätsrand fast vollständig mit Klebstoff gefüllt ist. Die verbleibende Vertiefung von etwa $20 \mu\text{m}$ - $40 \mu\text{m}$ gegenüber der Oberfläche des Substrates ist als unkritisch anzusehen. Somit ist eine spätere Kontaktierung der Widerstände problemlos möglich, die Gefahr einer Fehlkon-

taktierung durch Kapillareffekte besteht nicht. Auffällig ist die Schiefelage des eingebetteten Widerstandes. Dies könnte jedoch an dem Einbettvorgang an sich liegen, da alle Widerstände manuell eingesetzt wurden und dabei leichte Kippfehler unvermeidbar sind.

Nach erfolgreicher Einbettung der Widerstände galt es, diese elektrisch zu kontaktieren. Dies erfolgt durch den strukturierten Auftrag elektrisch leitfähiger Pasten sowie deren nachträgliches thermisches Aushärten. Hierfür wurden drei unterschiedliche Methoden untersucht:

- Siebdruck: Flächiger Auftrag der leitfähigen Paste mittels eines strukturierten Siebs; nur für ebene Oberflächen geeignet; Referenzprozess
- Dispensen: Kontinuierlicher, linien- oder punktförmiger Auftrag der leitfähigen Paste mittels einer geführten Dosiernadel; zum Materialauftrag auf ebenen und dreidimensionalen Oberflächen einsetzbar
- Jetten: Diskontinuierlicher, berührungsloser Auftrag diskreter Pastendepots, durch Überlagerung Erzeugung von Linien möglich; zum Materialauftrag auf ebenen und dreidimensionalen Oberflächen einsetzbar

Exemplarische Ergebnisse der drei untersuchten Kontaktierverfahren sind in Abbildung 7 dargestellt.

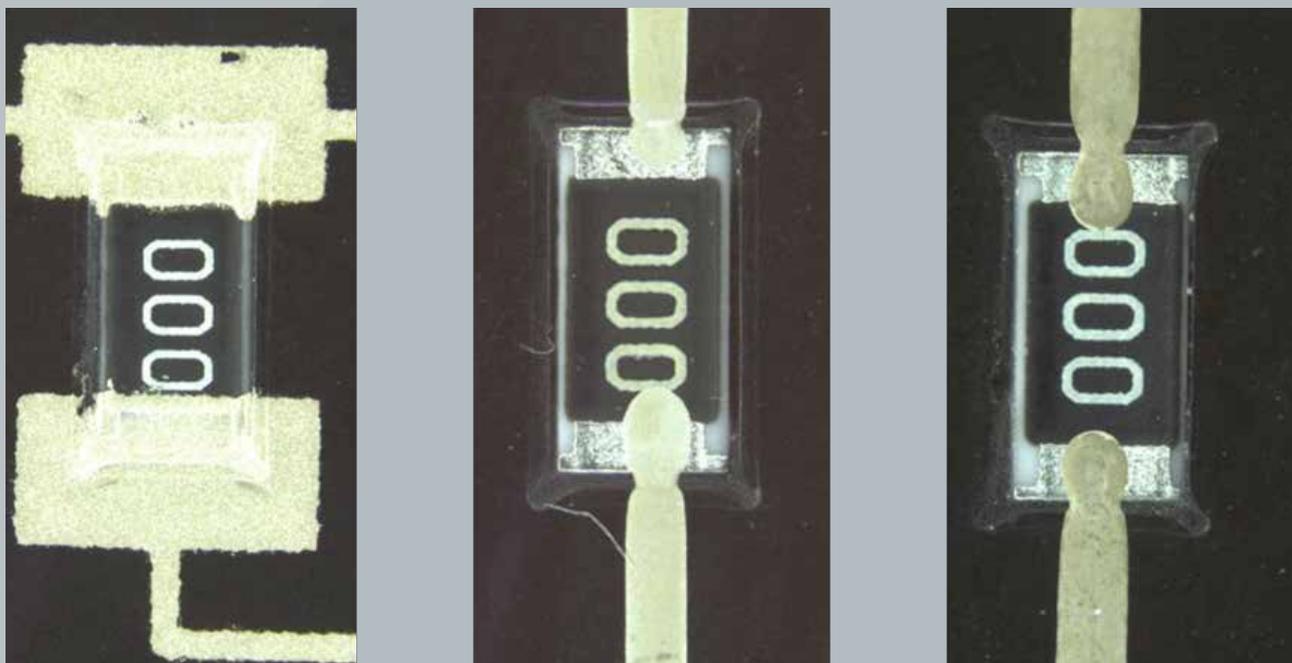


Abbildung 7: Gegenüberstellung der Kontaktierungsvarianten Siebdruck (links), Dispensen und Piezojetten (rechts). Foto: Güroglu, Hahn, Pach, Pest

Die in Abbildung 7 erkennbaren Unterschiede lassen sich wie folgt erläutern. Durch das gewählte Drucksieb wird eine sehr breite Anschlussfläche realisiert. Dadurch ist die Kontaktierung des kompletten Bauteilanschlusses gewährleistet. Demgegenüber wurde bei den zwei digitalen Auftragsverfahren Dispensen und Piezojetten bewusst lediglich die Kontaktierung mittels einer einzigen schmalen Leiterstruktur realisiert. Alle drei Varianten führen zu guten und sicheren Kontaktsergebnissen, die sich im Hinblick auf den erzielten elektrischen Widerstand bei Berücksichtigung der vorliegenden Kontaktfläche und Leiterbahnquerschnitte kaum unterscheiden. Auffällig ist jedoch, dass Kontaktierungen mittels Jetten oder Dispensen leichte Einschnürungen im Übergangsbereich zwischen Substrat und Bauteil aufweisen. Zu einem Ausbluten des Klebstoffs, also etwa dem unkontrollierten Fließen in leichte Vertiefungen, kommt es allerdings in keinem Fall.

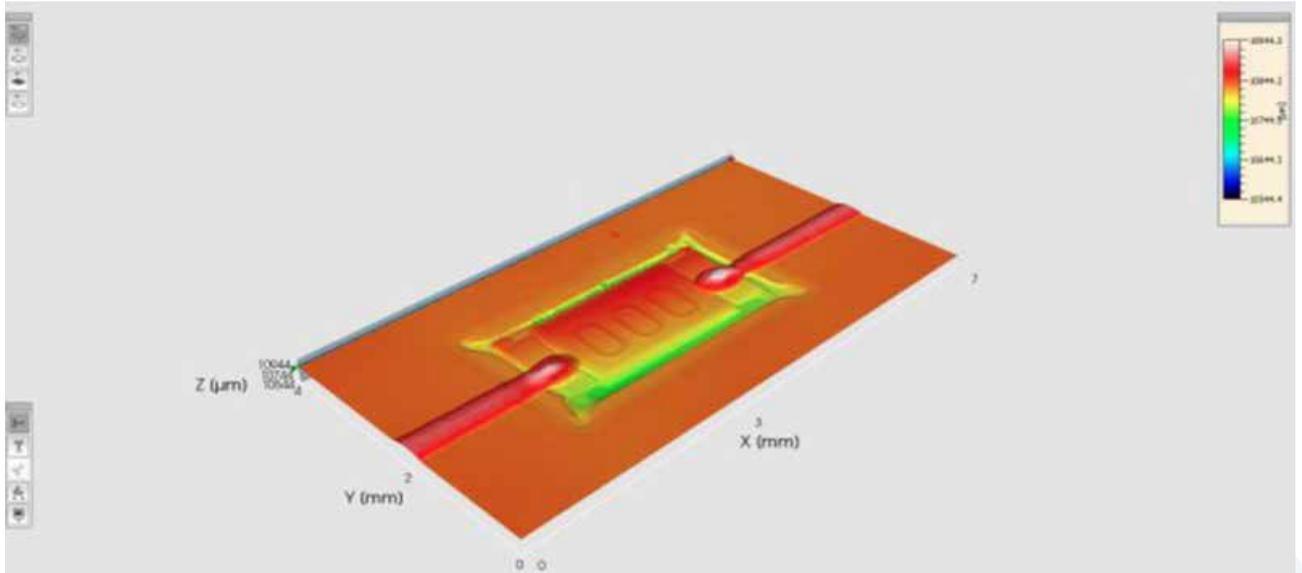


Abbildung 8: 3D-Oberflächenscan eines mittels Dispensen kontaktierten eingebetteten Bauteils. (Quelle: Schweizer Electronic AG). Foto: Güroglu, Hahn, Pach, Pest

Wie oben dargestellt, ist in diesem Bereich mit Vertiefungen als Folge des Einbettvorgangs oder/und mit einem leichten Hochstehen der Bauteile zu rechnen. Die erkennbaren Einschnürungen liegen wohl im Fließverhalten (Viskosität, Thixotropie) der für das Jetten und Dispensen eingesetzten Aggefüllten Leitpaste begründet. Dadurch können leichte Vertiefungen/Erhöhungen zu Struktureinschnürungen führen. Das eingesetzte Material ist aufgrund seiner höheren Fließfähigkeit anfällig für Vertiefungen und neigt zu Kapillareffekten. Aufgrund des geringen Dosiervolumens und der damit verbundenen niedrigen Schichtdicke hat ein Einsinken der Silberleitpaste eine Durchmessererschmälerung zur Folge. Die für den Siebdruck eingesetzte Leitpaste weist dagegen eine deutlich geringere Viskosität auf, so dass ein Verfließen kaum auftritt.

Nachfolgend ist exemplarisch ein Schaltungsträger mit eingebetteten CR 1206 Bauteilen gezeigt, bei dem die Bauteile mittels Siebdruck kontaktiert wurden.

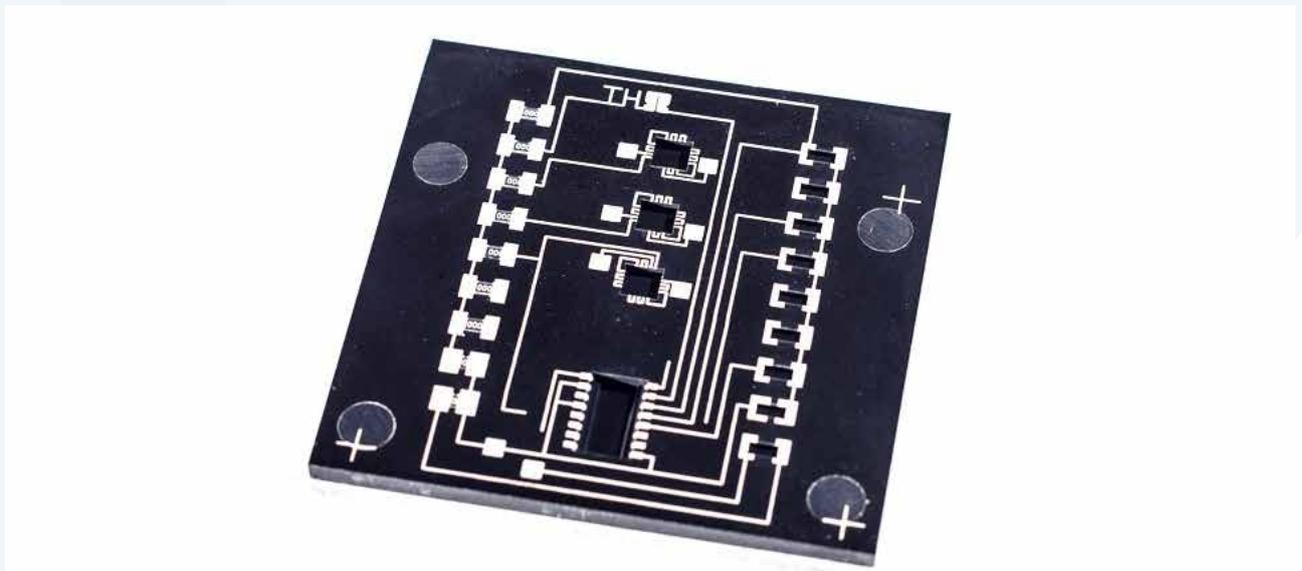


Abbildung 9: Foto eines mit eingebetteten Bauteilen versehenen Schaltungsträgers (Kontaktierung mittels Siebdruck). Foto: Schuller

5. Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Der erzielten Ergebnisse sind, trotz aller Einschränkungen aufgrund der teilweise manuell durchgeführten Teilschritte, eine gute Grundlage für weiterführende Untersuchungen. Die Forschenden konnten aufzeigen, dass das Einbetten elektronischer Bauteile und Kavitäten mit anschließendem Kontaktieren grundsätzlich möglich ist. Der positive Machbarkeitsnachweis ist damit geführt. Um dabei eine niedrige Fehlerrate zu erreichen, sind allerdings hochautomatisierte Verarbeitungsprozesse mit entsprechender Prozessüberwachung erforderlich. So würde eine adaptive Dosierung der erforderlichen Klebstoffmenge nach einer Volumenvermessung von Kavitäten und Bauteil, kombiniert mit einem angepassten Bestückprozess (Bauteil wird bei simultaner UV-Bestrahlung solange gehalten bis der Klebstoff fixiert ist), zu optimalen Füllgraden führen.

Studentische Arbeiten:

Aktuell werden Fragestellungen, die sich im Verlauf der Bearbeitung dieses Projektes ergeben haben, in einem M-APR-Projekt untersucht. Im Rahmen des bis Ende September 2020 angesetzten Projektes werden unter anderem Einbettstrategien für elektronische Bauteile in mittels FFF (Fused Filament Fabrication) hergestellte mechatronische Grundkörper untersucht. Die im Vorlaufforschungsprojekt erzielten Ergebnisse fließen direkt in dieses Projekt ein.

Folgeprojekte:

Im November 2019 wurde beim Projektträger AiF Projekte GmbH der ZIM-Antrag zum Kooperationsprojekt DD-MID (Entwicklung einer Prozess- und Qualitätsstrategie zur Funktionalisierung von spritzgegossenen Schaltungsträgern mittels Dickschicht-Druck für dicht gepackte Hochleistungsanwendungen) zusammen mit zwei Industriepartnern eingereicht. Im Projekt möchten die Teams funktionalisierte Schaltungsträger durch den Einsatz innovativer Druckmaterialien und -verfahren mit dem Spritzgießen (als großserientaugliches Urformverfahren) zu einem robusten, verketteten Prozessablauf zusammenführen. Das Einbetten elektronischer Bauteile kann im Rahmen des Projekts relevant werden, wenn zur Erreichung bestimmter Funktionalitäten Vorgaben hinsichtlich des Baugruppenvolumens oder anderer geometrischer Größen eingehalten werden müssen. Dabei können die Ergebnisse des Vorlaufforschungsprojektes als Startpunkt für die prozesssichere Umsetzung dienen.

Zudem ist für April 2020 die Einreichung eines Projektantrags innerhalb der Förderlinie FH Kooperativ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung geplant. Im Rahmen des auf eine Dauer von vier Jahren angelegten Projektes soll die Kombination aus additiver Drucktechnik mit keramischen Formmassen mit der Applikation elektrischer Funktionsmaterialien zur Erzeugung thermisch hochbeanspruchbarer Mechatronikmodule untersucht werden. Auch hierbei werden die erzielten Ergebnisse von grundsätzlicher Bedeutung sein, wenn elektronische Bauteile eingebettet werden müssen. Die in diesem Vorlaufforschungsprojekt erzielten Ergebnisse können als grundlegende Vorarbeiten direkt in das beantragte Projekt einfließen.









BioPolyKon – Produktion des Biopolymers PHB im kontinuierlichen Verfahren

Prof. Dr.-Ing. Stephanie Stute
Felix Berthold, M. Sc.
Fakultät Verfahrenstechnik
TH Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Kunststoffe sind in allen Lebens- und Industriebereichen vertreten und kaum aus dem alltäglichen Leben wegzudenken. Für etliche Anwendungen könnten alternativ auch Biokunststoffe wie zum Beispiel Polyhydroxybutyrat (PHB) eingesetzt werden, die biologisch abbaubar und somit nicht umweltbelastend sind. Bisher limitieren vor allem die hohen Herstellungskosten den Einsatz des mikrobiell produzierten PHB im größeren Maßstab. Um die Kosten zu senken, hat die Fakultät Verfahrenstechnik ein kontinuierliches und damit wirtschaftlicheres Herstellungsverfahren für PHB entwickelt. Im Rahmen der Vorlaufforschung wurden die Stabilität des über mehrere Wochen laufenden Prozesses und die Steigerung der Produktivität untersucht, um die Grundlage für eine Weiterverfolgung unter industriellen Gesichtspunkten zu schaffen.

1. Projektdaten

Fördersumme	35.000 Euro
Laufzeit	Februar bis Oktober 2019
Fakultät	Verfahrenstechnik
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Stephanie Stute
Kontaktdaten	stephanie.stute@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Kunststoffe sind in allen Lebens- und Industriebereichen vertreten und oft Wegwerfprodukte mit einmaliger Nutzung. Bereits jetzt akkumuliert sich Plastikmüll in den Weltmeeren zu enormen, schwimmenden Inseln und das beim Degradieren des Mülls entstehende sogenannte Mikroplastik reichert sich in der Nahrungskette an. Darüber hinaus werden für die Herstellung von klassischen, petrochemischen Kunststoffen wertvolle Ressourcen wie Erdöl und Energie verbraucht und bei ihrer Entsorgung die Umwelt belastet. Alternativ könnten für etliche Anwendungen sogenannte Biokunststoffe eingesetzt werden, die entweder biobasiert hergestellt werden oder biologisch abbaubar sind. Einige wenige Biokunststoffe wie zum Beispiel Polybuttersäure (PHB für Polyhydroxybutyrat) erfüllen sogar beide Eigenschaften. PHB ist weitgehend farblos, weist äquivalente technische Eigenschaften wie Polypropylen (PP) und Polyethylen (PE) auf und ist daher ein idealer nachhaltiger und umweltfreundlicher Ersatz für diese petrochemischen Polymere. Bisher limitieren besonders die höheren Herstellungskosten des biotechnologisch produzierten PHB den Einsatz im großen Maßstab.

Das Biopolymer PHB wird von vielen Bakterienarten als Speicherstoff in den Zellen in Form von Granula eingelagert, die bis zu 80 Prozent des Zellgewichts ausmachen können (Abbildung 1 links). Das aus den Zellen gewonnene PHB kann in gängigen kunststoffverarbeitenden Verfahren zur Herstellung von verschiedenen Produkten und Verpackungen genutzt werden (Abbildung 1 rechts).

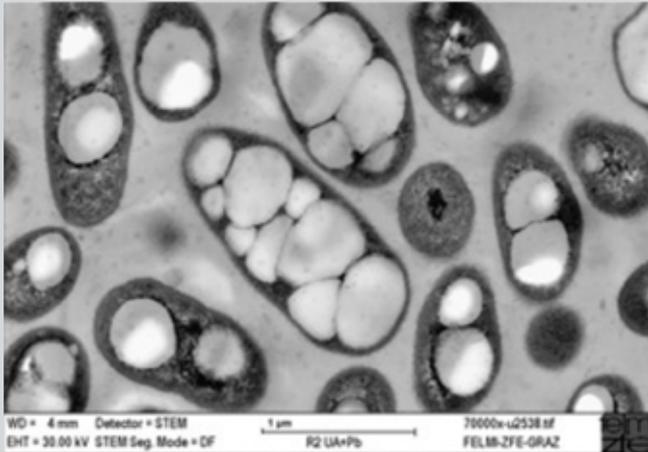


Abbildung 1: PHB in der Bakterienzelle und als Material für Kunststoffprodukte. Links: Einige Bakterienarten wie *Cupriavidus necator* lagern bis zu 80 Prozent ihres Zellgewichts in Form von PHB-Granula ein, die hier in der Mikroskopaufnahme als weiße Körner zu sehen sind. Foto: Koller et al. 2011. Rechts: PHB kann zu vielen Kunststoffprodukten des Alltags verarbeitet werden. Foto: Telles

Um die der PHB-Einlagerung zugrundeliegenden Stoffwechselwege großtechnisch nutzen zu können, müssen für die Anzucht der benötigten Bakterienzellen und die nachfolgende PHB-Produktion unterschiedliche Prozessbedingungen umgesetzt werden:

- Das Wachstum der Zellen erfolgt unter optimaler Versorgung der Zellen mit Nährstoffen.
- Die PHB-Einlagerung findet unter Mangelbedingungen statt.

Folglich muss die Produktion in mindestens zwei räumlich getrennten Bioreaktoren oder zwei zeitlich getrennten Prozessschritten durchgeführt werden. In der Regel wird PHB im industriellen Maßstab im Zulaufverfahren hergestellt, wobei die Zellen zunächst die vorgelegten Nährstoffe während des Wachstums verbrauchen, so dass im Verlauf der Fermentation ein Nährstoffmangel entsteht und infolgedessen die PHB-Einlagerung beginnt. Die PHB-Einlagerung wird durch immerwährendes Zulaufen einer Kohlenstoffquelle (zum Beispiel Glucose, Saccharose, Melasse, Glycerin) verstärkt. Nach Erreichen des maximal im Bioreaktor möglichen Reaktionsvolumens oder der maximal erreichbaren Produktmenge wird die Fermentation abgebrochen, der Inhalt des Bioreaktors abgeerntet und das Produkt PHB aus den Bakterienzellen extrahiert. Die Auslastung der Bioreaktoren in der oben beschriebenen Zulauf- beziehungsweise FedBatch-Betriebsweise ist aufgrund von immer wieder anfallenden Rüstzeiten (Reaktorreinigung, erneutes Befüllen, Sterilisieren von Nährmedium und Reaktor etc.) nicht optimal, was sich indirekt auf die Herstellungskosten auswirkt.

Prinzipiell sind die Herstellungskosten für biotechnologisch produzierte Produkte maßgeblich von den Kosten für die eingesetzten Rohstoffe und für die der Fermentation nachfolgenden Produktaufreinigung sowie der gewählten Prozessfahrweise beeinflusst. Ein leicht umzusetzender Ansatzpunkt zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit ist dabei die Reduktion der Kosten für Rohstoffe beziehungsweise Substrate, die bis zu 50 Prozent der Betriebskosten ausmachen können. Gängige Rohstoffe für Fermentationen im industriellen Maßstab sind Melasse oder Glucose. Bei aerober Verstoffwechslung wird etwa die Hälfte der Glucose in Biomasse umgewandelt, das heißt pro Kilogramm eingesetzter Glucose können 0,5 Kilogramm Biomasse gewonnen werden. Im Falle des Bakteriums *Cupriavidus necator* sind ähnliche Substratausbeuten für den Reststoff Rohglycerin berichtet worden [Rodríguez-Contreras et al. 2015]. Rohglycerin entsteht bei der Umesterung von Triacylglyceriden, etwa bei der Herstellung von Seife, von Fettsäuren in der Oleochemie oder von Biodiesel. Je Tonne hergestelltem Biodiesel entstehen etwa 100 Kilogramm Rohglycerin, für das es in Deutschland bisher keinen lukrativen Markt gibt. Rohglycerin steht daher als kostenfreier beziehungsweise kostengünstiger Reststoff in ausreichender Menge zur Verfügung. Das wirtschaftliche Potenzial dieses Rohstoffes wird jedoch bis jetzt kaum genutzt.

Eine weitere Möglichkeit, biotechnologische Herstellungsprozesse hinsichtlich der Produktivität und damit der Wirtschaftlichkeit zu verbessern, ist der kontinuierliche Betrieb, in dem fortlaufend Nährstoffe über einen Zulauf zugeführt und kontinuierlich Fermentationsbrühe mit Zellen und Produkt aus dem Reaktor abgeführt wird. Um

die Leistungsfähigkeit eines Prozesses und folglich die Wirtschaftlichkeit zu bewerten, kann die sogenannte Produktivität oder Raum-Zeit-Ausbeute herangezogen werden, bei der die pro Liter Fermentationslösung gewonnene Produktmenge bezogen auf die dafür benötigte Zeitdauer angegeben wird. Bei den wiederholt ablaufenden Produktionszyklen einer großtechnischen Herstellung in Batch- und FedBatch-Fahrweise müssen hierbei anfallende Leerzeiten berücksichtigt werden, da der Reaktor für den nächsten Produktionslauf gereinigt, erneut befüllt und das Nährmedium sterilisiert werden muss. Ein großer Vorteil der kontinuierlichen Prozessfahrweise ist hier der Wegfall dieser Leer- oder Rüstzeiten. Bisher erfolgt die Umsetzung biotechnologischer Prozesse allerdings kaum in kontinuierlicher Fahrweise.

Ein von der STAEDTLER Stiftung gefördertes Vorläuferprojekt untersuchte zwei Maßnahmen zur oben aufgeführten Senkung der PHB-Herstellungskosten hinsichtlich ihrer generellen Umsetzbarkeit:

- Nutzung von Rohglycerin aus der Biodiesel-Herstellung
- Umsetzung einer kontinuierlichen Prozessfahrweise

Das Projektvorhaben wurde mit dem häufig verwendeten Bakterium *C. necator* durchgeführt. Kontinuierliche Prozesse zur PHB-Produktion mittels *C. necator* unter Nutzung von Glucose sind aus der Literatur bekannt, wobei bisher eine zweistufige [Du et al. 2001] und eine fünfstufige Reaktorkaskade [Atlić et al. 2011] umgesetzt wurde. Die erzielten Produktivitäten blieben allerdings mit $1,23 \text{ g}_{\text{PHB}}/(\text{L}\cdot\text{h})$ beziehungsweise $1,85 \text{ g}_{\text{PHB}}/(\text{L}\cdot\text{h})$ bei beiden Studien unterhalb der in Zulaufverfahren maximal erzielten Produktivität von $3,14 \text{ g}_{\text{PHB}}/(\text{L}\cdot\text{h})$ [Ryu et al. 1997], wobei man hier die bei einem industriellen Verfahren anfallenden Rüstzeiten nicht bei der Berechnung der Produktivität berücksichtigte. Ein kontinuierlicher Prozess unter Nutzung von Rohglycerin ist bis dato nicht in der Literatur beschrieben, konnte aber im Rahmen des Vorläuferprojekts als zweistufiger, kontinuierlicher Prozess erfolgreich ausgelegt und im Rahmen von Abschlussarbeiten umgesetzt werden [Masterarbeit Berthold 2018, Bachelorarbeit Lederer 2018]. Die erzielte maximale Produktivität von $1,54 \text{ g}_{\text{PHB}}/(\text{L}\cdot\text{h})$ ist in Anbetracht der frühen Entwicklungsphase als ausgezeichneter Startpunkt für weitere Optimierungsuntersuchungen zu bewerten.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Kernziele der im Rahmen der Vorlaufforschung geförderten Forschungsaktivitäten sind die Erhöhung der Produktivität und die Realisierung eines stabilen kontinuierlichen Prozesses über mehrere Wochen hinweg, um in einem nachfolgenden Projekt die Auslegung und Optimierung des Verfahrens für die Umsetzung im industriell relevanten Maßstab erfolversprechend bearbeiten zu können.

Die Forschenden betreiben das bereits in Grundzügen entwickelte zweistufige Verfahren unter mit industriellen Prozessen vergleichbaren steriltechnischen Maßnahmen, um das Vorliegen lediglich des gewünschten Produktionsorganismus sicherzustellen. Beim kontinuierlichen Betrieb sind jedoch aufgrund der langen Prozesslaufzeit immer wieder Wechsel der Vorlagebehältnisse mit Nährmedium oder der Behältnisse für die ablaufende Fermentationsbrühe notwendig, wobei bei jedem Wechsel und auch bei jeder Probenahme ein gewisses Kontaminationsrisiko durch Fremdkeime vorliegt. Ein weiteres Risiko sind natürliche spontane Mutationen, die mit jeder Zellteilung auftreten und an die nachfolgenden Zellgenerationen weitervererbt werden können. Natürlich auftretende Mutationen können theoretisch die Produktivität sowohl negativ als auch positiv beeinflussen oder auch ohne jegliche auffällige Auswirkung bleiben. Üblicherweise beträgt die Prozesslaufzeit von mikrobiellen Herstellungsprozessen lediglich Stunden bis wenige Tage, so dass bei Zurückgreifen auf eine neue Startkultur aus der sogenannten *working cell bank* die Auswirkungen von Mutationen gering ausfallen. Bei einem über Wochen laufenden Prozess mit mehreren Millionen zugleich stattfindenden Zellteilungen ist der Einfluss durch Kontamination und Mutation jedoch nicht abschätzbar. Kontinuierliche Verfahren sind aber insbesondere dann wirtschaftlich interessant, wenn sie im Idealfall über Wochen und Monate stabil betrieben werden können und verlässlich Produkte in gleichbleibender Qualität und Quantität ermöglichen. Daher untersucht das Forschungsprojekt zum einen den prinzipiellen Langzeitbetrieb unter monoseptischen Gesichtspunkten und zum anderen die Auswirkungen durch möglicherweise auftretende Mutationen auf die Prozessstabilität. Im Rahmen des kontinuierlichen Langzeitbetriebs ist es außerdem das Ziel, die Produktivität über eine Steigerung der dem kontinuierlichen Prozess zugrun-

deliegenden Biomassenkonzentration und der Durchflussrate, die wiederum von der spezifischen Wachstumsrate der Mikroorganismen abhängt, zu erhöhen.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Das Forschungsprojekt wurde in drei Arbeitspakete (AP) gegliedert:

- Erhöhung der Produktivität (AP1)
- Stabilität des kontinuierlichen Prozesses über mehrere Wochen (AP2)
- Ausarbeitung eines Folgeantrags (AP3)

Die Forschenden führten das Projektvorhaben mit dem Bakterium *C. necator* durch, das sowohl beim Kooperationspartner Fritzmeier Umwelttechnik GmbH & Co. KG als auch in eigenen Vorversuchen erfolgreich im Rührkessel kultiviert wurde. Die Firma Tecosol stellte das benötigte Rohglycerin kostenfrei zur Verfügung. Aus Gründen der möglichen zukünftigen Verwertung der Forschungsergebnisse in Form eines Patentes werden nachfolgend keine genauen Zahlenwerte oder ähnliche Angaben zum Vorgehen oder den Ergebnissen gemacht.

Der im Vorläuferprojekt entwickelte Aufbau der zweitstufigen Reaktorkaskade wurde beibehalten (Abbildung 2) und die gewonnenen Daten als Basis für die Untersuchungen zur Erhöhung der Produktivität (AP1) herangezogen. Die Produktivität eines kontinuierlichen Prozesses ergibt sich aus der Multiplikation der Biotrockenmassenbeziehungsweise PHB-Konzentration mit der Durchflussrate, die von der spezifischen Wachstumsrate abhängt. Eine über das Optimum hinausgehende Erhöhung bei beiden Stellschrauben zugleich kann jedoch kontraproduktiv sein und die Gesamtproduktivität auch verringern, da sich die Zellen bei höheren Durchflussraten in einem für die PHB-Einlagerung ungünstigen physiologischen Zustand befinden.

Jeder kontinuierliche Prozess startet mit dem Animpfen des Reaktors und einer Batch-Phase. Zu- und Ablauf werden nach einer gewissen Prozesszeit zugeschaltet. Der Zeitpunkt des Zuschaltens des Zulaufs hat hierbei maßgeblichen Einfluss auf die Produktivität. Wird der Zulauf zu früh zugeschaltet, dann beginnt der kontinuierliche Betrieb mit nur geringer Zelldichte. Bei idealen Einstellungen, die ein stabiles, sogenanntes Fließgleichgewicht ermöglichen, bleibt diese Zelldichte über den gesamten kontinuierlichen Betrieb konstant – im Falle eines verfrühten Zuschaltens folglich konstant niedrig. Bei einem zu späten Zuschalten sind die Zellen in einem physiologisch trägen Stadium, so dass es zu einem Auswaschen der Zellen aus dem Reaktor, dem sogenannten *washout*, kommen kann.

Um den kontinuierlichen Betrieb mit einer möglichst hohen Biomassekonzentration zu starten, untersuchten die Forschenden mehrere Maßnahmen. Prinzipiell hängt die spezifische Wachstumsrate von der den Zellen zur Verfügung stehenden Substratkonzentration ab, so dass mit hohen Substratkonzentrationen in der Regel auch hohe Wachstumsraten und eine hohe Biomasseausbeute möglich sind. Eine Steigerung der Substratkonzentration über einen gewissen Wert hinaus ist bei *C. necator* aufgrund der nachgewiesenen Substratüberschussinhibition [Bachelorarbeit Walther 2018] jedoch nicht sinnvoll, so dass die Steigerung der Biomasse über die bereits erzielten Biomassekonzentrationen nur über einen FedBatch-Ansatz möglich ist, bei dem kontinuierlich ein Nährmedium zugegeben, aber dabei die kritische Substratkonzentration im Reaktor nicht überschritten wird. Die Parameter für eine FedBatch-Strategie wurden theoretisch ausgelegt und im Versuch getestet, wobei das Wachstum hinter den berechneten Erwartungen zurückblieb. Als Ursache hierfür hat das Projektteam eine unzureichende Konzentration der Stickstoff-Nährstoffe ermittelt. Durch eine Erhöhung der Stickstoff-Nährstoffe und ein möglichst spätes Zuschalten von Zu- und Ablauf steigerte sich die Biomassekonzentration in Reaktorstufe 1 schließlich auf das Doppelte des Ausgangswert. Durch geringfügige Parameteranpassungen erhöhte sich außerdem die spezifische Wachstumsrate um 33 Prozent im Vergleich zum Ausgangswert, so dass der kontinuierliche Prozess mit höheren Durchflussraten als bisher gefahren und somit eine höhere Produktivität ermöglicht werden kann.

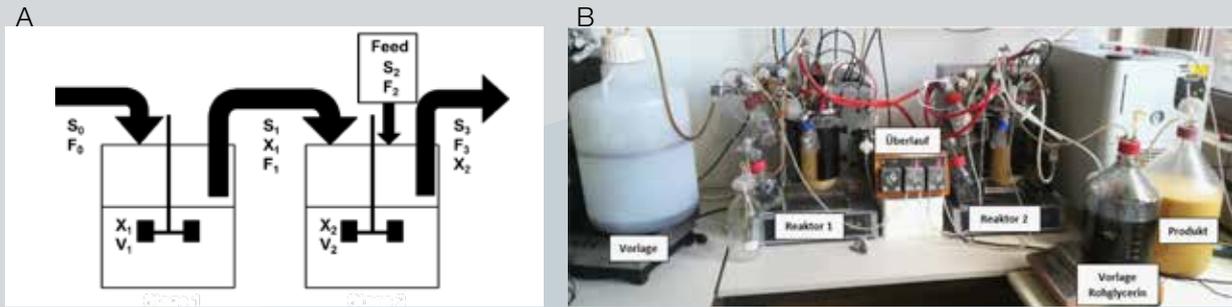


Abbildung 2: Aufbau der zweistufigen Reaktorkaskade. A: Schema. B: Anordnung der einzelnen Elemente. Von links nach rechts: Vorlagegefäß mit Nährmedium für die erste Stufe, Reaktor 1 zur Generierung der Biomasse, Schlauchpumpen zur Überführung der Fermentationsbrühe aus Reaktor 1 in Reaktor 2, Reaktor 2 zur Steigerung der PHB-Einlagerung, Vorlagegefäß für Feed mit Rohglycerin, Gefäß zum Auffangen der PHB-reichen Fermentationsbrühe. Foto: Felix Berthold

Beim Zusammenführen aller Ansätze ist theoretisch eine Produktivität von $5 \text{ g}_{\text{PHB}}/(\text{L}\cdot\text{h})$ und mehr möglich. Die Literatur berichtet für die mikrobielle PHB-Produktion bis dato über einen Maximalwert in Höhe von $4,2 \text{ g}_{\text{PHB}}/(\text{L}\cdot\text{h})$, wobei hier ein FedBatch-Verfahren unter Nutzung eines anderen Bakteriums mit dem Disaccharid Saccharose zugrunde liegt [Penloglou et al. 2017]. Die unternommenen Ansätze zur Erhöhung der Produktivität sind somit insgesamt als zielführend und erfolgreich zu bewerten, wobei die experimentelle Bestätigung der berechneten möglichen Produktivität aufgrund der begrenzten Laufzeit der Vorlauforschung erst in nachfolgenden Forschungsarbeiten erbracht werden kann.

Ein weiterer Ansatzpunkt der Forschungsaktivitäten war die Untersuchung der Stabilität des kontinuierlichen Prozesses über mehrere Tage und Wochen (AP2). Der Betrieb der Bioreaktoren an sich bereitete zu Beginn aufgrund technischer „Kinderkrankheiten“ größere Schwierigkeiten. Die an den Reaktoren für den geregelten Zulauf des Nährmediums und Ablauf der Fermentationsbrühe verbauten Schlauchpumpen waren nicht für den kontinuierlichen Betrieb ausgelegt und zeigten bereits nach einigen Betriebswochen deutlichen Verschleiß und führten zu Ausfällen. Zudem konnten die Forschenden aufgrund der Bauweise der Pumpen nur geringe Schlauchinnendurchmesser wählen, die regelmäßig mit den im Rohglycerin enthaltenen Schwebstoffen verstopften. Zur Behebung der Probleme wurde eine externe Schlauchpumpe mit vier Kanälen angeschafft und in Betrieb genommen. Eine weitere Herausforderung bestand darin, die Schaumbildung der Fermentationsbrühe bei hohen Biomassekonzentrationen unter Kontrolle zu behalten und ein Verstopfen der Sterilfilter in der Abluftstrecke durch ausgetragenen Schaum zu verhindern. Durch das Verstopfen der Filter in Kombination mit dem oben erwähnten Verstopfen der Schläuche kam es mehrmals zum Überlaufen der Reaktoren und damit zum Abbruch der Fermentation. Um dies zu vermeiden, wurden an Zu- und Abluft zusätzlich Auffangbehälter, sogenannte Schaumfallen, integriert und im Vorlaufmedium Entschäumungsmittel vorgelegt, wodurch sich die Schaumbildung erfolgreich reduzierte.

Der kontinuierliche Betrieb der zwei Reaktorstufen konnte mehrmals aufgenommen und für mehrere Tage, teils Wochen, aufrechterhalten werden, wobei PHB in relevanten Mengen gewonnen werden konnte (Abb. 3). Über die maximal erreichte Versuchsdauer von rund 33 Tagen zeigte der verwendete Organismus *C. necator* keine wesentlichen Veränderungen in Morphologie, Wachstum oder PHB-Einlagerung, die auf spontane Mutationen hinweisen. Hierbei ist hervorzuheben, dass über den gesamten Zeitraum monoseptische Bedingungen herrschten, sprich keine Kontamination durch andere Mikroorganismen festzustellen war und der gewählte Organismus äußerst robust gegenüber unvorhergesehenen Unterbrechungen der Nährstoff- oder/und Sauerstoffzufuhr und Schwankungen im technischen Betrieb aufgrund der oben beschriebenen technischen Schwierigkeiten war. Das Bakterium *C. necator* hat sich somit als idealer Produktionsorganismus erwiesen und kommt auch in weiteren Forschungsansätzen zum Einsatz.



Abbildung 3: Im zweistufigen kontinuierlichen Verfahren gewonnenes PHB in Pulverform. Foto: Felix Berthold

Um das Projektvorhaben langfristig weiterentwickeln und finanzieren zu können, erarbeitete das Team verschiedene, konzeptionelle Projektideen (AP3). Der Einsatz von PHB in der additiven Fertigung wurde in Kooperation mit Prof. Dr. Michael Mirke (Fakultät Werkstofftechnik) im Rahmen einer Abschlussarbeit hinsichtlich der technischen Machbarkeit untersucht [Bachelorarbeit Bär 2019]. Prof. Dr. Michael Mirke konnte die Weiterverfolgung dieser Projektidee im Rahmen der Vorlauftforschung 2020 erfolgreich beantragen. Darüber hinaus wurde gemäß dem Ansatz ‚Verzahnung von Lehre und Forschung‘ ein Projektkurs des Masterstudiengangs Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik mit der Erstellung eines Antragsentwurfs für ein Forschungsvorhaben zum Thema „Verwendung von PHB als Material für Lebensmittelverpackungen“ betraut, der bei der Bayerischen Forschungsförderung eingereicht werden sollte. Die Studierenden beschäftigten sich unter anderem mit den speziellen Anforderungen an Lebensmittelverpackungen und mit möglichen Optimierungen der technischen Eigenschaften des PHB hinsichtlich der Verarbeitung zu Verpackungsmitteln. Der erarbeitete Antrag konnte zum gegenwärtigen Zeitpunkt jedoch noch nicht eingereicht werden, da die für die Kooperation mit Lebensmittelherstellern benötigten Probematerialmengen mit der zur Verfügung stehenden Laborausstattung nicht mit vertretbarem Aufwand hergestellt werden können. Durch die Rechercharbeit der Studierenden und durch eigene Netzwerk-Aktivitäten konnten jedoch Kontakte zu Firmen aus dem Bereich der Kunststoffanalytik und -verwertung sowie zu einem an der PHB-Herstellung interessierten Unternehmen geknüpft werden, die an zukünftigen Kooperationen interessiert sind. Erste Schritte zur Bildung eines Konsortiums für ein Verbundprojekt sind bereits erfolgt und die Ausarbeitung eines Vollertrags soll nun zeitnah folgen.

5. Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Die im Rahmen des Forschungsprojekts BioPolyKon durchgeführten Untersuchungen und erzielten Ergebnisse bilden eine sehr vielversprechende Grundlage für die Stellung eines Folgeantrags. Mit über vier Wochen Dauerbetrieb haben die Forschenden erfolgreich gezeigt, dass das entwickelte zweistufige kontinuierliche Verfahren ausreichend stabil für eine Weiterführung der Forschungsaktivitäten hinsichtlich einer industriellen Umsetzung ist. Ausgesuchte Ergebnisse hierzu stellte ein Teil des Teams auf der Tagung „Biologisierung 2019“ (Cluster Neue Werkstoffe, Bayern Innovativ) am 25.09.2019 in Nürnberg vor.

Neben den zwei sich maßgeblich auf die Herstellungskosten auswirkenden Faktoren Rohstoffkosten und Prozessfahrweisen ist auch die der Fermentation nachfolgenden Produktaufreinigung für die Auslegung eines ökonomisch attraktiven Prozesses relevant. Für die zukünftige Weiterentwicklung des Verfahrens gilt es daher, die kontinuierliche Produktaufreinigung zu untersuchen. Erste Ansätze zur Ernte der Zellen und Gewinnung des PHB aus den Zellen haben zwei Studierende in ihren Bachelorarbeiten [Schneider 2019, Vogel 2019] untersucht. Fokus der Arbeiten war die Aufarbeitung der gebildeten Biomasse und die Extraktion des in den Zellen eingelagerten PHB mit potenziell für den kontinuierlichen Betrieb geeigneten Methoden. Hierbei zeigten vor allem die Versuche mit Dimethylcarbonat, einem Lösemittel aus der *Green Chemistry*, vielversprechende Ergebnisse für die weitere Auslegung der PHB-Extraktion, was in einem Folgeantrag aufgegriffen werden soll. Derzeit ist noch keine kontinuierliche Durchführung der Produktaufreinigung möglich, weshalb in einer derzeit noch laufenden Bachelorarbeit Grundlagen für eine kontinuierliche Inaktivierung der Biomasse in Hinblick auf eine erhöhte Lagerstabilität der Fermentationsbrühe erarbeitet werden. In einer ebenfalls noch nicht abgeschlossenen Masterarbeit ist es außerdem das Ziel, die Zusammensetzung der Nährmedien weiter zu optimieren, um so die Biomasse- und Polymerausbeute nochmals zu steigern.

Im Rahmen der Forschungs- und Recherchetätigkeit hat das Team weitere relevante zukünftige Forschungsfelder identifiziert. Der Einsatz des produzierten Polymers für die additive Fertigung wurde in einer Abschlussarbeit in Kooperation mit Prof. Dr. Michael Mirke untersucht. Hierbei wurden erste Parameter für die Herstellung eines PHB-Filaments und dessen Verarbeitung im 3D-Druck ermittelt [Bachelorarbeit Bär 2019]. Weiterführende Untersuchungen zum Einsatz von PHB zur Herstellung von personalisierten, medizinischen Implantaten mittels 3D-Druck können zukünftig im Rahmen der Vorlauforschung 2020 unter der Leitung von Prof. Dr. Michael Mirke durchgeführt werden.

Ein wichtiges Ergebnis im Rahmen der Recherche zum durchgeführten Projektkurs (siehe 4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse) war, dass die Herstellung von gängigen Produkten oder Verpackungen aus reinem PHB aufgrund der Sprödigkeit des Materials nur schwerlich möglich ist. Die übliche Veränderung der Kunststoffeigenschaften durch Zugabe von Additiven wie Weichmachern oder die Mischung mit anderen Materialien zu sogenannten Blends stellt unter der Anforderung, ein umweltfreundliches Material zu entwickeln, eine besondere Herausforderung dar, da nicht biologisch abbaubare Zusätze prinzipiell die Bioabbaubarkeit in Frage stellen. Die Eigenschaften des PHB lassen sich jedoch durch den Einbau von strukturell andersartigen Monomeren modifizieren. Neben chemischen Ansätzen ist es auch möglich, durch gezielte Prozessführung ein Copolymer mit Polymerketten aus unterschiedlichen, natürlich in den Bakterienzellen synthetisierten Monomer-Einheiten herzustellen. Das Verfahren zur Herstellung eines Copolymers entspricht prinzipiell der Herstellung von PHB, außer dass zusätzliche Substrate zur Bildung des Copolymers zuzufügen sind, was im kontinuierlichen Verfahren leicht über einen weiteren Zulauf zu bewerkstelligen ist. Elemente des im Projektkurs erarbeiteten Antrags sollen aufgegriffen und mit Projektpartnern, die lediglich Testchargen mit wenigen Kilogramm PHB benötigen, weiterverfolgt werden. Erste Schritte zur Bildung eines Konsortiums für ein Verbundprojekt sind bereits erfolgt und die Ausarbeitung eines Vollartrags soll nun zeitnah folgen.

Die weitere Finanzierung der Forschungsaktivitäten zur Optimierung und/oder Variation des PHB-Herstellungsprozesses ist bislang nicht gesichert. Ziel der gesamten Forschungstätigkeiten ist es, einen wirtschaftlich attraktiven Prozess zu entwickeln, mit dem PHB beziehungsweise PHB-Copolymere je nach Verarbeitungsanforderung hergestellt werden können – und dies zum Patent anzumelden. Langfristig soll der Prozess bis zur kommerziellen Reife fortgeführt und so PHB letztendlich günstiger und/oder in gezielten Qualitäten auf den Markt gebracht werden.

6. Literatur

- Atlić A., Koller M., Scherzer D., Kutschera C., Grillo-Fernandes E., Horvat P., Chiellini E. & Braunegg G. (2011). Continuous production of poly([R]-3-hydroxybutyrate) by *Cupriavidus necator* in a multistage bioreactor cascade. *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 91, pp. 295-304
- Bär L. (2019). Untersuchung des Verhaltens des Biopolymers Polyhydroxybutyrat (PHB) im 3D-Druck. Bachelorarbeit, Fakultät Verfahrenstechnik, Technische Hochschule Nürnberg
- Berthold F. (2018). Entwicklung eines kontinuierlichen Verfahrens für die Produktion von Polyhydroxybutyrat durch *Cupriavidus necator* unter Verwendung von Rohglycerin. Masterarbeit, Fakultät Verfahrenstechnik, Technische Hochschule Nürnberg
- Du G., Chen J., Yu J. & Lun S. (2001). Kinetic studies on poly-3-hydroxybutyrate formation by *Ralstonia eutropha* in a two-stage continuous culture system. *Process Biochemistry*, Vol. 37, pp. 219-227
- Lederer M. (2018). Entwicklung einer zweistufigen Bioreaktorkaskade in Hinblick auf die kontinuierliche Produktion von Polyhydroxybuttersäure mit *Cupriavidus necator*. Bachelorarbeit, Fakultät Verfahrenstechnik, Technische Hochschule Nürnberg
- Penloglou G., Vasileiadou A., Chatzidoukas C. & Kiparissides, C. (2017). Model-based intensification of a fed-batch microbial process for the maximization of polyhydroxybutyrate (PHB) production rate. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, Vol. 40, pp. 1247-1260
- Rodríguez-Contreras A., Koller M., Miranda-de Sousa Dias M., Calafell-Monfort M, Braunegg G. & Soledad Marqués-Calvo M. (2015). Influence of glycerol on poly(3-hydroxybutyrate) production by *Cupriavidus necator* and *Burkholderia sacchari*. *Biochemical Engineering Journal*, Vol. 94, pp. 50-57
- Ryu H. W., Hahn S. K., Chang Y. K. & Chang H. N. (1997). Production of Poly(3-hydroxybutyrate) by high cell density fed-batch culture of *Alcaligenes eutrophus* with phosphate limitation. *Biotechnology and Bioengineering*, Vol. 55, pp. 28-32
- Schneider I. (2019). Untersuchungen zur Gewinnung des Biopolymers Polyhydroxybutyrat (PHB) aus Bakterienzellen und dessen Einsatz als Mikroplastikersatz in Kosmetika. Bachelorarbeit, Fakultät Verfahrenstechnik, Technische Hochschule Nürnberg
- Vogel S. (2019). Produktaufarbeitung des Biopolymers Polyhydroxybutyrat aus Fermentationsbrühe unter Aspekten der Green Chemistry. Bachelorarbeit, Fakultät Verfahrenstechnik, Technische Hochschule Nürnberg
- Walther C. (2018). Untersuchungen zu Einflussfaktoren auf das Wachstum des zur Biokunststoffproduktion eingesetzten Bakteriums *Cupriavidus necator*. Bachelorarbeit, Fakultät Verfahrenstechnik, Technische Hochschule Nürnberg



125,8
x
86

125,8

x

107



Einflussfaktoren auf die Extraktion von bromidhaltigen Flammschutzmitteln aus komplex gebundenen Dämmstoffen

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Teipel
Thomas Fehn, M. Sc.
Fakultät Verfahrenstechnik
Prof. Dr. Martin Elsner
Fakultät Angewandte Chemie
TH Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Seit den 1970er-Jahren werden Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) zur energetischen Sanierung an Gebäudefassaden angebracht. Durch die Langlebigkeit dieser komplexen Kompositmaterialien fallen nun erstmals vermehrt WDVS-Abfälle an. Überwiegend werden diese Systeme thermisch verwertet, da aktuell keine etablierte Recyclingstrategie zur wertstofflichen Aufbereitung zur Verfügung steht. Des Weiteren enthalten die am häufigsten verbauten Dämmstoffe wie expandiertes Polystyrol (EPS), das seit 2013 als umwelt- und gesundheitsgefährdend eingestufte Flammschutzmittel Hexabromcyclododecan (HBCD), was eine rohstoffliche Verwertung zusätzlich erschwert. Im Rahmen dieses Projektes löste das Team das Dämmstoffmaterial vom Komposit heraus und trennte es in einer ersten Versuchsreihe mittels thermischer Extraktion vom Flammschutzmittel ab.

1. Projektdaten

Fördersumme	35.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2019
Fakultät	Verfahrenstechnik
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Ulrich Teipel
Kontaktdaten	ulrich.teipel@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Einen erheblichen Beitrag zur Energieeinsparung leistet die Verringerung des Transmissionswärmeverlustes durch Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) an Gebäudefassaden. In den letzten 50 Jahren wurden in der Bundesrepublik Deutschland zirka. 900 Millionen Quadratmeter WDVS zur thermischen Sanierung an Fassaden von Gebäuden angebracht [1]. Der komplexe Aufbau dieser Komposite zeichnet sich durch einen mehrschichtigen Aufbau aus, welcher aus einer Dämmstoffschicht, einer gewebearmierten Unterputzschicht und einer Schicht Oberputz besteht. Überwiegend wurde/wird als Dämmstoffmaterial expandiertes und extrudiertes- Polystyrol (EPS/XPS) sowie Stein- und Glaswolle verwendet [2]. Mit einem Marktanteil von 66 Prozent wird als Dämmmaterialien EPS/XPS verwendet (Stand 2016), da diese eine geringere Wärmeleitfähigkeit als andere Dämmstoffe vorweisen und in der Herstellung vergleichsweise kostengünstig sind. Die WDVS der ersten Generation haben nun ihre maximale Standzeit erreicht und stellen einen immer weiter ansteigenden Abfallstrom dar [3-4]. Die Dämmstoffmaterialien EPS und XPS gelten als leicht entzündliche Baustoffklassen, wodurch diese auf ein Flammschutzmittel angewiesen sind [5]. Bis zum Jahre 2013 kam hierfür das Flammschutzmittel Hexabromcyclododecan (HBCD) zum Einsatz. Jedoch konnte dieses Flammschutzmittel in Gewässern, Böden, Klärschlämmen und Fischbeständen nachgewiesen werden. Somit wurde dieses 2008 als persistenter, bioakkumulativer, toxischer Stoff (PBT-Stoff) klassifiziert. Im Jahre 2013 kam HBCD in die Liste der persistenten organischen Schadstoffe (POP), wodurch ein weltweites Herstellungs- und Anwendungsverbot folgte [5-7]. Seit dem Jahr 2016 dürfen Produkte (Stoffe, Gemische und Erzeugnisse) mit einem Gehalt von mehr als 100 mg/kg HBCD nicht mehr hergestellt oder in Verkehr gebracht werden. Des Weiteren müssen alle Materialien, welche das umweltgefährdende und gesundheitsschädliche Flammschutzmittel HBCD enthalten, thermisch in Müllverbrennungsanlagen verwertet werden, um dieses vollständig zu zerstören [8]. Hierdurch geht ein enormes Ressourceneffizienzpotenzial verloren. Aktuell existieren in der Recyclingwirtschaft keine etablierten Verwertungswege, um die individuellen Materialien aus den komplexen WDVS herauszulösen. Aufgrund der zunehmenden Massenströme und Vielfalt an WDVS, welche HBCD enthalten, müssen dringend neue Recyclingstrategien entwickelt werden, um

diese Materialien wertstofflich und schadstoffarm aufzubereiten, damit diese erneut als Sekundärrohstoff oder als Füllstoffmaterial für neuartige Bauprodukte am Markt etabliert werden können. Der Verwertungsprozess von dämmstoffhaltigen Kompositmaterialien stellt aufgrund der Materialvielfalt hohe Anforderungen an den durchzuführenden Recyclingprozess. In diesem Forschungsvorhaben erarbeitete das Team einen Lösungsweg, um die WDVS sortenrein aufzubereiten und das enthaltene Flammschutzmittel HBCD aus dem Dämmstoffmaterial extrahieren zu können.

3. Ziel des Forschungsprojekts

In vorangegangenen Forschungsvorhaben erarbeiteten die Beteiligten bereits eine Recyclingstrategie zur mechanischen Aufbereitung von komplexen WDVS und testeten diese im Labormaßstab. Durch verfahrenstechnische Prozessschritte wie der Zerkleinerung, Klassierung und Charakterisierung konnten aus dem Verbund homogene Stoffströme erzeugt werden. Das abgetrennte Dämmstoffmaterial (EPS) soll nun im Anschluss weiter aufbereitet werden, um das partikulär gebundene Flammschutzmittel HBCD abzutrennen. Die Extraktion soll in diesem Projekt mittels thermischer Extraktion (Soxhlet-Extraktion) erfolgen. Hierbei sollen verschiedene Einflussfaktoren wie Partikelgröße x , Extraktionsmittel und Extraktionszeit t eruiert beziehungsweise variiert werden. Mittels Prallbeanspruchung und variierenden Einlegsiebmaschenweiten w_{Ein} unter der Mahlvorrichtung soll das Ausgangsprodukt weiter zerkleinert werden, um die mittlere Partikelgröße x_{50} zu verringern und hiermit die spezifische Oberfläche S_v von den jeweiligen Partikeln zu erhöhen, wodurch eine Extraktion begünstigt wird. Durch den Zerkleinerungsprozess werden unterschiedliche Dämmstoffproben mit unterschiedlichen mittleren Partikelgröße x_{50} erzeugt, um hierdurch den Einfluss auf die später durchgeführte Extraktion zu ermitteln. Um die individuellen Partikelkollektive hinreichend charakterisieren zu können, wurden diese mit einem optoelektronischen Messgerät zur dynamischen Bildanalyse vom Typ CAMSIZER vermessen. Anschließend sollen mit dem abgetrennten Dämmstoffmaterial Lösemittel-Versuche durchgeführt werden. Hierzu soll mittels ausgewählter Versuche ein Extraktionsmittel eruiert werden, welches den Dämmstoff in seiner sphärischen Form nicht angreift beziehungsweise zersetzt und als Extraktionsmittel für das bromidhaltige Flammschutzmittel HBCD dient. Zusätzlich müssen die Siedepunkte und etwaige Azeotrope der getesteten Lösemittelgemische eruiert werden, um die Extraktionsanlage optimal betreiben zu können. Begleitend zu den Extraktionsversuchen sollen die erhaltenen Extrakte mittels adäquater chemischer Analysemethoden auf den HBCD-Gehalt hin vermessen werden. Hierfür kommt ein Gaschromatograph mit integriertem Massenspektrometer (GC-MS) zum Einsatz. Auf diese Weise können die Ausbeuten an Flammschutzmittel qualifiziert beziehungsweise quantifiziert werden und somit die Einflussfaktoren auf den Extraktionsprozess überprüft werden.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Wie bereits erwähnt, konnten in vorangegangenen Projekten komplexe WDVS in homogene Materialströme separiert werden. Hierfür wurden mittels Prallbeanspruchung in einer Hammermühle die individuellen Materialien (Putz, Glasfasergewebe und Dämmstoffmaterial (EPS)) aus dem komplexen Verbund herausgetrennt. Im Anschluss konnte durch Anwendung der Strömungsklassierung in einem Zickzacksichter das Materialgemisch durch aufeinanderfolgende Sichterschnitte in homogene Materialfraktionen separiert werden. Somit konnte das Team eine reine Fraktion an Polystyrol erzeugen. Die Reinheit des Polystyrols wurde mittels thermogravimetrischer Analyse (TGA) nachgewiesen. Von den Proben wurden zirka 10 mg in Aluminiumoxidtiegel eingewogen und anschließend vermessen. Es konnte eine Reinheit von 92,8 wt.-% für Polystyrol festgestellt werden. Im Anschluss wurde das Polystyrol mittels dynamischer Bildanalyse vermessen. Es konnte eine mittlere Partikelgröße von $x_{50} = 7,1$ mm bestimmt werden. Im Anschluss wurde das Polystyrol mittels einer Hammermühle und variierender Einlegsiebmaschenweite w_{Ein} weiter nachzerkleinert. Somit kann das Team einen direkten Einfluss auf das Zerkleinerungsprodukt nehmen. Es wurden die Einlegsiebe von $w_{\text{Ein}} = 4$ mm, 8 mm und 10 mm verwendet. Für die Zerkleinerung wurde jeweils eine Masse von $m = 600$ g rückgewonnenem Polystyrol verwendet. Die im Anschluss an die Zerkleinerung erhaltenen Produkte wurden erneut mittels dynamischer Bildanalyse vermessen. Die mittlere Partikelgröße bei den verwendeten Einlegsiebmaschenweiten von $w_{\text{Ein}} = 4$ mm, 8 mm und 10 mm lagen bei $x_{50} = 3,86$ mm, 4,77 mm und 5,67 mm. Die durchgeführten Zerkleinerungsprozesse haben gezeigt, dass die Variation der Einlegsiebmaschenweite w_{Ein} einen direkten Einfluss auf die Größe des Polystyrols

hat. Mit abnehmender Einlegesiebmaschenweite sinkt auch die mittlere Partikelgröße x_{50} . Um das im Dämmstoffmaterial partikulär befindene Flammenschutzmittel extrahieren zu können, wurde eine Soxhlet-Apparatur verwendet. Diese dient der Fest-Flüssig-Extraktion, bei der in einer Extraktionshülse aus Filterpapier befindliche Extraktionssubstanzen vom Lösungsmittel diskontinuierlich extrahiert werden. Hierbei wird das Lösemittel (Extraktionsmittel) in einem Destillationskolben bis zum Siedepunkt erhitzt und verdampft. Es steigt als Dampf auf und wird am Rückflusskühler kondensiert. Das hierdurch kondensierte Extraktionsmittel tropft anschließend in die Extraktionshülse in der sich das zu extrahierende Material befindet. Durch weiteres Zutropfen des Extraktionsmittels steigt der Flüssigkeitsspiegel in dem Soxhlet-Aufsatz, bis er die Höhe der Biegung des dünnen U-Rohres erreicht hat. Durch Saug-Hebelwirkung wird das Lösungsmittel mit dem gelösten Extrakt in den Destillationskolben zurückgeführt. Durch weiteres Verdampfen des Lösungsmittels wird die Extraktionshülse erneut mit Lösungsmittel gefüllt. Die extrahierten Stoffe reichern sich im Kolben an, während das Extraktionsmittel erneut verdampft, kondensiert und die zu extrahierende Substanz aus der Papierhülse herauslöst. Für den Extraktionsprozess ist es nötig ein geeignetes Lösemittel zu eruiieren. Durch die anfangs durchgeführte Literaturrecherche und die durchgeführten Lösemittelversuche konnte herausgefunden werden, dass die höchsten Ausbeuten Y_{HBCD} mit einem 1:1-Gemisch aus Aceton und n-Hexan erzielt werden können. Die Daten wurden über das Simulationsprogramm Aspen+ ermittelt, welches direkt mit der DECHEMA-Datenbank verknüpft ist. Über das Programm wurde zu dem Gemisch eine Siedelinse (T-xy-Diagramm) erstellt. Die Siedelinse besitzt einen azeotropen Punkt bei einem Molanteil von $x_{\text{Aceton}} = 0,64$ und einer Siedetemperatur von $T_s = 49,5 \text{ }^\circ\text{C}$. So ergibt ein 1:1-Gemisch (volumenbezogen) aus n-Hexan und Aceton ein Lösemittelgemisch mit azeotropen Eigenschaften. Durch die azeotrope Zusammensetzung des Lösemittelgemisches hat der bei der Extraktion entstehende Dampf die gleiche Zusammensetzung wie das flüssige Lösemittel. Zudem ändert sich dadurch die Zusammensetzung des Dampfes während der Extraktion nicht. Würde das Gemisch aus drei Teilen Aceton und einem Teil n-Hexan bestehen, wäre ein Aceton-Anteil von $x_{\text{Ac.}} = 0,75$ im Lösemittelgemisch. Wird dieses zum Sieden gebracht, hat der entstehende Dampf einen geringeren Aceton-Anteil, da das azeotrope Gemisch (mit $x_{\text{Ac.}} = 0,64$) der Leichtsieder ist. Es verschiebt sich die Gemischzusammensetzung im flüssigen (siedendem) Lösemittel zu steigenden Aceton-Anteilen. Hierdurch ändert sich wiederum die Zusammensetzung des entstehenden Dampfes. Somit ist weder im flüssigen Lösemittel noch im Dampf, der im Kondensator niedergeschlagen wird, eine konstante Zusammensetzung gegeben, was zu schlechteren (beziehungsweise nicht vorhersagbaren) Extraktionseigenschaften führen kann. Somit sollte das Lösemittelgemisch im azeotropen Punkt vorgelegt werden. So bleibt die Dampfzusammensetzung von Aceton und n-Hexan während der Extraktion gleich. Zum jetzigen Forschungsstand konnte das Team noch kein anderes Extraktionsmittel ermitteln. Für die Reinigung der erhaltenen Probe nach dem Extraktions- beziehungsweise Destillationsprozess wurde ein 450-nm-Polytetrafluorethylen-Filter (PTFE) verwendet, welcher unempfindlich gegen organische Lösemittel ist. Um festzustellen, welchen Einfluss die Extraktionszeit auf die Ausbeute an Flammenschutzmittel hat, wurden Extraktionszeiten von $t = 2 \text{ h}$, 4 h , 6 h und 8 h realisiert. Für jeden durchgeführten Extraktionsprozess wurden 300 ml des Extraktionsmittels im Kolben vorgelegt. Jede Extraktionshülse wurde mit einer Masse von 20,0 g EPS der jeweilig erzeugten Proben befüllt. Für das Temperiergerät wurde eine Temperatur von $T = 65^\circ$ ermittelt.



Abbildung 1: Soxhlet-Apparatur über einem Temperierbad (a) sowie die in der Apparatur platzierte Soxhlet-Hülse (Zur Veranschaulichung wurde die Hülse aufgeschnitten) befüllt mit Polystyrol (b); Foto: Thomas Fehn

Hierbei werden nach Beendigung des Anfahrverhaltens vier Zyklen pro Stunde in der Extraktionsapparatur absolviert. Die Anzahl der Zyklen ist entscheidend, da ein Gleichgewicht zwischen Lösemittelablass und Benetzung des Feststoffes herrschen muss. Anschließend wurde damit begonnen das Flammschutzmittel aus der Extraktionshülse zu extrahieren. Hierbei wurden wie bereits angegeben die Extraktionszeiten und die Probe in der Hülse variiert. Nach Beendigung der Extraktion wurde das jeweilige erhaltene Lösemittelgemisch, in welchem sich HBCD befindet, mittels einer Destillationsbrücke abdestilliert, um das extrahierte Flammschutzmittel weitgehen von der Lösemittelmatrix abtrennen zu können. Dieser Schritt ist notwendig, um das erhaltene Extrakt mittels Gaschromatographie (GC) vermessen zu können. Im Anschluss wurde das erhaltene Extrakt mittels einer GC vermessen, um überprüfen zu können, ob HBCD aus dem Feststoff (EPS) extrahiert werden konnte. Es wurde damit begonnen, das HBCD aus der Probe mit einer mittleren Partikelgröße von $x_{50} = 5,67$ mm zu extrahieren. So konnte bei einer Extraktionszeit von $t = 2$ h und 8 h eine Ausbeute von $Y_{\text{HBCD}} = 4565$ ppm und $Y_{\text{HBCD}} = 4597$ ppm erreicht werden. Bei dem Zerkleinerungsprodukt mit einer mittleren Partikelgröße von $x_{50} = 4,77$ mm konnte bei einer Extraktionszeit von $t = 2$ h und 8 h eine Ausbeute von $Y_{\text{HBCD}} = 5203$ ppm und $Y_{\text{HBCD}} = 5198$ ppm festgestellt werden. Für die Probe mit einem Medianwert von $x_{50} = 3,86$ mm konnte bei einer Extraktionszeit von $t = 2$ h und 8 h eine Ausbeute von $Y_{\text{HBCD}} = 5690$ ppm und $Y_{\text{HBCD}} = 5697$ ppm bestimmt werden. Die Versuchsreihen haben gezeigt, dass die Extraktionszeit keinen direkten Einfluss auf die Ausbeute an extrahiertem HBCD hat. Zwischen den Extraktionszeiten von $t = 2$ h und 8 h konnte bei den jeweiligen Proben nicht mehr HBCD aus dem Polystyrol herausgelöst werden. Jedoch zeigt sich, dass die Partikelgröße des Polystyrols einen Einfluss auf die Ausbeute Y_{HBCD} des Flammschutzmittels HBCD hat: Bei den Proben mit geringerer Partikelgröße des Polystyrols konnte die Ausbeute Y_{HBCD} an HBCD erhöht werden. Somit konnte in einer ersten Versuchsreihe nachgewiesen werden, dass bromidhaltige Dämmstoffmaterialien mittels thermischer Extraktion aufgereinigt werden können.

5. Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

In den vergangenen 50 Jahren wurden in der Bundesrepublik Deutschland zirka 900 Millionen Quadratmeter bromdhaltige Dämmstoffmaterialien in komplex gebundenen WDVS verbaut. Die immer weiter ansteigenden Abfallmengen erfordern im Sinne der Kreislaufwirtschaft effiziente Verwertungswege, um die Abfälle sortenrein und schadstoffarm aufzubereiten und erneut als Sekundärrohstoff in der Baustoffindustrie zu etablieren. Durch den entwickelten und im Labormaßstab getesteten Verwertungsweg konnte ein erster Ansatz für einen kompletten Recyclingweg für WDVS-Abfälle entwickelt werden. In vorangegangenen Forschungsvorhaben konnte dieser erfolgreich getestet und optimiert werden. Hierdurch konnten die individuellen Komponenten, wie das Dämmstoffmaterial, aus dem komplexen Komposit herausgelöst werden. Da dieser überwiegend das umwelt- und gesundheitsgefährdende Flammschutzmittel HBCD enthält, steht dieses nach erfolgreicher Abtrennung nicht für eine Wiederverwertung als Sekundärrohstoff zur Verfügung. Aus diesem Grund entwickelten die Beteiligten dieses Forschungsvorhabens einen ersten Ansatz, um das Flammschutzmittel aus dem Dämmstoff herauszulösen, und testeten diesen. Die thermische Extraktion hat gezeigt, dass durch abnehmende Partikelgröße des Dämmstoffmaterials eine höhere Ausbeute an HBCD festgestellt werden konnte. Die Variation der Extraktionszeit hatte selbst keinen Einfluss auf die Ausbeute. Das Forschungsteam konnte nachweisen, dass das verwendete Extraktionsmittel geeignet ist, um das Flammschutzmittel zu extrahieren. Somit entsteht erstmals einen ganzheitlicher Verwertungsweg zum sortenreinen und schadstoffarmen Recycling von WDVS. Durch dieses beantragte Forschungsvorhaben konnte ein Folgeantrag für das Landesministerium für Umwelt und Verbraucherschutz gestellt werden, wodurch dieses Forschungsthema fortgesetzt wird und großtechnisch in Recyclingunternehmen getestet werden soll. Somit wird dieser Verwertungsweg weiter optimiert. Hierdurch entsteht die Möglichkeit, für jegliche WDVS-Abfälle den optimalen Entsorgungsweg zu bestimmen.

6. Literatur

- [1] W. Riedel, H. Oberhaus, Von der Thermohaut bis zur transparenten Wärmedämmung, 2. Auflage, Fraunhofer IRB Verlag, 2010
- [2] T. Steiner, Fachverband und Innendämmung, Praxishandbuch Innendämmung, Planung-Konstruktion-Details-Beispiele, 1. Auflage, Müller-Rudolf Verlag, 2016
- [3] W. Albrecht und C. Schwitalla, Rückbau, Recycling und Verwertung von WDVS, Fraunhofer IRB Verlag, 2015
- [4] N. Heller, Entwicklung und Modellierung von Entsorgungswegen für WDVS-Abfälle, 4. Konferenz für Mineralische Nebenprodukte und Abfälle, Berlin, Juni 2017
- [5] L. Gottfried, Praktische Bauphysik, Eine Einführung mit Berechnungsbeispielen, Stuttgart/Leipzig: B.G. Teubner-Verlag, 2001, pp. 519-522.
- [6] H. Fromme, B. Hilger, Environmental International, 2014, 64(1), 61-68, DOI: 10.1016/j.envint.2013.11.017
- [7] Umweltbundesamt (UBA), Wofür wird der Stoff HBCD verwendet ?, <https://www.umweltbundesamt.de/service/ubafragen/wofuer-wird-der-stoff-hbcd-verwendet>, 25.07.2016
- [8] J. Wurbs, Beer, I., Hexabromcyclododecan (HBCD) – Antworten auf häufig gestellte Fragen, Hrsg.: Umweltbundesamt Fachgebiet IV 1.1 – Internationales Chemikalienmanagement, 2017



Lebenslauf

Telefonnummer

Mobile

Adresse

Geburtsdatum

Geburtsort

Familienstand

Heirat

Kindern

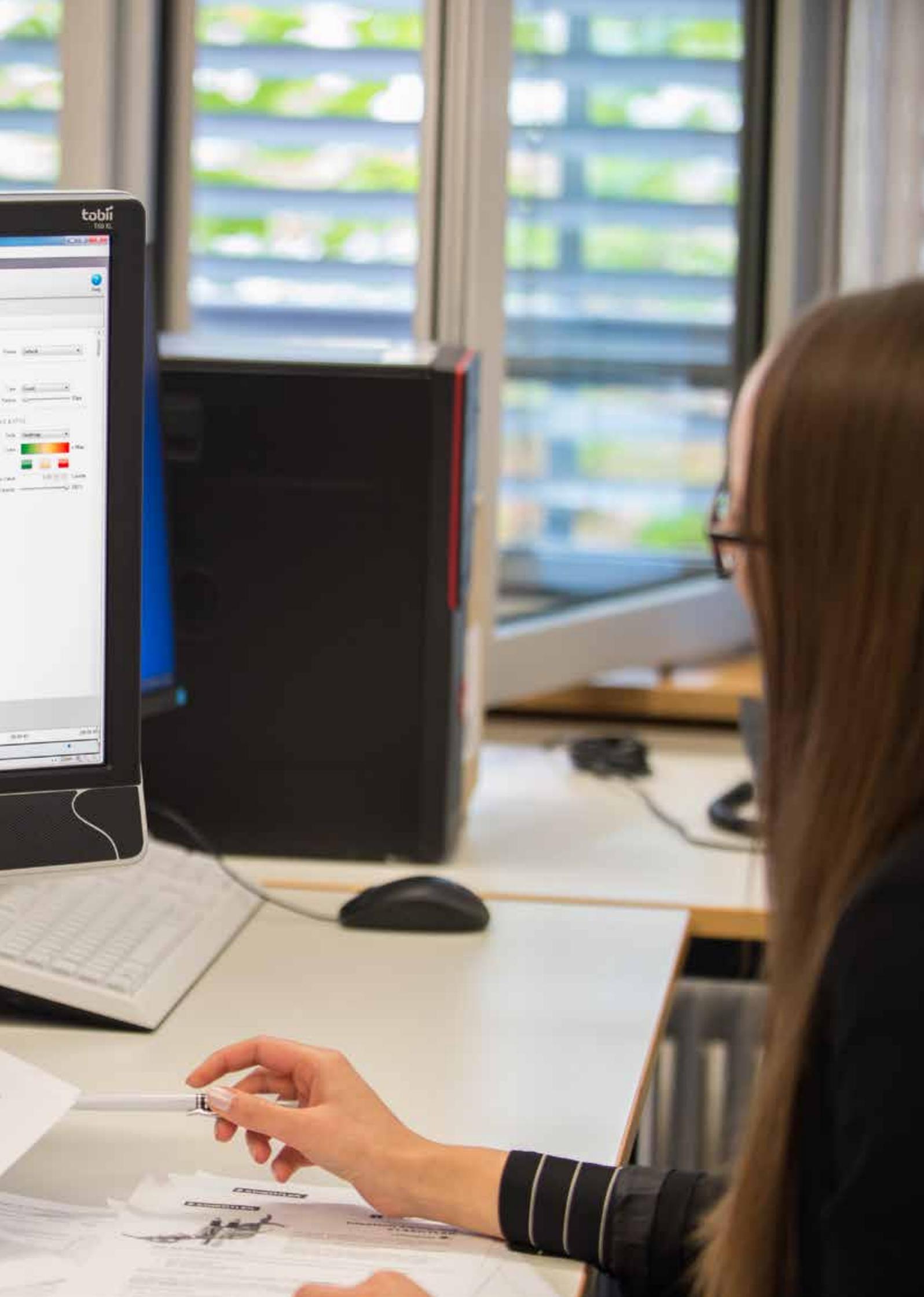
Religion

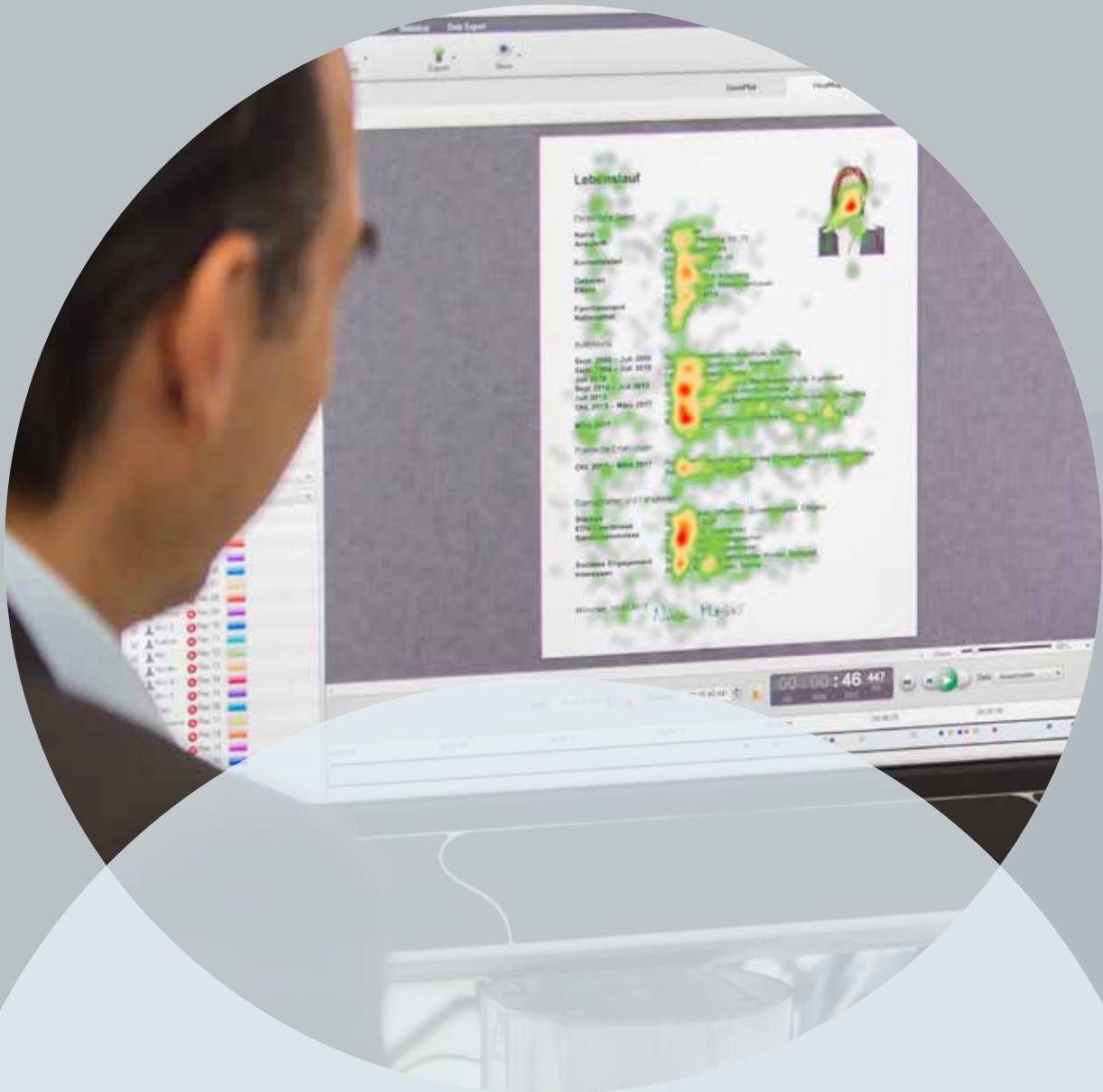
Sprachen

Interessen

Freizeitaktivitäten

Freizeitsportarten





Steigerung der Recruitingkompetenz und -effizienz durch den Einsatz apparativer Diagnostik und (non-)digitaler Qualitätsaudits im HRM

Prof. Dr. Raphael Verstege
Andreas Kopp M. A.
Fakultät Betriebswirtschaft
TH Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Im Recruiting ist die Sichtung und Beurteilung von Bewerbungsunterlagen und -profilen – hinsichtlich der Eignung für entsprechende Vakanzen – heutzutage selbstverständlich. Durch Beobachtungs- und Beurteilungsfehler kann die Validität des angewandten Personalauswahlverfahrens negativ beeinflusst werden. Anhand von Erkenntnissen einer Vorstudie aus dem Jahr 2018 zur Analyse des Blickrichtungsverhaltens bei der Sichtung von Bewerbungsunterlagen ergibt sich der vielversprechende Ansatz, diese Beobachtungs- und Beurteilungsfehler mittels apparativer Methoden und Qualität-Audits zu untersuchen. Ziel dieser Analyse ist es, Aussagen über die Qualität der Personalauswahl von Unternehmen abzuleiten und damit einen Beitrag zur Effizienzsteigerung des Recruiting zu leisten

1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2019
Fakultät	Betriebswirtschaft
Projektleitung	Prof. Dr. Raphael Verstege
Kontaktdaten	raphael.verstege@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Die Qualität der Personalarbeit in Unternehmen lässt sich an verschiedenen Prozessen und Ergebnissen des Human Resource Management festmachen. Der Chronologie folgend steht am Anfang die Personalplanung und -beschaffung, wobei ein professionelles Recruiting besonders wichtig erscheint. Es geht also generell um die Fähigkeit eines Unternehmens, Vakanzen zutreffend und zeitnah zu schließen und die neugewonnenen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter gut zu integrieren sowie langfristig zu binden.

In Anbetracht dessen scheint es besorgniserregend, dass regelmäßig von zunehmender Vakanzzeit und Frühfluktuation berichtet wird. Die offizielle Statistik der Bundesagentur für Arbeit zeigt sehr deutlich, dass sich die Vakanzzeit seit 2010 mehr als verdoppelt hat¹. Es ist davon auszugehen, dass die Dunkelziffer entsprechend höher ausfallen dürfte, wenn man berücksichtigt, dass nicht alle Unternehmen die Bundesagentur für Arbeit zur Besetzung offener Vakanzen konsultieren [1].



Abbildung 1: Die Entwicklung der Vakanzzeit in Deutschland seit 2008. Grafik: [1]

Auch wenn dieser Befund bei Großkonzernen sowie populären Arbeitgebern und Arbeitgeberinnen im Verhältnis nur in geringem Ausmaß auftritt, kommt er bei kleineren und mittelgroßen Unternehmen (KMUs) und insbesondere bei Unternehmen im ländlichen Raum immer massiver zur Geltung, nicht zuletzt wegen einer zunehmenden Wanderung gerade junger Generationen in städtisch geprägte Gebiete [2,3].

Dies kann im Extremfall dazu führen, dass gerade auf der Ebene der Fachkräfte sowie Spezialisten und Spezialistinnen Vakanzzeiten nicht mehr besetzt werden können [1] und die ungewollte – da zum Teil strukturell bedingte – Fluktuation zu einer Stagnation oder gar einem Rückgang im Personalbestand führt.

Um diesem Unterangebot zu begegnen, gibt es verschiedene Möglichkeiten. Ein regelmäßiger Lösungsansatz wird darin gesehen, die Bewerbermenge durch Maßnahmen des Personalmarketings, wie beispielsweise Employer Branding, zu erhöhen. Dies geschieht in der Hoffnung, dass die Steigerung der reinen Bewerbermenge zu einer besseren Personalauswahl führt [4].

Dieser Ansatz lässt jedoch außer Acht, dass eine Erhöhung der Anzahl an Bewerberinnen und Bewerbern nichts über die Qualität der Personalauswahl aussagt. Es wird also nicht ersichtlich, ob die Personalauswahl aus einem Pool an Kandidatinnen und Kandidaten auch tatsächlich in der Lage ist, geeignete Bewerberinnen und Bewerber zu erkennen und auszuwählen respektive ungeeignete Bewerberinnen und Bewerber zu identifizieren und abzulehnen.

Dementsprechend können vor allem folgende Situationen eintreten:

- Die Menge an Personen im Talent-Pool steigt, jedoch sind diese hinsichtlich ihrer Eignung für die jeweilige Vakanz nach wie vor nur bedingt geeignet
- Es kommt zu einer Erhöhung der Anzahl an geeigneten Bewerberinnen und Bewerbern im Talent-Pool, jedoch ist das Personalauswahlverfahren nicht in der Lage, diese zu erkennen
- Neben der qualitativen Erhöhung der Menge an Bewerberinnen und Bewerbern gelingt es ebenfalls, die Kandidatin oder den Kandidaten mit der besten Eignung zu identifizieren

Gerade die berufliche Eignungsdiagnostik bietet Möglichkeiten, objektive, reliable und valide Auswahlinstrumente einzusetzen, um aus einem Pool an Kandidatinnen und Kandidaten die Geeignetste oder den Geeignetsten herauszufiltern. Diese Instrumente kommen jedoch in der Praxis nur selten in der gewünschten Ausprägung zum Einsatz [5].

In einer ersten eigenen Studie im Jahr 2018 in diesem Bereich konnte der Befund partiell bestätigt werden. Sowohl HRM-Studierende als auch professionelle Recruiterinnen und Recruiter treffen ihre Auswahlentscheidung auf Basis eingeschränkt valider Entscheidungen und unterliegen darüber hinaus verschiedensten unbewussten

Beobachtungs- und Beurteilungsfehlern. Intervenierende Variablen wie beispielsweise die einschlägige fachliche Erfahrung tragen nahezu nicht zur Verbesserung der Auswahlqualität bei. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch andere Studien aus jüngerer Zeit [6].

Es stellt sich daher die Frage, welchen Beitrag die (nicht vorhandene) Qualität der eigenen Personalarbeit – und hier insbesondere das Recruiting – zu dieser ohnehin angespannten Situation des Unterangebots an geeigneten Bewerberinnen und Bewerbern leistet. Folglich soll im geplanten Forschungsvorhaben auf diesen bislang weniger untersuchten Bereich eingegangen und dabei geklärt werden, wie sich Qualität im Recruiting nachvollziehbar messen lässt. Insbesondere soll dabei die Situation von KMUs im ländlichen Raum – untersucht am Beispiel des Regierungsbezirks Mittelfranken – fokussiert werden.

99,5 Prozent aller Unternehmen in Deutschland lassen sich den KMUs zuordnen und beschäftigen in etwa 60 Prozent der sozialversicherungspflichtigen Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer [7]. In Verbindung mit der allseits bekannten und prekären Situation von KMUs [8,9,10] liegt die Vermutung nahe, dass das Forschungsprojekt gerade für diese Zielgruppe einen nachhaltigen Mehrwert schaffen kann und ein hohes Interesse an den Forschungsergebnissen gegeben sein müsste. Nicht zuletzt liegt die Förderung und Weiterentwicklung des Mittelstands auch im allgemeingesellschaftlichen Interesse, wie regelmäßige Förderlinien der Bundesrepublik Deutschland – zum Beispiel KMU-innovativ des BMBF, die Mittelstandsförderung durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie (STMWI) oder auch das Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) – zeigen.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Aus der dargestellten Ausgangssituation resultieren folgende Ziele:

1. Klärung der Fragestellung, wie sich Qualität im Recruiting – speziell bei KMUs im ländlichen Raum – messen lässt
2. Definitorische Abgrenzung des Repräsentativitätsbegriffs und Ziehung einer entsprechenden Stichprobe für den Regierungsbezirk Mittelfranken
3. Entwicklung und Einsatz von Diagnostiktools und Untersuchungsinstrumenten zur multiperspektivischen Analyse der Recruiting-Qualität
4. Evaluation des Forschungsansatzes und Darstellung erster Ergebnisse
5. Identifikation anschließender Forschungsfragen

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Zu 1.: Bedeutung von Qualität im Recruiting, insbesondere für KMUs im ländlichen Raum

Der **Qualitätsbegriff** wird im alltäglichen Sprachgebrauch oft verwendet, jedoch nur selten spezifiziert. Auch in der einschlägigen Fachliteratur liegt keine Einheitsdefinition vor. Daher soll nachfolgend Qualität als zeitpunktbezogener Prozess des Beurteilens vorab definierter Kriterien hinsichtlich eines Erfüllungsgrades verstanden werden. Sowohl Beurteilungskriterien als auch der Erfüllungsgrad sind durch eine bestimmte Instanz vorgegeben (zum Beispiel Kundinnen und Kunden, Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, Geschäftsführung etc.). Das Qualitätsniveau bemisst sich daran, inwieweit die Beurteilungskriterien erfüllt werden, wobei das grundlegende Ziel darin besteht, den Mehrwert und damit das Qualitätsniveau der jeweiligen Interessentin oder des jeweiligen Interessenten zu maximieren [11].

Das bedeutet am Beispiel der Personalauswahl, dass sich die Qualität nicht nur am Interesse der Recruiterin beziehungsweise des Recruiters oder der Bewerberin beziehungsweise des Bewerbers bemisst, sondern auch weitere Stakeholder ein berechtigtes Interesse – mitunter basierend auf quantifizierbaren Erfolgskriterien (zum Beispiel „cost-per-hire“) – am Personalauswahlprozess haben.

Bei diesem **relativen Qualitätsansatz** ist es ausreichend, wenn Prozesse an den Interessen der relevanten Interessensgruppen ausgerichtet sind beziehungsweise werden. Neben dem motivationalen Hintergrund ist es jedoch auch erforderlich, Qualität mittels quantitativer Variablen zu erfassen. Diese Operationalisierung führt zum **absoluten Qualitätsansatz**, der sich über bestimmte „harte“ Erfolgsparameter legitimiert.

Die Steigerung der Zufriedenheit bestimmter Interessensgruppen durch Anpassung des Personalauswahlprozesses an den jeweiligen Bedürfnissen (relative Qualität) ist damit kein ausschließliches Indiz für gute Personalauswahl, wenn indes beispielsweise eine hohe Frühfluktuationsquote (absolute Qualität) vorliegt – Bewerberinnen und Bewerber also unmittelbar nach Anstellung wieder kündigen.

Die Verbesserung der Qualität in der Personalauswahl ist dabei eine im Verhältnis zu anderen QM-Methoden relativ junge Anforderung, die sich beispielsweise in der DIN 33430 wiederfindet. Diese bezieht sich auf „[...] a) die Planung von berufsbezogenen Eignungsbeurteilungsprozessen; b) die Auswahl, Zusammenstellung, Durchführung und Auswertung von Verfahren; c) die Interpretation der Verfahrensergebnisse und die Urteilsbildung; d) die Anforderungen an die Qualifikation der an Eignungsbeurteilungsprozessen beteiligten Personen“ [12]. Die DIN 33430 geht sehr spezifisch auf den Prozess der Eignungsbeurteilung sowie dazugehöriger vor- und nachgelagerter Prozesse ein und verweist immer wieder auf die Nutzung evidenzbasierter Auswahlverfahren. Basierend auf den bisherigen Ausführungen sind die nachfolgenden Aspekte als Indiz für eine entsprechend hohe Qualität des Personalauswahlverfahrens zu sehen.

Dementsprechend können vor allem folgende Situationen eintreten:

- Bei der Umsetzung des Personalauswahlverfahrens werden die Interessen relevanter Stakeholder bei der Prozessgestaltung und -umsetzung berücksichtigt (zum Beispiel Bewerberinnen und Bewerber, Geschäftsführerinnen und Geschäftsführer, Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter etc.)
- Es kommt zu einer Erhebung und Evaluation wichtiger Kennzahlen im Personalauswahlprozess – sogenannte „Key Performance Indicators“ (KPI) – wie beispielsweise Frühfluktuationen, „cost-per-hire“, „hire-per-channel“ etc.
- Die Anforderungen der DIN 33430 sind im jeweiligen Unternehmen umgesetzt beziehungsweise finden Berücksichtigung im Personalauswahlverfahren

Neben der Klärung des Qualitätsbegriffs bleibt die Frage, was nachfolgend unter **klein- und mittelständischen Unternehmen (KMUs)** zu verstehen ist. Eine populäre Definition findet sich in einer Empfehlung der EU-Kommission wieder. Diese definiert KMUs über die Anzahl der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sowie den Jahresumsatz oder die Jahresbilanzsumme [13]:

	Kleinstunternehmen	Kleinunternehmen	Mittlere Unternehmen
Mitarbeiterzahl	< 10	< 50	< 250
Jahresumsatz	≤ 2 Mio. EUR	≤ 10 Mio. EUR	≤ 50 Mio. EUR
Jahresbilanzsumme	≤ 2 Mio. EUR	≤ 10 Mio. EUR	≤ 43 Mio. EUR

Tabelle 1: Abgrenzungsmerkmale zur Definition von KMUs gemäß Empfehlung der Kommission der europäischen Gemeinschaften. Eigene Darstellung in Anlehnung an: [13]

In Anbetracht einer möglichen Anschlussfinanzierung des hier vorgestellten Projekts bietet es sich an, der Definition zu folgen, um eine Kompatibilität mit den Förderinstanzen von Bund und Land zu gewährleisten. Dabei ist zu beachten, dass neben der Anzahl der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter – dem zentralen Schlüsselkriterium der Definition – auch andere Abgrenzungen existieren. Beispielsweise geht das Institut für Mittelstandsforschung (IfM) von 499 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter als obere Grenze aus [14]. Wie zu zeigen sein wird, präferiert das vorliegende Forschungsprojekt eine Kombination beider Ansätze, um die noch zu ziehende Stichprobe möglichst flexibel zu gestalten.

Die Definition des **ländlichen Raums** hängt von den betrachteten Determinanten ab, etwa die Unterschiede zwischen topographischen und/oder klimabedingten Ausprägungen im Vergleich zu Wirtschaftsräumen und Populationen in bestimmten Gebieten. Letzteres Kriterium nutzt beispielsweise die Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) und klassifiziert diese als „[...] predominantly urban (PU), intermediate regions (IN), predominantly rural regions close to a city (PRC) and predominantly rural remote regions (PRR)“ [15, S.14]. Ausschlaggebend für die Eingliederung in eine der eben dargestellten Regionen ist der Anteil der betrachteten Population in den ländlichen Gebieten [15, S.140]. Damit folgt die OECD dem Weg einer Negativdefinition, das heißt, die Eingliederung in (überwiegend) städtisch ausgeprägte Regionen erfolgt nicht über den Definitionsversuch von „Stadt“ beziehungsweise „städtischer Raum“, sondern über den Anteil der Bevölkerung im betrachteten ländlichen Gebiet. Was also nicht dem ländlichen Raum zugeordnet werden kann, muss folglich dem städtischen Raum zuordenbar sein.

Ein Beispiel für eine Positivdefinition findet sich beim Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), dem sich auch das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) größtenteils anschließt:

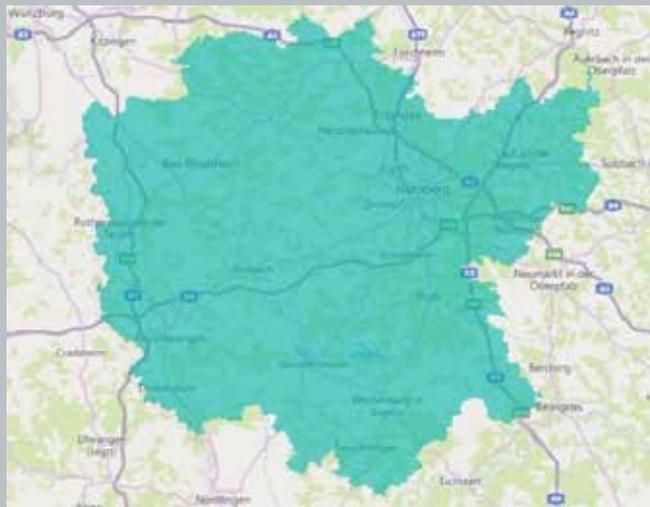
Kreisfreie Großstädte	Kreisfreie Städte mit mindestens 100.000 Einwohnern
Städtische Kreise	Kreise mit einem Bevölkerungsanteil in Groß- und Mittelstädten von mind. 50 % und einer Einwohnerdichte von mind. 150E./km ² ; sowie Kreise mit einer Einwohnerdichte ohne Groß- und Mittelstädte von mind. 150E./km ²
Ländliche Kreise mit Verdichtungsansätzen	Kreise mit einem Bevölkerungsanteil in Groß- und Mittelstädten von mind. 50 %, aber einer Einwohnerdichte unter 150E./km ² , sowie Kreise mit einem Bevölkerungsanteil in Groß- und Mittelstädten unter 50 % mit einer Einwohnerdichte ohne Groß- und Mittelstädte von mind. 100E./km ²
Dünn besiedelte ländliche Kreise	Kreise mit einem Bevölkerungsanteil in Groß- und Mittelstädten unter 50 % und Einwohnerdichte ohne Groß- und Mittelstädte unter 100E./km ²

Tabelle 2: Definitionsansatz städtischer und ländlicher Kreise gemäß BBSR. Eigene Darstellung in Anlehnung an: [16]

Die geplante Zusammenarbeit mit Unternehmen aus Mittelfranken erfordert eine eingehendere Analyse der Stadt-Land-Strukturen in diesem Regierungsbezirk. Basierend auf der reinen Bodenfläche entfielen 2017 mit 724.369 Hektar in etwa 10 Prozent der bayerischen Bodenfläche auf den Regierungsbezirk Mittelfranken, wobei der Großteil der mittelfränkischen Bodenfläche mit knapp 60 Prozent der Region „Westmittelfranken“ zuzuordnen ist [17]. Die verbleibenden 40 Prozent entfallen auf die Region Nürnberg, bestehend aus der Stadt Nürnberg, Stadt Erlangen, Stadt Fürth, Stadt Schwabach, Landkreis Erlangen-Höchstadt, Landkreis Fürth, Landkreis Nürnberger Land sowie dem Landkreis Roth [ebd.,18]. Der Blick auf die Bevölkerungsdichte der Stadt Schwabach sowie Stadt Ansbach zeigt, dass die Stadt Ansbach bei relativ gleicher Population eine um mehr als 50 Prozent geringere Bevölkerungsdichte aufweist [19]. Dies lässt auf eine höhere Verstädterung von Schwabach im Vergleich zu Ansbach schließen und zeigt zudem, dass eine hohe Population ohne Vergleich zur dahinterliegenden Fläche noch kein ausschließliches Indiz für die Zuordnung in ein städtisch beziehungsweise ländlich geprägtes Gebiet darstellt, was für die Nutzung der Bevölkerungsdichte zur Definition des ländlichen Raums spricht. Auch der Begriff „Stadt“ in der Ortsbezeichnung als Ausschlusskriterium zur Eingliederung von Gebieten in städtisch geprägte Areale ist nicht zulässig. Dies zeigt sich beispielsweise bei der Stadt Ellingen, die durch die vor Ort vorhandene Residenz zwar Stadtrecht genießt, mit 3.813 Einwohnerinnen und Einwohnern und einer Bevölkerungsdichte von 121 Einwohnern pro Quadratkilometer jedoch klar dem ländlichen Raum zuzuordnen ist. Daraus resultiert, dass der Definitionsansatz des BBSR angemessener erscheint und als Basis für die Forschungsarbeit dienen soll.

Wie angeführt, qualifizieren sich vor allem jene Regionen zur Aufnahme in die Stichprobe, die weniger als 150 Einwohner pro Quadratkilometer haben. In Folge dessen galt es, zu ermitteln, welche Ortschaften im Regierungsbezirk Mittelfranken weniger als 150 Einwohner pro Quadratkilometer haben, was nachfolgender Abbildung entnommen werden kann.

Regierungsbezirk Mittelfranken



Ländlicher Raum im Regierungsbezirk Mittelfranken

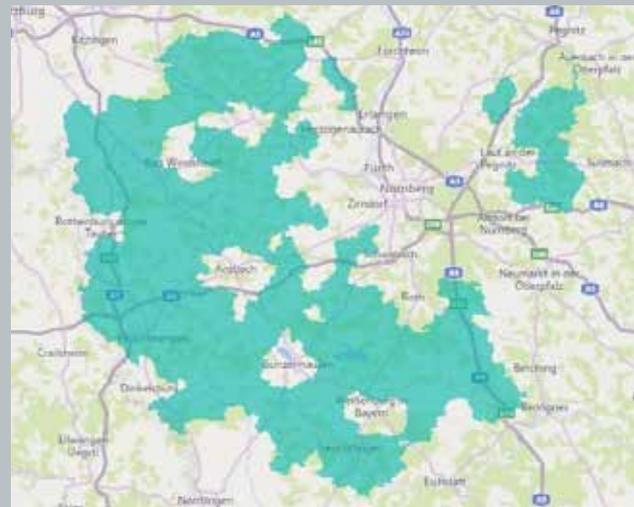


Abbildung 2: Geographische Zuordnung ländlicher Regionen im Regierungsbezirk Mittelfranken basierend auf dem Zuordnungskriterium $<150\text{E./km}^2$. Eigene Darstellung

Somit sind knapp zwei Drittel der Fläche des Regierungsbezirks Mittelfranken dem ländlichen Raum zuzuordnen, wobei vor allem Süd- und Westmittelfranken ländlich geprägt sind. Dies entspricht den Landkreisen Neustadt-Aisch Bad Windsheim, Roth, Nürnberger Land, Weißenburg-Gunzenhausen, Ansbach, und Erlangen-Höchstadt.

Als Zwischenfazit bleibt festzuhalten, dass Qualität im Recruiting durch die Berücksichtigung der Interessen von Zielgruppen am Personalauswahlprozess (relative Qualität) und unter Absicherung dieser anhand konkreter Kennzahlen (absolute Qualität) definiert werden kann. Gerade durch die zunehmende Brisanz der Situation für KMUs in ländlich geprägten Gebieten, die die Forschenden nachfolgend mittels der Bevölkerungsdichte definieren, kann dadurch ein Mehrwert zur Gewinnung und vor allem zur Auswahl geeigneter Bewerberinnen und Bewerber geleistet werden.

Zu 2.: Klärung einer repräsentativen Stichprobe

Ausgehend von einer validen Grundgesamtheit, die alle klein- und mittelständischen Unternehmen des Regierungsbezirks Mittelfranken umfassen muss, lassen sich mittels geschichteter Zufallsstichprobe relevante Unternehmen ziehen. Ziel ist es, einen mit hoher Wahrscheinlichkeit vorliegenden Rückschluss von Erkenntnissen der Stichprobe auf die Grundgesamtheit zu ermöglichen [20]. Nichtsdestotrotz wird eine gewisse Unschärfe verbleiben, da nie alle relevanten Kriterien bei einer Stichprobenziehung abgebildet werden können.

Zur Definition der **Grundgesamtheit** haben die Forschenden auf eine entsprechende Unternehmensdatenbank zugegriffen, wobei Quellen mit freiwilliger Beteiligung (beispielsweise „Key to Bavaria“) als ungeeignet erscheinen. Nachdem der Zugriff auf Daten der Wirtschaftsförderungen der betroffenen Landkreise – aus Datenschutzgründen – nicht möglich war, konnte die IHK Nürnberg für Mittelfranken eine valide Unternehmensdatenbank mit rund 10.500 Datensätzen zur Verfügung stellen.

Zwei relevante Repräsentativitätskriterien bilden die bereits bekannten klein- und mittelständischen Unternehmen auf der einen Seite und andererseits der ländliche Raum im Regierungsbezirk Mittelfranken ab.

Bei der Reduktion dieser Grundgesamtheit auf eine adäquate Stichprobe muss berücksichtigt werden, dass durch die Wahl der beteiligten Unternehmen eine repräsentative Branchenverteilung erzielt wird. Allerdings ergibt sich hierbei die Herausforderung bei Unternehmen mit Filialstruktur. Gerade bekannte Einzelhandelsunternehmen oder auch Bäckereiketten haben vielerorts durch deren Filialstruktur beziehungsweise Franchise Personal vor Ort im Einsatz. Bei diesen Unternehmen interessieren jedoch weniger die operativen Vorgänge in den Filialen vor Ort, sondern mehr das Recruiting der übergeordneten Zentralverwaltung. Daher werden operative Filialen

von Unternehmen in der Grundgesamtheit nicht berücksichtigt, sondern es qualifizieren sich lediglich die Zentralverwaltungen, die mit dem Recruiting des Personals für die Filialen betraut sind.

Die Aggregation der Wirtschaftszweigschwergewichte in der IHK Unternehmensdatenbank erfolgte mittels NACE-Klassifikation und ergab folgende TOP 5 Branchen für den ländlichen Raum im Regierungsbezirk Mittelfranken:

- Handel; Instandhaltung und Reparatur von Kraftfahrzeugen
- Erbringung von freiberuflichen, wissenschaftlichen und technischen Dienstleistungen
- Erbringung von Finanz- und Versicherungsdienstleistungen
- Verarbeitendes Gewerbe
- Erbringung von sonstigen wirtschaftlichen Dienstleistungen

Als letztes Entscheidungskriterium verbleibt noch die genauere Größenspezifikation innerhalb der KMUs. Da davon auszugehen ist, dass eine professionalisierte Personalauswahl ein ausreichendes Bewerberinnen- und Bewerberaufkommen voraussetzt, wird die Grundgesamtheit vor allem auf die Beschäftigtengrößenklasse 200 bis 499 reduziert. Zur Vermeidung einer zu geringen Beteiligungs- und Rücklaufquote erfolgte anschließend eine Erweiterung dieser Definition auf eine Beschäftigtengrößenklasse von 100 bis 199 Beschäftigten. Folglich standen – rein formal – 106 Unternehmen zur Verfügung.

Anzahl der Beschäftigten je Beschäftigtengrößenklasse aller Datensätze

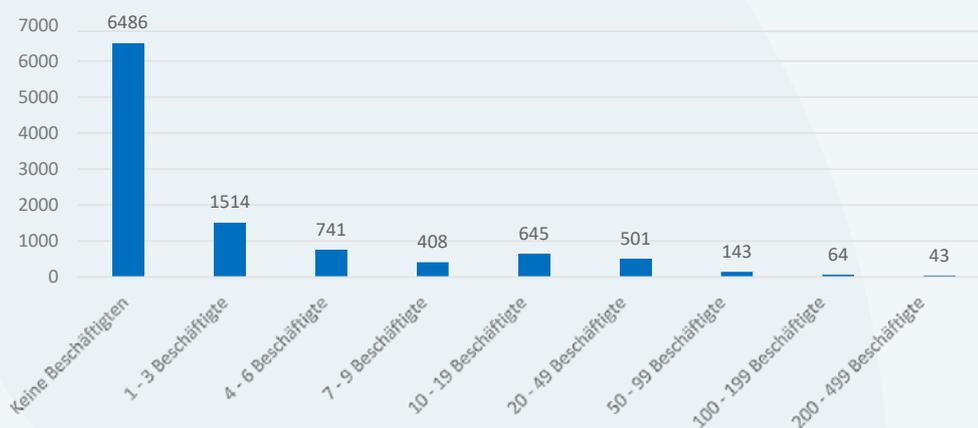


Abbildung 3: Verteilung der Unternehmen der Grundgesamtheit nach Beschäftigtengrößenklassen². Grafik: Eigene Darstellung

Durch Kombinatorik der vorab genannten Auswahlparameter hätte sich eine lediglich 36 Unternehmen umfassende Stichprobe ergeben, wie der nachfolgenden Abbildung entnommen werden kann. Selbst unter der Annahme einer idealtypischen Rücklaufquote von 100 Prozent wären kaum empirisch belastbare Ergebnisse erzielt worden.

Grundgesamtheit:	10.544 Unternehmen
abzgl. Unternehmen in städtisch geprägten Gebieten (>150 Einwohner / km ²)	6.454 Unternehmen
= Um städtisch geprägte Gebiete bereinigte Grundgesamtheit	4.090 Unternehmen
abzgl. Unternehmen außerhalb der TOP 5 Branchen	715 Unternehmen
= Branchenbereinigte Grundgesamtheit	3.375 Unternehmen
abzgl. Unternehmen außerhalb der relevanten Beschäftigtengrößenklassen (0 - 99 Beschäftigte)	3.339 Unternehmen
= Geschichtete Stichprobe	36 Unternehmen

Abbildung 4: Darstellung der geschichteten Stichprobe. Grafik: Eigene Darstellung

Damit ergibt sich zwar keine vollständige Repräsentativität für die TOP 5 Branchen sowie den ländlichen Raum, jedoch eine repräsentative Stichprobe für klein- und mittelständische Unternehmen in einer Beschäftigten-größenklasse von 100 bis 499 Beschäftigten für nahezu alle Landkreise im Regierungsbezirk Mittelfranken. Diese Einschränkung erscheint in Anbetracht der Forschungsökonomie als gerechtfertigt.

Zu 3.: Entwicklung und Einsatz von Untersuchungsinstrumenten

a) Einsatz eines apparativen Diagnostik-Ansatzes im HRM

2018 wurde eine erste Vorstudie mit 58 Studierenden und 12 professionellen Recruiterinnen und Recruitern durchgeführt. Die Probandinnen und Probanden mussten aus einer Datenbank mit fiktiven Bewerberinnen und Bewerbern den geeignetsten Kandidaten beziehungsweise die geeignetste Kandidatin für eine Vakanz auswählen. Neben der Abfrage persönlicher Erfahrungen und Einstellungen im Bereich der Personalauswahl durch einen Fragebogen zu Beginn der Simulation zeichneten die Forschenden die Probandinnen und Probanden in dieser mittels Eye-Tracking auf, um im Anschluss die persönlichen Einstellungen und vermeintlich relevanten Einstellungskriterien mittels objektiven Außenkriterien abgleichen zu können. Die Methode des Eye-Tracking bietet die Möglichkeit, durch Aufzeichnung von Blickrichtungsverläufen und -intensitäten auf für die Probandinnen und Probanden relevante Stimuli zu schließen. Dabei kam es zu interessanten Diskrepanzen zwischen den im Vorfeld geäußerten Kriterien, die angeblich für eine Auswahlentscheidung von Relevanz sind, und dem letztlichen Blickrichtungsverhalten. Diese Diskrepanzen führten in Verbindung mit der mangelhaften Repräsentativität der Vorstudie zu der Entscheidung, die Ergebnisse als Replikationsstudie in einem repräsentativeren Rahmen mit Recruiterinnen und Recruitern aus Unternehmen zu vertiefen.

b) Bewerberdatenbank mit Fragebögen

Zur Umsetzung der Vorstudie war es mitunter aus Kosten- und Urheberrechtsgründen erforderlich, eine fiktive **Bewerberdatenbank** mit einem Stellenprofil sowie einer dazugehörigen Stellenausschreibung und Bewerbungen zu generieren. Mittels zufallsbasierter Parametrisierung einzelner Bewerberbestandteile – unter anderem CV, Bewerbungsfoto, Anschreiben, Arbeitszeugnisse, Nachweise außerberuflichen sowie fachbezogenen Engagements – war es möglich, ein verhältnismäßig ausgeglichenes Feld von zehn Bewerberinnen und Bewerbern herzustellen (s. nachfolgende Abbildung), aus dem ein bis zwei Bewerberinnen und Bewerber hinsichtlich ihrer Eignung für die fiktive Vakanz hervorstachen. Um das „look and feel“ der Bewerberdatenbank möglichst realitätsnah zu gestalten, wurden im Anschluss fiktive Unterlagen erstellt und in die Bewerberdatenbank integriert.

Status	Einschätzung	Eingang	Name	Stelle
in Bearbeitung	n/a	20.04.2018	Frau Franziska Arnold	Disponent
in Bearbeitung	n/a	20.04.2018	Frau Katrin Luisa Gröner	Disponent
in Bearbeitung	n/a	13.04.2018	Herr Lars Holzner	Disponent
in Bearbeitung	n/a	23.04.2018	Herr Finn Jungbauer	Disponent
in Bearbeitung	n/a	15.04.2018	Frau Claudia Sophia Lämmermann	Disponent
in Bearbeitung	n/a	16.04.2018	Frau Judith Meierhuber	Disponent
in Bearbeitung	n/a	17.04.2018	Frau Anna-Lena Pausen	Disponent
in Bearbeitung	n/a	18.04.2018	Herr Stefan Schmitt	Disponent
in Bearbeitung	n/a	19.04.2018	Herr Max Tietel	Disponent
in Bearbeitung	n/a	14.04.2018	Herr Peter Wildenberg	Disponent

Abbildung 5: Landing Page der fiktiven Bewerberdatenbank. Eigene Darstellung

Abbildung 6: Darstellung eines fiktiven Bewerberprofils. Eigene Darstellung

Neben der Simulation der Bewerbungssichtung erfolgte eine Vor- sowie Nachbefragung (zur Vorbefragung s. a)). Im Rahmen der Nachbefragung wurde unter anderem die Usability der Bewerberdatenbank, der fachliche Inhalt, ein Rückblick auf die Vorbefragung, das Forschungssetup sowie eine Eigenreflexion abgefragt. Die Ergebnisse aus der Vor- und Nachbefragung wurden später mit den Ergebnissen und Verhaltensbeobachtungen aus der Simulation verglichen.

Zur Steigerung der Objektivität wurden die Informationen einheitlich zur Verfügung gestellt. So erhielten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer nach Abschluss der Vorbefragung eine vorbereitete sowie vereinheitlichte Instruktion zur Bearbeitung der Bewerberdatenbank und im Anschluss jeweils identische Abschlussfragebögen. Auch das fiktive Stellenprofil sowie die Stellenausschreibung waren für alle Teilnehmerinnen und Teilnehmer identisch.

c) Qualitätsaudit als Self-Assessment

Zur Erhebung des Status Quo der Personalauswahl wurde im Vorlauforschungsprojekt ein Qualitätsaudit als Self-Assessment erstellt, das sich stark an die DIN EN ISO 9000:2015, die DIN EN ISO 9001:2015 und die DIN EN ISO 19011 anlehnt. Die Prinzipien einer klassischen Auditudurchführung wie beispielsweise das Ziel des Auditprogramms, der Auditumfang, der Auditplan und die relevanten Auditkriterien sowie die objektiven Auditnachweise wurden an dieser Stelle vereinfacht, um eine Zeitersparnis bei der Bearbeitung des Fragebogens zu ermöglichen und dadurch einen höheren Rücklauf zu generieren. Weiterhin liegt die Entscheidung zur Adaption des Auditverfahrens in einem möglicherweise höheren Rücklauf begründet.

Beim Self-Assessment handelt es sich um einen 54 Fragen umfassenden Fragebogen, der mit entsprechenden Verweisen durch den Fragebogen navigiert. Die Personalauswahl wurde um Fragen der Personalakquise, allgemein das HRM betreffende Fragen, Fragen zu einem bereits vorhandenen Qualitätsmanagement und zu relevanten KPIs ergänzt. Die Kriterien, die eingeflossen sind, wurden der fach einschlägigen Literatur wie beispielsweise Studien, Fachzeitschriften, Sammelbänden und Monographien entnommen und haben den Anspruch, den relativen sowie absoluten Qualitätsansatz zu vereinen.

Auf eine ausschließliche Versendung via E-Mail verzichteten die Forschenden, da aus dieser Art der Akquise erfahrungsgemäß ein sehr geringer Rücklauf resultiert. Stattdessen wurden die zuständigen Ansprechpartnerinnen und Ansprechpartner in mehreren Telefonaten eruiert, die dann Fragebögen sowie zusätzliche Informationen – etwa die Projektskizze und Auditinformationen – erhalten haben.

In Bezug auf die Evaluation des eigenen Forschungsansatzes ergeben sich bereits aus der Beantwortung und Rückmeldung der Fragebögen erste Erkenntnisse. Zur Steigerung der Usability des Fragebogens müssten bei

zukünftigen Folgeuntersuchungen Adaptionen vorgenommen werden. Zur Wahrung einer summativen Evaluation griffen die Forschenden bei der vorliegenden Studie nicht formativ in den Forschungsprozess ein.

d) Aufzeichnung eines fiktiven Telefoninterviews

In Ergänzung zu den unter b) und c) beschriebenen Forschungsinstrumenten wurden noch weitere Testinstrumente zur Überprüfung des Auswahlverhaltens von Recruiterinnen und Recruitern entwickelt. Das erste Tool widmet sich dem Telefoninterview (TI), das als Sonderform innerhalb der Interviewverfahren betrachtet werden kann und dennoch relativ weit verbreitet ist. Bei strukturierter und teilstandardisierter Vorgehensweise lassen sich durch diese Methode ausreichend hohe Validitätswerte erzielen [22].

Bei der Erstellung des Telefoninterviews sorgten Schauspielerinnen und Schauspieler für eine realitätsnahe Fallstellung, die bewusst mit typischen Beobachtungs- und Beurteilungsfehlern versehen wurde – zum Beispiel durch Fehler in der Vorbereitung, der Durchführung des Interviews oder der Art der Fragestellung. Im Zuge dessen erstellten die Forschenden eine fiktive Stellenbeschreibung und -ausschreibung, auf die sich die Bewerberinnen und Bewerber bewerben und für die im Anschluss das Telefoninterview (TI) durchgeführt wird.

Durch Einsatz dieses Tools kann untersucht werden, inwiefern (professionelle) Recruiterinnen und Recruiter durch Beobachtungs- und Beurteilungsfehler möglicherweise zu Fehlentscheidungen kommen. Dabei bezieht sich die Recruitingqualität auf ein einfaches Scoring-Verfahren, das vier idealtypische Situationen unterscheidet:

- Situation wurde als fehlerbehaftet erkannt und sie war auch fehlerbehaftet
- Situation wurde als fehlerbehaftet erkannt, sie war jedoch nicht fehlerbehaftet
- Situation wurde als nicht fehlerbehaftet identifiziert und war auch nicht fehlerbehaftet
- Situation wurde als nicht fehlerbehaftet identifiziert, war jedoch fehlerbehaftet

e) Erstellung und Aufzeichnung eines Assessment Centers (AC)

Bei einem Assessment Center (AC) handelt es sich um eine Methode der Personalvorauswahl, die mehrere Einzelverfahren zu einem Gesamtverfahren kombiniert, um über die Kombination von Einzelvaliditäten eine bessere Gesamtvalidität bei der Auswahl von Bewerberinnen und Bewerbern erzielen zu können [22]. Dieses Vorgehen führt jedoch nur dann zum Erfolg, wenn bereits die Validitäten der Einzelaufgaben auf einem entsprechend hohen Niveau sind und regelmäßig evaluiert werden [ebd.].

Die simulierte AC-Übung gehört zum Bereich des „Fact-Findings“ – einer Aufgabenstellung, bei der aus einem Überfluss an Informationen die relevanten Informationen herausgefiltert werden müssen – und wird in den Kontext eines ACs eingebunden. Im Gegensatz zum TI kann mit Hilfe dieses Tools eine Verbindung zum selbst- und fremdreflektierten Lernen hergestellt werden. Das heißt, es dient weniger dem reinen Aufzeigen von Defiziten, sondern bietet auch Möglichkeit, aus den Fehleinschätzungen zu lernen, um diese in Zukunft zu vermeiden.

Die Recruitingqualität einer Probandin oder eines Probanden bemisst sich daran, inwiefern sie oder er in der Lage ist, das Fehlverhalten auf Seiten der Teilnehmerinnen und Teilnehmer und Beobachterinnen und Beobachter des ACs – das bewusst eingestreut wurde – zu erkennen.

Zwischenergebnis:

Durch die bisherigen Maßnahmen und Forschungsergebnisse konnten die Forschenden einen ersten Pool an Diagnostiktools zur selbst- und fremdgesteuerten Analyse der Recruitingqualität der Personalauswahl potenzieller Unternehmen generieren. All diese Tools sind durch den Bezug zur Personalauswahl im Allgemeinen und zur Aufdeckung von Beobachtungs- und Beurteilungsfehlern im Speziellen miteinander verbunden und bieten eine fundierte Ausgangsbasis, um diese im Zuge der Personalvorauswahl einzusetzen. Gerade für Bildungsanbieter könnte diese Erkenntnis von Interesse sein, wenn es um die Ausbildung und Schulung von Personalverantwortlichen mit Kompetenzen in der Personalauswahl geht.

Zu 4.: Forschungsevaluation mit Darstellung erster Ergebnisse

Wie bereits unter 3a) erwähnt, zeigen sich Diskrepanzen zwischen Einstellung und Verhalten. Die in den Vorbefragungen angegebenen und angeblich relevanten Entscheidungskriterien finden wenig bis keine Berücksichtigung

in den letztlich Entscheidungen. Diese Inkonsistenz scheint unabhängig von der jeweiligen Erfahrung im Recruiting zu sein. Darüber hinaus ist die Tatsache, dass eine fiktive Bewerberin oder ein fiktiver Bewerber von zwei Recruiterinnen und Recruitern eines Unternehmens anhand verschiedener Entscheidungskriterien unterschiedlich kategorisiert wurde, als bedenklich einzustufen.

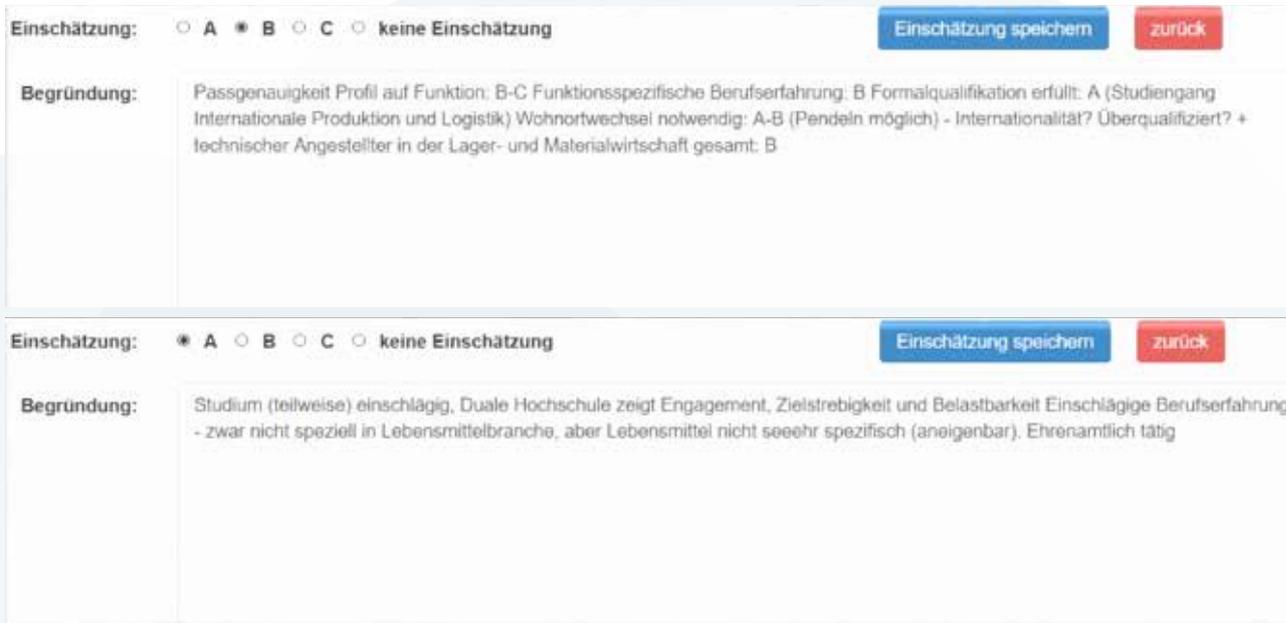


Abbildung 7: Unterschiedliche Kategorisierung einer Bewerberin oder eines Bewerbers durch zwei Recruiterinnen und Recruiter eines Unternehmens. Eigene Darstellung

Auch der hinlänglich bekannte Befund, dass das Bewerbungsfoto einer Bewerberin oder eines Bewerbers keinen Rückschluss auf die jeweilige Leistungsfähigkeit und -motivation zulässt [22], hielt die Teilnehmerinnen und Teilnehmer zumindest nicht davon ab, die Bewerbungsfotos mit einer entsprechend langen Verweildauer – die Heat Map des Eye-Trackings beginnt sich bereits orange zu färben – zu betrachten.



Abbildung 8: Moderate Blickintensität bei Betrachtung von Bewerbungsfotos. Eigene Darstellung

Zwar sagt eine lange Verweildauer auf dem Bewerbungsfoto noch nichts über eine explizite Auswahlentscheidung aus. Implizit kann jedoch der HALO-Effekt als einer von vielen Beurteilungsfehlern resultieren, nach dem ein Merkmal – hier das Bewerbungsfoto – weitere und womöglich kritischere Aspekte der Bewerberin oder des Bewerbers überlagert. In Folge dessen kann die Recruiterin oder der Recruiter auf Grund eines sympathischen Bewerbungsfotos über mögliche und gegebenenfalls für die zu besetzende Vakanz relevantere Defizite in der Bewerbung hinwegsehen, ohne dies bewusst wahrzunehmen. Nicht zuletzt wegen solcher Beurteilungsfehler erfreuen sich anonyme Bewerbungsverfahren zunehmender Beliebtheit.

Diese ersten Erkenntnisse bestärken den Bedarf, die Personalauswahl von Unternehmen eingehender zu untersuchen und die bereits entwickelten Tools aus Gründen der Nachhaltigkeit und Notwendigkeit weiter auszubauen und erneut anzuwenden. Da der Fokus der Vorstudie bereits stark an einer externen – teilweise apparativen – Analyse ausgerichtet ist, erweiterte das Vorlaufforschungsprojekt diesen um die Selbstbeurteilung der Qualität der Personalauswahl durch Personalverantwortliche, was dem Qualitäts-Audit als Self-Assessment entspricht. Die Forschenden führten die Datenerhebung vom 30.08.2019 bis 30.10.2019 durch und richtete sie an die oben beschriebene Stichprobe $n=106$. Trotz eines aktuellen Rücklaufs von knapp 19 Prozent, sind die bislang vorliegenden Ergebnisse noch nicht empirisch belastbar³. Einige erste Ergebnisse sollen dennoch im Folgenden präsentiert werden.

Hinsichtlich der **Relevanz einschlägiger Bewerbungsunterlagen** ist es wenig verwunderlich, dass der Lebenslauf das wichtigste Dokument im Bewerbungsprozess darstellt ($s_{VS}=48$, $s_{HS}=52$)³. Gefolgt wird dieses Ergebnis von den Arbeitszeugnissen von Arbeitgeberinnen Arbeitgebern ($s_{VS}=1.51$, $s_{HS}=2.42$) und dem Abschlusszeugnis des Studiums ($s_{VS}=1.88$, $s_{HS}=2.54$). Interessanterweise landet das Anschreiben/Motivationsschreiben mit Platz 4 nicht (mehr) unter den TOP 3 der relevanten Bewerbungsunterlagen, sodass Auswahlverantwortliche offenbar zunehmend die mangelhafte Aussagekraft dieses Dokuments bezogen auf die Leistungsfähigkeit und -motivati-on von Bewerberinnen und Bewerbern antizipieren. Auffällig ist jedoch, dass das Bewerbungsfoto in beiden Studien auf dem vorletzten Platz und damit noch vor den Nachweisen außerberuflichen Engagements landet.

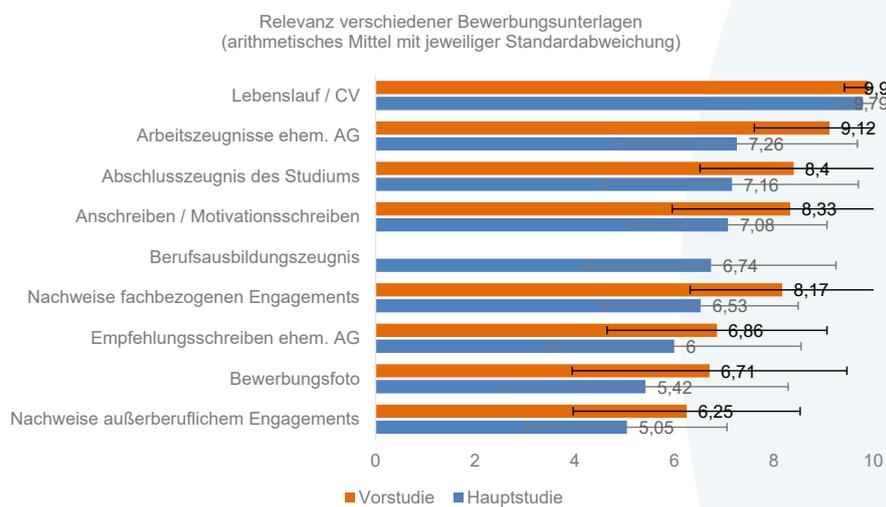


Abbildung 9: Relevanz verschiedener Bewerbungsunterlagen im Bewerbungsprozess. Eigene Darstellung

Weitere Erkenntnisse sind erwartungsgemäß eingetreten. So ist es wenig verwunderlich, dass sich die Auswahl der Instrumente der Personalauswahl nach der jeweiligen Vakanz richtet (90 Prozent Zustimmung) und der Bewerberin oder dem Bewerber im Bewerbungsprozess über die Stellenbeschreibung hinausgehende Informationen bezogen auf die zu besetzende Vakanz zur Verfügung gestellt werden (95 Prozent Zustimmung). Auch war zu erwarten, dass die subjektiv empfundene Validität des angewendeten Personalauswahlverfahrens tendenziell überschätzt wird ($\bar{x} = 7,47$, $s=.7$). Interessant bei der letzten Frage ist, dass lediglich 30 Prozent überhaupt regelmäßig Kennzahlen bezogen auf die Personalauswahl erheben, wobei keine Probandin und kein Proband eine Aussage zur Kennzahl der Validität treffen konnte. Damit liegt eine nicht nachweisbare Divergenz zwischen der subjektiv empfundenen und der tatsächlich vorliegenden Validität vor.

Kritische Ergebnisse sind, dass lediglich die Hälfte der befragten Probandinnen und Probanden die im Auswahlprozess eingesetzten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter bezüglich des Einsatzes der angewendeten Personalauswahlmaßnahmen schult, was der Empfehlung der DIN 33430 zuwiderläuft, die knapp 26 Prozent der Befragten bekannt ist. Weiterhin ist bedenklich, dass lediglich 11 Prozent die Akzeptanz ihres angewendeten Personalauswahlverfahrens überprüfen und nur 17 Prozent die Kosten des Personalauswahlverfahrens regelmäßig erheben und analysieren. Die bisherigen Auswertungen lassen daher den vorsichtigen Schluss zu, dass gerade im Bereich des Nachweises von Maßnahmen – beispielsweise durch KPIs oder Tracking der Kosten der Personalauswahl – entsprechendes Verbesserungspotenzial vorhanden ist.

Im Rahmen der **Personalakquise** und der genutzten Akquisekanälen ist es nicht verwunderlich, dass auch KMUs – vergleichbar mit Großunternehmen und Konzernen – Vakanzen am häufigsten auf Online-Stellenbörsen wie beispielsweise Indeed, Monster.de oder StepStone ausschreiben und damit dem „post and pray“-Ansatz folgen. In Zeiten zunehmender Vollbeschäftigung wird es jedoch immer schwieriger, über diesen Akquisekanal geeignete Bewerberinnen und Bewerber zu akquirieren, da diese hierfür aktiv auf der Suche sein müssten, was nicht immer gegeben ist. Interessant ist daher der zweitplatzierte Akquisekanal, da auch KMUs offenbar zunehmend auf Mitarbeiterempfehlungssysteme zur Besetzung offener Vakanzen setzen. Damit hat sich eine – wenn auch marginale – Änderung im Nutzungsverhalten von Akquisekanälen von KMUs ergeben, da in der Vergangenheit die Mitarbeiterempfehlungssysteme noch vor den Online-Stellenbörsen lagen [23]. Im Rahmen der zunehmenden Digitalisierung ist die auffällige Positionierung von Printmedien auf Platz 3 über die mögliche Zielgruppe zu erklären, deren Mediennutzungsverhalten sich möglicherweise auf dieses Medium konzentriert.



Abbildung 10: Nutzungsintensität verschiedener Akquisekanäle in der Personalgewinnung. Eigene Darstellung

Bei der **Bewerbungsverwaltung** zeigt sich ein relativ ausgewogenes Bild zwischen der Nutzung professioneller Bewerbermanagementsoftware und der Sichtung und Verwaltung eingegangener Bewerbungen in Tabellenkalkulationsprogrammen oder Datenbankmanagementsystemen wie beispielsweise MS Excel und MS Access. Interessanterweise haben bei mehr als einem Drittel der befragten Unternehmen die Bewerberinnen und Bewerber die Möglichkeit, sich über die jeweiligen Profile in Business Social Media Netzwerken – beispielsweise XING und LinkedIn – direkt für eine interessante Vakanz zu bewerben. Gerade vor dem Hintergrund der steigenden Digitalisierung und der zunehmenden Nutzung von Karrierewebsites zur Suche geeigneter Vakanzen sowie einem generationsabhängigen Nutzungsverhalten mobiler Endgeräte, das unter anderem die Nutzung von mobilen Apps zur Bewerbung auf interessante Stellen etwa via „One Click“ umfasst, kann die Ermöglichung digitaler Direktbewerbungen aus Sicht der Bewerberinnen und Bewerber einen starken Mehrwert bieten und damit zu einer steigenden Qualität des Recruitingprozesses beitragen [24].

Zu 5.: Identifikation anschließender Forschungsfragen

Ein zentrales Ergebnis der Vorlaufforschung – wenn auch empirisch auf Grund des geringen Stichprobenumfangs noch nicht gesichert – ist die Überinterpretation der Auswahlstärke des eigenen Personalauswahlverfahrens sowie das Vertrauen darauf, dass die angewandten Maßnahmen einen entsprechend validen Erfolg nach sich ziehen. Dieses Vertrauen wird häufig nicht anhand konkreter Kennzahlen gemessen, sodass ein Nachweis der tatsächlichen Güte des Auswahlverfahrens ausbleibt. Diese Erkenntnis zeigt sich auch bei KANNING in einer aktuellen Veröffentlichung [6]. Demnach „wäre es hilfreich, die Wirksamkeit der eingesetzten Verfahren viel häufiger und qualitativ anspruchsvoller zu evaluieren“ [ebd., S.49]. Auch das Vertrauen auf die eigene Recruitingverfahren kann Fehler in der Personalauswahl nicht verhindern. Ähnlich der vorliegenden Untersuchung kommt auch KANNING zur Aussage „Wir haben mit mehreren Studien belegt, dass erfahrene Personaler in solchen Situationen [Der Autor bezieht sich bei „solchen Situationen“ auf unstrukturierte Interviews] genauso viele Fehler machen wie völlige Laien“ [6, S.50]. Eine qualitative Personalauswahl kann also nicht dort vorliegen, wo Entscheidungen basierend auf Bauchgefühl und ohne nachweisbare Evidenz getroffen werden.

Nach Darstellung der bisherigen Erkenntnisse ist die Klärung, wie Qualität im Recruiting – speziell bei KMUs im ländlichen Raum – belastbar gemessen werden kann, weder hinreichend theoretisch geklärt noch empirisch abschließend gesichert. Speziell im ländlichen Raum zeichnet sich Nachholbedarf bei der Ausgestaltung der Personalauswahl ab. In Anbetracht der gesamtgesellschaftlichen Situation – zum Beispiel steigende Vakanzzeiten oder ein zunehmender Fachkräftemangel – ist eine rechtzeitige Anpassung von Personalauswahlprozessen an die geänderten Anforderungen relevanter Stakeholder erforderlich. Die ersten Ergebnisse bestätigen den gewählten multimethodischen, multimedialen und multiperspektivischen Forschungsansatz und die Berücksichtigung beider Sichtweisen – einer Selbstreflexion sowie die apparativ gestützte Erhebung von objektiven Vergleichsdaten aus externer Sicht. Insbesondere die Verbindung verschiedener biometrischen Methoden, wie beispielsweise Eye-Tracking und Fragebögen, scheinen Potenzial zur weiteren Klärung des thematisierten Problemfeldes zu haben und sollten damit weiterverfolgt werden.

5. Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Die Forschenden bieten die Ergebnisse der Vorlaufforschung einschlägigen Fachzeitschriften oder auch Herausgeberinnen und Herausgebern von Sammelbänden zur Veröffentlichung an. Eine erste Präsentation der Ergebnisse im Rahmen der „Personalleitertagung für die Metropolregion Nürnberg“ im November 2019 erzeugte eine starke Resonanz. Die Beteiligten äußerten großes Interesse an der Weiterbearbeitung des Themas.

Die bereits erwähnte Folgeforschung soll auf einen längeren Zeitraum ausgelegt werden, um die Studienergebnisse der Vorlaufforschung mit einer tiefergehenden Studie zu replizieren und zu analysieren. Es ist geplant, zusammen mit Praxispartnern aus der Metropolregion Nürnberg an der Entwicklung, der Erprobung und dem Ausbau niederschwelliger Weiterbildungsangebote in diesem Kontext weiterzuarbeiten.

¹ Vakanzzeit ist als Zeitraum definiert, der zwischen Meldung der Vakanz und Meldung einer Nachbesetzung an die Bundesagentur für Arbeit liegt.

² Die Beschäftigtengrößenklasse „Keine Beschäftigten“ scheint überproportional belegt zu sein. Eine erste Plausibilitätsprüfung zeigte bereits einige Fehlzusammenhänge. Möglicherweise wären mehr Unternehmen für die Stichprobe geeignet gewesen, was auf Grund des Datenumfangs jedoch nicht korrigierbar war.

³ Eine auffällig verhaltene Teilnahmebereitschaft von Seiten der KMUs – häufig durch Kapazitätsengpässe begründet – erschwerte die Generierung eines hinreichenden Stichprobenumfangs. Die Rücklaufquote von 19 Prozent ist in Anbetracht der sonst in Forschungsprojekten vorhandenen Retouren dennoch als hoch einzustufen.

⁴ VS=Vorstudie aus 2018; HS=Hauptstudie, also das Vorlaufforschungsprojekt aus 2019

6. Literatur

- [1] Bundesagentur für Arbeit (2019): Fachkräfteengpassanalyse 06/2019. Hg. v. Bundesagentur für Arbeit: Statistik/Arbeitsmarktbericht-erstattung. Nürnberg (Berichte: Blickpunkt Arbeitsmarkt). Online verfügbar unter <https://statistik.arbeitsagentur.de/Statistikdaten/Detail/201906/arbeitsmarktberichte/fk-engpassanalyse/fk-engpassanalyse-d-0-201906-pdf.pdf>. Zuletzt geprüft am: 18.11.2019.
- [2] Gade, Christel D.; Helfritz, Kai H.; Murmann, Jörg (2018): Recruiting zwischen Executive Search und Digitalisierung. Eine Kooperationsstudie von iubh, BDU und DGFP. Hg. v. IUBH Internationale Hochschule (Business & Management, Vol.1, Issue 3). Online verfügbar unter https://www.dgfp.de/fileadmin/user_upload/DGFP_e.V/Medien/Publikationen/Studien/11-2018_DGFP_Studie_Recruiting_zwischen_Executive_Search_und_Digitalisierung_-_BDU_DGFP_IUBH_Internationale_Hochschule.pdf. Zuletzt geprüft am: 23.09.2019.
- [3] Statistisches Bundesamt (2018): Bevölkerung, Familien, Lebensformen. Statistisches Jahrbuch 2018. Hg. v. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Jahrbuch/jb-bevoelkerung.pdf?blob=publicationFile>. Zuletzt geprüft am: 23.09.2019.
- [4] Hördt, Olga; Brickwedde, Wolfgang (2019): Die Bedeutung des Employer Branding für die Gewinnung von Nachwuchskräften im Handel. In: Heinemann, Gerrit; Gehrckens, Mathias H.; Täuber, Thomas; Accenture GmbH (Hg.): Handel mit Mehrwert. Digitaler Wandel in Märkten, Geschäftsmodellen und Geschäftssystemen. Wiesbaden: Springer Gabler. S. 495-510.
- [5] Anderson, Neil (2017): Das Verhältnis zwischen Praxis und Forschung in der Personalauswahl: Weiß die linke Hand, was die rechte tut? In: Krause, Diana E. (Hg.): Personalauswahl. Die wichtigsten diagnostischen Verfahren für das Human Resources Management. Wiesbaden: Springer Gabler. S. 1-29.
- [6] Kanning, Uwe P. (2019): Völlig absurd. Wirtschaftspsychologin Uwe Kanning über nicht wissenschaftliche Verfahren in der Eignungsdiagnostik, trügerisches Bauchgefühl und mangelnde Evaluation. Interview geführt von Werner Kipp. Erschienen in: Personalführung (52. Jahrgang, 11/2019). Frankfurt am Main. S.46-51.
- [7] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2018): Wirtschaftsmotor Mittelstand. Zahlen und Fakten zu den deutschen KMU. Online verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Mittelstand/wirtschaftsmotor-mittelstand-zahlen-und-fakten-zu-den-deutschen-kmu.pdf?blob=publicationFile&v=29>. Zuletzt geprüft am: 07.10.2019.
- [8] Creutzburg, Dietrich (2019): Ländlichen Regionen geht der Berufsnachwuchs aus. Erschienen in: Frankfurter Allgemeine online. Rubrik: Karriere. Online verfügbar unter: <https://www.faz.net/aktuell/karriere-hochschule/buero-co/iw-studie-laendlichen-regionen-geht-der-berufsnachwuchs-aus-16284678.html>. Zuletzt geprüft am: 07.10.2019.
- [9] Diekmann, Florian (2019): Die Landflucht der jungen Deutschen. Erschienen in: Spiegel Online. Rubrik: Wirtschaft. Online verfügbar unter: <https://www.spiegel.de/wirtschaft/soziales/deutschland-die-extreme-landflucht-der-jungen-und-ihre-gruende-a-1292981.html>. Zuletzt geprüft am: 18.11.2019.
- [10] Erk, Daniel (2019): Große kleine Welt. Erschienen in: Zeit Online. Rubrik: Arbeit. Online verfügbar unter <https://www.zeit.de/zeit-fuer-unternehmer/2019/02/fachkraeftemangel-unternehmen-standort-provinz-mitarbeiter-flexibilitaet>. Zuletzt geprüft am 07.10.2019.
- [11] DIN ISO 9000:2015-11: Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe. Teil 2: Grundlegende Konzepte und Grundsätze des Qualitätsmanagements. ICS 01.040.03; 03.120.10. S. 10.
- [12] DIN 33430:2016-07: Anforderungen an berufsbezogene Eignungsdiagnostik. ICS 03.100.30. S. 6.
- [13] Kommission der europäischen Gemeinschaften (2003): Empfehlung der Kommission vom 6. Mai 2003 betreffend die Definition der Kleinstunternehmen sowie der kleinen und mittleren Unternehmen. AZ K(2003) 1422. 2003/361/EG. Europäische Union. Online verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUri-Serv.do?uri=OJ:L:2003:124:0036:0041:de:PDF>. Zuletzt geprüft am: 23.11.2019. S. 4ff.
- [14] Institut für Mittelstandsforschung (IfM) Bonn (2016): KMU-Definition des IfM-Bonn. Online verfügbar unter: <https://www.ifm-bonn.org/definitionen/kmu-definition-des-ifm-bonn/>. Zuletzt geprüft am: 23.11.2019.
- [15] OECD (2018): OECD regions and cities at a glance 2018. Paris: OECD Publishing.
- [16] Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (2019): Laufende Raumb Beobachtung – Raumabgrenzungen. Online verfügbar unter: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Raumb Beobachtung/Raumabgrenzungen/deutschland/kreise/Kreistypen4/kreistypen_node.html. Zuletzt geprüft am: 23.11.2019.
- [17] Regierung von Mittelfranken (2018a): Gebiet. Bodenflächen nach Nutzungsarten 2017. Stand: 31.12.2017. Hg. v. Regierung von Mittelfranken. Online verfügbar unter: https://www.regierung.mittelfranken.bayern.de/aufg_abt/abt3/zahlen/01_02_2017.pdf. Zuletzt geprüft am: 23.11.2019.
- [18] Regierung von Mittelfranken (2019): Regionalplanung. Hg. v. Regierung von Mittelfranken. Online verfügbar unter: https://www.regierung.mittelfranken.bayern.de/aufg_abt/abt3/abt35005.htm. Zuletzt geprüft am: 23.11.2019.
- [19] Regierung von Mittelfranken (2018b): Bevölkerung. Bestand und Bevölkerungsdichte am 30. Juni 2018. Hg. v. Regierung von Mittelfranken. Online verfügbar unter: https://www.regierung.mittelfranken.bayern.de/aufg_abt/abt3/zahlen/02_01_2018_06_Z_Bevoelkerungsbestand_Zensus2011.pdf. Zuletzt geprüft am: 23.11.2019.
- [20] Diaz-Bone, Rainer (2019): Statistik für Soziologen. 5. überarbeitete Auflage. München: UVK Verlag.
- [21] Kanning, Uwe P. (2016): Über die Sichtung von Bewerbungsunterlagen in der Praxis der Personalauswahl. In: Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie A&O (60). Göttingen: Hogrefe Verlag. S.18-32.
- [22] Schuler, Heinz (2013): Personalauswahl. Eine eignungsdiagnostische Perspektive. Erschienen in: Handbuch Strategisches Personalmanagement. Stock-Homburg, Ruth (Hg.). 2. überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler. S.29-58.
- [23] Bossler, Mario; Kubis, Alexander; Moczall, Andreas (2017): Große Betriebe haben im Wettbewerb um Fachkräfte oft die Nase vorn. Erschienen in: IAB-Kurzbericht (18/2017). Institut für Arbeitsmarkt und Berufsforschung der Bundesagentur für Arbeit (Hg.). Nürnberg.
- [24] Weitzel, Tim; Maier, Christian; Oehlhorn, Caroline; Weinert, Christoph; Wirth, Jakob; Laumer, Sven (2019): Social Recruiting und Active Sourcing. Ausgewählte Ergebnisse der Recruiting Trends 2019, einer empirischen Unternehmensstudie mit den Top-1.000-Unternehmen aus Deutschland sowie den Top-300-Unternehmen aus der Branche IT und der Bewerbungspraxis 2019, einer empirischen Kandidatenstudie mit Antworten von über 3.300 Kandidaten. Online verfügbar unter: <https://www.uni-bamberg.de/isdl/chris/recruiting-trends/recruiting-trends-2019/>. Zuletzt geprüft am: 24.11.2019.



A photograph of two scientists in a laboratory setting. They are wearing light blue lab coats and safety glasses. The scientist in the foreground is a woman with dark hair tied back, looking slightly to the left. The scientist in the background is a man, also looking to the left. The background is a bright, out-of-focus laboratory environment.

Vorlaufforschung
der TH Nürnberg
2020

Asymmetrische Verzahnung	192
Prof. Dr.-Ing. Alexander Monz, Johannes Gründer, M.Sc. Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik, TH Nürnberg	
Digitale (3D-) Lebensmitteldruck in Europa: Geschäftsmodelle und Lieferkettenaspekte	202
Prof. Dr. Helen Rogers Fakultät Betriebswirtschaft, TH Nürnberg	
Rückgewinnung von Katalysator-Platin aus Siliconen	222
Prof. Dr. Dennis Troegel Fakultät Angewandte Chemie, TH Nürnberg	







Smart-Energy-Prüfstand – Vorentwicklung eines Cloud-unterstützten HiL- Prüfstands für regenerative und netzdienliche Gebäudeversorgungskonzepte

Prof. Dr.-Ing. Arno Dentel
Gunnar Harhausen, Dipl.-Phys.
Sebastian Hummel, M. Eng.
Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik
TH Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Effiziente Gebäudetechnik und erneuerbare Energien im Gebäudebereich können Energie einsparen, erzeugen, speichern und netzdienlich managen – aufgrund des hohen Verbrauchs im Gebäudesektor ist dies ein wichtiger Baustein der Energiewende. Dieses Projekt erweitert einen bestehenden Anlagenprüfstand zu einem sehr universell einsetzbaren Hardware-in-the-Loop-Prüfstand (HiL-Prüfstand) zur Untersuchung und Optimierung von komplexen smarten Gebäudeenergiesystemen. Dazu werden Mess- und Regelungstechnik optimiert, energietechnische Komponenten ergänzt sowie Konzepte zur prädiktiven Regelung und repräsentativen verkürzten Prüfzyklen eingebunden. Zukünftig testet die Arbeitsgruppe damit im Rahmen von studentischen Arbeiten, Industrieraufträgen und Forschungsprojekten Systeme, bevor sie in realen Gebäuden eingesetzt werden.

1. Projektdaten

Fördersumme	34.598 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2020
Fakultät / Institut	Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik, Energie Campus Nürnberg
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Arno Dentel
Kontaktdaten	arno.dentel@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Der Gebäudebereich nimmt einen erheblichen Anteil des weltweiten Gesamtprimärenergiebedarfs ein. Obwohl es in dem Bereich in den letzten Jahren gute Fortschritte in der Energieeffizienz und der Erzeugung Erneuerbarer Energien gab, wurden die politischen Ziele nur teilweise erreicht. Das Erreichen der Klimaschutzziele als Ganzes ist noch fraglich. Speziell im Gebäudesektor sind wichtige Maßnahmen sinnvoller Pfade der Energiewende bisher nur teilweise umgesetzt worden. Die positive Seite ist, dass im Gebäudebereich technisch noch ein erhebliches und relativ leicht umzusetzendes Verbesserungspotenzial besteht.

Bisherige Verbesserungen sind meist auf einzelne Bausteine fokussiert beziehungsweise begrenzt (zum Beispiel effiziente/günstigere PV-Module, Wärmedämmung der Gebäudehülle, effiziente Lüftungsgeräte und Wärmepumpen). Um eine hohe reale Effizienz des „Systems Gebäude“ zu erreichen, muss das Gesamtsystem betrachtet und optimiert werden – insbesondere die Kopplung des Gebäudes zum Strom- und gegebenenfalls Wärmenetz (Kontext Energiewende, Wärmenetze 4.0, netzdienliche Gebäudesysteme, Sektorenkopplung).

Die Forschung behandelt diesen Themenbereich einerseits theoretisch beziehungsweise planerisch: Das System wird auf Basis sequenzieller Planungsmethoden (energetische Gebäudeplanung, Anlagenauslegung auf einzelne Lastfälle) sowie durch (statische) Auswertung der Kenndaten der Einzelkomponenten und gegebenenfalls einer dynamischen Simulationsrechnung untersucht. Dieser Ansatz macht abhängig von der isolierten Betrachtung und den statischen Methoden, was neue Erkenntnisse einer Systembewertung erschwert.

Ein anderer Ansatz ist die praktische Umsetzung, in Form von Demonstrationsgebäuden, teilweise als „Reallabore“ bezeichnet: Der reale Betrieb wird wissenschaftlich begleitet, durch Messung von Energieverbrauch, Witterung und diverser Komfort-/Betriebs-/Regelungsdaten. In einem Demonstrationsgebäude ist (wie in gewöhnli-

chen Gebäuden) meist die Versorgung der Nutzerinnen und Nutzer das oberste Ziel, was den möglichen Umfang von Experimenten, Varianten und somit die möglichen Erkenntnisse deutlich einschränkt.

Eine gezielte experimentelle Untersuchung innovativer Gebäude-/Anlagensysteme im praxisnahen Betrieb (bei zugleich gezielter Variierbarkeit der Parameter) ist mit beiden genannten Ansätzen nicht möglich, wird jedoch auf Basis von umfangreichen Prüfständen realisierbar. Hierbei sind mehrere/alle Komponenten einer versorgungstechnischen Anlage als Hardware enthalten, welche messtechnisch erfasst werden. Hardware, welche aus baulichen- oder Kostengründen nicht real eingebunden werden kann, wird als Echtzeitsimulation abgebildet. Datenaustausch zwischen simulierten und realen Komponenten findet bidirektional statt. Die Simulation des Gebäudes ermöglicht frei wählbaren Einfluss durch Witterung, Nutzerinnen und Nutzer sowie Effizienzklasse.

Das Konzept wird häufig als Hardware-in-the-Loop (HiL) bezeichnet. Damit ist die Einbettung (mindestens) einer zu untersuchenden Hardwarekomponente (zum Beispiel Wärmepumpe) in eine Umgebung (sonstige Anlagentechnik, Gebäude) gemeint, wodurch das Gesamtsystem realitätsnah dargestellt wird. Das Gesamtsystem wirkt auf die Komponente zurück (Schleife, Loop). Dieses Prüfstandkonzept überwindet viele der oben genannten Einschränkungen und ist zudem wesentlich günstiger als ein umfangreich ausgestattetes Demonstrationsgebäude.

In der Arbeitsgruppe wurde im Rahmen von früheren Projekten die Basis für die aktuelle Erweiterung des neuen Prüfstands gelegt. Zunächst baute das Forschungsteam einen grundlegenden Wärmepumpenprüfstand auf, der eine Sole-/Wasserwärmepumpe, Speicher für Wärme, Kälte beziehungsweise Wärmequelle sowie Trinkwarmwasserbereitung umfasst. Die Regelung läuft parallel/alternativ zu der herstellereitigen Regelung des Wärmepumpensystemherstellers. Hier können Lastgänge für die Wärmepumpe selbst, für Wärme-/Kälteverbraucher (jeweils emuliert) vorgegeben und das reale Betriebsverhalten sowie die Effizienz des Systems untersucht werden.

In einem folgenden größeren EU-Projekt erweiterte die Arbeitsgruppe den Prüfstand um ein Blockheizkraftwerk und einen weiteren Wärmespeicher. In weiteren Prüfständen und Demoanlagen der anderen Projektpartnerinnen und -partner waren zusätzliche Komponenten installiert. Wesentliche neue Komponente des Prüfstands war eine systemweite und standortübergreifende Anlagenregelung. Hierfür wurden entsprechende Fernverbindungen installiert („Cloud“).

Nach Projektende waren die Komponenten, welche in der Kompetenz der Projektpartnerinnen und -partner lagen, für die Arbeitsgruppe nicht mehr verfügbar und (plangemäß) mit dem Prüfstand nicht mehr verbunden. Daraus leitete sich die Notwendigkeit ab, die bestehenden Komponenten strategisch zu einem eigenständigen anspruchsvollen Prüfstandsystem für smarte Energiesysteme zu erweitern. Know-how aus vorigen und parallel laufenden Projekten sollte dabei intensiv genutzt werden. Die vorhandene Hardware wurde im hier beschriebenen Forschungsprojekt um zusätzliche Komponenten ergänzt. Zudem strukturierte das Forschungsteam bestehenden Funktionen für Ablaufsteuerung und Anlagenregelung besser und erweiterte diese.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Das hier beschriebene Projekt hat den Charakter einer Vorlaufforschung. In diesem Rahmen wurden viele Aspekte detailliert untersucht und entsprechende technische Lösungen geplant (schematische Übersicht siehe Abbildung 1). Einige Aspekte wurden bereits umgesetzt, weitere müssen in zukünftigen Schritten und im Rahmen größerer Projekte realisiert werden. Die hier gewonnenen Erkenntnisse fließen bereits in neue Forschungsanträge ein, in denen die vorgesehenen Komponenten konkret umgesetzt werden sollen.

Das strategische Ziel des „Smart-Energy-Prüfstands“ wird auf Basis mehrerer Einzelbausteine erreicht.

- Erweiterung der Messtechnik durch präzisere und zusätzliche Sensoren
- Installation weiterer energietechnischer Komponenten (Photovoltaik (PV), Batteriespeichersystem)
- Anpassung der Einbindung der Wärmepumpe sowie optionaler Bypass des Wärmequellen- und Wärmespeichers

- Strategische Ausrichtung an zertifizierbaren Verfahren
- Einrichtung und Nutzung verkürzter repräsentativer Prüfzyklen
- Homogenisierung der Mess- und Datentechnik
- Einrichtung eines parallel eingesetzten Datensystems auf OGEMA-Basis (Open Gateway Energy Management)
- Einbindung des parallel aufzubauenden Klimakammer-Prüfstands
- Ermöglichung der Nutzung von Hardware- und Software-Komponenten sowie Datenstrukturen für andere Projekte der Arbeitsgruppe und Projektpartnerinnen und -partner

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Um die zuvor genannten Einzelmaßnahmen konkret umzusetzen, wurde zunächst die bestehende Ausstattung näher untersucht und in Teilen zusätzlich dokumentiert. Auf der Basis legte das Projektteam die wichtigsten Komponenten fest, die es zu erweitern beziehungsweise zu modernisieren galt. Anschließend planten die Beteiligten verschiedene Detaillösungen vor, unter Berücksichtigung eines begrenzten Finanzbudgets, einer langfristigen Nutzbarkeit und möglichst einer Kompatibilität zu bestehenden Projekten beziehungsweise Installationen der verschiedenen Arbeitsgruppen. Die wichtigsten Komponenten wurden beschafft und installiert. Die noch ausstehenden beziehungsweise optionalen Komponenten ordnete das Team zukünftigen Investitionsschritten und Projektansätzen zu.

Im Verlauf der Recherche, Planung und Ausführung identifizierten die Beteiligten in verschiedenen Richtungen zusätzlichen Bedarf für Erweiterungen sowie weitere Projektideen. Folgend werden die wichtigsten Arbeitsbereiche des Projektverlaufs näher beschrieben.

Erweiterung der Messtechnik

Die Modernisierung der Messtechnik begann bei der Bestandsaufnahme der bestehenden, teilweise historisch und projektspezifisch gewachsenen Sensorik, der Messgeräte und Messwerterfassungssysteme. Hier ermittelte das Team vorliegende Qualitäten beziehungsweise erreichte Messgenauigkeiten und verglich diese mit den zukünftigen Anforderungen. Wo nötig beziehungsweise sinnvoll, bauten die Beteiligten höherwertige Sensoren ein. Daneben installierten sie auch einzelne Messstellen neu. Hier ist insbesondere die Installation hochwertiger Volumenstromzähler zu nennen, zur dedizierten Messung des Wärmepumpenkreislaufs (Abbildung 3). Auf dem Dach des Technikums ist eine Wetterstation installiert. Die erfassten Werte können bei Bedarf live zur Simulation des emulierten Gebäudes herangezogen werden. Es erfolgt eine durchgängige, vom Prüfstand unabhängige Datenspeicherung. Die Werteverläufe konnten als Beispiel für diverse Untersuchungen herangezogen und zum Beispiel mit Wetterprognosedaten verglichen werden.

Wesentliche neue Komponenten sind die modularen Messwerterfassungssysteme, bestehend aus jeweils einem Hauptgerät und drei Einschüben mit je zehn bis 20 Messkanälen (vier- oder zwei-poliger Messtyp). Die Geräte sind in einem zentralen Rack montiert. Dieser Aufbau ermöglicht eine modulare Gliederung der Sensoren/Anlagenbereiche und eine schrittweise Erweiterung beziehungsweise Umstellung der Anlage. Es ist auch mit geringem Aufwand möglich, Teilbereiche temporär auszubauen und für andere Anwendungen einzusetzen. Die ausgewählten Geräte sind über Ethernet/TCP ansprechbar. Sie sind daher sehr flexibel einsetzbar und können generell auch durch entfernte Steuerrechner über Internet/VPN angesprochen werden. Auch eine Anwendung als Messgerät/Datenlogger ohne Steuerrechner ist möglich.

Hydraulische und bauliche Einbindung der Wärmepumpe

Das Forschungsteam flexibilisierte die bisherige fixe Einbauposition der Wärmepumpe, sodass ein Umbau zur Verwendung eines anderen Geräts nun unproblematisch möglich ist und zudem Bauraum für eventuell. nötige zusätzliche Bauteile geschaffen wurde (Abbildung 3). Die Wärmequellen- und Wärmesenkenpeicher erhielten jeweils einen optionalen Bypass, sodass sie bei Bedarf vom System weggeschaltet werden können. In dem Zuge wurde auch der Anschlussstyp „Pendelspeicher“ (statt bisher „hydraulische Weiche“) ermöglicht, wodurch

sich die Durchmischung der Temperaturschichtung im Speicher reduziert und die Anlageneffizienz etwas erhöht. Durch die Flexibilisierung des hydraulischen Aufbaus können ohne Umbauten verschiedene Anlagenkonfigurationen eingestellt werden.

Datentechnik

Die Modernisierung der Messtechnik umfasste auch den Aspekt Datentechnik. Die beteiligten (neuen) Komponenten wurden auf Basis von Ethernet/TCP und teilweise Modbus/RS485 angebunden. Dieser Ansatz ist zu unterschiedlichen etablierten Datentechniksystemen und Datenerfassungsgeräten kompatibel.

Im Standard-Betriebsmodus der Datentechnik sind alle Netze am zentralen Prüfstands-PC angebunden, alle Teilnehmer (Messgeräte, I/O-Module, Aktoren) werden von diesem über die zentrale Software gesteuert. Optional ist auch eine Transparentschaltung des Prüfstand-PCs möglich. Die Software ist dann inaktiv. Ein anderer Rechner, gegebenenfalls entfernt, via Internet verbunden, erhält dann Verbindung mit den Netzen. Über die örtlichen Netze sind dann alle Sensoren/Aktoren/Messwerterfassungssysteme mit dem entfernten Rechner verbunden. Dieser Aspekt der Cloud-Architektur soll hier als Prototyp weiter getestet werden und kann in zukünftigen Forschungsprojekten in Demoanlagen eingesetzt werden.

In dem Kontext der zahlreichen neuen Netzteilnehmer (Messgeräte, I/O-Module) wurde auch das Ethernet im Technikum erweitert. Hierbei prüfte das Projektteam die Option von „Managed Ethernet Switches“, die eine Installation verschiedener virtueller Netzwerke in einem gemeinsamen physikalischen Netz erlauben. Dadurch werden Analyse- und vor allem sicherheitstechnische Features ermöglicht. Diese Variante wurde aus Zeitgründen bisher nicht umgesetzt, ist jedoch für zukünftige Erweiterungen eine Option.

Dieser Ansatz ist in größeren Gebäuden/Gebäudeautomationssystemen, in Produktionsstätten sowie in Forschungsprojekten, welche das bestehende Netzwerk für nachgerüstete Messtechnik nutzen wollen, sehr praxisrelevant. Ethernet basierte Datentechnik erlaubt ein schnelles und relativ kostengünstiges Netz. Da über das gemeinsame Netz jedoch nativ alle Geräte miteinander verbunden sind und eventuell sogar die EDV-Geräte (Büro-PCs, Server) auf dem gleichen Netz laufen, besteht hier zunächst ein deutliches Sicherheitsleck. Eine mögliche Lösung ist auch hier die Errichtung virtueller Netzwerke. Die hier erarbeiteten Vorplanungen sollen in das Monitoring/Datentechnik-Konzept der mittelfristig angedachten Forschungsprojekte in Demogebäuden einfließen.

PV-Anlage

Auf dem Gebäudedach des Technikums ist eine kleine PV-Anlage installiert. Sie dient als Referenz zur Hochrechnung der Leistung einer virtuellen größeren Anlage von zum Beispiel 10 kW Nennleistung. Der Skalierungsfaktor kann je nach Aufgabenstellung der Systemuntersuchung variiert werden. Aufgrund baulicher und rechtlicher Einschränkungen musste auf den Bau einer größeren PV-Anlage verzichtet werden. Die kleine PV-Anlage besteht aus zwei Modulen, einem Modulwechselrichter (AC-Kopplung) und integrierter Datentechnik mit Leistungsmessung. Sie hat somit alle wesentlichen Features einer großen PV-Anlage und erlaubt entsprechende Untersuchungen.

Parallel konnte das Forschungsteam neben dem Prüfstand eine kleine PV-Anlage als Exponat nutzen. Hier können mit künstlicher Beleuchtung und Verschattungselementen anschaulich veränderliche PV-Erträge simuliert werden. Beide PV-Anlagen wurden (mittelbar) durch die Messwerterfassung des Prüfstands ausgewertet. Die Systemregelung reagierte auf der Ebene der „Smarten Funktionen“ auf die veränderliche PV-Leistung zum Beispiel durch (De-)Aktivierung der Wärmepumpe oder Be-/Entladen des Batteriespeichers.

Die Anlage auf dem Dach wird unabhängig vom Prüfstand permanent betrieben, die Daten werden von einem unabhängigen (aber mit dem Prüfstand gekoppelten) Datensystem aufgezeichnet (siehe Abschnitt OGEMA-System).

Batteriespeichersystem

Der Prüfstand wurde um ein hochwertiges Batteriespeichersystem ergänzt und erhielt damit eine wesentliche Komponente eines energie- und lastflexiblen Systems. Das Batteriesystem ist AC-gekoppelt, da eine DC-Kopplung mit der deutlich kleineren PV-Anlage technisch keinen Sinn macht. Die Regelung des Batteriespeichersystems (im Kontext PV-Direktverbrauch und Lastglättung) erfolgte jedoch auf Basis einer (virtuellen) großen PV-Anlage (vgl. Abschnitt PV-Anlage).

Das Batteriespeichersystem wurde auf zirka 10 kWh Speicherkapazität und zirka 5 kW Nennleistung dimensioniert, passend zur bestehenden Wärmepumpe und dem Mikro-Blockheizkraftwerk. Es wurde ein dreiphasiges System gewählt, welches zudem weitgehend flexibel in der Lade-/Entladeleistung steuerbar ist. Dadurch wurde ein Energiemanagementsystem auf Basis der Prüfstands-Regelung ermöglicht, unabhängig von der internen Regelung des Herstellers.

Die dreiphasige Betriebsweise ist von hoher Relevanz für reale (üblicherweise dreiphasige) Hausenergiesysteme. Kleinere beziehungsweise kostengünstigere Batteriespeichersysteme schränken sich meist auf eine einzige Phase ein, wodurch kostspielige Elektronik eingespart wird. Ein solches System muss also auf einer einzigen Phase angeschlossen werden (zum Beispiel L1). Auf den anderen Phasen (L2, L3) kann es weder Verbraucher speisen, noch kann es von dort Ladeleistung beziehen. Technisch gesehen ist das System also auf zwei von drei Phasen unwirksam, was sich negativ auf die Netzqualität auswirkt. Daneben ist aber auch der durch den Hauptzähler ermittelte Direktverbrauch betroffen. Die für L2 und L3 eigentlich benötigte Leistung könnte vom Batteriesystem auf L1 geliefert werden. In Summe (Saldo) wäre die benötigte Leistung gedeckt. „Nicht saldierende Zähler“ bewerten jedoch nicht diese Summe, sondern den Effekt in den einzelnen Phasen. Die Netzbetreiberin beziehungsweise der Netzbetreiber entscheidet, ob „nicht saldierende Zähler“ eingesetzt werden müssen beziehungsweise „saldierende Zähler“ eingesetzt werden dürfen. In erstem Fall sinkt der abrechnungsrelevante Direktverbrauchseffekt des einphasigen Batteriesystems auf zirka ein Drittel des Effekts des dreiphasigen Systems und kann somit wesentlich unwirtschaftlicher werden. Dieser wichtige Aspekt wird in einfachen bilanziellen Betrachtungen häufig übersehen.

Durch die explizite Steuerbarkeit des Systems kann zum Beispiel die effektive Speichergröße herabgesetzt werden. Ebenfalls können verzögerte Regelungsantworten auf veränderliche Lasten emuliert werden. Zusätzlich kann die künstliche Beschränkung auf eine Phase realisiert werden.

Strategische Ausrichtung an zertifizierbaren Verfahren beziehungsweise Ausstattung

Für Wärmepumpen wurden in den vergangenen Jahren zunehmend detaillierte Prüfbedingungen erarbeitet und durch Normungsgremien festgelegt. Die meisten Geräteherstellerinnen und -hersteller richten sich nach diesen Prüfbedingungen und ermitteln die Kenndaten der Geräte entsprechend. Dementsprechend sollte auch der Prüfstand diese Kriterien erfüllen und wurde entsprechend ausgestattet.

Eine mögliche Zertifizierung (als zugelassene Prüfstelle für Wärmepumpen) des Prüfstands wurde erwogen. Die Zertifizierung an sich ist jedoch ein aufwendiges Verfahren und schließt Schulung und Prüfung der mit den Prüfaufgaben betrauten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter mit ein. Aus heutiger Sicht sind reine Zertifizierungsmessungen für die Forschungsgruppe unwirtschaftlich.

Dennoch sollten alle Komponenten so hochwertig ausgewählt und die Messmittel/Verfahren entsprechen detailliert und rückführbar dokumentiert werden, dass eine Zertifizierung zukünftig möglich ist/bleibt. Auf diese Weise kann man intern sowie externen Auftragskundinnen und -kunden oder Kooperationspartnerinnen und -partnern die Qualität des Prüfstands glaubhaft vermitteln.

Einrichtung/Nutzung normierter Prüfkonditionen und verkürzter repräsentativer Prüfzyklen

Die grundlegende Aufgabe von Prüfständen ist die quantitative Vermessung von Komponenten bezüglich ihrer

technisch relevanten Eigenschaften. Hierfür ist wesentlich, dass die Randbedingung der Prüfsituation in der Theorie sinnvoll und eindeutig definiert werden und in der Praxis (Prüfstandbetrieb) hinreichend genau eingehalten werden. Die elementarste Form der Randbedingung ist die Definition eines stationären Betriebspunkts (zum Beispiel Temperatur und thermische Leistung am Ausgang einer Komponente). Darauf basierend werden dynamische Prüfzyklen definiert, bestehend aus einer festen zeitlichen Abfolge von Betriebspunkten. Die feste Abfolge kann in weiteren Schritten zu komplexen, realitätsnahen Verläufen erweitert werden (besondere Referenzlastgänge, Typtage oder ähnliches).

Dieser Prüfstand hat die Effizienz realer Gebäudeenergiesysteme im Blick, daher erfolgte die Prüfung nicht nur auf der Komponentenebene, sondern primär auf der Systemebene. Zusätzlich zu einzelnen Datenblattorientierten Prüfzyklen war ein langfristiger, realitätsnaher Verlauf zu berücksichtigen. Während in einem realen Gebäude Lastverläufe und Energiebedarfe typischerweise im gesamten Jahresverlauf betrachtet werden, ist dies in einem Prüfstand nicht sinnvoll beziehungsweise wirtschaftlich praktikabel. In der Praxis soll der Prüfstand typischerweise in wenigen Stunden bis einigen Tagen ein relevantes Ergebnis liefern können. Dennoch soll im Allgemeinen ein für das gesamte Jahr repräsentatives Ergebnis aus der Prüfstandmessung resultieren.

Um beide Anforderungen hinreichend zu erfüllen, wurden von verschiedenen Stellen Verfahren erarbeitet. Diese untersuchte das Projektteam auch im Smart-Energy-Prüfstand sowie in den begleitenden Simulationsrechnungen näher auf Eignung hin und setzte sie in Auswahl ein. Da der Prüfstand für Versorgungssysteme mit sehr breiter Anwendung vorgesehen ist, mussten Lastprofile für Wärme (Heizwärme und Trinkwarmwasserbereitung), Kälte sowie Strom mit ihren jeweiligen Besonderheiten herangezogen werden.

Grundsätzlich kann zwischen komponentenorientierter und systemorientierter Prüfung unterschieden werden. Bei Komponentenprüfverfahren wird jede Systemkomponente ihrer jeweiligen Prüfnorm unterzogen. Hieraus resultieren meist Leistungskennlinien, welche mit Parametern beschrieben werden können. Die systemorientierte Prüfung richtet sich meist nach einem „Black-Box“-Prinzip, bei welchem das System als Ganzes mess-technisch untersucht und bewertet wird. Meist wird im Anschluss des Prüfzyklus eine Parameteridentifikation anhand eines Simulationsmodelles durchgeführt. Auf Grundlage der Parameter (entweder aus Komponententest oder aus Parameteridentifikation) können Jahressimulationen durchgeführt werden.

Die komponentenorientierte Prüfung ist zwar hinsichtlich ihrer Flexibilität äußerst vielseitig und vorteilhaft (es lassen sich alle möglichen Anlagenkonstellationen durch die Einzelprüfung darstellen), jedoch ist die Abhängigkeit beziehungsweise die Rückkopplung der Anlagenkomponenten untereinander nur simulativ und nicht real dargestellt. Installations- oder Designfehler in der Verschaltung von Einzelkomponenten werden nicht berücksichtigt. Daher hat sich das „Whole System Testing“ mehr und mehr etabliert, obwohl es den Vorteil der hohen Flexibilität nicht besitzt.

Hier ein Überblick zu Prüfverfahren, die bei der Entwicklung des Prüfstands und seinem Einsatz Berücksichtigung finden:

- EN 12976 „Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile“
- ISO 9459-4 „Complete system testing group test“
- ISO 9459-5 „Dynamic System Testing“
- Fraunhofer ISE, Projekt „WPVT-Freeze“; Erweiterung des Standard-ST-DST-Verfahrens
- CCT – Concise Cycle Test (SPF, Rapperswil)
- GTP – Global Testing Procedure (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment - CSTB, Paris)
- SCSPT – Short cycle system performance test (CAE, Institut National de l'Energy Solair INES, Frankreich)
- Combitest (SERC und SP, Schweden)
- Harmonized WST test method (SERC; SPF, Rapperswil, Institut National de l'Energy Solair INES)
- CTSS – Component Testing and System Simulation (IGTE Stuttgart)
- DIN EN 14511 – WP zur Wassererwärmung (stationäres Prüfverfahren)
- DIN EN 14852 – WP zur Wassererwärmung unter Teillast und Berechnung des SCOP

- DIN EN 16147 – WP zur reinen Trinkwarmwassererwärmung
- Haberl, R., Haller, M., Papillion, P., Chéze, D., Persson, T., Bales, C., 2015. Testing of combined heating systems for small houses: Improved procedures for whole system test methods. Final report on Deliverable 2.3 of the MacSheep Project.
- Huchtemann, K., Engel, H., Mehrfeld, P., Nürnberg, M., Müller, D., 2016. Testing method for evaluation of a realistic seasonal performance of heat pump heating systems: Determination of typical days. CLIMA 2016 - proceedings of the 12th REHVA World Congress: volume 3, Aalborg.

Einbindung der Klimakammer

In einem Schwesterprojekt baute das Team neben der Standfläche des Smart-Energy-Prüfstands eine Klimakammer zur Verwendung als Prüfstand für Luft-/Wasser-Wärmepumpen auf. Messtechnik, Ablaufsteuerung sowie die Hydraulik wurden mit dem Smart-Energy-Prüfstand gekoppelt. Einerseits, um auch Luft-/Wasser-Wärmepumpen direkt in das Komponenten-Portfolio zur Systemprüfung aufzunehmen, und andererseits generell, um Synergien bei der Ausstattung und den Arbeitsschritten zu nutzen.

Der anfängliche Mehraufwand an Planung wurde kompensiert durch die mögliche Mehrfachnutzung einiger Komponenten (Messrechner, Software, einzelne Hydraulikkomponenten) sowie des Dokumentationsschemas und die Einsparung bei späteren Modernisierungen.

Die Struktur des Systems erlaubt prinzipiell eine Aufteilung in zwei Teilsysteme (Prüfstände). Dann können Klimakammer-Prüfstand und Smart-Energy-Prüfstand bei Bedarf separat und parallel betrieben werden. Das würde einen gleichzeitigen Einsatz für verschiedene Messaufgaben erlauben, für den Fall, dass sich in Zukunft ein verstärkter Bedarf im Rahmen von Auftragsmessungen und Forschungsprojekten ergibt.

OGEMA-System

OGEMA (Open Gateway Energy Management, www.ogema.org) ist eine offene Softwareplattform im Bereich Gebäudeautomation und Energiemanagement. Die Plattform wird von den Instituten Fraunhofer IWES, Fraunhofer IIS, Fraunhofer ISE und weiteren Partnerinnen und Partnern entwickelt. Die Plattform ist in der Lage, von verschiedenen Datensystemen und -Standards Daten aufzunehmen, zu speichern, und an andere Systeme/Schnittstellen zu übertragen. Sie verfügt über ein konfigurierbares Nutzerinterface und Rechteverwaltung und kann somit auch hohen Ansprüchen im Bereich Datenschutz genügen. Sie ist damit eine kostengünstige und zukunftssträchtige Lösung für die häufige Situation im Bau- und Anlagenbereich, dass verschiedene (Daten-)Techniksysteme installiert sind, die nur mangelhaft miteinander kommunizieren können.

Im Kontext anderer Projekte der Arbeitsgruppe besteht bereits Kontakt zu den Entwicklerinnen und Entwicklern, wodurch ein tieferer Einblick in die Software möglich wurde. Es wurden bereits eigene Testanwendungen realisiert und eine generelle Eignung für aktuelle und zukünftige Forschungsprojekte geprüft.

Am Prüfstand sollte das OGEMA-System zunächst als permanent aktives Datensystem für die PV-Anlage sowie die Wetterstation betrieben werden. Diese Komponenten müssen permanent laufen, um die gewünschten Daten vollständig und unterbrechungsfrei zu liefern. Der Smart-Energy-Prüfstand wird dagegen nur phasenweise aktiv betrieben und eignet sich daher nicht für die permanente Erfassung langfristiger Datenverläufe. Abbildung 2 zeigt schematisch die Einbindung des OGEMA-Systems in den Prüfstand.

Das hier errichtete Datensystem kann auf den Prüfstand selbst und auf später projektweise angebundene entfernte Komponenten (zum Beispiel Netzbetreiberin/Netzbetreiber, Energiehandel) angewendet werden (Datencloud). Das System ist auch geeignet, um mittelfristig eine institutsweite Datenplattform und Arbeitsinfrastruktur aufzubauen. Dies soll einerseits die Datensicherheit beziehungsweise Verfügbarkeit erhöhen und zudem die Arbeitsstruktur für kleine Projekte und studentische Arbeiten vorgeben (im positiven Sinne: Infrastruktur bereitstellen).

Das OGEMA-System mit dem durch uns zusammengestellten Hardware/Software-Paket soll für zukünftige Forschungsprojekte auch in Gebäuden eingesetzt werden. Beim intensiven Monitoring von Gebäuden/Gebäude-technik zeigt es sich häufig, dass die branchenüblichen Lösungen im Bereich der Gebäudeautomation recht unflexibel und teilweise unzuverlässig/störungsanfällig sind. Im Verlauf von Forschungsprojekten fallen zunächst erhebliche Kosten für die gewünschten Anpassungen in der Gebäudeautomation (zur Datenhaltung) an. Ein zuverlässiger Betrieb während der Projektlaufzeit ist jedoch selten. Anpassungen sind oft sehr kostenintensiv. Deren Umsetzung ist oft verspätet oder gar nicht möglich.

Daher soll bei Erstinbetriebnahme oder gegebenenfalls Nachrüstung im Kontext von Gebäudemonitoring-Forschungsprojekten der Einsatz des OGEMA-Systems vorangetrieben werden. Hier muss insbesondere eine gute Abstimmung zwischen nativ installierter, nötiger Gebäudeautomation und zusätzlicher Sensorik entwickelt werden. Die zusätzliche Sensorik sollte direkt an das OGEMA-System angebunden werden, die Gebäudeautomation überträgt ihre Daten digital an das OGEMA-System. Hiervon würden zukünftig Projektkosten und Datenqualität profitieren.

Ideen für zukünftige Erweiterungen und Projekte

Während der Projektarbeit haben sich einige weiterführende Einzelthemen ergeben. Diese eignen sich zunächst für innovative studentische Arbeiten, bei konkretem Interesse von externen Forschungspartnerinnen und -partnern auch für größere Forschungsprojekte.

■ Wetterprognose

Das Wetter (insbesondere Lufttemperatur, Einstrahlung) hat starken Einfluss auf den Energieverbrauch des Gebäudes sowie auf Energieerzeugung durch Photovoltaik. Eine Kenntnis des (wahrscheinlichen) Verlaufs in der nahen Zukunft (1 ... 24 h) kann durch intelligente, prädiktive Anlagenregelungen genutzt werden, um die Betriebsweise zu optimieren, hinsichtlich Energieeffizienz und/oder Direktverbrauch.

Als Basis dient zunächst die Messung von Wetterdaten durch die eigene Wetterstation. Die Auswertung der zeitlichen Verläufe erlaubt die (nachträgliche) Bewertung von diversen Wetterprognoseansätzen. Der aktuelle Wert sowie die Tendenz des lokalen Luftdrucks erlauben eine grobe Vorhersage von „üblichen“ Wetterverläufen (Hochdruckwetter, Tiefdruckwetter, Wetterwechsel). Dies kann durch vereinfachte Algorithmen grob abgebildet werden. Ergänzend soll eine professionelle Kurzzeitwettervorhersage als Datendienst eingebunden werden. Dies ist per Internet oder per Funkstation möglich.

Als Spezialanwendung könnte die Bewertung des lokalen Wolkenbilds implementiert werden. Dabei beobachtet eine (wetterfeste) Kamera den Himmelshalbraum. Eine Software erkennt den Bewölkungsgrad, einzelne räumliche Abschnitte und Bewegung. Die Ergebnisse können im Nachgang mit dem Wetterradarbild (Aufnahme und Vorhersage) professioneller Wetterdienste verglichen werden. Ziel ist eine Kurzzeitprognose der Einstrahlung sowie des resultierenden PV-Ertrags. Daneben können eventuell vorhandene bewegliche Sonnenschutzelemente darüber besser gesteuert werden.

Die verschiedenen Maßnahmen sollen zunächst in möglichst einfacher/kostengünstiger Form umgesetzt und im Rahmen einer studentischen Arbeit bewertet werden. Dabei wird die Prognosequalität selbst betrachtet sowie die Auswirkung auf bestehende modellprädiktive Regelungen auf Simulationsbasis. Anschließend kann eine gezielte Verbesserung einer der Maßnahmen oder eine verbesserte Kombination angegangen werden. Ziel ist ein semiprofessioneller Prototyp einer Witterungsprognose, welcher in einem Demo-Gebäude in Verbindung mit einer modellprädiktiven Anlagenregelung betrieben werden soll.

■ Systematische Analyse von Batteriespeichersystemen

Batteriespeichersysteme können zunächst auf Basis der elementaren technischen Daten charakterisiert werden (Kapazität, maximale Lade- oder Entladeleistung, Effizienz). In realen Systemen zeigt sich jedoch, dass dadurch

wesentliche Eigenschaften nicht erfasst werden, die für ein effizientes Gesamtsystem im dynamischen Betrieb relevant sind (Reaktionsgeschwindigkeit und Präzision der Regelung bezüglich Lade-/Entladeleistung). Die Regelung des Systems spielt eine entscheidende Rolle, zumindest für den erreichbaren Direktverbrauch und somit für die Wirtschaftlichkeit des Systems.

Hier hat die Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, insbesondere die Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Volker Quaschnig, sehr fundierte Arbeit geleistet und veröffentlicht. Hier wurde ein Testverfahren entwickelt, was auf Basis von praxisnahen dynamischen Lastgängen die Systemeffizienz ermittelt. Dieses Verfahren soll mittelfristig auch im Smart-Energy-Prüfstand umgesetzt werden.

■ Tiny-PV (AC- oder DC-Netz)

Sehr kleine Photovoltaikanlagen („Tiny-PV“) finden zunehmend Verbreitung. Sie lassen sich auf kleinen verfügbaren Flächen installieren (Balkon, Garagendach, Gartenhütte ...), was sie auch für Mieterinnen und Mieter anwendbar macht. Dadurch entsteht ein wesentlich höheres Potenzial für PV-Energie insgesamt.

Aufgrund ihrer geringen Größe ist Tiny-PV im Wesentlichen vorgesehen, um den aktuellen Stromverbrauch des Nutzers zu decken. Netzeinspeisung ist nicht vorgesehen beziehungsweise meist nicht erlaubt, die Anlage ist aber zumeist an das Hausnetz (AC, 230 V) angeschlossen. Eine Einspeisevergütung erfolgt nicht. Für diese Anlageklasse gelten verringerte Anforderungen bezüglich des Netzanschlusses.

In Deutschland ist dieses Anlagenkonzept ziemlich strengen Regeln unterworfen, sodass der Vorteil gegenüber einer regulären PV-Anlage (Installationsaufwand besonderer Komponenten, Genehmigung etc.) begrenzt ist. Einige der Nachteile lassen sich umgehen, wenn man statt der Netzkopplung ein eigenes Gleichstrom-Netz aufbaut. Hier können einige Verbrauchertypen direkt betrieben werden, zum Beispiel Beleuchtung und Elektronik-Verbraucher wie PC, Notebook, gegebenenfalls TV. Übliche 230-V-Verbraucher können über einen Wechselrichter mittelbar aus dem DC-Netz betrieben werden. Zu Stützung des Netzes ist meist eine Batterie obligatorisch. Bei zu wenig PV-Ertrag kann diese aus dem regulären AC-Netz nachgeladen werden.

Der finanzielle Vorteil der DC-Variante liegt darin, dass für den PV-Strom weder der Netzbezugspreis noch die EEG-Umlage entrichtet werden muss. Demgegenüber müssen Speicherverluste und die Investitionskosten für die zusätzlichen Komponenten berücksichtigt werden.

Diese Strategie kann insbesondere bei der wachsenden Zahl von Tiny-House- oder Ökosiedlungs-Bauprojekten Anklang finden. Zudem ist es nativ eine Lösung für netzferne Anlagen. Denkbar ist auch eine zusätzliche Nutzung der Speichersysteme bestehender Backup-/Notstromsysteme auf Batteriebasis.

Um dieses Thema näher zu untersuchen, kann die PV-Installation des Prüfstands genutzt werden, welche dann mit weiteren Komponenten zu einem DC-System ergänzt wird.

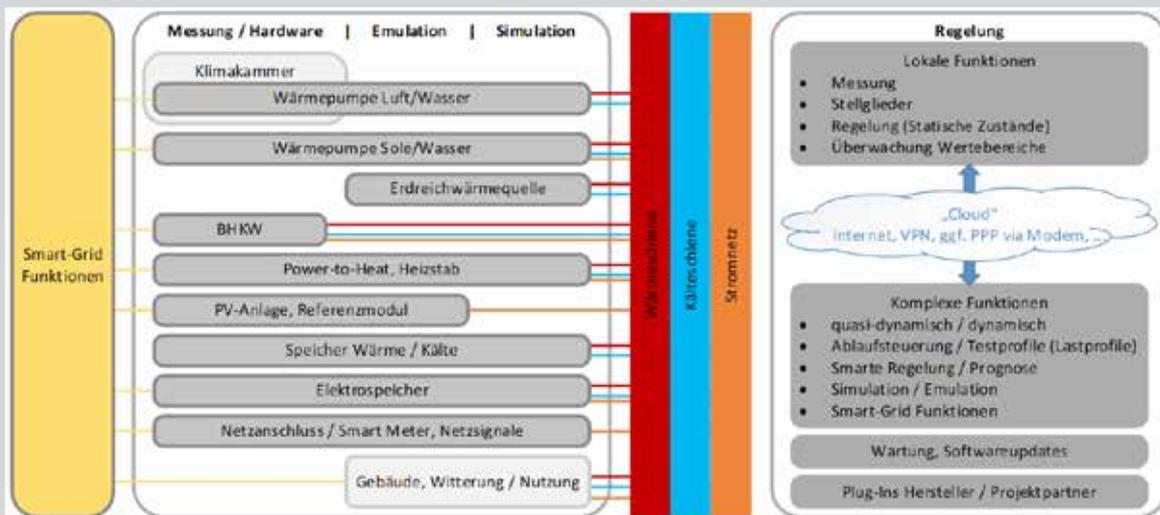


Abbildung 1: Funktionsschema des Smart-Energy-Prüfstands: Komponenten, Systembereiche und Regelungsfunktionen. Grafik: Projektteam

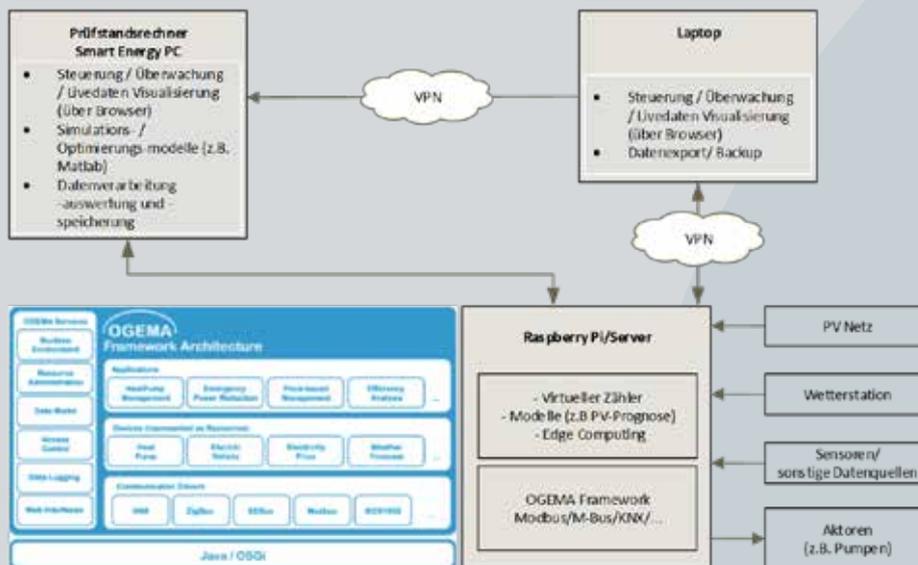


Abbildung 2: Funktionsschema des OGEMA-Systems in Verbindung mit dem Smart-Energy-Prüfstand. Grafik: Projektteam

5. Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Im Kontext des Projekts führten die Beteiligten Forschungsarbeiten zu den mehreren Teilaspekten des übergeordneten Themas durch und veröffentlichten die Ergebnisse in Form von Konferenzbeiträgen. Parallel zu den projektbezogenen Tätigkeiten der wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter wurden/werden studentische Abschlussarbeiten durchgeführt. Weitere sind in Planung. Im beschriebenen Themenbereich wurde bereits die Akquise weiterer, größerer Projekte (EU-Horizon-2020-Anträge) vorangetrieben. Davon ist eines bereits bewilligt, ein weiteres wird vermutlich in Kürze bewilligt, weitere Anträge sind in Arbeit. Innerhalb der neuen Projekte bildet der Smart-Energy-Prüfstand einen wesentlichen Teil der Kompetenzen der Arbeitsgruppe.

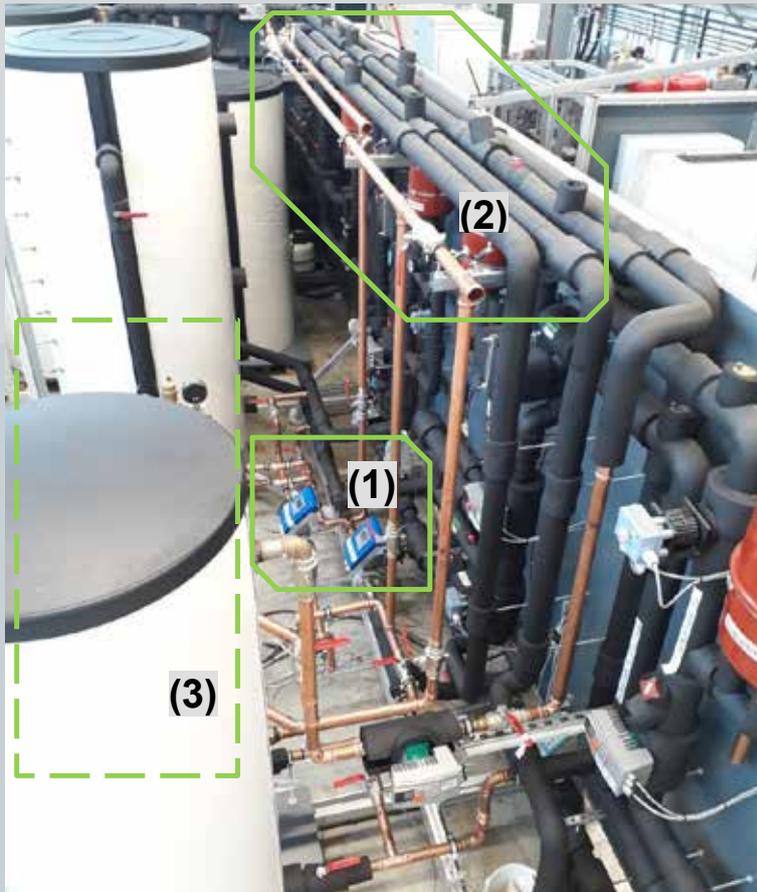


Abbildung 3: Nachrüstung hochwertiger Volumenstromzähler im Wärmepumpenkreislauf zur normgerechten Messung im Bilanzkreis (1). Installation einer zusätzlichen Montageplattform und Hydraulikschiene zur Einbindung neuer Anlagenkomponenten (2). Flexibilisierung der Aufstellung und der Anbindung der Wärmepumpenkomponente (3). Foto: Projektteam

6. Literatur

- Betzold, C., Bordin, S., Dentel, A. und Harhausen, G., 2021. Control strategies for modulating heat pumps in a plus energy building. Heat Pump Conference 2021. (Paper accepted for publication).
- Betzold, C., Dentel, A. und Bordin, S., 2020. Entwicklung und Implementierung von Betriebsführungsstrategien in einem Plusenergiegebäude. 8. Deutsch-Österreichische ibpsa Konferenz BauSIM 2020.
- S. Hummel, C. Betzold, K. Kandasamy, S. Bordin, G. Harhausen, A. Dentel. (2020). Experimentelle Validierung von Simulationsmodellen an einen Hardware-in-the-Loop Wärmepumpenprüfstand. 8. Deutsch-Österreichische ibpsa Konferenz BauSIM 2020.
- Betzold, C., Dentel, A. (2019). PV Optimized Control of Modulating Heat Pumps regarding PV Self-Consumption. Proceedings of the International IBPSA Building Simulation Conference 2019, Sept. 02th - 04th, 2019, Rome, Italy.
- Dentel, A., Stephan, W., Betzold, C. (2019) Smart Operation Strategies for Heat Pumps in Dwellings. Case Study of the International IBPSA Building Simulation Conference 2019, Sept. 02th - 04th, 2019, Rome, Italy
- Dentel, A., Betzold, C., Herterich, T. (2019). Smarte Regelstrategien für Wärmepumpen in Wohngebäuden. In: Ingenieurspiegel 1, S. 66 - 67.

Bachelorarbeiten:

- Development and research of artificial neural networks for thermal load prediction of buildings, 2020, Tianxiang Zheng
- Entwicklung und Untersuchung künstlicher neuronaler Netze zur elektrischen Lastprognose von Wohngebäuden, 2020, Manuel Berbig
- Entwicklung und Untersuchung künstlicher neuronaler Netze zur Erstellung von Lastprognosen für Gebäude, 2020, Bernhard Schiffer

Masterarbeiten:

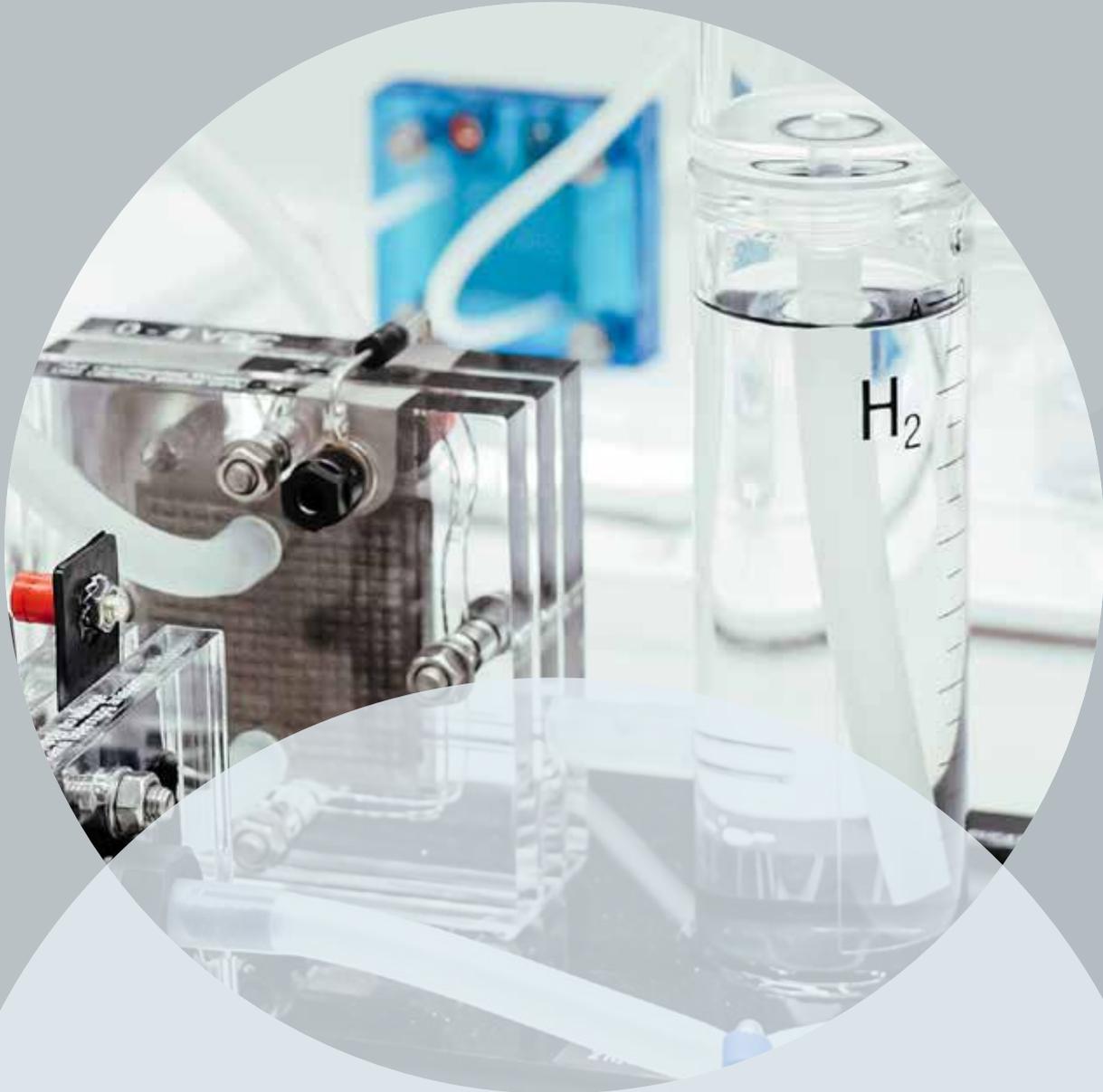
- Erstellung einer modellprädiktiven Steuerung für modulierende Wärmepumpen, 2019, Andreas Ammann
- Evaluation of the performance of heat pump heating systems in a hardware-in-the-loop test bench on the basis of representative daily load profiles and test cycles, vor. Abschluss: 2021, Obada Alsharairi

Akquise weiterer Forschungsprojekte:

Im Bearbeitungszeitraum hat die Arbeitsgruppe sieben Projektideen, meist als Vollarträge formuliert, die in einem deutlichen Kontext zum Prüfstand stehen. Diese reichen von eher kleinen, hochschul-/arbeitsgruppeninternen Projekten mit Studiencharakter über mittlere Projekte mit deutschen Industriepartnerinnen und -partnern bis zu großen EU-Projekten mit über zehn europaweiten Kooperationspartnerinnen und -partnern. Erste Projekte sind bereits bewilligt.







Brennstoffzellensensorik – Identifizierung von Zustands-, Diagnose- und Prognoseparametern für die Deaktivierung und Alterung von Brennstoffzellen

Prof. Dr. Maik Eichelbaum
Fakultät Angewandte Chemie
TH Nürnberg

1. Projektdaten

Fördersumme	35.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2020
Fakultät	Angewandte Chemie
Projektleitung	Prof. Dr. Maik Eichelbaum
Kontaktdaten	maik.eichelbaum@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Brennstoffzellen sind ein wichtiger Bestandteil eines nachhaltigen Energiesystems, da sich die damit verbundene Wasserstofftechnologie sowohl als Energie(zwischen)speicher für regenerative, aber fluktuierende Energiequellen als auch als Ersatztechnologie für die Verbrennung fossiler Rohstoffe im Mobilitäts- und Wärmesektor eignet. Besonders für den Einsatz in Trucks, Bussen, Baumaschinen, Flugzeugen, Schiffen und Schienenfahrzeugen, das heißt in den Bereichen, in denen hohe Leistungsdichten, Tagesfahrleistungen und Lebensdauern gefordert sind, bietet die Wasserstoff-Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle in alternativen emissionsfreien Elektroantrieben gegenüber Verbrennungsmotoren und batterieelektrischen Antrieben entscheidende Vorteile [1]. Während die Kosten der Technologie voraussichtlich durch die Hochskalierung der Produktion deutlich gesenkt werden können, wird die Alterung und damit die Lebensdauer der Brennstoffzellen nur durch ein tiefes Verständnis der zugrundeliegenden Deaktivierungsprozesse unter realistischen Betriebsbedingungen und die Einführung effizienter Zustandsprognosemodelle positiv beeinflusst werden können [2].

Ein wichtiger Aspekt ist in diesem Zusammenhang die Entwicklung und Integration geeigneter Sensoren. In Brennstoffzellen können Sensoren zur Überwachung von Stoffkonzentrationen in der Gas- und Flüssigphase, zur Gewinnung von Regelgrößen für die Steuerung und für weitere analytische Zwecke einschließlich der Identifikation und Abstellung von Fehlerquellen im laufenden Betrieb verwendet werden. Hierzu sind insbesondere elektrochemische Methoden geeignet, welche direkt die Ströme und Potentiale an der Anode und Kathode der Zelle messen. Aber auch Sensoren zur Gasanalytik, (voltammetrischen) Elementanalytik oder zur Messung physikalisch-chemischer Größen wie Temperatur oder pH-Wert sind relevant.

Für die Zustandsprognose von Brennstoffzellen können prinzipiell ideale physikalische („white box“), empirische („grey box“) und rein mathematische („black box“) Modellierungsmethoden verwendet werden [3]. White-box-Modelle basieren auf differenziellen Gleichungen zu bekannten physikalischen Zusammenhängen, sind sehr genau und generalisierbar, aber rechenintensiv und erfordern ein genaues Systemverständnis. Dieses genaue physikalische Verständnis der Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern ist in einem komplexen Brennstoffzellensystem unter Betriebsbedingungen aber selten gegeben. Grey-box-Modelle, in denen empirische Formeln eingesetzt werden, sind recht genau und generalisierbar, haben aber Probleme in der Modellierung nicht-linearer Kontexte und bei der Extrapolation, die aber für die Prognose eines Verhaltens in der Zukunft elementar ist. Für die Approximation nicht-linearer Zusammenhänge in unvollständigen Datensätzen mit hohem Rauschanteil haben sich Black-box-Modelle bewährt, die sehr schnell und sehr gut dynamische Prozesse, wie sie auch in Brennstoffzellen stattfinden, abbilden können. Beim sogenannten Machine Learning (deutsch: maschinelles Lernen) werden diese Black-box-Modelle direkt über einen vorgegebenen Algorithmus aus den vorliegenden Daten erstellt [4]. Der Vorteil liegt darin, dass Machine-Learning-Methoden aus Trainingsdatensätzen automatisiert Zusammenhänge, Muster und Trends erkennen können. Der Algorithmus ist also in der Lage, selbständig aus den Daten zu lernen und muss nicht wie bei „klassischen“ Methoden zuvor programmiert werden. Werden diese identifizierten Zusammenhänge, Muster und Trends auf einen anderen Testdatensatz angewandt, können damit

Prognosen erstellt und Abläufe verbessert werden. Die Genauigkeit und Generalisierbarkeit der mit Machine Learning erstellten Modelle hängt aber vom Umfang und der Qualität des verwendeten Trainingsdatensatzes ab.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Zur Etablierung von Methoden zur (elektro-)chemischen Analyse und Diagnose von Polymerelektrolytmembran- (PEM)-Brennstoffzellen baut das Forschungsteam einen Prüfstand auf, mit dem Brennstoffzellen und kleine Brennstoffzellenstacks bis zu einer Leistungsklasse von 100 W betrieben und untersucht werden können. Mit diesem Prüfstand sollen charakteristische Kenndaten im Brennstoffzellenbetrieb wie Strom-Potential-Kennlinien, elektrochemische Impedanzspektren, der Wasserstofffluss und die Zell- beziehungsweise Stack-Temperatur unter verschiedenen Belastungsszenarien gemessen werden können. Ein weiteres Ziel ist die Auswertung der aufgezeichneten Messdaten mit verschiedenen Machine-Learning-Methoden. Damit möchte das Projektteam zum einen die Methoden identifizieren, welche sich am besten zur Beschreibung von Brennstoffzellen im Betrieb mittels Black-box-Modellen eignen. Zum anderen sollen notwendige und besonders aussagekräftige Messparameter gefunden werden, die am besten für die Leistungsvorhersage der untersuchten Brennstoffzellen herangezogen werden können. Diese Auswertung soll als Ausgangspunkt für ein zukünftiges generalisierbares Diagnose- und Prognoseverfahren für Brennstoffzellen verwendet werden.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Teil 1: Aufbau eines Brennstoffzellenprüfstands

Zur Prüfung und Charakterisierung von Wasserstoff- PEM-Brennstoffzellen baute das Forschungsteam einen Teststand auf, mit dem zwei Brennstoffzellenstacks der Leistungsklassen 12 W und 100 W betrieben und untersucht werden können (Abbildung 1). Dieser Prüfstand enthält eine elektrochemische Workstation, einen Potentiostaten für elektronische Lasten bis zu 200 W (20 V, 10 A) und ein elektrochemisches Impedanzspektrometer, um Strom-Potential-Kennlinien und elektrochemische Impedanzspektren an Brennstoffzellen der entsprechenden Leistungsklassen messen zu können. Zur Steuerung und Messung des Wasserstoffflusses integrierte die Forschungsgruppe einen elektronischen Druck- und Massenflussregler. Über ein Drei-Wege-Ventil wird der Wasserstofffluss entweder zum angeschlossenen 12-W- oder 100-W-Brennstoffzellenstack geleitet. Durch Integration eines Netzgerätes und eines Steuergerätes wird die Luftkühlung der Brennstoffzellen je nach Belastung in Abhängigkeit der Stack-Temperatur geregelt. Das Steuergerät erlaubt auch über entsprechende Sensoren die automatische Aufzeichnung von Spannung, Stromstärke und Temperatur der betriebenen Brennstoffzelle. Mit der elektrochemischen Workstation und dem Potentiostaten können nahezu beliebige Lastprofile für den Betrieb der Brennstoffzelle potentiostatisch oder galvanostatisch programmiert werden. Zur Analyse des Reaktionswassers der Brennstoffzellen wurde ein entsprechendes Auffanggefäß am Abgasauslass der Brennstoffzelle installiert, das mit einem Eisbad gekühlt werden kann.

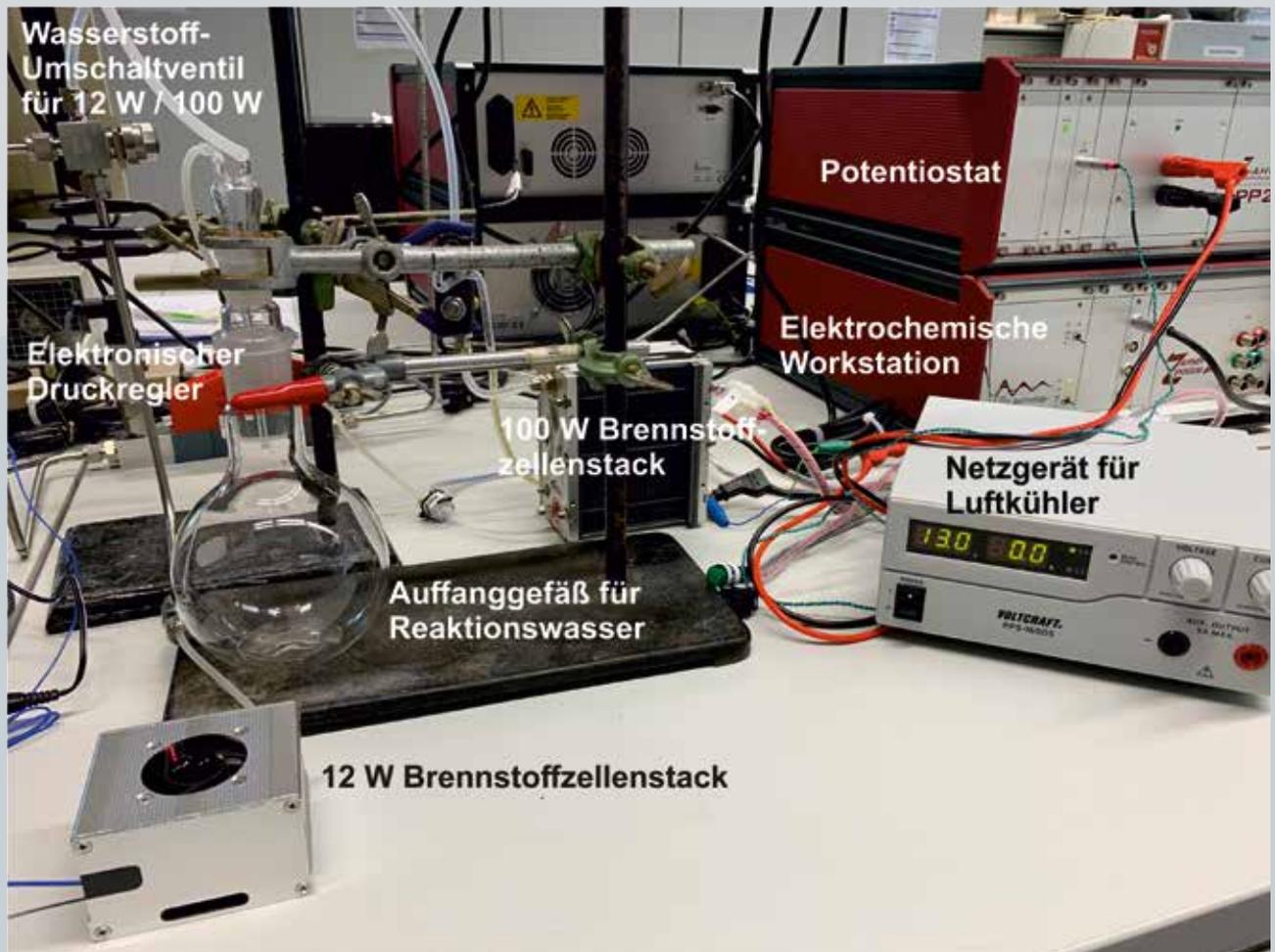


Abbildung 1: Installierter Prüfstand für die elektrochemische Charakterisierung von Brennstoffzellenstacks der Leistungsklassen 12 W und 100 W.
Foto: Maik Eichelbaum

Teil 2: Aufnahme und Analyse von Kenndaten zur Charakterisierung von Brennstoffzellen

Exemplarisch sind in Abbildung 2a mit dem Prüfstand dynamisch aufgenommene Strom-Potential-Kennlinien des 100-W-Brennstoffzellenstacks dargestellt. Unmittelbar nach dem Einschalten der Brennstoffzelle („Kaltstart“) zeigt sich mit steigender Stromstärke eine Kennlinie, die auf eine deutlich schlechtere Leistung der Brennstoffzelle im Vergleich zu den übrigen getesteten Bedingungen hinweist. Ursachen hierfür sind höchstwahrscheinlich die niedrige Stack-Temperatur und die geringe Befeuchtung der Polymerelektrolytmembran. Der Rücklauf der Strom-Potential-Kennlinie (das heißt Messung bei abnehmender Stromstärke) verläuft dagegen bei deutlich höheren Leistungen und zeigt, dass bereits ein kurzzeitiger Betrieb bei Höchstlast zu optimalen Leistungen führt. Nach zirka acht Stunden Betrieb unter wechselnder Last ist die Hysterese der Strom-Potential-Kennlinie zwischen Hin- und Rücklauf deutlich geringer ausgeprägt, da die Ausgangstemperatur der Brennstoffzelle höher und auch die ausreichende Befeuchtung der Membran durch den vorherigen Dauerbetrieb gegeben ist. Die Höchstleistung bei 10 A ist mit 123 W nach dieser Belastung im Vergleich zum Kaltstart (128 W) aber etwas reduziert. Unterhalb von 8 A laufen die Rückläufe der beiden Kennlinien aber nahezu synchron. Die Zellspannung im stromlosen Zustand ist nach acht Stunden Betrieb nur geringfügig reduziert (19,2 V gegenüber 19,4 V). Nach dieser relativ kurzen Belastung können also noch keine signifikanten Alterungserscheinungen diagnostiziert werden. Weitere Untersuchungen zur Langzeitalterung werden derzeit durchgeführt.

Der im „Steady-state-Modus“ aufgenommene Aktivierungsbereich der Stromdichte-Potential-Kennlinie des 100-W-Brennstoffzellenstacks wurde ebenfalls ausgewertet (Abbildung 2b). Vereinfachend kann für den Bereich der Aktivierungsüberspannung die Tafel-Gleichung verwendet werden, um den exponentiellen Anstieg der Aktivierungsüberspannung $\Delta\eta_A$ mit der Stromdichte i mathematisch für den Gültigkeitsbereich $i > i_0$ zu beschreiben:

$$\Delta\eta_A = A \cdot \ln\left(\frac{i}{i_0}\right) \quad (1)$$

Die Stromdichte i_0 wird als Austauschstromdichte bezeichnet und beschreibt den Wert der Stromdichte, ab dem die Überspannung von Null ansteigt. Die Austauschstromdichte ist umso größer, je höher die Reaktionsgeschwindigkeit ist. Sie sollte demnach so groß wie möglich sein, um eine hohe Effizienz der Elektrode zu gewährleisten. Die Austauschstromdichte ist in einer PEM-Brennstoffzelle (PEMFC) an der Kathode (Sauerstoffelektrode) bis zu 10^5 -mal kleiner als an der Anode (Wasserstoffelektrode). Typische Werte sind 200 mA/cm^2 für die Anode und $0,1 \text{ mA/cm}^2$ für die Kathode [5]. Für die hier untersuchte Brennstoffzelle, bei der keine weitere Referenzelektrode für die Messung verwendet wurde und daher prinzipiell sowohl Anoden- als auch Kathodenseite zum Ergebnis beitragen müssten, wurde eine Austauschstromdichte von $0,12 \text{ mA/cm}^2$ (bezogen auf eine Einzelzelle) ermittelt. Dieses Ergebnis stimmt sehr gut mit dem für die Kathodenseite erwarteten Wert überein, sodass wie erwartet davon ausgegangen werden kann, dass die kathodische Reduktion des Sauerstoffs geschwindigkeitsbestimmend ist.

Der Anstieg A der Tafel-Gleichung ist dagegen umso größer, je langsamer die elektrochemische Reaktion ist. Sie kann durch die folgende Formel aus der Theorie der Reaktionskinetik berechnet werden:

$$A = \frac{R \cdot T}{\alpha \cdot n \cdot F} \quad (2)$$

R ist hierbei die universelle Gaskonstante, T die Zell- bzw. Stack-Temperatur, n die Zahl der pro Formelumsatz ausgetauschten Elektronen, F die Faraday-Konstante und α der Ladungsübertragungs- oder Durchtrittskoeffizient. Letzterer gibt an, ob der Übergangszustand zwischen der reduzierten und oxidierten Form der elektroaktiven Spezies eher dem Edukt ($\alpha = 0$) oder eher dem Produkt ($\alpha = 1$) ähnelt. Für die Wasserstoffelektrode liegt dieser Wert für viele Elektrodenmaterialien ungefähr bei 0,5 und für die Sauerstoffelektrode zwischen 0,1 und 0,5 [5]. In der konkret untersuchten 100-W-Brennstoffzelle wurde ein Durchtrittskoeffizient von 0,38 ermittelt. Auch dieses Ergebnis legt nahe, dass hier vor allem die kathodische Elektroden-seite das Ergebnis geprägt hat. In zukünftigen Untersuchungen soll daher auch die Tafel-Auswertung des Aktivierungsbereiches der Stromdichte-Potential-Kennlinie für die Charakterisierung der Brennstoffzelle als Parameter für die Alterung herangezogen werden.

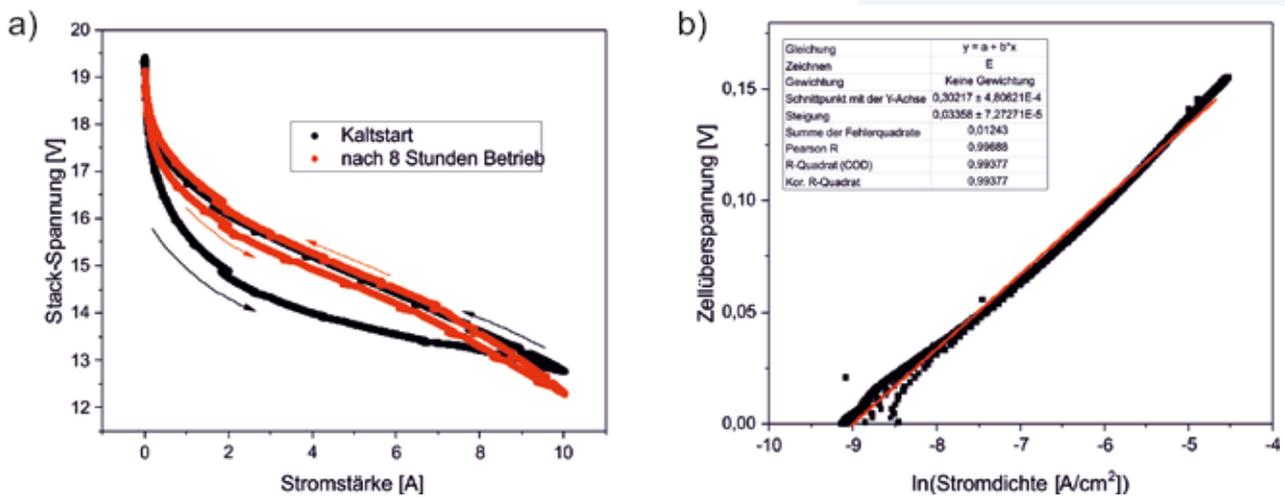


Abbildung 2: a) Dynamisch aufgenommene Potential-Strom-Kennlinien des 100-W-Brennstoffzellenstacks direkt nach dem Einschalten („Kaltstart“) und nach zirka acht Stunden Betriebsdauer. b) Tafel-Auftragung der auf eine Einzelzelle des 100-W-Brennstoffzellenstacks bezogenen Überspannung. Die Auswertung der linearen Regression (rote Gerade) mit der Tafel-Gleichung ergibt einen Durchtrittskoeffizienten $\alpha = 0,38$ und eine Austauschstromdichte $i_0 = 1,2 \times 10^{-4} \text{ A/cm}^2$. Grafik: Maik Eichelbaum

Als weitere Methode zur Charakterisierung von PEM-Brennstoffzellen im aufgebauten Prüfstand testete das Team die elektrochemische Impedanzspektroskopie. Zu diesem Zweck wurden exemplarisch elektrochemische Impedanzspektren am Brennstoffzellenstack der Leistungsklasse 100 W nahe der stromlosen Zellspannung (18 V / ca. 0,5 W Last), unter mittlerer Belastung (16 V / ca. 20 W) sowie unter hoher Belastung (14 V / ca. 98 W) im Frequenzbereich zwischen 10 mHz und 100 kHz potentiostatisch mit einer Amplitude von 10 % der Klemmspannung aufgezeichnet. Die Nyquist-Diagramme der Spektren sind in Abbildung 3a und b dargestellt. Zur Auswer-

tung wurden die in Abbildung 3c dargestellten Ersatzschaltbilder herangezogen. Die Kathoden- und die Anoden- seite wird dabei jeweils durch eine Parallelschaltung aus Widerstand (Ladungstransferwiderstand) und Kapazität (Doppelschichtkapazität) modelliert, die in Reihe mit einem weiteren Widerstand geschaltet sind, der dem Mem- branwiderstand zwischen den Halbzellen entspricht. Die elektrochemische Doppelschicht realer polykristalliner Elektroden kann häufig besser durch ein sogenanntes Constant Phase Element (CPE) statt einer reinen Kapazi- tät beschrieben werden. Die Impedanz Z_{CPE} eines CPE berechnet sich nach folgender Formel:

$$Z_{CPE} = \frac{1}{Q_0(\omega i)^n} \quad (3)$$

Für den Exponenten $n = 1$ wird aus dem CPE daher ein perfekter Kondensator mit der Kapazität $C=Q_0$. Zur Be- rücksichtigung von Induktivitäten, die in der Regel durch Kabel bei hohen Frequenzen verursacht werden, wurde zusätzlich eine in Reihe geschaltete Spule im Ersatzschaltbild integriert. Dieses Ersatzschaltbild wird häufig zur Beschreibung elektrochemischer Impedanzspektren von Brennstoffzellen verwendet, da die Schaltelemente noch relativ gut interpretierbar im Kontext des realen Brennstoffzellenaufbaus sind [6]. Die Anpassung der dis- kutierten Ersatzschaltbildelemente an die experimentellen elektrochemischen Impedanzspektren ergab die in Abbildung 3c dargestellten Werte. Zum einen fällt auf, dass die Spektren relativ gut mit Hilfe des vorgeschlagenen Ersatzschaltbildes simuliert werden können. Innerhalb einer Messung zeichnet sich jeweils ein Parallelschaltkreis durch einen relativ hohen Ladungstransferwiderstand und eine hohe Kapazität aus, während der andere Paral- lelschaltkreis teilweise um eine Größenordnung kleinere Werte für die jeweiligen Elemente aufweist. Die Seite mit den hohen Werten kann daher der Kathode zugeordnet werden. Auffällig ist auch, dass mit steigender Last vor allem die Ladungstransfer- und Membranwiderstände kleiner werden. Die genauen Ursachen dafür sind komplex, aber die Reaktionsgeschwindigkeiten steigen (beziehungsweise die dazugehörigen Widerstände fallen) vor allem aufgrund der geringeren Klemmspannung, der steigenden Temperatur bei hoher Last (und dem unter an- derem damit einhergehenden verbesserten Gas- und Protonentransport in den Membranen) und eventuell auch aufgrund der verbesserten Membranbefeuchtung durch die höhere Produktionsrate an Wasser. Insgesamt zeigt aber diese Analyse, dass sich auch die elektrochemische Impedanzspektroskopie sehr gut zur tiefgründigen Diagnostik der mit diesem Prüfstand untersuchten Brennstoffzellen eignet und deshalb zukünftig auch für die Beschreibung von Alterungsphänomenen herangezogen werden wird.

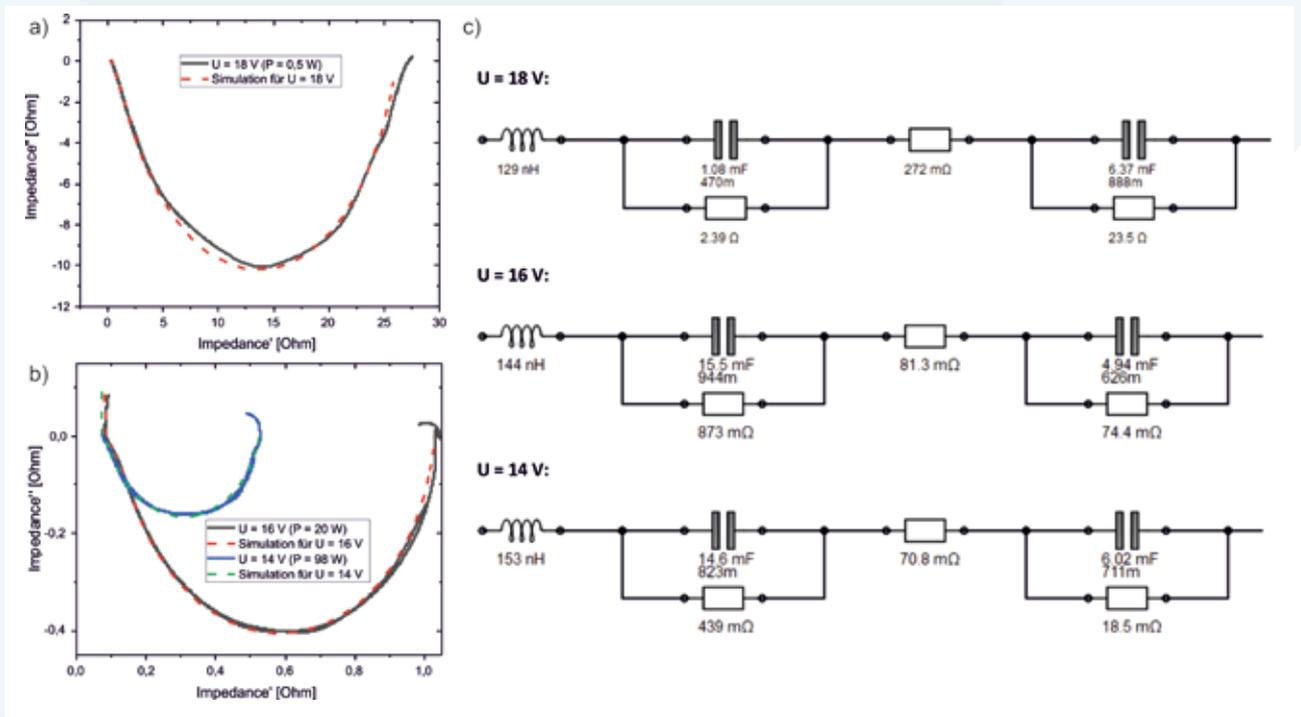


Abbildung 3: Nyquist-Diagramme elektrochemischer Impedanzspektren (10 mHz – 100 kHz), aufgenommen an einem 100-W-Brennstoffzellenstack, bei a) geringer sowie b) mittlerer und hoher Belastung, sowie Vergleich mit berechneten elektrochemischen Impedanzspektren, die mit den unter c) dargestellten Ersatzschaltbildern an die experimentellen Daten angepasst wurden. Grafik: Maik Eichelbaum

Teil 3: Aufnahme von Lastprofilen

Ein weiterer Vorteil des installierten Prüfstands ist die Programmierung von verschiedenen Lastprofilen, um zum Beispiel eine beschleunigte Alterung der Brennstoffzellen herbeizuführen oder für Mobilitätsanwendungen standardisierte Fahrzyklen zu simulieren. Zum Test wurden zwei verschiedene Lastprofile potentiostatisch programmiert. Im Profiltyp 1 wechseln sich längere Phasen bei einer konstanten Spannung mit abrupten Änderungen der Spannung über einen großen Potentialbereich ab (Abbildung 4a). Im Profiltyp 2 wird die Spannung kontinuierlich und schrittweise zwischen einem Maximal- und Minimalwert geändert (Abbildung 4b). Während der Potentios-tat die vom Profil vorgegebene Spannung regelt, werden mit dem Prüfstand die Kenndaten Stromstärke, Spannung, Stack-Temperatur und Wasserstofffluss gemessen und mit einer Frequenz von zirka 0,3 Hz gespeichert. Die Profile wurden an einem 100-W-Brennstoffzellenstack getestet, um damit entsprechende Datensätze für das Training und die Testung von verschiedenen Machine-Learning-Methoden aufzunehmen.

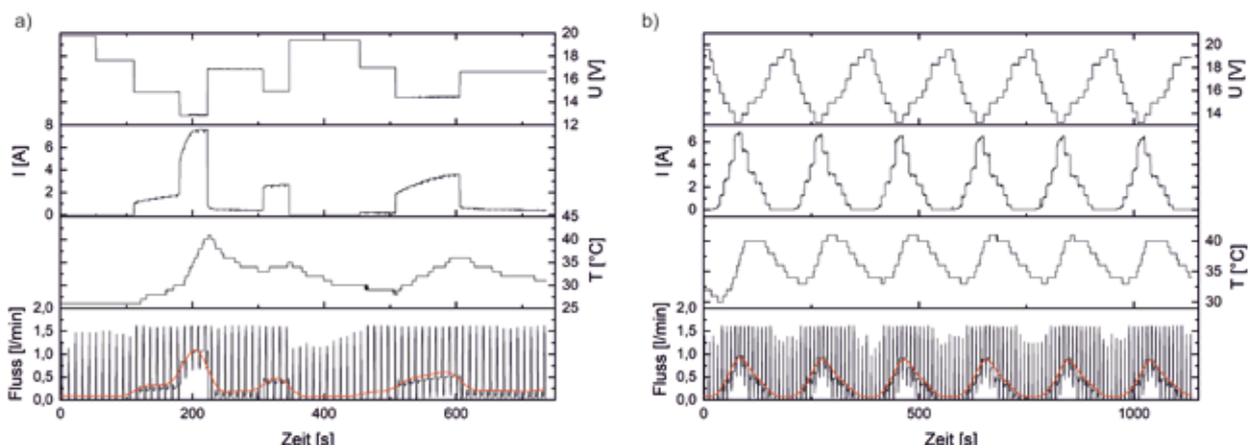


Abbildung 4: Zwei Beispieldatensätze aufgenommen am Brennstoffzellenstack der Leistungsklasse 100 W mit den resultierenden Messdaten für die Spannung U, Stromstärke I, Stack-Temperatur T und den Wasserstofffluss bei potentiostatischer Regelung (das heißt ein Spannungsprofil wurde vorgegeben) für zwei grundsätzlich verschiedene Lastprofile (a) Profiltyp 1, b) Profiltyp 2). Die scharfen Linien beim Wasserstofffluss resultieren aus der automatischen Öffnung des Gasauslassventils im Abstand von zirka 10 s zum Druckabbau. Die PID-Regelung des Wasserstoffflusses erfolgte auf der Basis eines an der Brennstoffzelle anliegenden Soll-Überdrucks von 0,5 bar. Grafik: Maik Eichelbaum

Teil 4: Anwendung von Machine-Learning-Methoden zur Erstellung eines Prognosemodells

Durch Anwendung verschiedener Machine-Learning-Methoden sollten diese Trainingsdatensätze verwendet werden, um an unabhängigen Testdatensätzen die Prognosewahrscheinlichkeit für einen charakteristischen Parameter des Brennstoffzellenstacks unter definierter Belastung zu bestimmen. Es wurden die Methoden „Multiple Linear Regression“, „Polynomial (4th degree) Regression“, „Support Vector Regression“, „Decision Tree Regression“ und „Random Forest Regression“ getestet. Als Prognoseparameter (Ausgabeparameter) wurde die Stack-Spannung gewählt, Eingangsparameter waren die Stromstärke, die Stack-Temperatur und der Wasserstofffluss. Als Erstes wurde für jeden der beiden Lastprofiltypen (das heißt Profiltyp 1 oder 2) eine Zahl an Datensätzen als Trainingsdatensatz und eine Zahl an Datensätzen vom gleichen Lastprofiltyp (das heißt 1 oder 2) als Testdatensatz definiert (jeweils fünf bis zehn Datensätze). In der nächsten Schwierigkeitsstufe wurde die Methode mit einem Profiltyp trainiert und mit dem jeweils anderen Profiltyp getestet (jeweils sieben bis 14 Datensätze). In Abbildung 5 werden die experimentellen und die vorhergesagten Spannungen der jeweiligen Testdatensätze exemplarisch für die „Multiple Linear“, „Decision Tree“ und „Random Forest Regression“ in Paritätsdiagrammen dargestellt

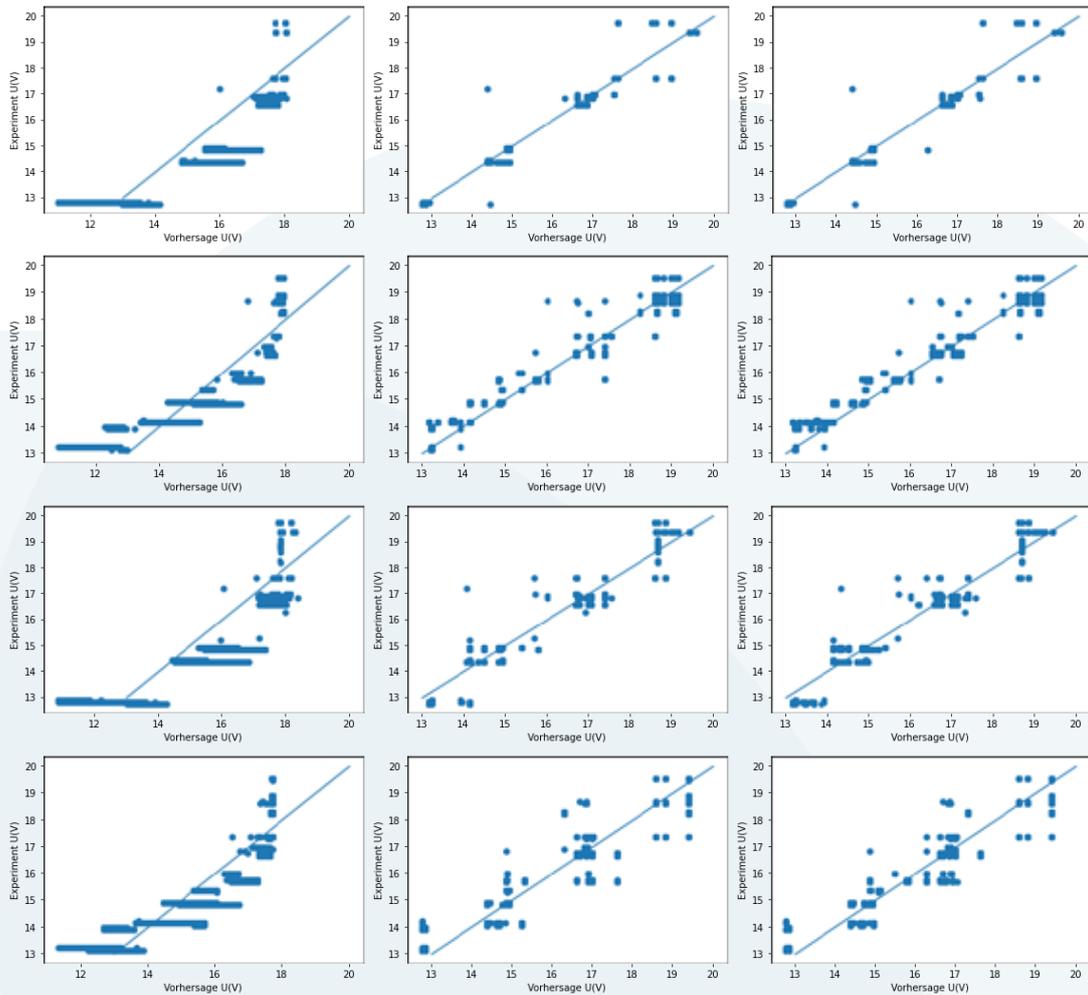


Abbildung 5: Darstellung von Paritätsdiagrammen zum Vergleich von unter verschiedenen Lastprofilen gemessenen („Experiment“) und von mit den Machine-Learning-Methoden „Multiple Linear Regression“ (linke Spalte), „Decision Tree Regression“ (mittlere Spalte) und „Random Forest Regression“ (rechte Spalte) vorhergesagten Brennstoffzellstack-Spannungen. Die Methoden wurden mit Lastprofil Datensätzen vom Typ 1 trainiert und getestet (obere Zeile), mit Lastprofil Datensätzen vom Typ 2 trainiert und mit Typ 1 getestet (dritte Zeile) beziehungsweise mit Lastprofil Datensätzen vom Typ 1 trainiert und mit Typ 2 getestet (untere Zeile). Grafik: Maik Eichelbaum

Neben der optischen Beurteilung über die Paritätsdiagramme wurden auch das Bestimmtheitsmaß und die Wurzel des mittleren Abweichungsquadrates der vorhergesagten Spannungen zur mathematisch-statistischen Bewertung der Ergebnisse berechnet. Die Ergebnisse sind für alle getesteten Methoden in Tabelle 1 zusammengefasst. Als klarer Trend lässt sich erkennen, dass die linearen Regressionen („Multiple Linear“ und „Polynomial“) nur sehr schlecht die Spannungen prognostizieren können. Die „Support Vector Regression“ kommt ebenfalls nur zu ungenügenden Ergebnissen. Dagegen erreichen die Methoden „Decision Tree“ und „Random Forest Regression“ teilweise schon recht gute Ergebnisse, wobei die „Random Forest Regression“ tendenziell bei allen Testverfahren am besten abschneidet.

	Multiple Linear Regression	Polynomial Regression (4th degree)	Support Vector Regression	Decision Tree Regression	Random Forest Regression
mit Lastprofiltyp 1 trainiert und getestet	$r^2 = 0,6076$ RMSE = 1,2268	$r^2 = 0,9002$ RMSE = 0,6191	$r^2 = 0,3095$ RMSE = 1,6274	$r^2 = 0,9415$ RMSE = 0,4735	$r^2 = 0,9414$ RMSE = 0,4740
mit Lastprofiltyp 2 trainiert und getestet	$r^2 = 0,7675$ RMSE = 0,9880	$r^2 = 0,9184$ RMSE = 0,5855	$r^2 = 0,9367$ RMSE = 0,5155	$r^2 = 0,9556$ RMSE = 0,4318	$r^2 = 0,9592$ RMSE = 0,4154
mit Lastprofiltyp 2 trainiert und mit Lastprofiltyp 1 getestet	$r^2 = 0,6377$ RMSE = 1,1796	$r^2 = 0,8345$ RMSE = 0,7973	$r^2 = 0,7529$ RMSE = 0,9743	$r^2 = 0,9088$ RMSE = 0,5919	$r^2 = 0,9249$ RMSE = 0,5486
mit Lastprofiltyp 1 trainiert und mit Lastprofiltyp 2 getestet	$r^2 = 0,7983$ RMSE = 0,9115	$r^2 = 0,6403$ RMSE = 1,2172	$r^2 = 0,8052$ RMSE = 0,8956	$r^2 = 0,8724$ RMSE = 0,7249	$r^2 = 0,9070$ RMSE = 0,6066

Tabelle 1: Bestimmtheitsmaß r^2 und Wurzel des mittleren Abweichungsquadrates RMSE der mit verschiedenen Machine-Learning-Methoden vorhergesagten Brennstoffzellstack-Spannungen.

Teil 5: Ausblick

Eine genauere Analyse der mit den Machine-Learning-Methoden prognostizierten Testdaten zeigt, dass insbesondere die Spannungen zu Beginn eines Testzyklus („Kaltstart“) mit den größten Abweichungen vorhergesagt werden. Durch die Optimierung der Trainingszyklen insbesondere in diesem Bereich soll zukünftig der Prognosefehler weiter minimiert werden. Zudem sollen auch Methoden des „Deep Learning“ wie künstliche neuronale Netze getestet werden. Neben den bisher betrachteten Kenndaten Spannung, Stromstärke, Wasserstofffluss und Stack-Temperatur sollen auch noch weitere Daten, die mit dem Prüfstand gemessen werden können (wie zum Beispiel die Auswertung der elektrochemischen Impedanzspektren mit Ersatzschaltbildelementen und der Strom-Potential-Kennlinien mit der Tafel-Gleichung), aber auch noch weitere charakteristische Kennwerte (wie zum Beispiel die H_2 -, O_2 - und H_2O -Konzentration sowie von Verunreinigungen wie CO, CO_2 in der Abluft; Metallionenkonzentrationen wie Pt, Fe, Ni etc. im Reaktionswasser) in die Modelle einfließen. Damit soll ein generalisierbares und leistungsfähiges Diagnose- und Prognosemodell erstellt werden, das sich auch zur Vorhersage der Lebensdauer des Brennstoffzellenstacks und zur Leistungsoptimierung eignet. Durch Anwendung auf reale Systeme soll dieses Modell schließlich in der Praxis getestet werden.

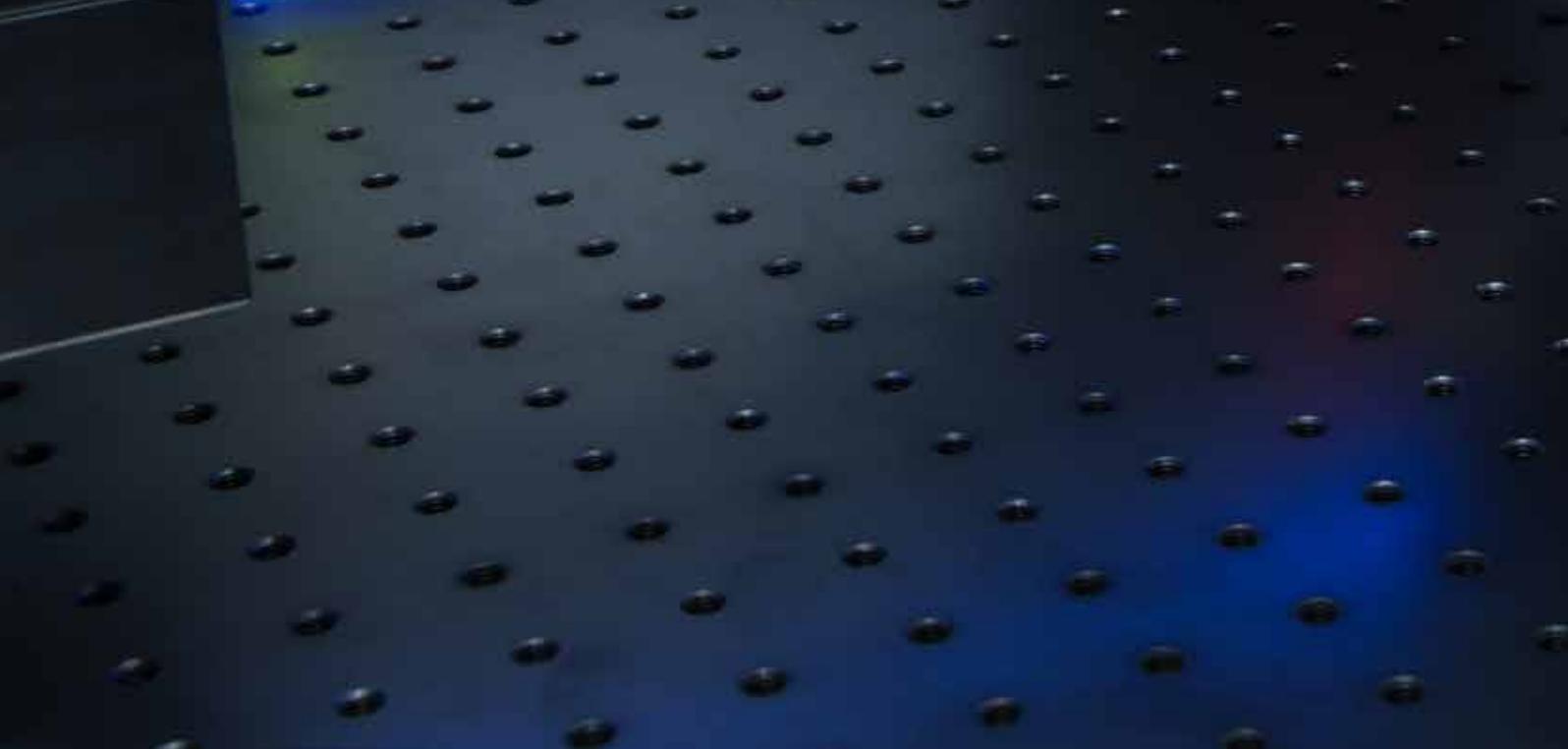
5. Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

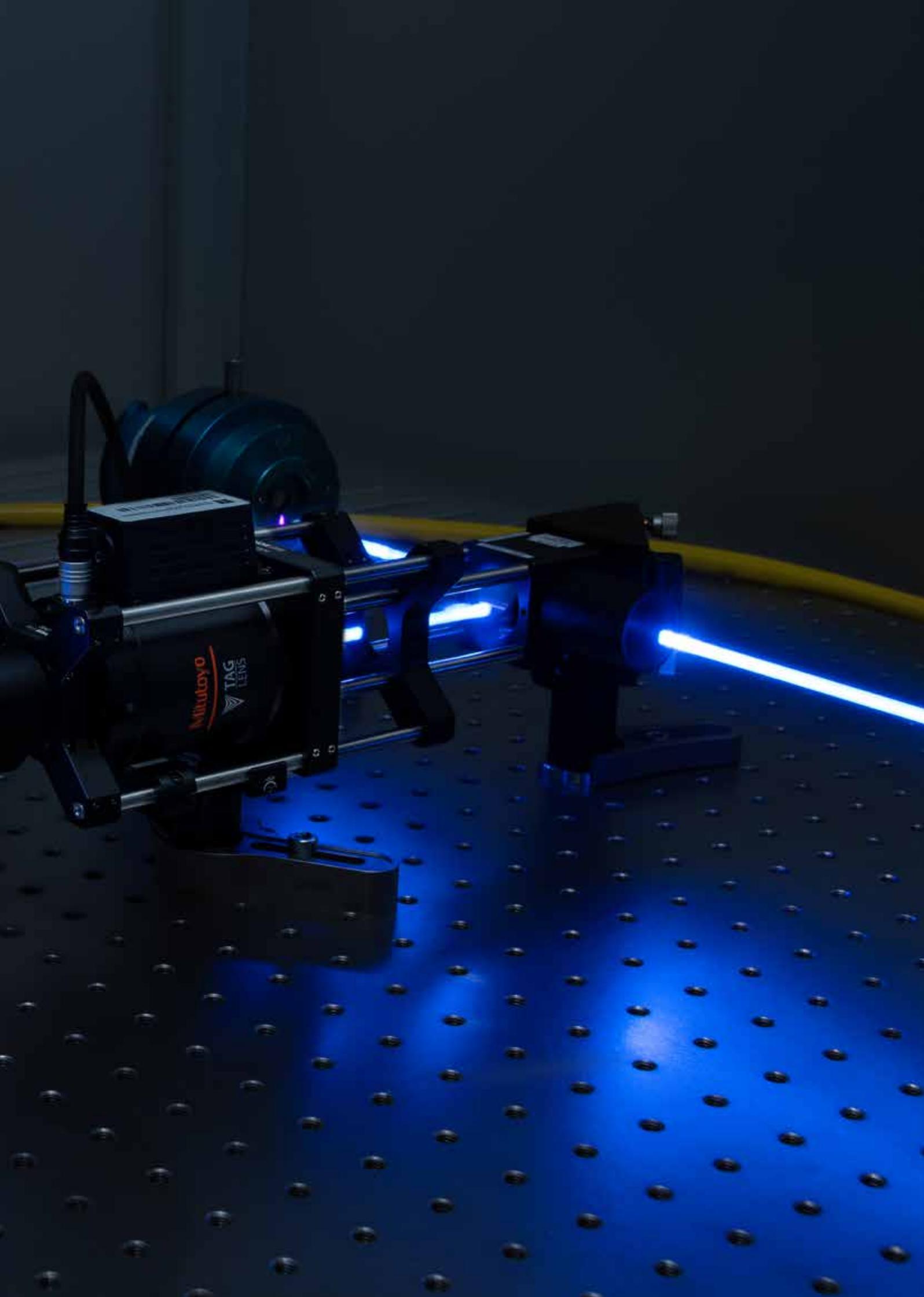
- Auf der Grundlage dieser Arbeiten ist in Kooperation mit der MAN Truck & Bus SE, der TU Hamburg und dem Fritz-Haber-Institut der Max-Planck-Gesellschaft eine Projektskizze zum Thema „Smartes Monitoring der Alterung und Regenerierung von Truck-H₂-Brennstoffzellen mittels neuronaler Netze und Impedanztomographie (SMART.H₂)“ für die Förderlinie „Forschung an Fachhochschulen in Kooperation mit Unternehmen“ (FH-Kooperativ) entstanden, die am 15. Oktober 2020 beim Bundesministerium für Bildung und Forschung eingereicht wurde.
- Die Arbeiten werden ebenfalls in den neu gegründeten Wasserstoff-Campus der TH Nürnberg, der MAN Truck & Bus SE und der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg auf dem Werksgelände der MAN in Nürnberg einfließen.
- Die Ergebnisse und Erfahrungen aus dem Projekt werden auch in die Lehre, vor allem im Kontext des Lehrmoduls „Klima, Energie- und Rohstoffwandel“ im Masterstudiengang Angewandte Chemie eingebracht. So wird seit dem Wintersemester 2020/21 der Praktikumsversuch „Leistungskenndaten einer Polymerelektrolyt-Brennstoffzelle“ am aufgebauten Brennstoffzellenprüfstand durchgeführt.
- Im Rahmen dieses Vorlauforschungsprojektes wurden zudem Abschluss- und Projektarbeiten vergeben, die in der nachfolgenden Tabelle aufgeführt sind.

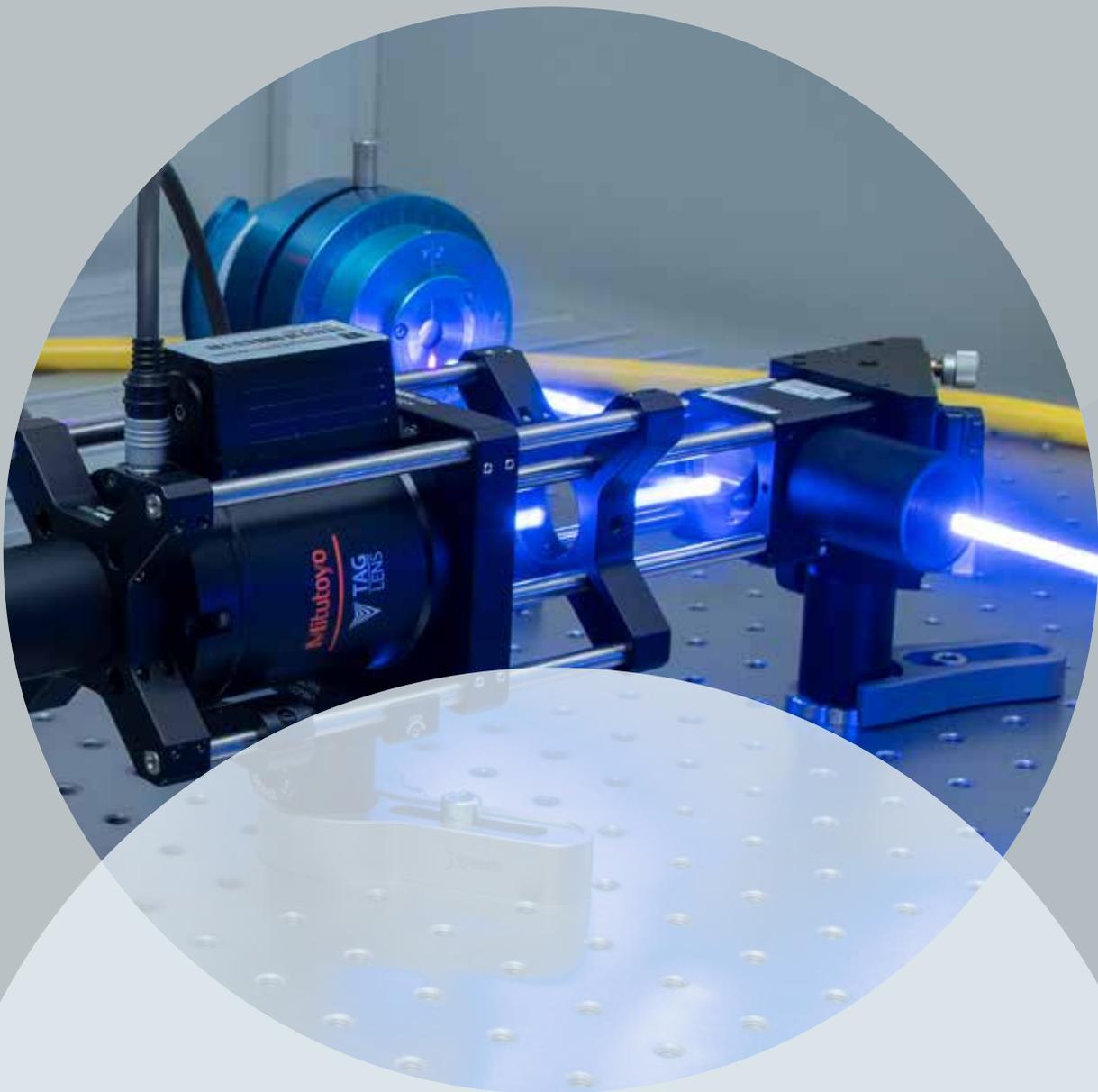
Art	Titel	Autor	Status
Masterprojekt	Elektrochemische Charakterisierung von H ₂ -PEM-Brennstoffzellen	Steven Schamber	abgeschlossen
Masterprojekt	Spurenanalytik des Reaktionswassers einer H ₂ /Luft-PEM-Brennstoffzelle	Marco Lindner	abgeschlossen
Masterarbeit	Elektrochemische und elementanalytische Untersuchung der Alterung von Wasserstoff-Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen	Marco Lindner	abgeschlossen

6. Literatur

1. T. Gnann, M. Wietschel, A. Kühn, A. Thielmann, A. Sauer, P. Plötz, C. Moll et al.: „Brennstoffzellen-Lkw: kritische Entwicklungshemmnisse, Forschungsbedarf und Marktpotential“: Studie im Rahmen der wissenschaftlichen Beratung des BMVI zur Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie, Fraunhofer ISI, Karlsruhe, Fraunhofer IML, Dortmund, PTV Transport Consult GmbH, Karlsruhe 2017.
2. J. Zhao, X. Li, A review of polymer electrolyte membrane fuel cell durability for vehicular applications: Degradation modes and experimental techniques. *Energy Conversion and Management* 2019, 199, S. 112022.
3. R. Petrone, Z. Zheng, D. Hissel, M.C. Péra, C. Pianese, M. Sorrentino, M. Becherif et al., A review on model-based diagnosis methodologies for PEMFCs. *Int. J. Hydrog. Energy* 2013, 38, S. 7077–7091.
4. Y. Wang, B. Seo, B. Wang, N. Zamel, K. Jiao, X.C. Adroher, Fundamentals, materials, and machine learning of polymer electrolyte membrane fuel cell technology. *Energy and AI* 2020, 1, S. 100014.
5. G. Reich, M. Reppich, *Regenerative Energietechnik: Überblick über ausgewählte Technologien zur nachhaltigen Energieversorgung*, 2. Auflage, Springer Fachmedien, Wiesbaden 2018.
6. X.-Z. Yuan, C. Song, H. Wang, J. Zhang, *Electrochemical Impedance Spectroscopy in PEM Fuel Cells: Fundamentals and Applications*, Springer-Verlag, London 2010.







Liquid Laser Optics for Material Processing Applications (LiLO)

Prof. Dr.-Ing. Thomas Frick
Dipl.-Ing. Andreas Schkutow
Institut für Chemie, Material- und Produktentwicklung (OHM-CMP)
TH Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Im Rahmen dieses Projekts entwickelte und charakterisierte das Team eine akustisch modulierte Flüssiglense, mit der sich die Strahlung von Hochleistungslasersystemen äußerst schnell beeinflussen lässt. In Materialbearbeitungsprozessen ermöglicht dies eine äußerst flexible Variation des Strahlprofils, der Fokusslage und damit der Leistungsdichte am Werkstück wodurch sich die Bearbeitungsqualität und die Prozesseffizienz deutlich steigern lässt. Ein breites Anwendungsspektrum wurde durch die Auslegung für einen sehr großen Wellenlängenbereich im nahen Infrarotbereich zwischen 800 und 2000 Nanometern erreicht. Dies ermöglicht die Verwendung verschiedener Dioden-, Festkörper- und Faserlaser.

1. Projektdaten

Fördersumme	35.000 Euro
Laufzeit	November 2019 bis Dezember 2020
Institut	Institut für Chemie, Material- und Produktentwicklung (OHM-CMP)
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Thomas Frick
Kontakt Daten	thomas.frick@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage und Ziele des Forschungsprojekts

Bei nahezu allen Prozessen in der Lasermaterialbearbeitung ist die Leistungsdichteverteilung im Laserfokus entscheidend für das Prozessergebnis. Es existieren verschiedene Technologien, um das Strahlprofil anwendungsgerecht zu formen [1]. Transmissive, refraktive Strahlformer können verlustarm ein bestimmtes Strahlprofil in einem festgelegten Arbeitsabstand erzeugen und sind deshalb für spezialisierte Anwendungen vorteilhaft. Verbreitet sind Strahlformer, die aus einem gaußschen Strahlprofil ein Top-Hat-Profil generieren [2]. Solche Optiken erreichen ein bestimmtes Strahlprofil aber oft nur in einem bestimmten Arbeitsabstand [3]. Vor und hinter diesem Fokusabstand können grundlegend andere Strahlprofile vorliegen, weshalb Bearbeitungsprozesse empfindlich auf Abweichungen im Arbeitsabstand reagieren können. Andere Methoden zur Strahlformung wie räumliche Lichtmodulatoren auf Basis von Flüssigkristallen bieten eine hohe Flexibilität und relativ hohe Geschwindigkeiten, sind jedoch nicht für hohe mittlere Leistungen geeignet [4]. In den meisten Anwendungen werden deshalb die Strahlprofile der Laserstrahlquellen unverändert über einfache Linsen- oder Spiegeloptiken in die Bearbeitungszone fokussiert, wobei meist gaußförmige Intensitätsprofile am Werkstück erzeugt werden [5]. Dies führt dazu, dass in vielen Anwendungen ein Teil der Laserenergie ungenutzt bleibt, da nur im Zentrum des Strahls die für den jeweiligen Prozess (Schneiden, Schweißen, Abtragen, usw.) benötigte Leistungsdichte erreicht wird. Ebenso kann der Fall auftreten, dass die Leistungsdichte über einen größeren Bereich des Strahldurchmessers für den Prozess ausreichend ist, es im Zentrum aufgrund der höheren Leistungsdichte aber zu unerwünschten Effekten wie unkontrolliertem Verdampfen, thermischen Umwandlungen oder dergleichen kommt [6]. Besonders für Medizintechnik- und Reinraumanwendungen stellt das damit verbundene Kontaminationsrisiko häufig ein Ausschlusskriterium für die Anwendung dar. Um die Gefahr thermischer Schädigungen zu reduzieren, wird in vielen Anwendungen mit leicht defokussierter Strahlung gearbeitet. Dadurch kann außerdem die Bearbeitungseffizienz gesteigert werden, üblicherweise aber zu Lasten der Präzision [7].

Aus Anwendungen in der Mikroskopie und der industriellen Bildverarbeitung ist eine akustisch modulierte Flüssiglinse bekannt [8,9], die ihre Brechkraft äußerst schnell variieren kann. Diese basiert auf einem zylinderförmigen Flüssigkeitsreservoir, um das ringförmig Piezoelemente angeordnet sind. Durch eine geeignete Ansteuerung der Piezoelemente können in der Flüssigkeit stehende Schallwellen erzeugt werden. Diese führen zu periodischen Veränderungen in der Dichte der Flüssigkeit. Der optische Brechungsindex eines Materials ist von der Dichte abhängig, somit führt die Anregung der Flüssigkeit mit Schallwellen zu einer periodischen Veränderung der Brechkraft der Linse. Das Funktionsprinzip des Systems ist in Abbildung 1 dargestellt. Wird nun beispielsweise die Beleuchtung eines Mikroskops mit der Betriebsfrequenz der Flüssiglinse synchronisiert, also die Beleuchtung nur dann aktiviert, wenn die Linse eine bestimmte Brechkraft aufweist, so kann mit einer Kamera gezielt eine bestimmte Fokusebene abgebildet werden.

Das Funktionsprinzip dieser Linse bietet auch für Hochleistungs-Laseranwendungen großes Potenzial, da es eine äußerst schnelle Variation der Leistungsdichte im Fokus ermöglicht und so potenziell die Nachteile anderer Strahlformungseinrichtungen wie zum Beispiel adaptiven Optiken, mechanischen Fokus-Shiftern oder Flüssigkristall-Lichtmodulatoren vermeiden kann.



Abbildung 1: Funktionsprinzip der „tunable acoustic gradient index lens“; Grafik: TAGOPTICS [10].

3. Ziele des Forschungsprojekts

Im Rahmen des Forschungsprojekts „LiLO, Liquid Laser Optics for Material Processing Applications“ soll eine kommerziell erhältliche Flüssiglinse [11], eine sogenannte „tunable acoustic gradient index lens“ oder kurz „TAGLENS“, so modifiziert werden, dass sie für den Einsatz mit Hochleistungslasern in der Materialbearbeitung geeignet ist. Die Modifikation erfolgt auf Basis eines Serienprodukts für Mikroskopieanwendungen in enger Abstimmung mit dem Hersteller Mitutoyo beziehungsweise deren Tochterfirma Microencoder Inc., sodass dessen Erfahrungen bei der Entwicklung und Herstellung des Systems mit unseren Erfahrungen aus den Lasermaterialbearbeitungsprozessen und den entsprechenden Anforderungen an die Laserstrahlung kombiniert werden können. Die größte Herausforderung stellen dabei die wesentlich höheren Strahlungsleistungen dar, die in der Lasermaterialbearbeitung im Vergleich zu Prozessüberwachungs-, Mikroskopie- oder Messtechnikanwendungen zum Einsatz kommen. Für die erfolgreiche Modifikation muss das Forschungsteam eine geeignete chemisch, physikalisch und thermisch stabile Flüssigkeit finden, die für die geplanten Laserwellenlängen einen sehr hohen Transmissionsgrad aufweist. Dadurch können Verluste minimiert und ein effizienter Bearbeitungsprozess realisiert werden. Die Flüssigkeiten werden mit Hilfe von Transmissionsspektren charakterisiert. Die übrigen Kennwerte, insbesondere die thermische Stabilität und die Viskosität entnehmen die Beteiligten der Literatur beziehungsweise den Datenblättern. Außerdem müssen sie für die beidseitigen Fenster, die die Linse begrenzen, geeignete Materialien auswählen und eine breitbandige Antireflexbeschichtung entwickeln, um die Verluste weiter zu reduzieren. Anschließend wird das System aufgebaut, ausführlich charakterisiert und mit verschiedenen Laserstrahlquellen getestet und auf das Anwendungspotenzial für verschiedenste Bearbeitungsprozesse hin untersucht.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Festlegung der Zielkriterien

Um ein möglichst breites Einsatzspektrum des Linsensystems abdecken zu können, wurde der Design-Wellenlängenbereich des Linsensystems auf 800 bis 2000 Nanometer festgelegt. In diesem Wellenlängenbereich sollte die Transmission maximiert werden. Dies deckt zum einen die industriell besonders bedeutenden Nd:YAG-Festkörperlaser und Yb-Faserlaser mit typischen Wellenlängen zwischen 1030 und 1070 Nanometern ab, zum anderen die meisten kosteneffizienten Hochleistungsdiodelnlaser, die in der Regel im Bereich zwischen 800 und 980 Nanometern arbeiten. Auch viele Kurzpulslasersysteme, zum Beispiel auf Nd:YVO-Basis, werden damit abgedeckt. Außerdem werden Laserstrahlquellen auf Basis von Erbium, Holmium oder Thulium berücksichtigt, die im Wellenlängenbereich von 1,5 bis 2 Mikrometern emittieren und sowohl in medizinischen Anwendungen und der Kunststoffbearbeitung als auch bei Kurzpulslasersystemen zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Umsetzung

Aus der Literatur ist die Verwendung von Wasser und Silikonölen für Flüssiglinsensysteme bekannt [12]. Für den geplanten Einsatz im Wellenlängenbereich bis 2 Mikrometer ist Wasser aufgrund der starken Absorptionsbanden im Bereich um 1430 Nanometer, 1930 Nanometer und 1970 Nanometer nicht geeignet. Diese sind auf die Anregung von O-H-Streck- beziehungsweise Biegeschwingungen im Wassermolekül zurückzuführen [13]. Silikonöle absorbieren im Design-Wellenlängenbereich hauptsächlich aufgrund der organischen Seitengruppen. Typischerweise handelt es sich dabei um CH₃ Gruppen, die mehrere Absorptionsbanden zwischen 1690 und 1852 Nanometern besitzen. Daneben liegen im Bereich um 1185 Nanometer und 1400 Nanometer Absorptionsbanden der Si-O-Streckschwingungen vor, sodass Silikonöle für den gewünschten Wellenlängenbereich ebenfalls ungeeignet sind [14]. Das Forschungsteam identifizierte eine vielversprechende, thermisch und chemisch stabile Flüssigkeit, die aufgrund ihrer chemischen Struktur keine der oben beschriebenen Absorptionsbanden enthält. Aufgrund einer Geheimhaltungsvereinbarung mit den beteiligten Firmen darf die verwendete Flüssigkeit hier nicht genannt werden. Mittels UV-VIS-NIR-Spektroskopie wurde bestätigt, dass die Flüssigkeit im Wellenlängenbereich zwischen 450 und 1950 Nanometern kaum Strahlung absorbiert und somit für die Anwendung sehr gut geeignet ist.

Neben der Flüssigkeit müssen auch die Fenster angepasst werden, um eine möglichst hohe Transmission zu erreichen. Da der Brechungsindex des Fluides im Infrarotbereich nicht genau bekannt, der Unterschied zum Fenstermaterial aber sehr gering war, versahen die Beteiligten nur die außenliegenden Luft-Glas-Grenzflächen mit einer Antireflexbeschichtung, um die Fresnel-Reflexion dort so gut wie möglich zu minimieren. Die Fensterbeschichtung wurde durch einen externen Dienstleister vorgenommen, wobei als Zielvorgabe eine Restreflexion von unter 1,0 Prozent im Wellenlängenbereich zwischen 800 und 2000 Nanometern angestrebt wurde. Im Wellenlängenbereich zwischen 800 und 1800 Nanometern konnte dieses Ziel mit einer Restreflexion von durchschnittlich 0,6 Prozent übertroffen werden. Lediglich im Bereich zwischen 1900 und 2000 Nanometern liegt die Restreflexion je Grenzfläche über 1,0 Prozent.

Das Team setzte die beschichteten Fenster in die Linse ein, füllte das System mit dem Fluid und bestimmte die Transmissionseigenschaften des Gesamtsystems. Abbildung 2 zeigt das fertiggestellte Linsensystem und das bestimmte Transmissionsspektrum, wobei der Design-Wellenlängenbereich blau hinterlegt ist.

Im Wellenlängenbereich zwischen 800 und 1650 Nanometern zeigt das System abgesehen von einem leichten Absorptionspeak bei zirka 1400 Nanometern eine sehr hohe Transmission von über 97 Prozent, wobei die geringen Verluste höchstwahrscheinlich auf die geringen Restreflexionen an den vier Fenstergrenzflächen zurückzuführen sind. Lediglich im Wellenlängenbereich zwischen 1800 und 2000 Nanometern fällt das System etwas hinter die Erwartungen zurück. Hier besteht für die Zukunft noch Optimierungspotenzial. Insbesondere könnte die Verwendung eines infrarotoptimierten Quarzglas mit geringem OH-Gehalt den nutzbaren Wellenlängenbereich beziehungsweise die zulässige Leistungsdichte weiter erhöhen. Eine Optimierung der Beschichtungen

für die konkrete Anwendung bietet darüber hinaus die Möglichkeit, die Restreflexionen weiter zu minimieren. Für Anwendungen mit moderater mittlerer Leistung sollte die Absorption im Fenster aber keine Probleme bereiten. Kritischer ist jedoch der Transmissionsabfall bei Wellenlängen über 1800 Nanometer anzusehen. Dieser ist teilweise auf Absorption im Fluid selbst zurückzuführen. Aufgrund der großen Länge des Flüssigkeitszylinders von mehreren Zentimetern ist die Absorption im Gegensatz zu den Messungen an den Standard-Messküvetten nicht mehr vernachlässigbar. Der Einfluss der Laserabsorption im Fluid wird in der Folge mit einem Thulium-Faserlaser ermittelt, der eine Emissionswellenlänge von 1998 Nanometern besitzt.

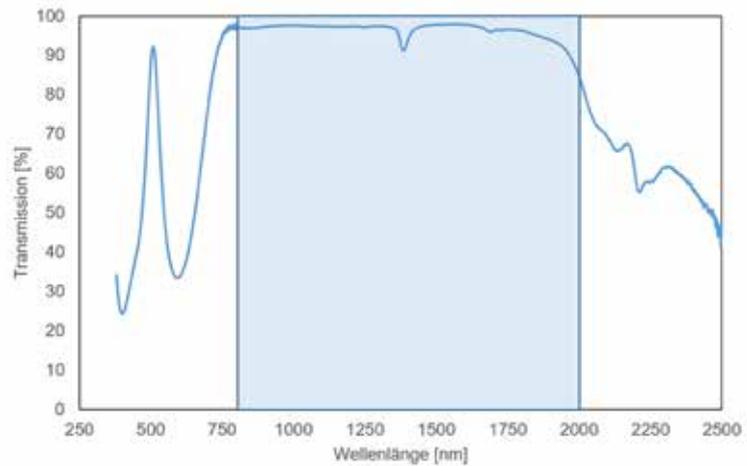
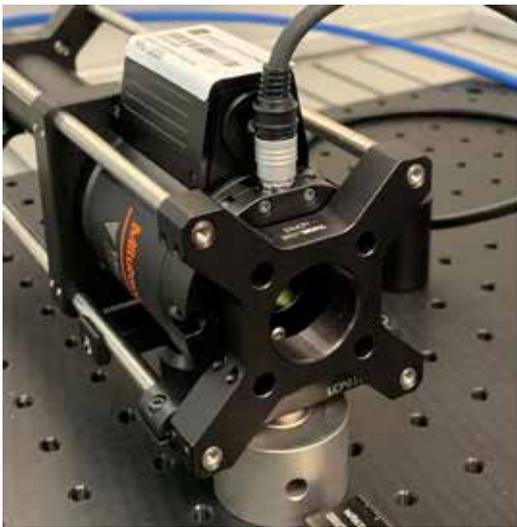


Abbildung 2: Fotografie des Linsenprototyps und Transmissionspektrum der modifizierten TAGLENS; Foto und Grafik: Andreas Schkutow

Außerhalb des Design-Wellenlängenbereichs fällt die Transmission deutlich ab. Im langwelligen Bereich zwischen 2 und 2,5 Mikrometern liegt die Transmission noch bei Durchschnittlich 62 Prozent. Dies ist ausreichend, um beispielsweise noch eine on-axis-Temperaturüberwachung mit Hilfe eines InGaAs-Pyrometers durchführen zu können. Im sichtbaren Spektralbereich zwischen 400 und 750 Nanometern weist die Linse eine mittlere Transmission von 56 Prozent auf. Damit ist beispielsweise noch eine Prozessüberwachung mit Hilfe von Kameras realisierbar. Beim Einsatz von Farbkameras ist aufgrund des uneinheitlichen Transmissionspektrums allerdings mit einer verfälschten Farbwiedergabe zu rechnen.

Betrieb der Linse

Zum Betrieb der Flüssigkeitslinse wird durch ringförmig angeordnete Piezoelemente im Tubus des Linsengehäuses eine stehende Ultraschallwelle erzeugt. Die Resonanzfrequenzen, bei welchen eine stehende Welle erzeugt werden kann, sind unter anderem von der Geometrie des Flüssigkeitszylinders, den Eigenschaften der Flüssigkeit und der Temperatur abhängig. Beim Betrieb ist deshalb darauf zu achten, dass das Linsensystem zu Beginn der Versuche ein thermisches Gleichgewicht erreicht hat. Das Projektteam identifizierte eine Vielzahl von Resonanzfrequenzen, bei der die Linse betrieben werden kann. Zunächst ist festzustellen, dass diese Frequenzen deutlich größer sind, als die Betriebsfrequenz der Standard-TAGLENS für Mikroskopieanwendungen. Diese wird üblicherweise im Bereich um 70 Kilohertz betrieben. Diese Abweichung ist auf die Eigenschaften des verwendeten Fluides zurückzuführen. Da die Wellenlänge der Schallwelle umgekehrt proportional zur Frequenz ist, sorgen diese hohen Betriebsfrequenzen für kürzere Schallwellenlängen. Damit weisen auch die induzierten Dichteschwankungen im Fluid und damit die Brechungsindex-Unterschiede geringere Abstände auf, was bedeutet, dass die maximale Linsenwirkung auf einen kleineren Bereich konzentriert und somit die nutzbare Apertur geringer ist. Nicht alle Resonanzfrequenzen führen auch zu einer als Linse nutzbaren, radialsymmetrischen Brechungsindex-Variation. Deshalb führten die Beteiligten zunächst einen Versuch durch, bei dem ein Laserstrahl zentrisch koaxial durch die Linse geführt und ein hochempfindlicher Photodetektor hinter der Linse knapp außerhalb der Strahlachse platziert wurde. Anschließend wurde der gesamte Betriebsfrequenzbereich durchlaufen. Bei Betriebsfrequenzen, bei welchen eine Linsenwirkung auftritt, trifft Laserstrahlung auf den Detektor, wobei die

Intensität mit der Betriebsfrequenz der Linse variiert. Auf diese Weise identifizierte das Forschungsteam mehrere vielversprechende Betriebsfrequenzen, wobei Frequenzen zwischen 100 und 200 Kilohertz aufgrund der größeren nutzbaren Apertur besonders interessant sind. In diesem Bereich wurden zwei nutzbare Resonanzfrequenzen erfasst und ausführlich charakterisiert.

Optische Leistung

Bei den beiden Resonanzfrequenzen bestimmten die Mitarbeitenden mit Hilfe eines Shack-Hartmann-Wellenfrontsensors die maximale Brechkraft, die nutzbare Apertur und die mittlere Wellenfrontabweichung sowie Aberrationen. Bei beiden Frequenzen ist eine beugungsbegrenzte Abbildung mit vernachlässigbaren Abbildungsfehlern durch die Linse möglich. Die höhere Frequenz führte dabei zu einer höheren Brechkraft, allerdings ist die nutzbare Apertur, bei welcher eine beugungsbegrenzte Abbildung erreicht wird, auf rund 2,0 Millimeter beschränkt. Bei der niedrigeren Frequenz ist die Brechkraft etwas geringer, dafür ist die nutzbare Apertur mit 3,0 Millimetern größer, was für Hochleistungslaser von großer Bedeutung ist, um die thermische Belastung so gering wie möglich zu halten. Trotzdem ist die Apertur auch bei dieser Einstellung noch deutlich kleiner als es für viele Anwendungen wünschenswert wäre.

Anwendungen

Bei der Anwendung der akustisch modulierten Flüssiglinse muss zwischen zwei grundlegend unterschiedlichen Betriebsarten unterschieden werden. Wenn die Linse in Resonanz bei einer konstanten Frequenz betrieben wird, stellt diese im Prinzip eine zylindrische Gradientenindexlinse dar, die ihre Brechkraft periodisch mit der Betriebsfrequenz variiert. Die Amplitude der Brechkraftänderung ist dabei abhängig von der Betriebsspannung. Wenn die Linse von kontinuierlicher Laserstrahlung oder gepulster Laserstrahlung mit Pulsdauern, die deutlich länger als eine Schwingungsperiode sind, bestrahlt wird, ergibt sich hinter der Linse eine zeitlich gemittelte Intensitätsverteilung. In dieser Betriebsart kann sich eine deutlich größere effektive Schärfentiefe ergeben, da das mittlere Intensitätsprofil auch in Bereichen ober- und unterhalb der ursprünglichen Fokusebene einen ähnlichen zeitlichen Verlauf aufweist. Die zweite mögliche Betriebsart liegt dann vor, wenn eine gepulste Laserstrahlquelle Pulsdauern besitzt, die deutlich kürzer als eine Schwingungsperiode sind, und die Pulsfrequenz des Lasers mit der Betriebsfrequenz der Linse synchronisiert wird. Dann erfährt jeder Laserpuls die gleiche Linsenbrechkraft und liegt somit in der gleichen Fokusebene. Durch eine Phasenverschiebung zwischen der Pulsfrequenz und der Linsenfrequenz lässt sich die räumliche Lage des Laserfokus dabei flexibel verschieben und auch sehr schnell variieren. Beide Betriebsarten untersucht das Team im Rahmen der Möglichkeiten der zur Verfügung stehenden Strahlquellen experimentell.

Anwendung mit kontinuierlicher Laserstrahlung

Zunächst wurde ein kontinuierlich betriebener Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 980 Nanometern eingesetzt, der mit einer asphärischen Linse auf einen Strahldurchmesser von 2,4 Millimetern kollimiert, durch die Flüssiglinse geführt und im Anschluss mit einer weiteren Asphäre fokussiert wurde. Aufgrund der periodischen Variation der Linsenbrechkraft ist mit einer periodischen Verschiebung der Fokuslage entlang der optischen Achse zu rechnen. Diese ist jedoch nicht einfach nachweisbar. Strahlprofil-Messgeräte besitzen eine stark eingeschränkte zeitliche Auflösung, weshalb diese nur in der Lage sind, radiale, zeitlich gemittelte Intensitätsverläufe zu erfassen. Im zeitlichen Mittel ergibt sich in einer Fläche senkrecht zur optischen Achse wieder ein gaußförmiger Intensitätsverlauf, selbst wenn die Spitzenintensität auf der optischen Achse wesentlich höher liegt. Im Experiment hat sich dies bestätigt: Mit einem Spaltblenden-Strahlprofilmessgerät konnten die Beteiligten entlang der Strahlkaustik keinen signifikanten Unterschied im radialen Intensitätsverlauf feststellen.

Als zusätzlich problematisch hat sich herausgestellt, dass der Diodenlaser aufgrund der relativ schlechten Strahlqualität nur in einer Glasfaser mit einem Kerndurchmesser von mindestens 200 Mikrometern geführt werden kann. Da aufgrund der geringen Linsenapertur eine sehr kurze Kollimationsbrennweite von nur 11 Millimetern erforderlich ist, kann mit der anschließenden Fokussierung auch nur ein relativ großer Fokusbereich erreicht werden, bei dem Unterschiede in Bearbeitungsprozessen kaum erkennbar sind.

Zur Untersuchung des Verhaltens mit kontinuierlicher Laserstrahlung wurde deshalb auch ein Singlemode-Thulium-Faserlaser eingesetzt, der eine wesentlich bessere Strahlqualität besitzt. Damit sind deutlich größere Gradienten der Leistungsdichte erreichbar. In Materialbearbeitungsprozessen führt das periodische Scannen der Fokusslage entlang der optischen Achse dazu, dass die maximale Leistungsdichte nicht nur in der Fokus-Ruhelage erreicht wird, sondern auch deutlich vor und hinter diesem Punkt. Effektiv wird somit eine Erhöhung der nutzbaren Schärfentiefe in Materialbearbeitungsprozessen erreicht.

Beim Betrieb mit dem Thulium-Faserlaser mit einer Wellenlänge von 1998 Nanometern wurde ein kollimierter Rohstrahl mit einem Strahldurchmesser von 7 Millimetern mit gaußförmiger Intensitätsverteilung eingesetzt, um die thermische Belastung in der Linse so gering wie möglich zu halten. Die Laserstrahlung wurde hinter der Flüssiglinse fokussiert und ebenfalls mit dem Spaltblenden-Strahlprofilmessgerät vermessen. Dabei kam es zu unerwarteten Komplikationen. Das transmittierte Strahlprofil zeigt ursprünglich das erwartete Strahlprofil mit geringem Fokusdurchmesser und sehr hohen Intensitätsgradienten, verschlechtert sich jedoch innerhalb kurzer Zeit massiv. In Abbildung 3 sind Ausschnitte aus einer Videoaufzeichnung des Strahlprofil-Messgeräts dargestellt. Der Strahl mit einem Fokusdurchmesser von zirka 200 Mikrometern weitet sich innerhalb weniger 100 Millisekunden um mehr als das Dreifache auf. Nach wenigen Sekunden ist das Strahlprofil völlig zerstört. Aufgrund der schnellen Änderung ist keine genauere Auswertung der Messungen möglich, sodass nur eine Videoaufzeichnung der Livemessungen vorliegt.

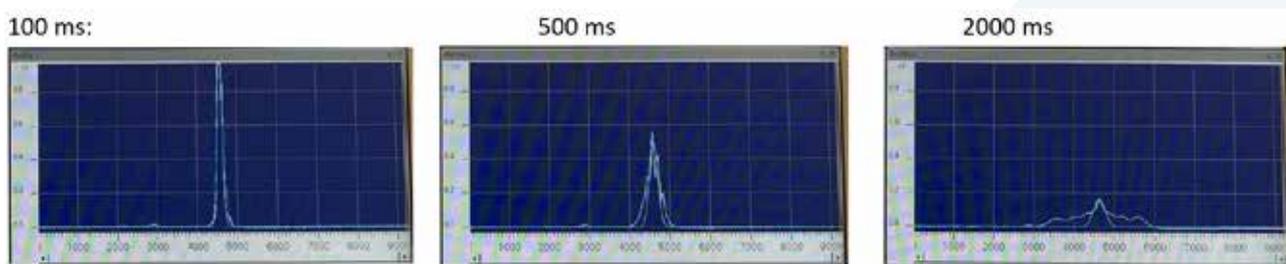


Abbildung 3: Massive Verschlechterung des Laserstrahlprofils des Thulium-Faserlasers; Grafik: Andreas Schkutow

Entgegen der ersten Vermutung handelt es sich bei dem Phänomen allerdings nicht um ein thermisches Problem, das auf eine lokale Verdampfung der Flüssigkeit in der Linse zurückzuführen wäre. Um dieses auszuschließen realisierte das Team einen Versuchsaufbau, bei dem während der Laserbestrahlung über einen dichroitischen Spiegel eine Kamera in den Strahlengang eingekoppelt wird, die das Innere der Linse während der Laserbestrahlung aufzeichnet. Unmittelbar beim Einschalten der Laserstrahlquelle ist dabei die in Abbildung 4 gezeigte Leuchterscheinung innerhalb der Linse zu erkennen.

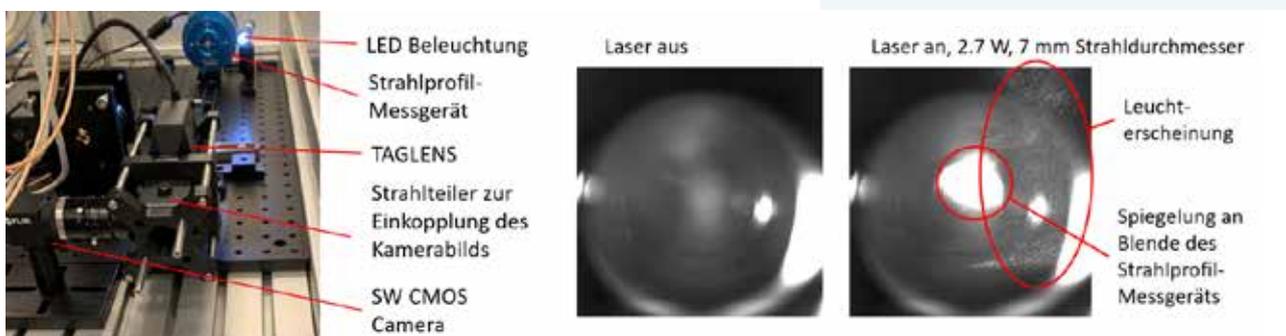


Abbildung 4: Aufbau zur Beobachtung des Inneren der Linse und zugehörige Kamerabilder; Foto und Grafik: Andreas Schkutow

Es scheint sich um eine Art Streuprozess zu handeln, der einen Teil der Laserstrahlung aus der optischen Achse auslenkt und vermutlich zu Mehrfachreflexionen an den Fenstern und Gehäusewänden führt. Noch konnte nicht geklärt werden, wie dieser Effekt entsteht und wie er sich vermeiden lässt. Es laufen aktuell Untersuchungen, ob gegebenenfalls eine Wechselwirkung zwischen verbleibender Pumpstrahlung bei zirka 800 Nanome-

tern und der 1998-Nanometer-Laserstrahlung der Grund für diese Auffälligkeit ist. Dieser Effekt tritt ohne Zeitverzögerung bei allen Laserleistungen auf, wobei die Intensität der Leuchterscheinung erwartungsgemäß mit der Laserleistung skaliert. In Abbildung 5 sind Aufnahmen des Linseninneren bei verschiedenen Ausgangsleistungen dargestellt, wobei im Gegensatz zu den vorigen Aufnahmen keine externe Beleuchtung eingesetzt wird. Bei der erfassten Strahlung handelt es sich deshalb vermutlich um gestreute Reste der Pumpstrahlung des Lasers, da die Kamera für die eigentliche Laserwellenlänge unempfindlich ist.

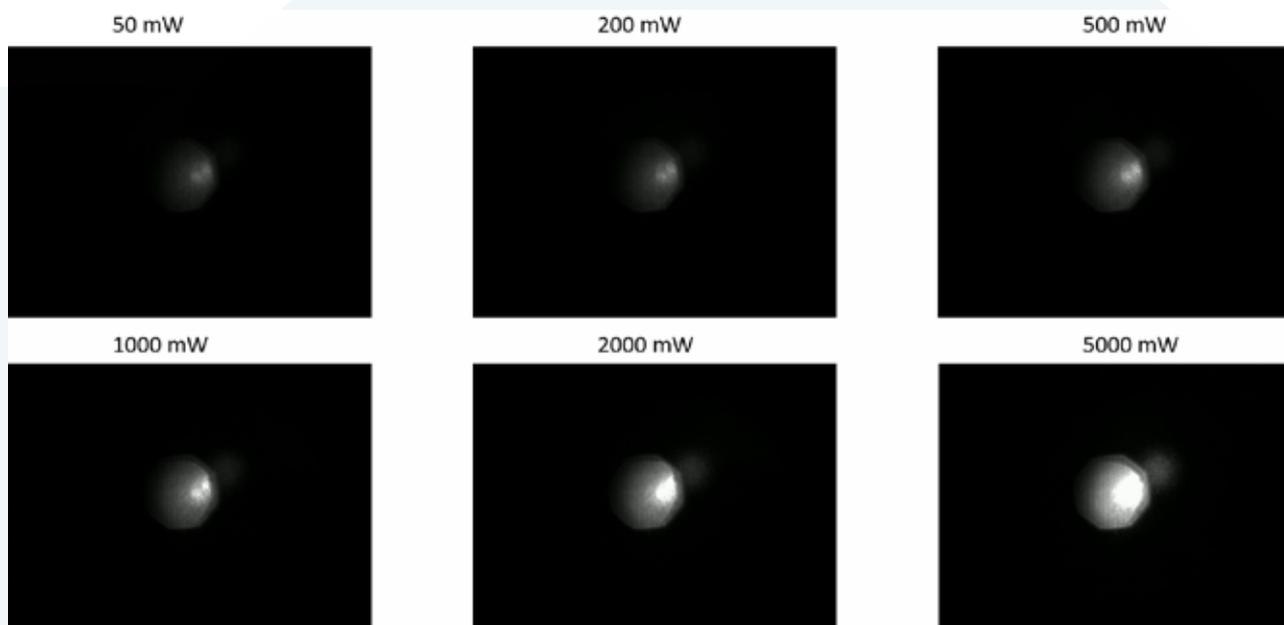


Abbildung 5: Leuchterscheinung innerhalb der TAGLENS in Abhängigkeit der Laserleistung; Grafik: Andreas Schkutow

Unabhängig von diesem Sachverhalt versuchte das Team auch, mit Hilfe der Kamera zu ermitteln, ob die Laserbestrahlung mit 1998 Nanometern zu einer thermisch bedingten Veränderung der optischen Eigenschaften in der Flüssigkeit führt. Dazu wurde die Laserstrahlung ungefähr in die Mitte der Linsenkavität auf einen Durchmesser von rund 100 Mikrometer fokussiert und die Flüssigkeit mit einer mittleren Leistung von 8,0 Watt bestrahlt. In diesem Fall tritt neben der oben beschriebenen Leuchterscheinung keine weitere sofortige Veränderung auf, nach zirka 300 Millisekunden ist aber die in Abbildung 6 dargestellte Veränderung in der Mitte der Linsenkavität erkennbar. Es kommt nicht zu einer Verdampfung der Flüssigkeit, allerdings bildet sich eine spiralförmige Struktur aus, die auf eine temperaturbedingte Brechungsindex-Variation und möglicherweise auch auf eine Konvektionsströmung schließen lässt. Die Tatsache, dass diese Veränderung auch bei sehr stark fokussierter Laserstrahlung erst nach einiger Zeit auftritt, deutet darauf hin, dass trotz der nicht idealen Transmissionseigenschaften ein Betrieb in diesem Wellenlängenbereich bei moderaten Leistungsdichten möglich ist.

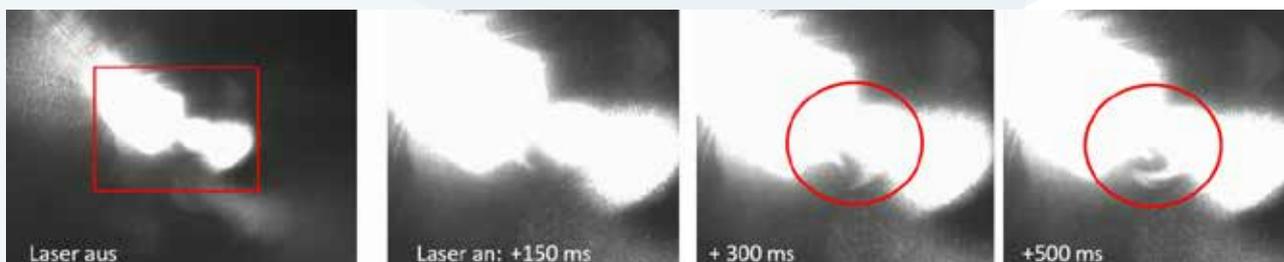


Abbildung 6: Thermisch bedingte Brechungsindex-Änderung bei fokussierter 2-Mikrometer-Strahlung; Grafik: Andreas Schkutow

Anwendung mit zur Betriebsfrequenz synchronisierter Laserstrahlung

Das größte Anwendungspotenzial einer akustisch modulierten Flüssiglense eröffnet sich in Verbindung mit gepulster Laserstrahlung bei einer Synchronisation der Pulsfrequenz der Laserstrahlung mit der Betriebsfrequenz der Linse. In dieser Betriebsart lässt sich durch die Variation der Phasenverschiebung die Fokusslage für jeden Puls individuell bestimmen und so die Leistungsdichte ohne Reduzierung der mittleren Leistung gezielt einstellen. Den Antragsstellern stehen mit dem 980-Nanometer-Diodenlaser und dem 1998-Nanometer-Thulium-Faserlaser aktuell nur Strahlquellen zur Verfügung, die für den kontinuierlichen Betrieb optimiert sind. Trotzdem wurde versucht, durch eine schnelle Modulation der analogen Leistungsvorgabe einen Pulsbetrieb zu realisieren, dessen Pulsfrequenz in der Größenordnung der Linsenbetriebsfrequenzen liegt. Mit dem Diodenlaser gelang das aufgrund der verbauten Ansteuerungselektronik nicht. Der Thuliumlaser besitzt aber eine ungefilterte analoge Schnittstelle, mit der direkt der Diodenstrom der Pumpdioden moduliert werden kann. Mit diesem konnte ein stabiler Pulsbetrieb bei Frequenzen über 100 Kilohertz realisiert werden, indem das Synchronisationssignal der Linse als Trigger-Signal für einen Funktionsgenerator verwendet wurde. Der Funktionsgenerator wird dabei verwendet, um ein Rechtecksignal mit dem gewünschten Spannungsniveau zu erzeugen, mit dem der Laser moduliert werden kann. Es zeigte sich, dass mit Hilfe einer Variation der Pulsdauer und der Rechteckspannung ein stabiles Anschwingen des Faserlasers erreicht werden kann. Abbildung 7 zeigt dazu eine Messung der zeitlichen Variation der Ausgangsleistung des Lasers (gelb), die mit einer Pulsbreite von 2,35 Mikrosekunden des Steuersignals (türkis) erreicht werden kann. Leider entspricht die daraus resultierende Pulsdauer mit rund 1,5 Mikrosekunden etwa einem Viertel der Schwingungsperiode der Linse, sodass auch mit diesem Laser keine scharfe Trennung der Fokusebenen möglich war.

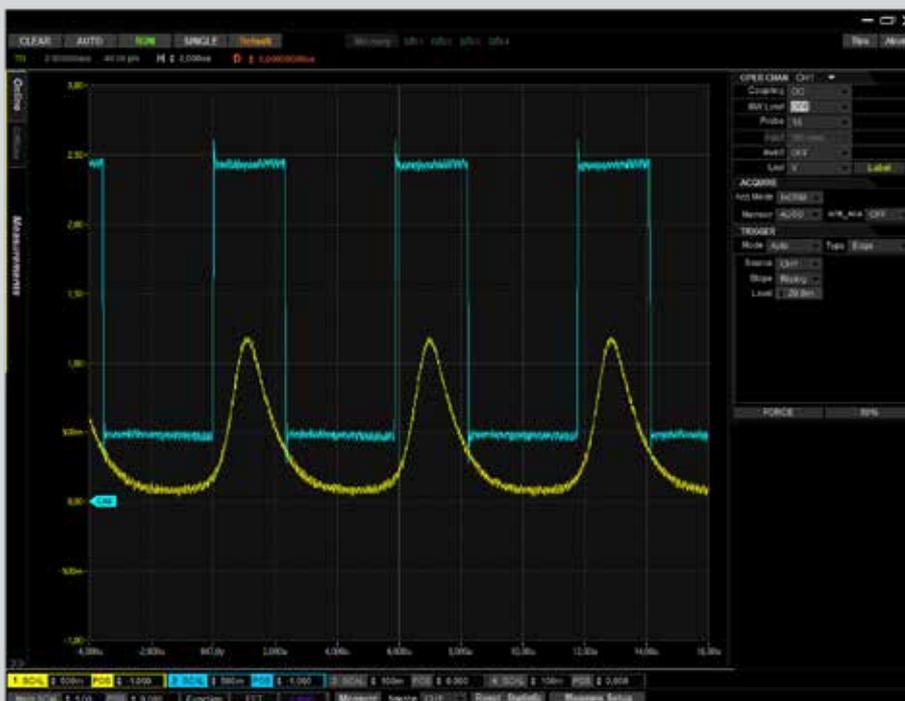


Abbildung 7: Schwingverhalten des Thulium-Faserlasers bei mit der Linsenfrequenz synchronisierter Anregung; Grafik: Andreas Schkutow

Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieses Projekts konnte das Forschungsteam ein neuartiges Werkzeug zur schnellen Strahlformung von Hochleistungs-Laserstrahlung entwickeln. Der Prototyp zeigt im Wellenlängenbereich zwischen 800 und 1900 Nanometern exzellente optische Eigenschaften und kann für eine Vielzahl industriell relevanter Laserstrahlquellen eingesetzt werden. Aufgrund der dafür notwendigen Modifikation der Flüssigkeit musste die Betriebsfrequenz der Linse auf über 100 Kilohertz gesteigert werden, was die nutzbare Apertur, in der das System eine beugungsbegrenzte Abbildungsleistung liefert, auf wenige Millimeter begrenzt.

Das Projekt hat sich insbesondere in Hinblick auf die komplexe Ansteuerung, die aufwendige Charakterisierung und die unerwarteten Schwierigkeiten beim Betrieb mit Laserstrahlung im Wellenlängenbereich um 2 Mikrometer als äußerst herausfordernd dargestellt. Obwohl die technische Qualifizierung erfolgreich abgeschlossen werden konnte, sind zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts noch keine Anwendungsberichte aus realen Bearbeitungsprozessen möglich. Dies liegt zum einen daran, dass die Spezifikationen der zur Verfügung stehenden Strahlquellen nicht ausreichen, um das Potenzial des Linsensystems voll auszuschöpfen. Zum anderen steht uns kein Messgerät zur Verfügung, das in der Lage wäre, die räumliche Leistungsdichteverteilung der Strahlung im Betrieb mit kontinuierlicher Laserstrahlung so schnell zu erfassen, dass die erwartete Erhöhung der Schärfentiefe quantitativ nachgewiesen werden könnte.

Die bisherigen Ergebnisse zeigen aber bereits, dass das größte Anwendungspotenzial für das Linsensystem bei der Anwendung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung mit Pulsdauern von maximal einigen hundert Nanosekunden und hohen Pulsfrequenzen erzielt werden kann. Außerdem ist es besonders für brillante Festkörper- und Faserlasersysteme geeignet, die auch bei relativ kleinen Strahldurchmessern eine sehr gute Abbildungsleistung ermöglichen.

5. Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Das fertiggestellte Linsensystem ermöglicht der Arbeitsgruppe Lasermaterialbearbeitung weit über das aktuelle Projekt hinaus die Untersuchung innovativer Lösungsansätze für verschiedenste Laserprozesse. Das Linsensystem wird auch über das Projektende hinaus weiter eingesetzt.

Zunächst wurde dazu eine Nanosekunden-Festkörper-Laserstrahlquelle beschafft, die aktuell in Betrieb genommen wird. Mit dieser soll das volle Potenzial des Linsensystems im synchronisierten Betriebsmodus demonstriert werden. Die Strahlquelle ermöglicht es, Voruntersuchungen für ein geplantes Anschlussprojekt durchzuführen, in dem die industriell bedeutende Anwendung der Laserbeschriftung untersucht werden soll. Das Linsensystem soll darin zur Beschleunigung der Beschriftungsprozesse von gekrümmten Oberflächen eingesetzt werden, wozu neben der hochfrequenten Fokuslagenverstellung zum Ausgleich von Oberflächenunebenheiten auch die Möglichkeit zur Variation der Laserspot-Durchmesser und damit der Größe der Beschriftungspixel untersucht werden soll. Zu diesem Thema werden aktuell erste Gespräche mit möglichen Partnern aus der Industrie geführt. Eine Antragsstellung ist im Programm ELSYS-Bayern geplant.

Darüber hinaus wurde bereits Mitte 2020 ein Gemeinschaftsantrag im Programm FH-Kooperativ unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. Rainer Engelbrecht von der Fakultät Elektrotechnik, Feinwerktechnik, Informationstechnik eingereicht, in dem die Linse in Verbindung mit einem Femtosekundenlaser zum Schreiben von Faser-Bragg-Gittern in Glasfasern eingesetzt werden soll.

Im November 2020 starteten die Antragsteller das neue ZIM-Projekt „HyLAMP-Hybrides Laserstrahlfügen von Metallen mit Polymeren“ bei dem ein Ytterbium-Faserlaser mit einer Wellenlänge von ungefähr 1070 Nanometern zum Einsatz kommen wird. Diese Strahlquelle ermöglicht dank der höheren Ausgangsleistung zum einen die Ermittlung der thermischen Einsatzgrenzen in diesem industriell besonders wichtigen Wellenlängenbereich. Außerdem besitzt der Laser zum anderen eine wesentlich höhere Strahlqualität als der bisher eingesetzte fasergekoppelte Diodenlaser, sodass die Abbildungsleistung der Linse wesentlich besser ausgeschöpft werden kann. Bei der Produktauswahl wurde dabei auch darauf geachtet, eine besonders schnell modulierbare Strahlquelle zu beschaffen, damit sowohl der kontinuierliche als auch der schnell modulierte Betrieb ermöglicht wird. Auch diese Strahlquelle wird aktuell integriert und in Betrieb genommen und steht in Kürze für erste Experimente zur Verfügung.

Die Antragsteller stehen nach wie vor in engem Kontakt mit den Projektbeteiligten der Firmen Mitutoyo und Microencoder. Diese planen, die modifizierte und weiter optimierte Linse als „TAGLENS-HP“ für High-Power-Anwendungen auf den Markt zu bringen. Die bisherigen Erfahrungen und die Einblicke in die Funktionsweise ver-

schaffen der TH Nürnberg in diesem Bereich einen wertvollen Wissensvorsprung, sodass wir damit rechnen, als attraktiver Projektpartner für neue industrielle Anwendungen Industrieprojekte akquirieren und regionale Unternehmen bei der Anwendung dieser attraktiven Technologie unterstützen zu können.

Wissenschaftliche Publikationen konnten aufgrund der beschriebenen Schwierigkeiten im Rahmen des aktuellen Projekts noch nicht erarbeitet werden, die Publikation der Ergebnisse ist für das Jahr 2021 voraussichtlich im Rahmen des „22nd International Symposium on Laser Precision Microfabrication“ geplant.

6. Literatur

- [1] F. M. Dickey, S. C. Holswade, and D. L. Shealy, *Laser Beam Shaping Applications* (CRC Press, 2005).
- [2] Duerr, F., & Thienpont, H. (2014). Refractive laser beam shaping by means of a functional differential equation based design approach. *Optics express*, 22(7), 8001-8011.
- [3] MÖHL, Anna, et al. Tailored focal beam shaping and its application in laser material processing. *Journal of Laser Applications*, 2019, 31. Jg., Nr. 4, S. 042019
- [4] Beck, R. J., Parry, J. P., MacPherson, W. N., Waddie, A., Weston, N. J., Shephard, J. D., & Hand, D. P. (2010). Application of cooled spatial light modulator for high power nanosecond laser micromachining. *Optics express*, 18(16), 17059-17065.
- [5] Craig B. Arnold and Euan McLeod, A New Approach to Adaptive Optics for Materials Processing, *Photonics Spectra*, 11, 2007
- [6] Homburg, O., and T. Mitra. „Gaussian-to-top-hat beam shaping: an overview of parameters, methods, and applications.“ *Laser Resonators, Microresonators, and Beam Control XIV*. Vol. 8236. International Society for Optics and Photonics, 2012.
- [7] METELKOVA, Jitka, et al. On the influence of laser defocusing in Selective Laser Melting of 316L. *Additive Manufacturing*, 2018, 23. Jg., S. 161-169.
- [8] Yang, Xiaoquan, et al. „Fast axialscanning photoacoustic microscopy using tunable acoustic gradient lens.“ *Optics Express* 25.7 (2017): 7349-7357.
- [9] Piazza, Simonluca, et al. „Enhanced volumetric imaging in 2-photon microscopy via acoustic lens beam shaping.“ *Journal of biophotonics* 11.2 (2018): e201700050.
- [10] Theriault, C., J. Guttenfelder, and Craig B. Arnold. „TAG lens: revolutionizing optical microscopy with ultra-high speed variable focus.“ *Microscopy and Microanalysis* 20.S3 (2014): 1092-1093.
- [11] Produktdatenblatt Mitutoyo Taglens, verfügbar unter: [https://shop.mitutoyo.de/pim/upload/mitutoyoData/leafLet/base/pre1498\(2\)_taglens_web.pdf](https://shop.mitutoyo.de/pim/upload/mitutoyoData/leafLet/base/pre1498(2)_taglens_web.pdf)
- [12] Koyama, Daisuke, Ryoichi Isago, and Kentaro Nakamura. „Compact, high-speed variable-focus liquid lens using acoustic radiation force.“ *Optics express* 18.24 (2010): 25158-25169.
- [13] Guided Wave. (2019, October 17). An Introduction to Online NIR Water Measurements in Liquid Samples. AZoM. Retrieved on November 27, 2020 from <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=17511>.
- [14] Pemberger, Nadin & Bittner, Lukas & Huck, Christian. (2015). Using Near-Infrared Spectroscopy to Monitor the Curing Reaction of Silicone Adhesives. *Spectroscopy*. 30. 8.









Digital Empathy im User Experience
Research – Entwicklung einer integrierten
Affective-Computing-Messmethode zur
digitalen Aufmerksamkeits- und
Emotionsforschung

Prof. Dr. Alexander Hahn
Fakultät Betriebswirtschaft
TH Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Zielsetzung dieses Projekts sind eine Machbarkeitsstudie und Vorarbeiten für eine integrierte Affective-Computing-Messmethode zur **digitalen Aufmerksamkeits- und Emotionsforschung**. Diese soll aus einer Kombination von Eye Tracking und Facial Coding bestehen. Diese Lösung ist aus zwei Gründen innovativ: Zunächst berücksichtigt sie aktuellste neurowissenschaftliche Erkenntnisse über die Interaktion zwischen Aufmerksamkeit und Emotion bei der Nutzung (digitaler) Produkte. Zudem transferiert sie die Methoden des Affective Computing in das Anwendungsfeld User Experience [UX] Research. Hier besteht eine sehr große Lücke in der anwendungsorientierten Forschung für Industrien wie zum Beispiel in den Bereichen digitale Medien, Kommunikation oder Mobilität.

1. Projektdaten

Fördersumme	30.100 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2020
Fakultät	Betriebswirtschaft
Projektleitung	Prof. Dr. Alexander Hahn
Kontaktdaten	alexander.hahn@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Affective Computing zielt auf automatisierte, echtzeitbasierte **Messung** und **Erkennung** von **Emotionen** durch Sensoren und lernende Algorithmen ab, um darauf angepasste Reaktionen in der Mensch-Computer-Interaktion zu ermöglichen (Picard, 2015). Affective Computing unterstützt digitale Marktforschung, um Nutzeremotionen kostengünstig, schnell, zuverlässig, valide und skalierbar zu erfassen (Hahn und Bartl, 2019). Ziel ist, User Experience [UX] durch **Digital Empathy** zu verbessern, indem Computer auf die **kognitiven** und **emotionalen Zustände** und **Bedürfnisse** der Nutzerinnen und Nutzer eingehen (Bartl, 2018). UX stellt in vielen Industrien einen zentralen Wettbewerbsvorteil dar (Sheppard et al., 2018). Valide, reliable und objektive Messungen und Interpretationen der kognitiven UX, zum Beispiel mittels Verhaltens- und Befragungsdaten, sind bereits etabliert. Im Gegensatz dazu wird emotionale UX vor allem über Befragungsdaten wie Interviews oder Fragebögen erhoben, die, bezogen auf Emotionen, systematisch verzerrt sind (Biemer et al., 2011). Reine Beobachtungs- und Verhaltensdaten können die oft subjektiven und impliziten Emotionen und Stimmungen nicht valide messen. Emotional angepasstes – empathisches – UX-Design sowie dessen reliable und valide Messung werden aufgrund des digitalen und internationalen Wettbewerbsdrucks allerdings immer wichtiger (Sheppard et al., 2018). Digital Empathy fokussiert sich schließlich auf emotional angepasste und optimierte Mensch-Computer-Interaktionen (Hahn, Klug und Riedmüller, 2020).

In der digitalen Marktforschung nehmen Conversion Rate Optimization und UX Research folglich immer mehr Raum ein. Dabei geht es oft um drei zentrale Fragen:

- Was machen die Nutzerinnen und Nutzer mit meinem (digitalen) Produkt?
- Wie bedienen die Nutzerinnen und Nutzer mein (digitales) Produkt beziehungsweise wie kaufen sie es?
- Warum finden die Nutzerinnen und Nutzer mein Produkt gut, mögen es, lieben es ... oder auch nicht?

Während zum Beispiel Log-File-Analysen die beiden ersten Fragen skalierbar und valide beantworten können, ist die Erforschung des **Warum** oft mit **individuell** und **subjektiv wahrgenommenen Nutzeremotionen** verbunden. Dies unterscheidet die reine Usability (funktionale Produktbeurteilung) von der User Experience (holistisch emotionale Produktbeurteilung).

Im Moment werden Emotionen, Einstellungen und Motive oft mittels (UX-)Nutzerinterviews und standardisierten oder selbstentwickelten Befragungen erfasst (Pettersson et al., 2018). Zur Erfassung kognitiver Einstellungen und Motivationen eignen sich solche Methoden. Bei Emotionen sind sie aber systematisch verzerrt, unter anderem durch Interviewer-Bias oder sozial erwünschtem Antwortverhalten. Nun stellt sich die Frage, wie man emotionale Reaktionen der Nutzerinnen und Nutzer zuverlässig und valide messen kann – idealerweise skalierbar, mit reduzierten Kosten und hoher Geschwindigkeit?

3. Ziele des Forschungsprojekts

Diese Vorlaufforschung etablierte auf **Basis erster Machbarkeitsstudien** (Hahn und Bartl, 2019) Vorarbeiten, um derzeitige Messmethoden des Affective Computing wie Eye Tracking, Herzratenmessung und Facial Coding zu integrieren. Dabei lag ein besonderes Augenmerk auf der **Integration von Aufmerksamkeits- und Emotionsforschung**, die oft isoliert betrachtet werden (Hahn und Maier, 2018). Grundlegende Erkenntnisse der Neurowissenschaften zeigen allerdings, dass **großflächige Hirnnetzwerke** wie Executive Neural Network, Salience Network und Default Mode Network bei der Nutzung digitaler Produkte in steter und kurzfristiger Wechselwirkung stehen, um emotionale und kognitive Reize aufzunehmen, zu verarbeiten und darauf zu reagieren (Parsons, 2017).

Im Gegensatz zu Grundlagenforschung mit bildgebenden Verfahren (Elektroenzephalografie (EEG), funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT)) war die **Anwendungsorientierung** ein zentrales Prinzip dieses Projekts. Die Lösung wurde durch eine **prototypische Verknüpfung** im Eye-Tracking-Labor der Fakultät Betriebswirtschaft (BW) nutzbar gemacht. Die Daten basieren dabei auf der **Affective-Computing-Lösung des KMU/Startups Tawny GmbH** sowie **Wearables** der Firma empatica und der bestehenden Hardware des **Eye-Tracking-Labors der Fakultät Betriebswirtschaft (BW)** (zweimal Tobii T60, stationär und Laptop, zweimal Tobii X3 120, einmal Tobii glasses inklusive Infrarot-Marker). Eine zentrale Herausforderung lag in der Synchronisation der komplexen und großen Datenmengen und ihrer automatisierten Auswertung.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden 111 Probandinnen und Probanden in einem Experiment beteiligt. Die Probandinnen und Probanden sahen sequenziell experimentell manipulierte Videosequenzen. Vorab und nachfolgend füllten sie einen Screening- und einen Abschlussfragebogen aus, um soziodemographische, Einstellungs- und Motivationsvariablen zu erheben. Während der gesamten Versuchsdauer wurden über **Eye Tracking** das **Blickverhalten** sowie **Stimmung, Emotionen und Herzrate** durch **Facial Coding** gemessen. Das Forschungsteam exportierte die Daten aus den Befragungs-, Eye-Tracking- und Facial-Coding-Tools, integrierte diese mittels der Statistiksoftware R und wertete sie aus. Abbildung 1 zeigt das Projektvorgehen im Zeitablauf. Aufgrund der Corona-Krise musste die geplante Konferenz zu Emotion AI abgesagt werden.



Abbildung 1: Projektvorgehen; Grafik: Alexander Hahn

Die Abbildung 2 stellt die zentralen konzeptionellen Ergebnisse der Studie dar. Die empirischen Ergebnisse zeigen, dass die **Emotionsanalyse durch Eye Tracking eindeutig bereichert** wird, weil es ermöglicht, zu erkennen, **welcher visuelle Stimulus** eine bestimmte **Emotion** oder Stimmungsreaktion ausgelöst hat. Zeigen Anwenderinnen und Anwender in einer Studie ähnliche emotionale Reaktionen, lassen sich bestimmte Emotionspitzen leicht auf den sequenziellen Fluss der Stimuli zurückführen. Im Falle von Nutzergruppen, die unterschiedliche emotionale Reaktionen zeigen, erlaubt ein ergänzendes Eye Tracking den Einblick, ob diese Gruppen ihre Aufmerksamkeit im Zeitverlauf auf verschiedene Stimuli richten. Im Rahmen der Studie zeigten sich des Weiteren auf Basis einer Clusteranalyse klar unterschiedliche Verhaltensweisen: Die Befragungsdaten zu dem persönlichen Interesse an den gezeigten Videoinhalten belegen drei unterschiedliche Gruppen von Probandinnen und Probanden, die sich je nach Content Involvement (niedrig/mittel/hoch) unterscheiden. Dieses Ergebnis wirft neue Forschungsfragen nach einer impliziten oder expliziten Messung des Content/Produkt Involvement im Bereich User Experience Research auf.

Die Emotionsanalyse bereichert somit die Aufmerksamkeitserfassung und gibt gleichzeitig Einblicke in eine tiefergehende Schicht von aufmerksamkeitsinduzierenden Stimuli. Die Fixierung auf ein visuelles Element bedeutet nicht notwendigerweise, dass die Betrachterin oder der Betrachter das dargestellte visuelle Element positiv bewertet. Vielmehr kann der Inhalt als verwirrend empfunden oder mit der Erinnerung an frühere – auch negative – Erfahrungen in Verbindung gebracht werden.

Für die Durchführung der gemeinsamen Messung von Aufmerksamkeit und Emotionen ist die **Kombination aus stationären Eye Trackern und Facial Coding** praktikabel. Bei vielen Eye-Tracking-Systemen wird das Gesicht der beobachteten Probandin beziehungsweise des Probanden über eine zugeschaltete Webcam automatisch mitaufgezeichnet. Für die Möglichkeit, dieses Gesicht anschließend analysieren zu können, muss die explizite Zustimmung der Probandin beziehungsweise des Probanden schriftlich vorliegen und zudem bei der Aufzeichnung auf einen neutralen Hintergrund des aufgenommenen Gesichts geachtet werden. Über den Zeitstempel der beiden Aufnahmen lassen sich die **Ergebnisse** der visuellen Fixationsverläufe und der emotionalen Kurvendigramme **zueinander in Beziehung** setzen (vgl. Abbildung 2). Dabei müssen Zeitverzögerungen bei der emotionalen Reaktion auf visuelle Reize ermittelt und berücksichtigt werden (Mariooryard und Busso, 2015).

Für die Auswertung der erhobenen Ergebnisse bieten sich zwei Vorgehensweisen an: Die Outside-In- und die Inside-Out-Analyse. Bei einer **Outside-In-Analyse** werden zunächst die Eye-Tracking-Daten analysiert und bei Besonderheiten in den etablierten Performance-Werten („Time-to-first-fix“ (TTFF), „Time-to-collision“ (TTC) etc.) die Ausschläge der Stimmung oder diskrete Emotionen hinzugezogen. Diese Herangehensweise entschlüsselt die empathische Interaktion von Nutzerinnen und Nutzern mit der Bildschirmoberfläche über deren visuellen Eindruck und postuliert, dass die Schönheit im Auge des Betrachters liegt.

Eine **Inside-Out-Analyse** konzentriert sich hingegen auf die emotionalen Spannungskurven der Nutzerinnen und Nutzer. Beim Überschreiten von positiven Schwellenwerten kann über das Hinzuziehen der Fixationsbe-

reiche der Auslöser für die jeweilige Stimmung analysiert werden. Die Herausforderung bei diesem Ansatz liegt dabei in den – im Vergleich zum Eye Tracking – noch nicht ausreichend etablierten und vergleichbaren Kennzahlen-Standards für emotionale UX.

Über wiederholte, kombinierte Aufmerksamkeits- und Emotionsmessungen lassen sich mit der Zeit Muster über das Zusammenspiel der jeweiligen Key Performance Indicators (KPI-Werte) erkennen. Im nächsten Schritt gilt es, über Künstliche-Intelligenz-gestützte Systeme die identifizierten Muster zu klassifizieren und damit die Einkodierung digitaler Empathie voranzubringen (Hahn, Klug und Riedmüller, 2020) .

Ein geplanter Test **physisch-digitaler Messungen zum Thema autonomes Fahren** in Kooperation mit Technologie (Prof. Dr.-Ing. Alexander von Hoffmann, Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik (efi)), Gestaltung (Prof. Yves Ebnöther, Fakultät Design) und Interaktion (Prof. Markus Kaiser, Fakultät Angewandte Mathematik, Physik und Allgemeinwissenschaften (AMP)) durch Automobilprototypen („Sitzkisten“) konnte aufgrund der Corona-Krise nur im Rahmen einer Feasibility Studie durchgeführt werden (Wolny, 2020).

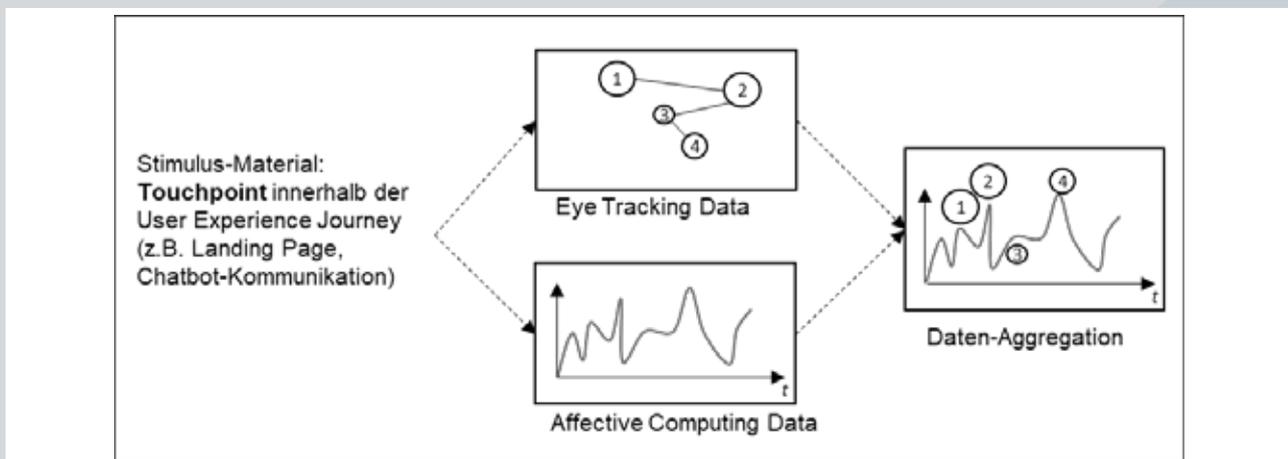


Abbildung 2: Kombination von Eye Tracking und Affective Computing Data; Grafik: Hahn, A., Riedmüller, F., Klug, K., 2020. Empathic Market Research: The added value of Eye Tracking data for Affective Computing UX Research, in: AfM: Arbeitsgemeinschaft für Marketing – PraxisWISSEN, im Erscheinen.

Auf Basis dieser Vorlauftforschung arbeitete das Team ein **Konzept zur automatisierten Implementierung der Ergebnisse** aus, das nun im Rahmen weiterer Forschungsprojekte prototypisiert und implementiert werden soll (siehe folgende Abbildung).

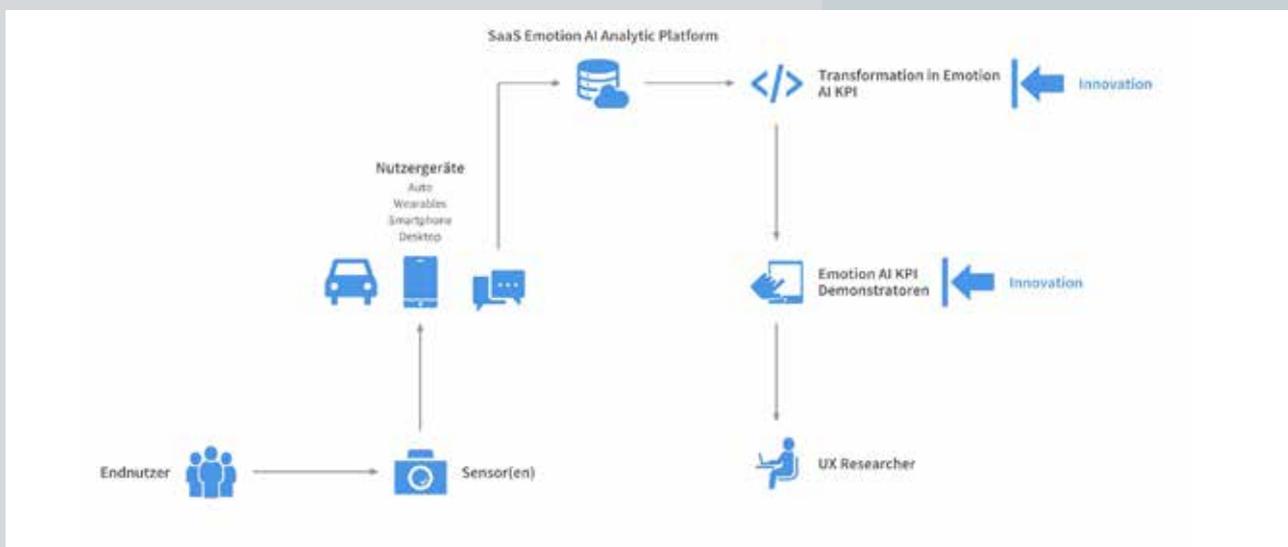


Abbildung 3: Ansatz der Emotion AI KPI; Grafik: Alexander Hahn

Des Weiteren wurden abschließend Bezüge zu **aktuellen strategischen Themen** der TH Nürnberg, der Hightech-Strategie 2025, der Hightech Agenda Bayern von Horizon 2020 sowie des Leitbilds für nachhaltiges Wachstum und Beschäftigung der Metropolregion Nürnberg identifiziert, um die Anschlussfähigkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Bezug zu aktuellen strategischen Themen	
Strategisches Thema	Bezug
Verkehr, Logistik und Mobilität (THN WaBe); Mobilität (HTS2025)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Nutzerinnen- und Nutzeradoption neuer Mobilitätsformen, vor allem autonomes Fahren ■ Mediennutzung im autonomen Auto
Innovative Dienstleistungen (THN); Digitalisierung, Industrie und Weltraum (H2020)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Nutzerinnen- und Nutzerzentrierte Gestaltung der UX innovativer Dienstleistungen ■ Adoption und Diffusion innovativer Dienstleistungen auf Basis optimierter UX
Gesundheit (THN H2020 WaBe HTS2025)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Nutzerinnen- und Nutzerzentrierte Gestaltung der UX von Digital-Health-Lösungen, insbesondere Mobile Health
Medien und Kommunikation (THN WaBe); Kultur, Kreativität und inklusive Gesellschaft (H2020)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Mediennutzung im autonomen Auto ■ Digitale-Medien-Produkte ■ Medienwirkungsmessung
Mittelstandsoffensive (HTBY)	<ul style="list-style-type: none"> ■ Kooperation mit zahlreichen Startups aus Bayern ■ Vernetzung und Stärkung des Cluster UX

THN = Technische Hochschule Nürnberg, HTS2025 = Hightech-Strategie 2025, HTBY = Hightech Agenda Bayern, H2020 = Horizon 2020, WaBe = Leitbild für nachhaltiges Wachstum und Beschäftigung der Metropolregion Nürnberg

5. Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Die **nachhaltige Verwertung** erfolgte durch wissenschaftliche Veröffentlichungen sowie anwendungsorientierte Forschung.

Die folgenden **Publikationen** wurden im Jahr 2020 eingereicht und werden veröffentlicht. Weitere Veröffentlichungen sind derzeit in Bearbeitung:

Hahn, A., Riedmüller, F., Klug, K., 2020. Empathic Market Research: The added value of Eye Tracking data for Affective Computing UX Research, in: AfM: Arbeitsgemeinschaft für Marketing – PraxisWISSEN, im Erscheinen.

Hahn, A., Klug, K., Riedmüller, F., 2020. Digital Empathy: Kombinierte Erfassung über Affective Computing und Eye Tracking, DIGITALE WELT Blog, Wissenschaftlicher Fachbeitrag, abgerufen unter URL: [<https://digitalewelt-magazin.de/2020/05/01/digital-empathy-kombinierte-erfassung-ueber-affective-computing-und-eye-tracking/>], Abfrage v. 04.05.2020.

Die folgenden **Förderanträge** wurden auf Basis der Ergebnisse der Vorlauforschung gestellt beziehungsweise bewilligt.

Status	Förderlinie/Auftraggeber	Projekttitel	Partner
Antrag gestellt	FH-Kooperativ	Digital Empathy: Entwicklung und Triangulation von Key-Performance-Indikatoren zur Messung affektiver User Experience durch emotionale künstliche Intelligenz	OMMAX GmbH Tawny GmbH Psyma Research + Consulting GmbH Zollhof Betreiber Gesellschaft GmbH
Antrag gestellt	Staedtler-Stiftung	Emotion Artificial Intelligence, Data Privacy und Blockchain – nutzerzentrierte, empirische Entwicklung regulatorischer, anbieter- und anwenderbezogener Empfehlungen	-
Antrag bewilligt	LEONARDO – Zentrum für Kreativität und Innovation	Emotion AI – Ist der mitleidigste Computer der beste Computer?	Prof. Dr.-Ing. Alexander von Hoffmann (efi) Prof. Markus Kaiser (AMP) Prof. Dr. Christina Zitzmann (Design)

Tabelle 1: Gestellte und bewilligte Förderanträge

Des Weiteren ist die Vorlaufforschung im Rahmen der folgenden **wissenschaftlichen (Abschluss-)Arbeiten integriert**:

Arbeit	Beschreibung
Kooperative Promotion	Seit 2020: Kooperative Promotion des Doktoranden Tobias Ahnfeld: „Digital Empathy – Konzeptualisierung und Implementierung integrierter Messmethoden“, zusammen mit der Universität Passau , Prof. Dr. Dirk Totzek
Masterarbeit	Wolny, F. (2020): „Triangulation of UX Research Methods: Eye Tracking, Affective Computing and Survey Research – An Exploratory Research Project Focusing on Media Content Usage in Self-Driving Cars“, Master Thesis, TH Nürnberg, Fakultät BW.
Bachelorarbeiten	Gareis, M.-L. (2020): „Digital Empathy: Measurement of Emotions“, Bachelor Thesis, TH Nürnberg, Fakultät BW. Schmidt, D. (2020): „Measurement of moods“, Bachelor Thesis, TH Nürnberg, Fakultät BW.

Tabelle 2: Wissenschaftliche Arbeiten

6. Danksagung und Limitationen

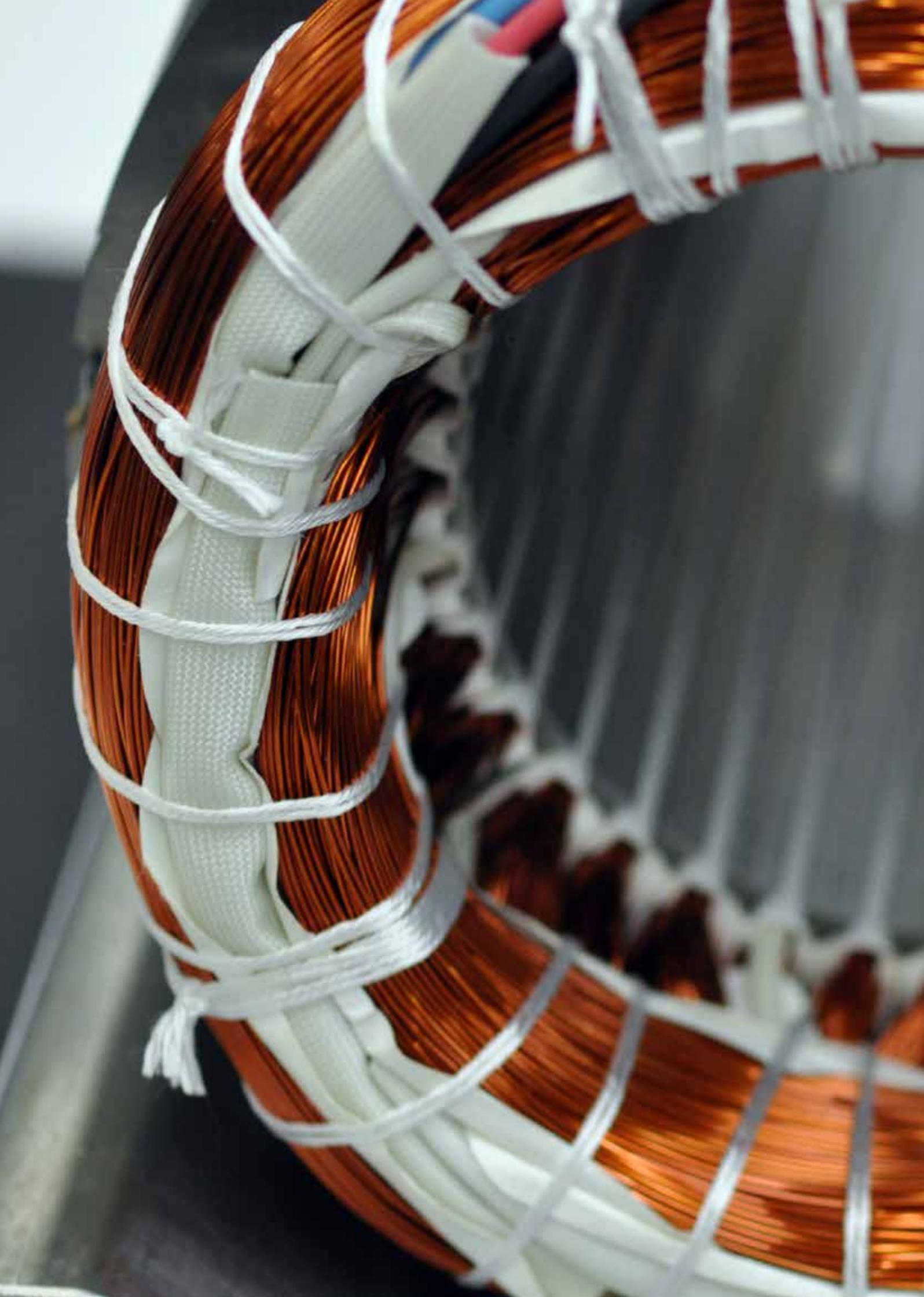
Wir möchten der **TH Nürnberg** für die finanzielle Förderung des Projekts danken.

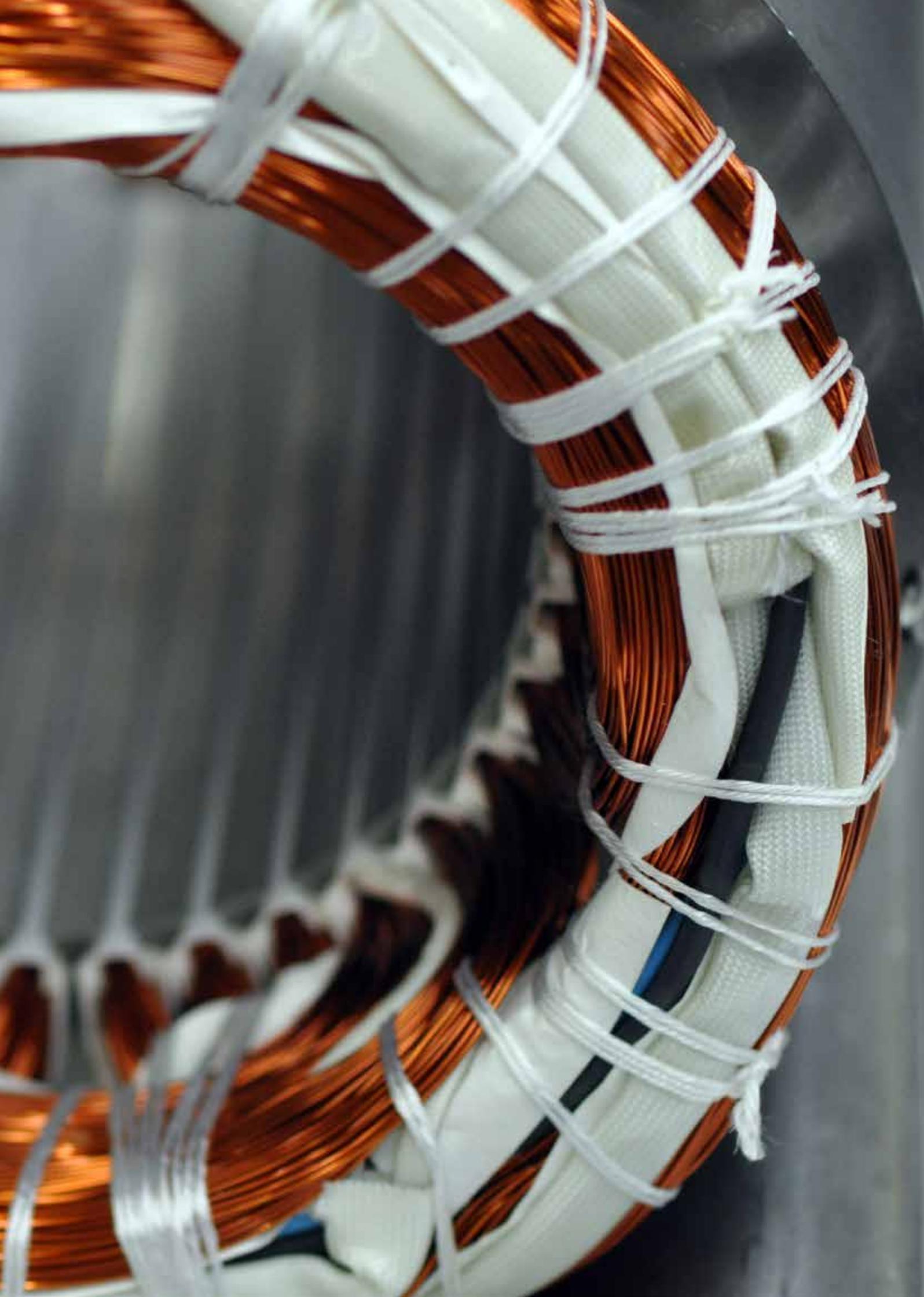
Zudem gilt unser Dank den **Kolleginnen und Kollegen** und **wissenschaftlichen Hilfskräften**, die durch ihre intensive und motivierte Unterstützung die Durchführung des Projekts trotz der Herausforderungen durch die Corona-Krise ermöglicht haben. Ebenso möchten wir den **Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Zentralstelle für Wissens- und Technologietransfer** der TH Nürnberg danken, die durch ihre Flexibilität und Hilfsbereitschaft zum Gelingen des Projekts beigetragen haben. Des Weiteren möchten wir der **Fakultät BW** danken, die durch ihre lösungsorientierte Herangehensweise die Durchführung des Projekts maßgeblich positiv beeinflusst hat. Ebenso möchten wir den **involvierten Firmen und deren Vertreterinnen und Vertretern** danken, die im Rahmen der Vorlaufforschung kooperiert haben.

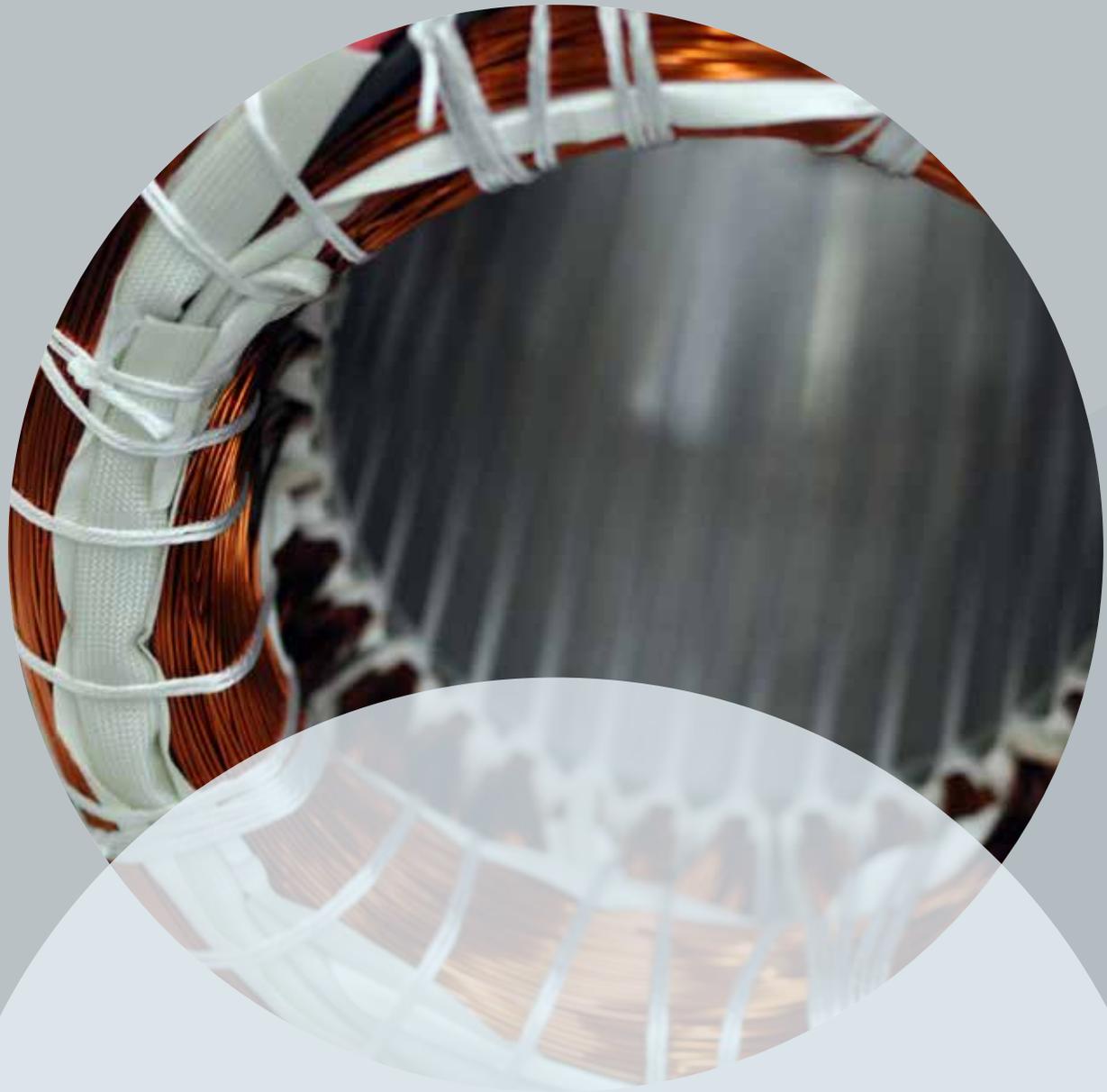
Das Projekt unterlag mehreren **Limitationen**. Zunächst konnte das Forschungsteam die Laboreinrichtungen für geraume Zeit aufgrund der Sicherheits- und Hygienevorschriften nicht nutzen, was die Stichprobengröße negativ beeinflusste. Des Weiteren konnte die experimentelle Studie mittels der „Sitzkiste“ nur als Machbarkeitsstudie umgesetzt werden, da auch hier kein praktikables Vorgehen im Rahmen der Corona-Krise möglich war. Aufgrund der anhaltenden Situation konnte aber das Forschungsdesign adaptiert und weiter digitalisiert werden.

7. Literatur

- Bartl, M., 2018, Automatisierung: Emotionale Bindung, in: CDO Insight im Digital Business, 06/17, o.S.
- Biemer, P., Groves, R., Lyberg, L., Mathiowetz, N. and Sudman, S., 2011, Measurement Errors in Surveys. New York: Wiley.
- Hahn, A., Maier, M., 2018, Affective Computing - Potenziale für empathisches digitales Marketing, Marketing Review St. Gallen, 4, p. 52-65.
- Hahn, A., Bartl, M., 2019, Wie Affective Computing kostengünstig, schnell, zuverlässig, valide und skalierbar Nutzer-Emotionen messen kann, um empathische Marktforschung anzureichern, in BVM Berufsverband Deutscher Markt- und Sozialforscher e.V.: 54. Kongress der Deutschen Marktforschung 2019 – Kluge Lösungen für den wirtschaftlichen Erfolg: Neue, agile und integrierte Ansätze.
- Hahn, A., Klug, K., Bartl, M., 2019, Digital Empathy: wie Künstliche Intelligenz & Affective Computing die Marktforschung verändern, in Pusler, M. (Hrsg.): Dem Konsumenten auf der Spur – Erfolgreiches Marketing durch zeitgemäße Marktforschung, Freiburg im Breisgau, Deutschland: Haufe, o.S.
- Mariooryad, S., Busso, C., 2015, Correcting Time-Continuous Emotional Labels by Modeling the Reaction Lag of Evaluators, IEEE Transactions on Affective Computing, Vol. 6/ Issue: 2, p. 97-108.
- Pettersson, I., Lachner, F., Frison, A.-K., Riener, A. und Butz, A., 2018, A Bermuda Triangle?, in: Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, p. 461, ACM.
- Parsons, Thomas D., 2017, Cyberpsychology and the Brain: The Interaction of Neuroscience and Affective Computing, Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Picard, R., 2015, The Promise of Affective Computing, in: R. Calvo, S. D'Mello, J. Gratch, & A. Kappas, The Oxford Handbook of Affective Computing, Oxford, New York: Oxford University Press.
- Sheppard, B., Sarrazin, H., Kouyoumjian, G., Dore, F., 2018), The Business Value of Design. McKinsey Quarterly, 25.10.2018. Abgerufen am 06.10.2020 von: <https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-design/our-insights/the-business-value-of-design/>
- Wolny, F., 2020, Triangulation of UX Research Methods: Eye Tracking, Affective Computing and Survey Research - An Exploratory Research Project Focusing on Media Content Usage in Self-Driving Cars. Master Thesis, TH Nürnberg, Fakultät BW.







HLSynMa: Entwurf einer Hochleistungs- synchronmaschine für unbemannte Luftfahrzeuge

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Krejtschi
Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik
TH Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Im Rahmen der Vorlauftforschung erstellt das Projektteam ein Berechnungsprogramm zur automatisierten, parametrischen Modellerstellung, Auswertung und Visualisierung der numerischen Ergebnisse von drei- und mehrsträngigen permanentmagneterregten Hochleistungssynchronmaschinen. Um eine einfache Bedienung des Berechnungsprogramms zu ermöglichen, entwickeln die Beteiligten eine graphische Benutzeroberfläche. Mit dieser ist es möglich, neben den Pre- und Post-Processing-Eigenschaften auch die zu untersuchenden Betriebs- und Stützpunkte vorzugeben. Durch die Einbindung einer Materialdatenbank für die weich- und hart-magnetischen Werkstoffe kann das Projektteam die Eisen-, Wirbel-, Hysterese- und Magnetverluste unter Verwendung von Herstellerangaben oder eigens gemessenen Verlustkennlinien – unter Berücksichtigung der Fertigungs- und Schnittkanteneinflüsse – für verschiedene Arbeitspunkte ermitteln und bewerten. Zur Bewertung der charakteristischen Eigenschaften kann der magnetische Fingerabdruck, bestehend aus dem Induktivitäts- und Flusskennfeld, herangezogen werden.

1. Projektdaten

Fördersumme	35.000 Euro
Laufzeit	November 2019 bis Dezember 2020
Fakultät	Maschinenbau und Versorgungstechnik
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Jürgen Krejtschi
Kontaktdaten	juergen.krejtschi@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage und Ziele des Forschungsprojekts

Die permanentmagneterregte Synchronmaschine (PMSM) wird aufgrund ihrer hohen Effizienz, Dynamik, Leistungs- und Drehmomentdichte und geringerem Gewicht im Vergleich zu anderen Maschinenkonzepten wie zum Beispiel der Drehfeld-Asynchronmaschine in verschiedenen Applikationen als Traktions-, Hilfs- und Unterstützungsantrieb oder in der Avionik als elektrischer Flugantrieb eingesetzt. Die verwendete Maschinentopologie (Innen- oder Außenläufer) hängt von den Anforderungen, die an die jeweilige Anwendung gestellt werden, ab. Die beiden Maschinentopologien sind exemplarisch in Abbildung 1 dargestellt.

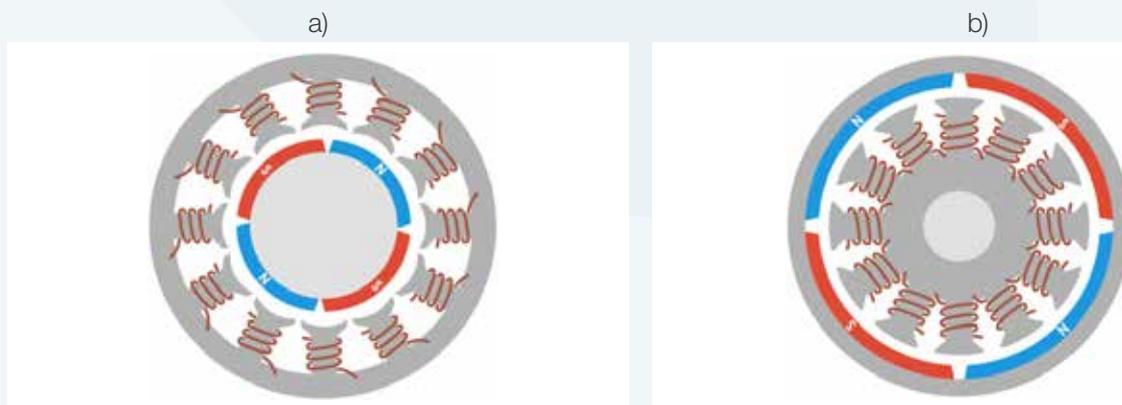


Abbildung 1: (a): PMSM als Innenläufer und (b): PMSM als Außenläufer [1]

Besonders bei avionischen Anwendungen wie zum Beispiel Zustellerdrohen oder „Vertical Take-Off and Landing“ (VTOL), die im urbanen und suburbanen Raum eingesetzt werden, spielen die akustischen Geräuschbelastungen und Vibrationen, die in Kombination mit der elektrischen Maschine und der Luftschraube entstehen, eine besondere Rolle. In Abbildung 2 sind die Schalleistungspegel für verschiedene Drehzahlen dargestellt.

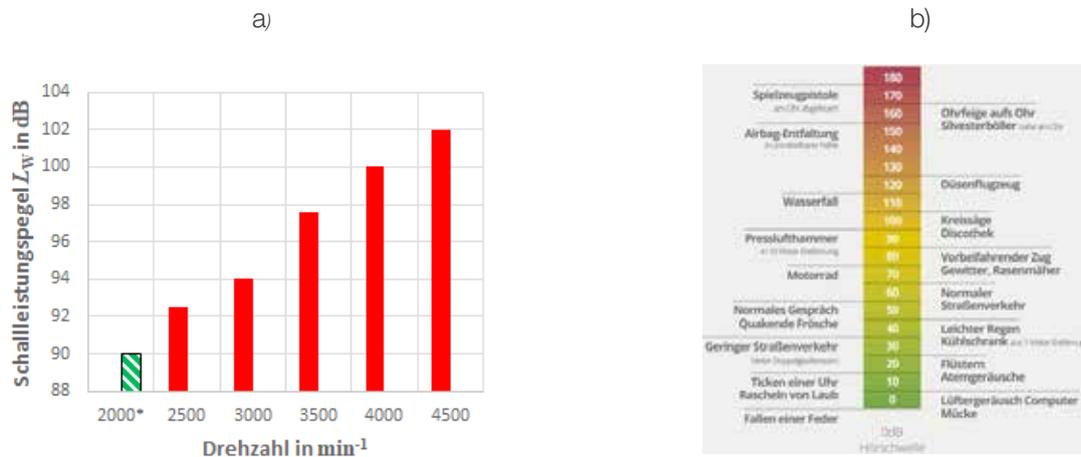


Abbildung 2: (a): Schallleistungspegel einer Messdrohne mit 250 kg Zuladung und mit einem 22 Zoll Propeller in Abhängigkeit der Motordrehzahl [2] und (b): Vergleichslautstärken von verschiedenen Alltagssituationen [3]

Ganz im Gegensatz zum aktuellen Trend der Automobilbranche bis hin zu Hochdrehzahlantrieben, bei denen die Leistung P aus dem Produkt von Drehmoment T und Drehzahl n erzeugt wird, kann dieser Ansatz auf avionische Anwendungen wegen der zu hohen Geräuschentwicklung, die in Abbildung 2 dargestellt ist, nicht übertragen werden. Um die Geräusche zu reduzieren, zielt die Forschung und Entwicklung im Bereich der elektrischen Flugantriebe, die im urbanen und suburbanen Raum eingesetzt werden sollen, auf langsam drehende ($n \leq 2000$ min⁻¹) und drehmomentstarke, elektrische Maschinen in der Außenläufer-Bauweise ab. Die Synchrondrehzahl n kann dabei über die Polpaarzahl p gemäß Gleichung (1) beeinflusst werden [4]. Die Anhebung der Polpaarzahl p hat zur Folge, dass das Drehmoment T gemäß Gleichung (2) entsprechend zunimmt.

$$n = \frac{f_1}{p} \quad (1)$$

$$T = \frac{m}{2} \cdot p \cdot \left((L_d - L_q) \cdot I_d \cdot I_q + \Psi_{PM} \cdot I_q \right) \quad (2)$$

Bei der Ausführung als langsam drehende und drehmomentstarke elektrische Maschine entfällt die Notwendigkeit, ein Getriebe einzusetzen, da die Luftschrauben direkt von der elektrischen Maschine angetrieben werden können. Neben unnötigen Komponenten werden ebenfalls Kosten und Gewicht reduziert.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Die Arbeiten, die im Rahmen der Vorlauforschung durchgeführt werden, zielen auf die Entwicklung eines Berechnungsprogrammes für permanentmagneterregte Synchronmaschinen in der Innen- und Außenläufer-Bauweise ab. Mit diesem soll es möglich sein, für unterschiedliche weich- und hartmagnetische Werkstoffe, Maschinentopologien und Maschinenkonzepte die elektrische Maschine numerisch zu untersuchen und hinsichtlich ihrer charakteristischen Eigenschaften – wie zum Beispiel zeitlicher Verlauf der induzierten Spannung, des Stromes und Drehmoments, Induktivitäts- und Flusskennfelder – und den aus der numerischen Feldrechnung berechneten Größen wie zum Beispiel Eisen-, Wirbel- und Hystereseverluste zu bewerten. Zur Auslegung der elektrischen Maschine soll ein vollautomatisierbares, parametrierbares 2D-Finite-Elemente-Methode-Modell (FEM-Modell) erstellt werden. Aus Berechnungsgründen wird nur die kleinste Symmetrieeinheit betrachtet und die Ergebnisse werden für das Vollpolmodell hochgerechnet. Zur automatischen Modellerstellung wird eine Ansteuerung zwischen den Programmen Mathworks MATLAB und ANSYS Maxwell erstellt. Zum Einlesen der geometrischen Daten des Stators, Rotors und der Materialien definiert das Forschungsteam diese in einem Parametersheet. Dadurch ist es möglich, bereits bestehende Auslegungen einfach nachzurechnen sowie neue Konzepte zu untersuchen. Zur einfacheren Handhabung des Berechnungsprogramms erstellten die Beteiligten eine Benutzeroberfläche (GUI). In dieser kann die Nutzerin beziehungsweise der Nutzer neben dem Betriebspunkt(en) auch verschiedene Pre- und Post-Processing-Einstellungen auswählen. Zur Verifikation der numerischen Ergebnisse wird eine bekannte Maschinenauslegung als Vergleich herangezogen.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Als Ausgangspunkt für die Umsetzung des Forschungsprojekts legt das Team zunächst die Maschinentopologie auf eine permanentmagneterregte Synchronmaschine (PMSM) mit Oberflächenmagneten in der Innenläufer-Bauweise fest. Anhand dieses Maschinentyps werden die entworfenen Funktionen und Auswertungsroutinen getestet, um weitere Maschinentopologien wie die PMSM mit vergrabenen Permanentmagneten zu implementieren. Die Festlegung auf diesen Maschinentyp ermöglicht es, bereits im frühen Entwicklungsstadium die numerischen Ergebnisse aus dem Berechnungsprogramm mit der bekannten Maschinenauslegung zu vergleichen, mit dem Ziel, Programmfehler zu finden und zu beheben. Des Weiteren sollen neben der konventionellen dreisträngigen auch mehrsträngige Synchronmaschinen, die über eine erhöhte Ausfallsicherheit verfügen, vollautomatisiert erstellt werden. In Abbildung 3 sind die Nutenspannungssterne für drei- und mehrsträngige Maschinen dargestellt.

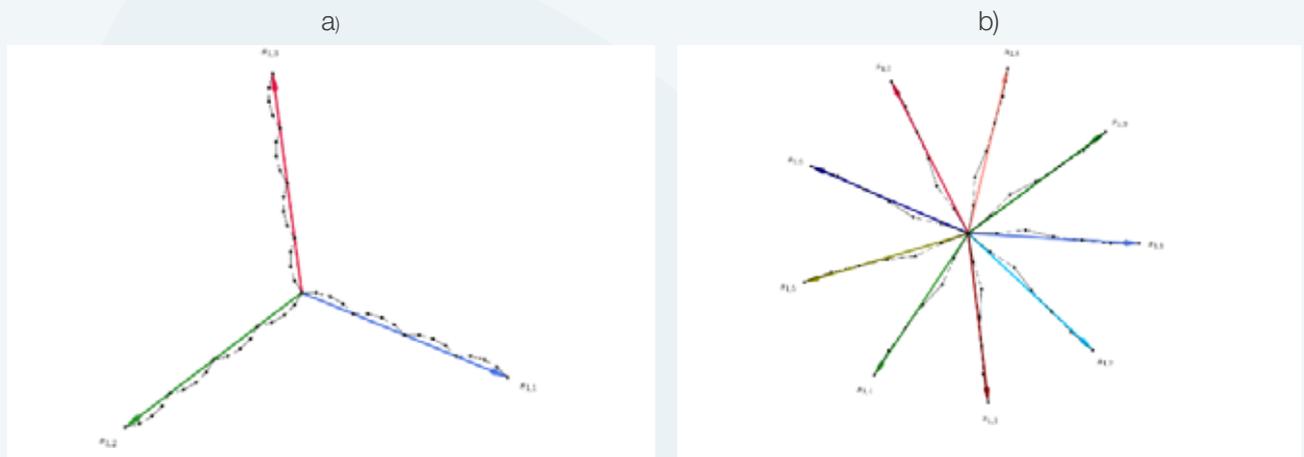


Abbildung 3: Nutenspannungsstern: (a): $m_1=3$ - und (b): $m_1=9$ -phasige elektrische Maschine. Grafik: Jürgen Krejtschi

Durch diese Festlegung ist das Berechnungsprogramm in der Anwendung nicht begrenzt und kann auch für zukünftige Projekt-, Bachelor- und Masterabschlussarbeiten und Forschungsprojekte, die eine Mehrphasenmaschinenauslegung anvisieren, eingesetzt werden. Zudem kann zwischen einer verteilten und konzentrierten Wicklung, wie in Abbildung 4 dargestellt, gewählt werden. Der Wicklungsentwurf wird dabei automatisch erstellt.



Abbildung 4: (a): Verteilte Wicklung, (b): beziehungsweise konzentrierte Wicklung [5]

Bei den weichmagnetischen Materialien kann dabei zwischen den Herstellerangaben und den am Messprüfplatz IMPROVES M des Instituts für leistungselektronische Systeme (ELSYS) aufgenommenen Magnetisierungs- und Verlustkennlinien gewählt werden. Die Verwendung eigener Messergebnisse bietet die Möglichkeit, Effekte wie Schnittkanteneinfluss und Druck-Zug-Belastungen in Elektroblechen und deren Auswirkungen auf die magnetischen Eigenschaften realitätsnah und anwendungsbezogen zu bestimmen und im Vorfeld in die Auslegung einfließen zu lassen. Die Berücksichtigung dieser Bearbeitungseinflüsse ermöglicht eine zuverlässigere Vorausberechnung von Kennfeldern und Eisenverlusten. Ebenfalls sind hartmagnetische Werkstoffe von namhaften Herstellern wie Vacuumschmelze, Bomatec und Eclipse Magnetics in einer Materialdatenbank, die erweitert werden kann, eingepflegt worden.

Automatisierte, parametrische Modellerstellung

Die im weiteren Verlauf vorgestellten Ergebnisse und Erkenntnisse beruhen auf einer zweidimensionalen numerischen Feldrechnung (2D-Finite-Element-Methode). Um eine effiziente und reproduzierbare Auslegung zu gewährleisten, erstellte das Forschungsteam eine automatisierte, parametrische Modellerstellung, die mithilfe einer Benutzeroberfläche (GUI) komfortabel bedient werden kann. Dafür realisierten die Beteiligten eine entsprechende Schnittstelle und Ansteuerung zwischen den Programmen Mathworks MATLAB und ANSYS Max-well. Die benötigten Material-, Geometrie- und Simulationsparameter werden dabei in einem Parametersheet hinterlegt, welches über die Benutzeroberfläche in MATLAB importiert wird. Durch nachgelagerte Funktionen werden die Daten in für ANSYS Maxwell verständliche Strukturen und Datentypen umgewandelt, damit das Modell erstellt werden kann. Die Randbedingungen („Boundary Conditions“) werden dabei in Abhängigkeit der betrachteten Symmetrieeinheit automatisch vergeben. Des Weiteren kann die Nutzerin beziehungsweise der Nutzer über die GUI neben unterschiedlichen automatisierten Berechnungs- und Auswertungsroutinen auch die Pre- und Post-Processing-Einstellungen steuern und auswählen.

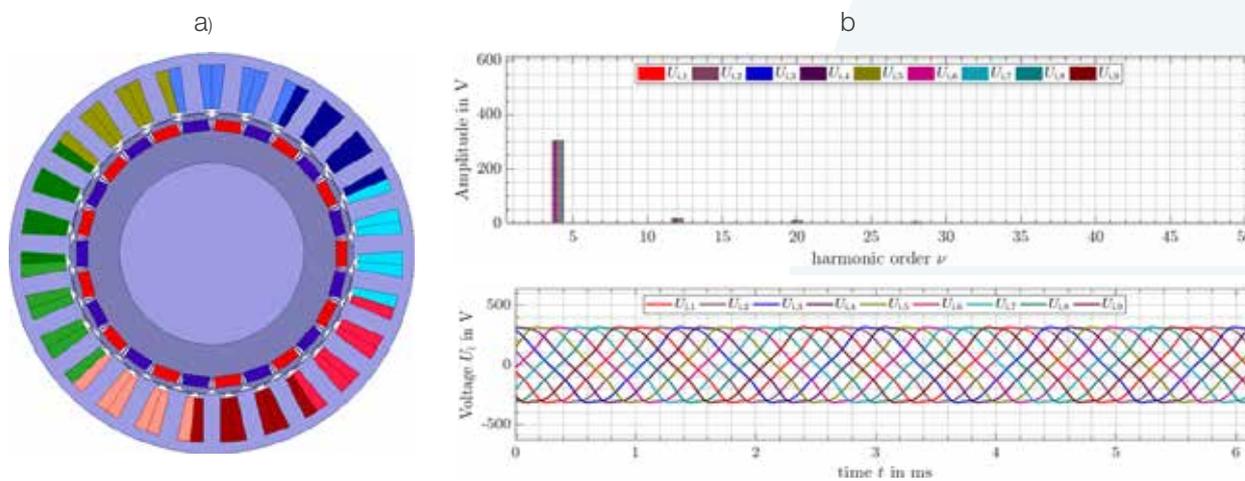


Abbildung 5: (a): numerisches Modell der 9-phasigen Synchronmaschine mit vergrabenen Permanentmagneten und (b): zeitlicher Verlauf und Fourier-Analyse der induzierten Spannung; Grafik: Jürgen Krejtschi

Nach erfolgreicher Modellerstellung wird dieses für die von der Nutzerin beziehungsweise vom Nutzer ausgewählte Berechnungsroutine gelöst und die numerischen gewonnenen Daten werden in MATLAB zurückgelesen, um weitere Größen abzuleiten sowie die Ergebnisse zu visualisieren. In Abbildung 5 ist das numerische Modell für eine 9-phasige elektrische Maschine mit vergrabenen Permanentmagneten und der zeitliche Verlauf der induzierten Spannung dargestellt.

Über das Parametersheet kann dabei zwischen einer Rotorausführung sowohl mit Oberflächenmagneten als auch mit vergrabenen Permanentmagneten, die in Abbildung 6 dargestellt sind, gewählt werden. Durch Veränderung der geometrischen Parameter können noch weitere Rotorkonfigurationen, die nicht dargestellt sind, abgeleitet und erstellt werden.

Oberflächenmagnete

Vergrabene Permanentmagnete

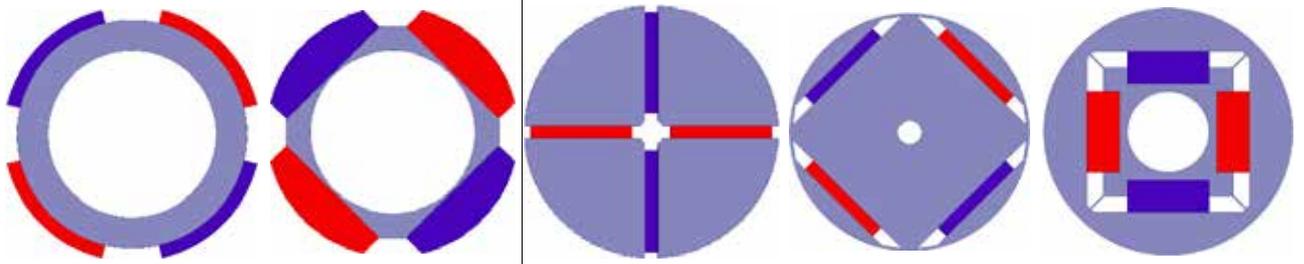


Abbildung 6: Übersicht der Rotorkonfigurationen; Grafik: Jürgen Krejtschi

Des Weiteren kann bei vergrabenen Permanentmagneten über die Methode des „Pole Shapings“ die geometrische Ausführung der Rotorkontur beeinflusst werden, um einen möglichst sinusförmigen Verlauf der magnetischen Flussdichte im Luftspalt zu erhalten, mit dem Ziel, harmonische Oberwellen der Ordnung ν zu reduzieren. Der Einfluss des „Pole Shapings“ auf die geometrische Gestaltung der Rotorkontur ist in Abbildung 7 dargestellt.

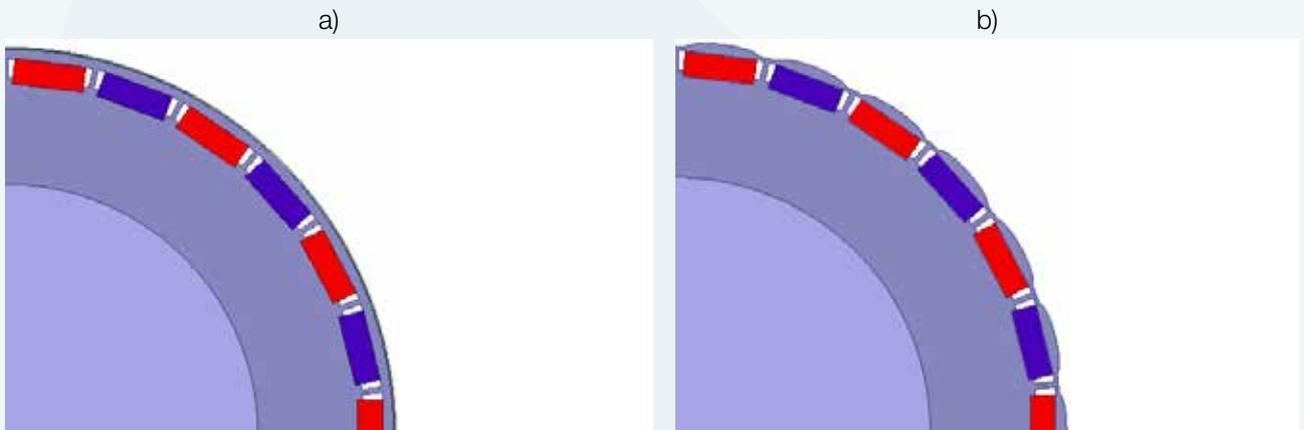


Abbildung 7: (a): ohne „Pole Shaping“ und (b): mit „Pole Shaping“ für identische elektrische Maschine; Grafik: Jürgen Krejtschi

In Abbildung 8 sind die numerischen Ergebnisse der magnetischen Flussdichte inklusive der harmonischen Oberwellen für die in der oberen Abbildung dargestellten Rotorausführungen abgebildet.

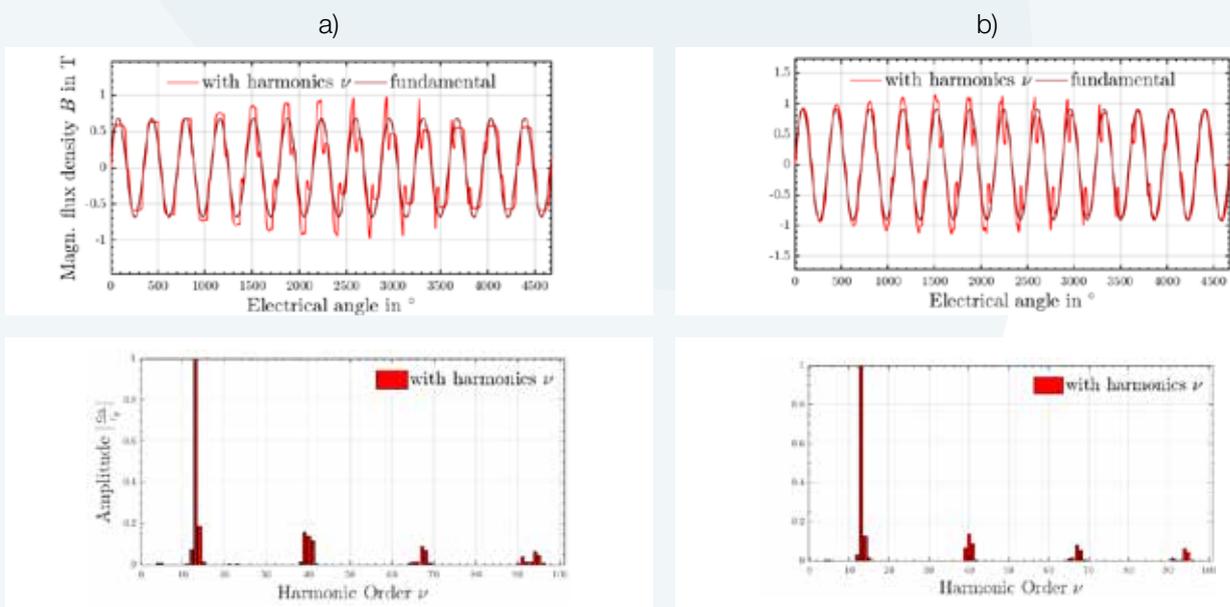


Abbildung 8: Verlauf der magnetischen Flussdichte und der harmonischen Oberwellen im Luftspalt für (a): ohne „Pole Shaping“ und (b): mit „Pole Shaping“; Grafik: Jürgen Krejtschi

Berechnungs- und Auswertungsroutinen

Um die Maschinenauslegungen hinsichtlich der charakteristischen Eigenschaften bewerten zu können, erstellen die Beteiligten neben der Modellerstellung auch vollautomatisierte Berechnungs-, Auswertungs- und Visualisierungsroutinen. Diese und weitere Einstellungen wie zum Beispiel, ob die Stromspeisung in Strang- oder in dq-Größen erfolgen soll, kann über die Benutzeroberfläche ausgewählt werden. Die dazugehörigen Funktionen wurden so erstellt, dass diese für drei- und mehrsträngige elektrische Maschinen angewandt werden können.

■ Feldsynchronisierung

Bei den PMS-Maschinen ist es üblich, dass diese in feldorientierten Koordinaten betrieben und geregelt werden. Eine korrekte Ausrichtung beziehungsweise Synchronisierung des Stator- und Rotorfelds ist vor jeder Simulation zu gewährleisten. Andernfalls wird ein nicht korrekter Strom in das dq-Koordinatensystem, wie in Abbildung 9 dargestellt, transformiert, mit der Folge, dass ein falsches Drehmoment gestellt wird.

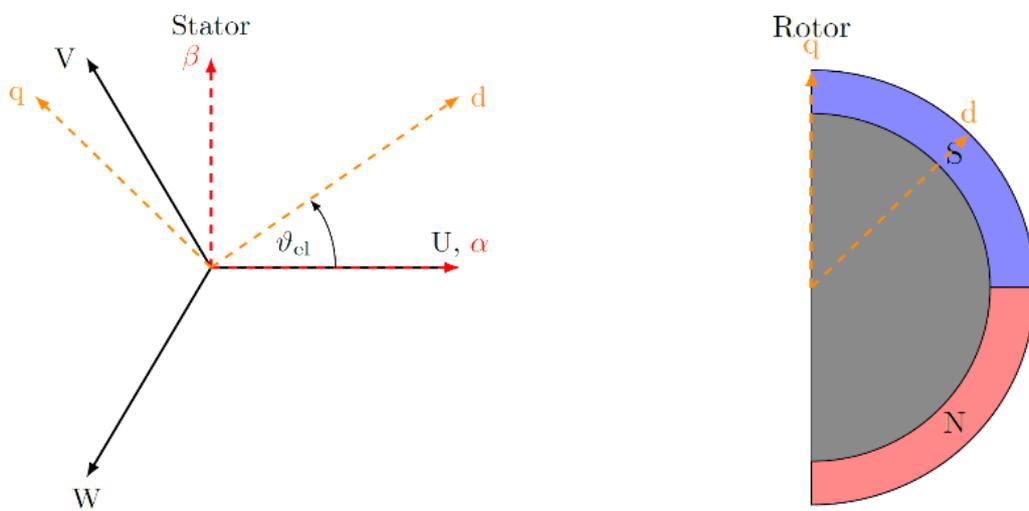


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Koordinatensysteme; Grafik: Jürgen Krejtschi

Um dies zu unterbinden erstellte das Forschungsteam entsprechende Funktionen, die unabhängig des gewählten Rotortyps die Feldsynchronisierung vornehmen. Die Ergebnisse der Methode der Feldsynchronisierung wurden für verschiedene Betriebspunkte auf Plausibilität überprüft und sind in Abbildung 10 dargestellt.

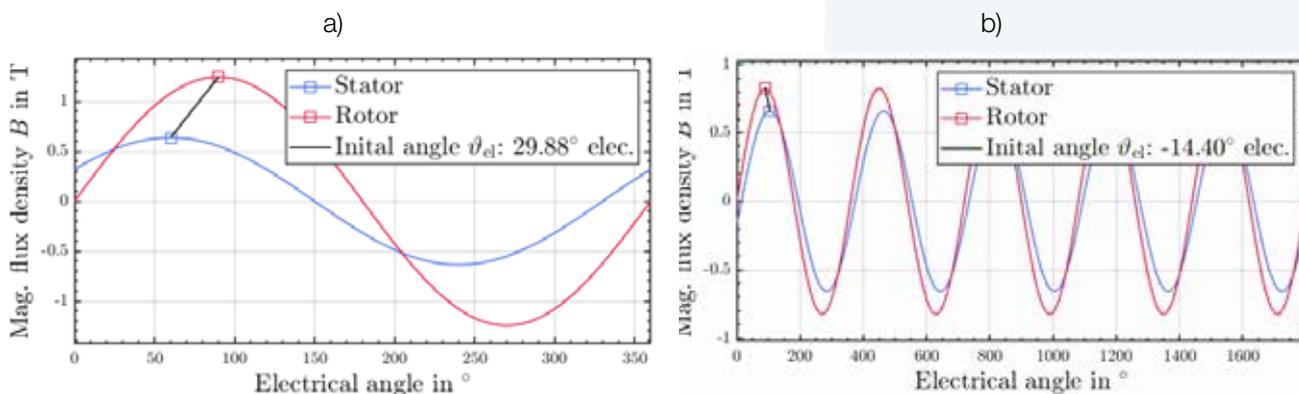


Abbildung 10: Feldsynchronisierung der Grundwelle der magnetischen Flussdichte des Stator- und Rotorfelds (a): für eine $2p=2$, $m_1=3$ - und (b): $2p=6$, $m_1=6$ -strängige elektrische Maschine; Grafik: Jürgen Krejtschi

■ Magnetostatische und/oder transiente stromgeführte Betriebspunkt- und Kennfeldrechnung

Zur Bewertung der charakteristischen Eigenschaften wie zum Beispiel stationärer und zeitlicher Verlauf des Drehmoments, Verluste, Induktivitäts- und Flusskennfelder, die in Abbildung 11 dargestellt sind, erstellen die Beteiligten entsprechende Funktionen. Dabei kann zwischen einer magnetostatischen oder transienten Rechnung

gewählt werden. Für eine erste Bewertung der Auslegung kann eine magnetostatische Rechnung verwendet werden. Der Vorteil hierbei ist, dass die Rechenzeit signifikant reduziert wird. Für detaillierte Analysen und Untersuchungen, um unter anderem den Einfluss der Nutzung zu berücksichtigen, sollte auf eine transiente Rechnung zurückgegriffen werden.

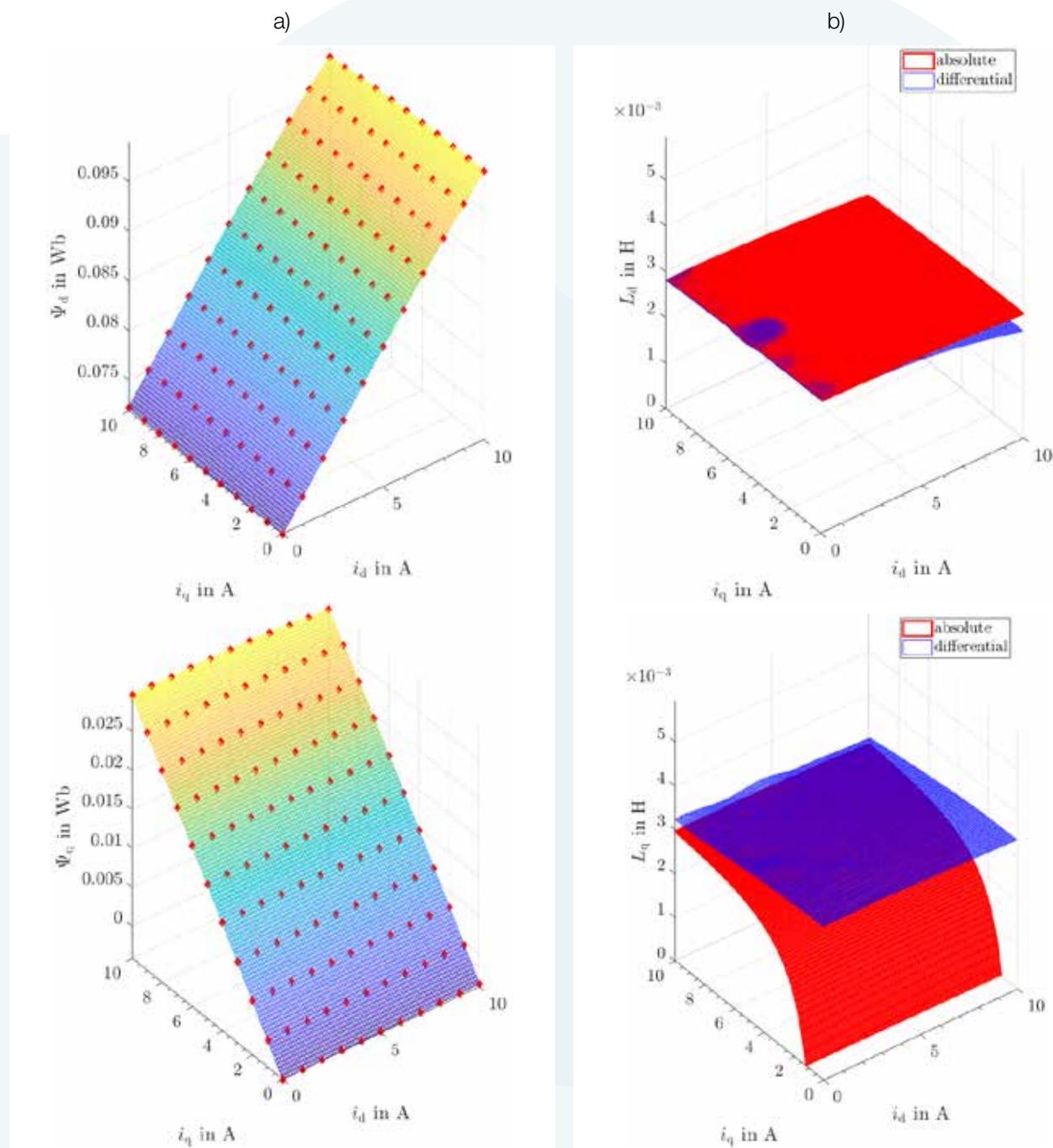


Abbildung 11: (a): Fluss- und (b): Induktivitätskennfeld aus einer magnetostatischen Feldrechnung für eine $m_1=9$ -strängige elektrische Maschine mit $2p=26$ und vergrabenen Permanentmagneten; Grafik: Jürgen Krejtschi

■ Transiente spannungsgeführte Betriebspunktrechnung

Rotierende elektrische Maschinen werden in den meisten Anwendungen mithilfe von einem oder mehreren Frequenzumrichter betrieben. In diesen sind verschiedene Regelalgorithmen wie zum Beispiel eine feldorientierte Regelung (FOC), die zum Standardrepertoire gehört, implementiert. Um für den Fall einer reinen Sineinspeisung das Verhalten der elektrischen Maschine untersuchen zu können, erstellte das Projektteam entsprechende Funktionen und Routinen, die eine automatisierte, spannungsgeführte Betriebspunktrechnung

und Auswertung ermöglichen. Neben der Analyse des zeitlichen Verlaufes des Stromes oder des Drehmoments können ebenfalls die Einflüsse der harmonischen Oberwellen untersucht und visualisiert werden. Ein Beispiel für eine solche Rechnung ist in Abbildung 12 dargestellt.

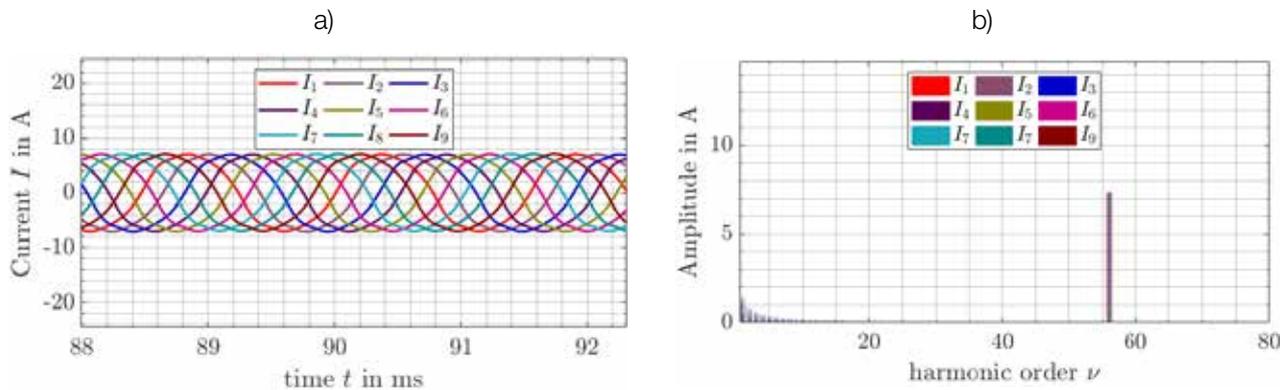


Abbildung 12: (a): zeitlicher Verlauf des eingeschwungenen Stromes und (b): Fourier-Analyse der harmonischen Oberwellen einer $m_1=9$ -strängigen elektrischen Maschine mit $2p=26$ und $f_1=650$ Hz; Grafik: Jürgen Krejtschi

Im Vergleich zur transienten, stromgeführten Betriebspunktrechnung ist die Rechenzeit bei der spannungsgeführten Rechnung signifikant höher, weil darauf gewartet werden muss, dass sich der stationäre Betriebsstrom eingestellt hat, um plausible Aussagen für das Verhalten der Maschine zu tätigen. Nichtsdestotrotz ist diese Methode ein hilfreiches Werkzeug, um die Maschineneigenschaften bei Spannungseinprägung, wie sie in der Realität ebenfalls anzutreffen ist, zu untersuchen und Verbesserungsmöglichkeiten abzuleiten.

Verifikation der numerischen Ergebnisse aus dem Berechnungsprogramm an bekannter Auslegung

Um die numerischen Ergebnisse, die mithilfe des erstellten Berechnungsprogramms gewonnen wurden, zu verifizieren, wurde eine bekannte Maschinenauslegung von einer Partner-Universität nachgerechnet. Die Parameter der Maschine sind in Tabelle 1 dargestellt.

Parameter	Auslegung	Berechnungsprogramm	rel. Abweichung
Bohrungsdurchmesser in mm		155	
Rotordurchmesser in mm		153	
Polpaarzahl p		13	
Frequenz f_1 in Hz		650	
Drehzahl n in min^{-1}		3000	
Strom I_q in A		7,5	
Magnethöhe b_H in mm		3	
Drehmoment T in Nm	35,8	37,7	+/- 5,3 %

Tabelle 1: Teilübersicht der Parameter der bekannten Maschinenauslegung [6]

Die numerischen Untersuchungen haben gezeigt, dass die aus dem Berechnungsprogramm gewonnenen Ergebnisse anhand der bekannten Maschinenauslegung mit geringen Abweichungen verifiziert werden konnten.

5. Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Die Vorlaufforschung hat der TH Nürnberg und der Fakultät Maschinenbau und Verfahrenstechnik den Einstieg in die Berechnung und Auslegung von permanentmagneterregten Synchronmaschinen ermöglicht. Neben diesem Einstieg wird das erstellte Berechnungsprogramm zum aktuellen Zeitpunkt in zwei universitären Kooperationsprojekten zur Auslegung von drei- und mehrsträngigen permanentmagneterregten Synchronmaschinen eingesetzt. Ziel dieser übergreifenden Zusammenarbeit ist es, eine elektrische Maschine mit möglichst wenig störenden Eigenschaften (harmonische Oberwellen, Klirr-Faktor etc.) zu entwickeln. Im weiteren Verlauf soll diese als Ausgangsbasis zum Testen, Bewerten und Verifizieren von verschiedenen modernen und performanten Regel-

algorithmen wie zum Beispiel der Modelprädiktiven Regelung (MPC), die im Rahmen einer Promotionsarbeit auf echtzeitfähiger Hardware wie zum Beispiel einer MicroAutoBox, Speedgoat oder UltraZohm implementiert und untersucht werden sollen, dienen.

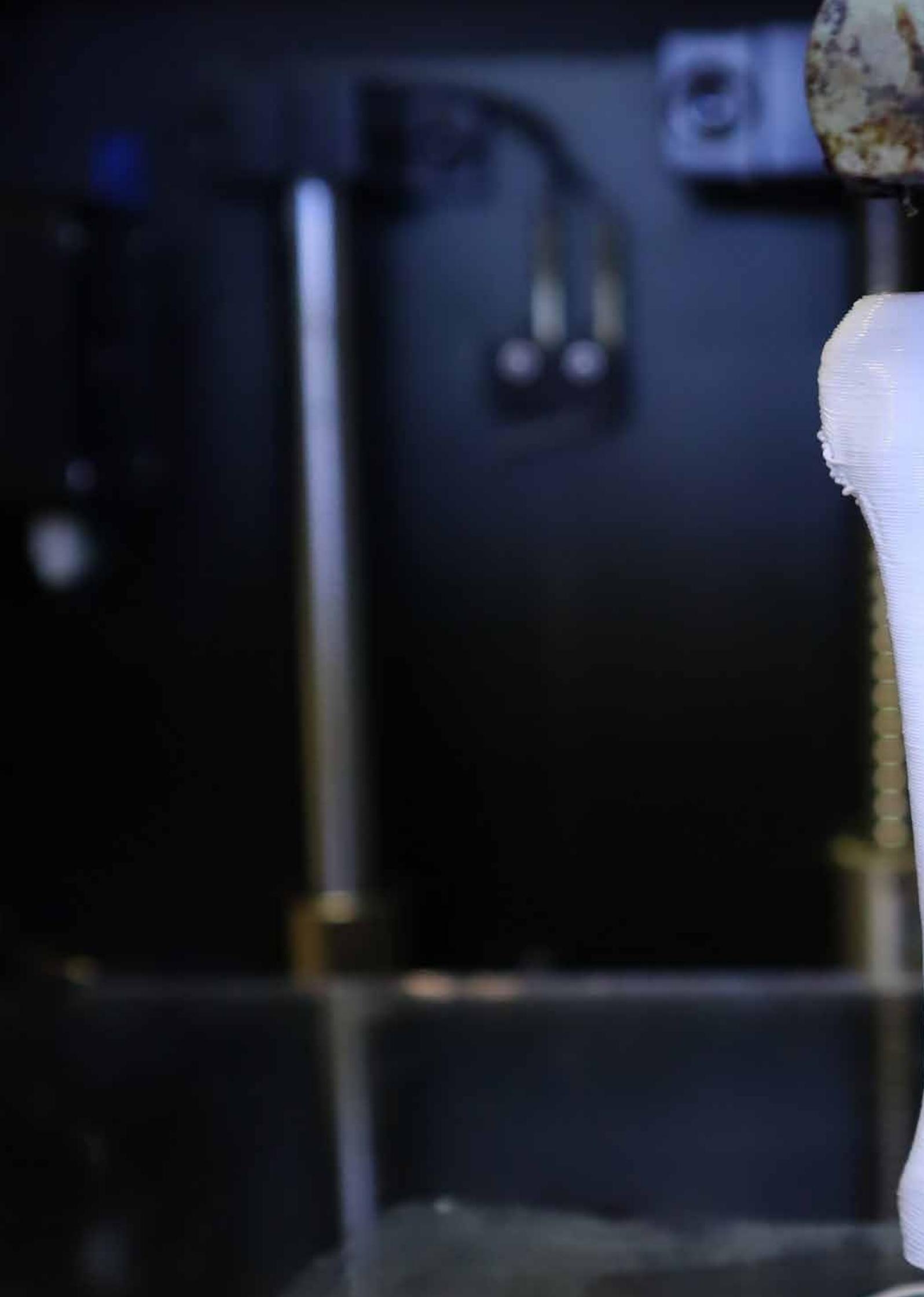
Zudem nahm das Forschungsteam erste Gespräche mit möglichen Projektpartnerinnen und -partnern auf, mit dem Ziel, fakultäts- und institutsübergreifende Forschungsanträge und -projekte zu ermöglichen. Diese Gespräche hatten zur Folge, dass im Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) zwei Forschungsanträge mit den Titeln „HighTorqCraft: Effiziente elektrische Flugmotoren mit hohem Drehmoment“ und „DepandableEngine: Entwicklung eines fehlertoleranten 2x3-strängigen Elektromotors“ verfasst wurden. Diese wurden am 20. November beziehungsweise 28. November 2020 zur Begutachtung beim Projektträger VDI/VDE Innovation + Technik GmbH beziehungsweise AiF Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. eingereicht. Zur Bearbeitung der Forschungsprojekte wird das entwickelte Berechnungsprogramm eingesetzt und weiterentwickelt. Diese Entwicklungen finden maßgeblich im Institut für leistungselektronische Systeme (ELSYS) statt.

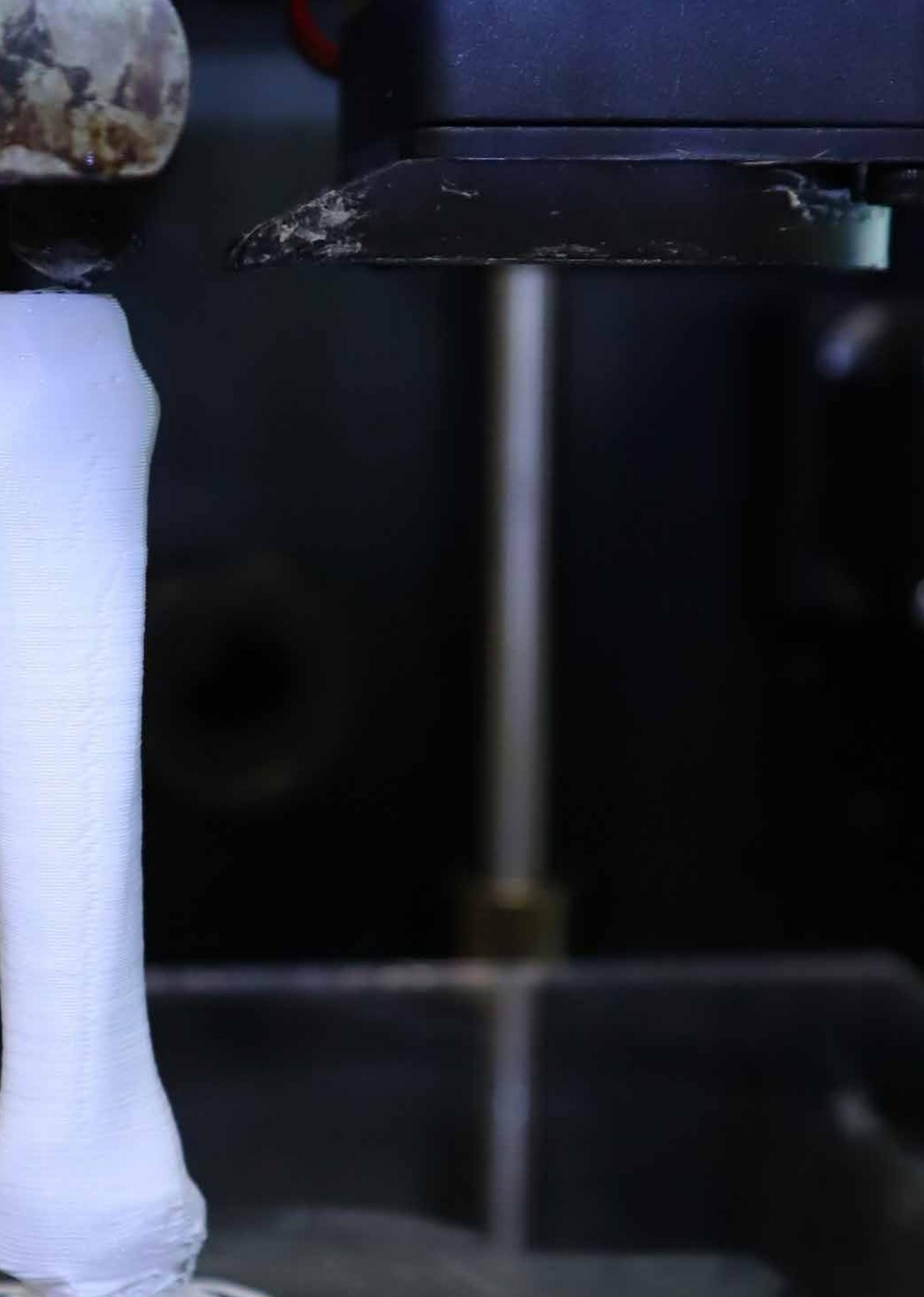
Mit dem entworfenen Berechnungsprogramm können drei- und mehrsträngige Synchronmaschinenkonzepte vollautomatisiert generiert, berechnet und die Daten der numerischen Feldrechnung visualisiert werden. Die Einflüsse der geometrischen Gestaltung des Stators oder des Rotors können durch Änderung des Parametershefts untersucht und analysiert werden. Die parametrische Modellerstellung übernimmt die aufwändige Arbeit der Modellgenerierung und die Anwenderin beziehungsweise der Anwender kann sich auf die Auslegung der elektrischen Maschine konzentrieren. Des Weiteren können die aus der numerischen Feldrechnung gewonnenen Daten für die Fluss- und Induktivitätskennfelder im Falle einer feldorientierten Regelung mithilfe von Lookup-Tabellen (LUT) im Regler hinterlegt werden, wodurch die Regelparameter der PI-Stromregler im d- und q-Zweig im jeweiligen Betriebspunkt nachgeführt werden. Dies führt zur einer verbesserten Systemantwort und Regeldynamik der Regelstrecke.

Aufgrund der aktuellen weltweiten SARS-CoV-2 Pandemie werden die Erkenntnisse aus der Vorlaufforschung einer breiten Öffentlichkeit im Rahmen eines Online-Beitrags auf einer der kommenden Konferenzen im Jahr 2021 präsentiert, so zum Beispiel bei der „International Conference on Electrical Machines“ (ICEM), der „International Electric Machines & Drives Conference“ (IEMDC), der „Ecological Vehicles and Renewable Energies“ (EVER) oder der „Electric Drives Production Conference“ (E|DPC).

6. Literatur

- [1] FutureLab3D: How Brushless Motor and ESC Work | FutureLab3D, 2019. <https://futurelab3d.com/how-brushless-motor-and-esc-work/>, abgerufen am: 23.11.2020
- [2] Konrad Oeckel, Jan Heimann, Sven Angermann, Michael Kerscher u. Wolfgang Rüter-Kindel: Vergleichende akustische Untersuchung von Drohnen-Propellern. 2019
- [3] GEERS: Lautstärke und Dezibel – wann ist laut zu laut? | GEERS, 2020. <https://www.geers.de/rund-ums-hoeren/lautstaerke-dezibel/>, abgerufen am: 23.11.2020
- [4] Emadi, A. (Hrsg.): Advanced Electric Drive Vehicles. Energy, Power Electronics, and Machines. Boca Ra-ton, FL: Taylor and Francis, an imprint of CRC Press 2014
- [5] Gerling, D.: Electrical machines. Mathematical fundamentals of machine topologies. Mathematical engineering. Berlin: Springer 2015
- [6] L. Tippe, J. Kammermann, I. Bolvashenkov u. H. Herzog: Concept Analysis and Design of a 9-Phase Permanent Magnet Synchronous Machine. 2018 AEIT International Annual Conference. 2018, S. 1–6







ImplantPrint – Herstellung von resorbierbaren Medizin-Implantaten im 3D-Druck

Prof. Dr. Michael Mirke
Felix Berthold, M. Sc.
Fakultät Werkstofftechnik
TH Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Die additive Fertigung ist ein technologischer Fortschritt, der die Möglichkeiten der Kunststoffverarbeitung erweitert. Sie ist nicht nur ein nützliches Werkzeug für das Rapid Prototyping. Auch für individualisierte Anfertigungen ist der Einsatz des sogenannten 3D-Drucks eine vielversprechende Herstellungsmöglichkeit medizinischer Implantate. Wegen ihrer biologischen Abbaubarkeit, biokompatiblen und nicht toxischen Eigenschaften rücken aliphatische Polyester wie Polyhydroxybutyrat (PHB) oder Polymilchsäure (PLA) in den Fokus der Forschung auf dem Gebiet der Biomedizin. Mit PHB und PLA konnten in Form von Filamenten oder Pulvern bereits erfolgreich künstliche Gewebe und Gerüststrukturen zur Knochenregeneration hergestellt werden, die mit der Zeit von Zellen besiedelt und schließlich vom Körper abgebaut werden. Im Rahmen der hier vorgestellten Vorlauforschung untersuchte das Projektteam die Herstellung von Filamenten auf Basis von PHB und ihre Verarbeitung im 3D-Druck. Die Beteiligten belegten die prinzipielle technische Machbarkeit der Projektidee 3D-gedruckter Implantate und erarbeiteten Grundlagen für eine Weiterverfolgung unter klinischen Gesichtspunkten.

1. Projektdaten

Fördersumme	35.000 Euro
Laufzeit	Februar bis September 2020
Fakultät	Werkstofftechnik
Projektleitung	Prof. Dr. Michael Mirke
Kontaktdaten	michael.mirke@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Kunststoffe sind in allen Lebens- und Industriebereichen vertreten, vom Wegwerfprodukt mit einmaliger Nutzung bis zum Hochleistungswerkstoff. Kunststoffe sind außerordentlich vielseitige Werkstoffe und prägen unser Zeitalter wie kaum ein anderes Material. Im Widerspruch zu ihrem teils schlechten Image können Kunststoffe beispielsweise aufgrund ihrer geringen Dichte und Recycling-Fähigkeit zum nachhaltigen Wirtschaften beitragen. Der Verbrauch fossiler Ressourcen sowie die weltweit betrachtet noch unzureichende „End-of-life-Behandlung“ stehen im Kontrast zum Aspekt Nachhaltigkeit. Ein Lösungsansatz geht von sogenannten Biokunststoffen aus. Im Hinblick auf die zunehmende Verknappung fossiler Ressourcen, den Klimawandel und die globale Umweltverschmutzung sollten diese Biokunststoffe auf nachwachsenden Rohstoffen beziehungsweise deren industriellen Restströmen basieren und recyclingfähig oder biologisch abbaubar sein. Der Begriff Biokunststoff ist hier differenziert zu betrachten: Biobasierte Kunststoffe müssen nicht zwingend biologisch abbaubar sein (wie zum Beispiel biobasiertes Polyethylenterephthalat PET), wohingegen einige wenige konventionelle, erdölbasierte Kunststoffe unter natürlichen Bedingungen biologisch zu organischer Materie und Kohlenstoffdioxid abgebaut werden können (zum Beispiel Polycaprolacton PCL) (Serrano et al., 2004).

Einer der wenigen Biokunststoffe, der sowohl biobasiert hergestellt wird und unter vielen Bedingungen (im Boden, in Süß- und Salzwasser, bei Heim- und Industriekompostierung, durch anaerobe Gärung etc.) in relativ kurzer Zeit biologisch abbaubar ist, ist Polyhydroxybutyrat (kurz PHB), das zur Gruppe der Polyhydroxyalkanoate (kurz PHA) gehört. PHA werden von vielen Bakterienarten als Speicherstoff in den Zellen in Form von Granula eingelagert, die bis zu 90 Prozent des Zellgewichts ausmachen. PHB und PHB-Derivate sind nahezu farblose Polyester mit ähnlichen technischen Eigenschaften wie Polypropylen oder Polyethylen. Die Forschung arbeitet daran, sie für die gängigen Kunststoffverarbeitungsmethoden wie Spritzgießen, Extrusion, Folienblasen oder auch die additive Fertigung geeignet herzustellen (Rajan et al., 2018).

Die Additive Fertigung (oft vereinfachend als „3D-Druck“ bezeichnet) stellt eine Erweiterung der Verarbeitungsmöglichkeiten auch von Kunststoffen dar und ist inzwischen ein etabliertes Werkzeug für Rapid Prototyping oder individualisierte Produkte. Additive Herstellungsverfahren können die verschiedensten Arten von Materialien nutzen wie zum Beispiel Thermoplaste (Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Polymilchsäure (PLA), Polyamid 6 (PA6)), Harze, Metalle (Al, Stahl, Au, Ag, Ti, Metalllegierungen), Pulver auf Gipsbasis, Keramik, biologische Materialien, Papier oder Lebensmittel. Polymere stellen dabei die am häufigsten verwendeten Materialien für den 3D-Druck dar (Ligon et al., 2017).

Ein wertvolles Anwendungsfeld neben der Herstellung von technisch nutzbaren Formteilen ist der Einsatz des 3D-Drucks zur Erstellung von medizinischen Implantaten. Aufgrund ihres ungiftigen und biokompatiblen Charakters sowie ihrer biologischen Abbaubarkeit gehören aliphatische Polyester wie Polyhydroxybutyrat (PHB; ein PHA aus dem Monomer 3-Hydroxybuttersäure) und Polymilchsäure (PLA) zu den am häufigsten verwendeten Biopolymeren auf dem Gebiet der Biomedizin (Panaitescu/Frone/Chiulan, 2016). In Form von Filamenten oder Pulver konnten mit PHB und PLA bereits künstliche Gewebe oder Gerüststrukturen zur Knochenregeneration hergestellt werden (Chiulan et al., 2017), die mit der Zeit von Zellen besiedelt und schließlich vom Körper abgebaut werden. Gerade in der Unfall- und operativen Chirurgie könnte die Erstellung eines – noch während der Operation 3D-gedruckten – maßgeschneiderten Implantats völlig neue Behandlungsmöglichkeiten eröffnen. Ein weiterer Vorteil dieses resorbierbaren Werkstoffs wäre, dass Eingriffe zur Implantatentfernung und somit auch die damit verbundenen Komplikationen wegfallen.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Kernziele der im Rahmen dieser Vorlaufforschung geförderten Aktivitäten sind die Untersuchung und Verbesserung der Verarbeitbarkeit von PHB im additiven Verfahren des „Fused Filament Fabrication“ (FFF). Dazu wurden neben reinem PHB auch physikalische Mischungen („Blends“) aus PHB mit anderen im FFF-Druck erprobten Polymeren wie zum Beispiel PLA untersucht. Im Vordergrund steht die additive Anwendung in der Medizin. Erste Voruntersuchungen im Rahmen einer Bachelorarbeit hatten die prinzipielle Verarbeitbarkeit von PHB im FFF-Druck gezeigt (Lukas Bär, 2019). Aufgrund hoher Sprödigkeit, hoher Kristallinität und einer Schmelztemperatur nahe der Zersetzungstemperatur sind tieferegehende Stoffkenntnisse für eine schonende Verarbeitung notwendig. Grundlegend hierfür ist das Schmelz- und Erstarrungsverhalten, welches durch die „Dynamische Differenzkalorimetrie“ (DSC) bestimmt werden kann.

Ausgangsmaterial für den 3D-Druck sind millimeterstarke Fäden, sogenannte Filamente, die aus Polymeren in Pulverform oder Granulat extrudiert werden. Durch Extrusionsversuche, die auf ermittelten Stoffeigenschaften basieren, werden wichtige Extrusionsparameter (wie Temperaturprofil, Extruderdrehzahl, Kühlung) bestimmt. Ziel ist die Erzeugung eines möglichst homogenen Filamentfadens mit gleichmäßigem Durchmesser.

Handelsübliches PHB wird zur Eigenschaftsverbesserung meist mit Additiven (zum Beispiel Nukleierungsmitteln) versehen, die möglicherweise aber einer medizinischen Anwendung entgegenstehen. Aus diesem Grund wird in diesem Projekt PHB-Pulver ohne Zusätze als Ausgangsstoff verwendet. Die Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften durch Hilfsstoffe wird mit denkbaren Nukleierungsmitteln im Labor nachvollzogen und durch DSC-Messungen überprüft.

Das gewonnene Filament wird im FFF-Druck durch Variation relevanter Parameter wie zum Beispiel Düsentemperatur, Druckbetttemperatur oder Druckgeschwindigkeit an einfachen Geometrien im kleinen Maßstab (wie zum Beispiel Stäbchen) getestet und seine Verarbeitung optimiert. Über der Fertigung komplizierterer Geometrien wird die Verwendung dieser 3D-Druckmethode für die Herstellung von Bioimplantaten überprüft.

Mögliche erste Anwendungen können sogenannte „Patch-Implantate“, jedoch auch komplette Knochen wie zum Beispiel Fingerknochen oder Knochenteile sein. Aufgrund der oben angesprochenen, problematischen Verarbeitungseigenschaften von PHB ist außerdem die Herstellung und Bewertung von Kunststoffgemischen, sogenannten „Blends“, Teil des Forschungsvorhabens. Mögliche Blendpartner hierfür sind Polymilchsäure (PLA), Polycaprolacton (PCL) oder Thermoplastische Elastomere (TPE).

Das Projekt wurde für eine Projektlaufzeit von insgesamt acht Monaten ausgelegt und gliedert sich in die nachfolgend dargestellten Arbeitspakete.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Das Forschungsprojekt wurde in sechs Arbeitspakete (AP) gegliedert:

- Bestimmung des Schmelz- und Erstarrungsverhaltens von PHB (AP1)
- Herstellung eines PHB-Filaments (AP2)
- Ermittlung der Druckparameter (AP3)
- Erstellung eines Implantat-Demonstrators (AP4)
- Untersuchungen zu PHB-Blends (AP5)
- Ausarbeitung eines Folgeantrags (AP6)

Das Projektvorhaben wurde mit PHB-Pulver (Enmat Y3000) der Firma TianAn Biopolymer (Ningbo, VR China) als Grundpolymer umgesetzt. Für die Herstellung von Polymerblends verwendete das Projektteam PLA (Fa. NatureWorks B.V., Minnetonka, USA; Ingeo 2003 D) und von der Firma Willowflex (Dassel, D) zur Verfügung gestelltes TPE (WillowFlex FX1504). Für die Nukleierungsversuche setzten die Beteiligten Bornitrid (Fa. Henze, Lauben, D; HeBoFill® LL-SP 010), Talkum (Imerys Performance Additives EMEA, Graz, A; Crys-Talc® 7 C) und Hydroxylapatit (Sigma Aldrich, Darmstadt, D; Hydroxylapatit $\geq 90\%$) ein. CaCO_3 (Carl Roth, Karlsruhe, D; $\text{CaCO}_3 > 99\%$) und gemahlene Austernschalen wurden vom Labor für Mechanische Verfahrenstechnik bereitgestellt (Fakultät Verfahrenstechnik der TH Nürnberg).

Um die Verarbeitung zu optimieren und zu verbessern, wurde das Schmelz- und Erstarrungsverhalten mittels DSC-Messungen ermittelt. Dies wurden im weiteren Verlauf der Forschungsarbeiten auch für alle modifizierten Polymere der Nukleierungsversuche sowie Polymer-Blends bestimmt. Dies ist notwendig, da die verwendeten Polymere je nach Herstellung und Vorbehandlung unterschiedliche Eigenschaften haben können, welche sich je nach Formulierung der Blends ändern. In Tabelle 1 sind die Kristallisations- und Schmelztemperaturen der verwendeten Grundpolymere aufgeführt. DSC-Messungen zeigen deutliche Unterschiede für die verwendeten PLA, PHB und WillowFlex. PLA erstarrt amorph, während PHB und WillowFlex beim Abkühlen kristallisieren. Damit können die im Druckprojekt auftretenden Spannungen erklärt werden. Während PLA amorph erstarrt, bauen sich beim als hochkristallin bekannten PHB durch die Kristallisierung Spannungen auf. Bei WillowFlex können die Polymerketten dies durch elastische Verformung ausgleichen, während sprödes PHB verformt wird, was zum Ablösen des Bauteils vom Druckbett führt. (Singh, 2018)

Probe	Kristallisationstemperatur	Schmelztemperatur
PHB Enmat Y3000	76,8 °C	178,8 °C
PLA Ingeo 2003 D	Kaltkristallisation im Bereich 110 °C bis 140 °C	150,8 °C
TPE WillowFlex FX1504	60,8 °C	109,8 °C

Tabelle 1: Kristallisations- und Schmelztemperaturen aus den DSC-Messungen der Reinstoffe PHB, PLA und TPE

Unmodifiziert eignet sich reines PHB deshalb kaum für die Anwendung im FFF-Druck. Um die Verarbeitbarkeit durch ein geeigneteres Kristallisationsverhalten zu verbessern, testete das Team nach Versuchen mit dem reinen Polymer unterschiedliche Nukleierungsmittel. Nukleierungsmittel erleichtern die Kristallisation, die dann schon bei geringerer Unterkühlung einsetzt und zu mehr, aber kleineren Kristalliten führt. Nach Literaturrecherchen wurden Bornitrid (BN) und Talkum (Talk) als Nukleierungsmittel geprüft. Aus der Literatur geht hervor, dass ein Massenanteil an BN oder Talk von 1-2 % w/w als Nukleierungsmittel bereits einen deutlichen Einfluss zeigt (Kai/He/Inoue, 2005).

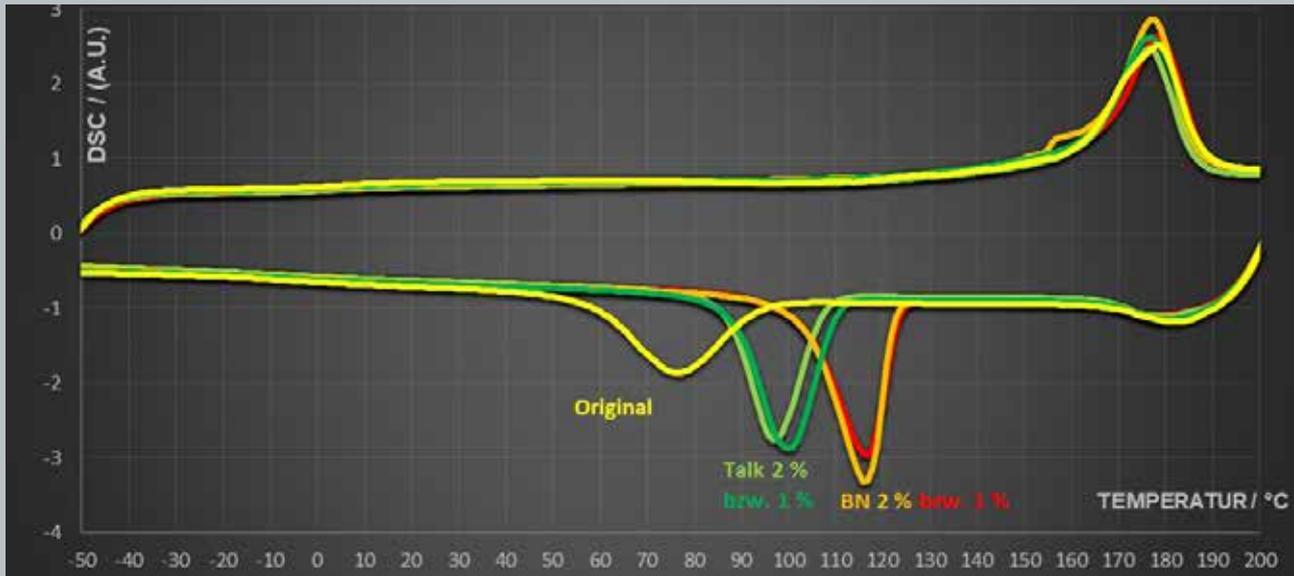


Abbildung 1: DSC-Messungen der Nukleierungsversuche, zur besseren Übersicht wurden die Kristallisationspeaks beschriftet. gelb: reines PHB, rot: mit 1 % BN, orange: mit 2 % BN, dunkelgrün: mit 1 % Talk, hellgrün: mit 2 % BN. Grafik: Felix Berthold

Erste Versuche wurden deshalb in diesem Bereich mit BN und Talk durchgeführt. Mittels DSC-Messungen wurde das geänderte Kristallisationsverhalten überprüft. Die Schmelz- und Kristallisationskurven (Abbildung 1) bestätigen, dass sich beide Stoffe als Nukleierungsmittel eignen und die zur Kristallisation notwendige Unterkühlung deutlich verringern. Auch ist zu erkennen, dass dies vor allem vom zugesetzten Stoff abhängig ist, jedoch weniger vom Massenanteil des Stoffs. Aus diesem Grund wurde für alle weiteren Versuche und Blends PHB mit 1 % w/w BN verwendet (PHB_1 % BN). Um die Biokompatibilität der Materialien zu verbessern, wurden außerdem Hydroxylapatit (HAP), Kalziumcarbonat (CaCO_3) und gemahlene Austernschalen als Nukleierungsmittel getestet. HAP ist Grundbestandteil der Knochensubstanz aller Wirbeltiere (Li et al., 2005) und wird als Knochenersatz in der Medizin verwendet. 1 % w/w Hydroxylapatit zeigte im Versuch keine Verbesserung der Kristallisation, könnte jedoch in weiteren Versuchen mit größerem Anteil als Füllstoff geprüft werden. Füllstoffe reduzieren den Materialeinsatz des Grundpolymers und könnten im Fall von HAP die Biokompatibilität erhöhen. CaCO_3 ist ein Hauptbestandteil von Austernschalen. Im Vergleich zeigte 1 % w/w CaCO_3 ein ähnliches Verhalten wie HAP. Austernschalen ergaben dagegen eine leichte Erhöhung der Kristallisationstemperatur. Da Austernschalen biologisch abbaubar und als Abfallprodukt kostengünstig sind, sollte analog zu HAP auch hier eine Verwendung als Füllstoff untersucht werden. Sowohl das verwendete PHB als auch die Nukleierungsmittel wurden als Pulver verarbeitet. Bei der Verarbeitung von Polymerpulver mit der vorhandenen Extrusionslinie (maGme Maschinenbau, Altdorf b. Nbg., D; GA 20DE-25D mit Rollenabzug) galt es, unterschiedliche Probleme zu lösen. Durch statische Aufladung des sehr feinen Polymerpulvers (d_{50} zirka $20 \mu\text{m}$) bildeten sich Brücken, die ein Nachrieseln aus dem Trichter behinderten. Die dadurch ungleichmäßige Befüllung des Extruders führte zu Unterbrechungen der Extrusion. Um das Nachrieseln bei der Extrusion von PHB-Pulver zu erleichtern, entwarf das Forschungsteam einen Vibrationstrichter, stellte diesen mittels FFF-Druck her und verwendete ihn erfolgreich bei der Extrusion (Abbildung 2).



Abbildung 2: CAD-Konstruktion Vibrationstrichter für Einschneckenextruder mit Aufnahmen für Vibrationsmotoren. Grafik: Felix Berthold

Zur Überprüfung der Einarbeitung des Nukleierungsmittels wurden Proben nach der Compoundierung mit Hilfe der Thermogravimetrie untersucht. Bei dieser Methode wurden die Proben auf bis zu 900 °C erhitzt. In Tabelle 2 sind die Verbrennungsrückstände der hergestellten Materialvariationen angegeben. Um einen Rückschluss auf die eingebrachte Menge an Nukleierungsmittel ziehen zu können, wurden die jeweiligen Verbrennungsrückstände um den Rückstand von reinem PHB korrigiert. Obwohl der verwendete Einschneckenextruder für die Dosierung und Compoundierung von Polymeren mit Zusatzstoffen nicht ideal war, zeigten die TG-Analysen, dass 99 Prozent der angestrebten BN-Menge im Polymer nachgewiesen werden können. Dies deutet darauf hin, dass die gewählte Art der Vormischung mit einem Rollenmischer eine geeignete Vorbehandlung des Stoffgemisches darstellt. Bei den anderen verwendeten Nukleierungsmitteln ergaben sich Abweichung von 10 Prozent und mehr, was auf eine schlechtere Vorbehandlung, Verluste durch Haftung an den Glasgefäßen oder im weiteren Verarbeitungsprozess zurückgeführt werden könnte. Auch neigen einige der Nukleierungsmittel dazu, zu agglomerieren, sodass sie sich eventuell weniger homogen im Polymer verteilen. Die entwickelte Methode bietet somit eine gute Basis für weitere Versuche mit pulverförmigen Gemischen, sollte zukünftig aber noch verbessert werden.

Probe	PHB	PHB_BN_1%	PHB_BN_2%	PHB_Talk_1%	PHB_Talk_2%	PHB_HAP_1%
Verbrennungsrückstand / % w/w	0,29	1,27	2,33	1,21	1,96	1,18
Verbrennungsrückstand korrigiert / % w/w	0,00	0,99	2,04	0,92	1,67	0,89

Tabelle 2: Verbrennungsrückstände aus thermogravimetrischer Analyse der untersuchten Polymer-Nukleierungsmittel-Gemische

Um die gewonnenen Ergebnisse im FFF-Druck nutzen zu können, wurden aus Polymerpulver beziehungsweise -granulat Filamente mit einem Durchmesser von 1,75 mm extrudiert. Grundlage für die Extrusionsversuche waren die in einer Vorarbeit ermittelten Werte (Lukas Bär, 2019) ergänzt durch die mit DSC ermittelten Parameter. Die Art der Extrusion wurden im Laufe der Versuche weiter optimiert.

Mit den optimierten Extrusionsparametern konnten Filamente aus verschiedenen Formulierungen hergestellt werden. Alle Polymere wurden vor dem Blending einmal extrudiert und in einer Schneidmühle granuliert. So konnten gleichförmige Granulate für die Blending-Versuche hergestellt werden. Blends wurden aus PHB_1%BN mit PLA und TPE hergestellt, jeweils mit Massenanteilen von 25 %, 50 % und 75 %. Zusätzlich wurden Filamente der reinen Polymere hergestellt.

Die gewonnenen Filamente testete das Forschungsteam für den FFF-Druck. Durch Optimierung von zum Beispiel Düsentemperatur, Druckbetttemperatur oder Druckgeschwindigkeit konnten die Beteiligten an einfachen Geometrien im kleinen Maßstab die Verarbeitung des PHB und der PHB-Blends im FFF-Druck prüfen und optimieren. Um einen ersten Eindruck der Verarbeitungs- und Materialeigenschaften zu bekommen, wurden Teststäbchen mit den Maßen 80 mm x 10 mm x 4 mm hergestellt (Abbildung 3; A).

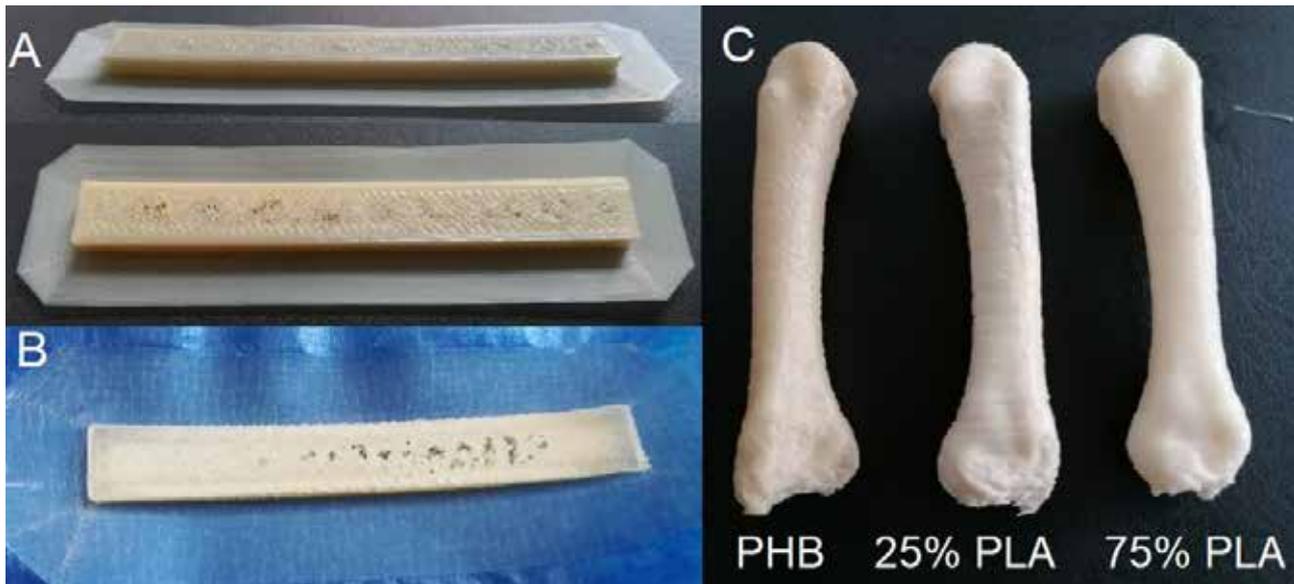


Abbildung 3: PHB verarbeitet im FFF-Druck, (A) Teststäbchen, (B) Warping bei Verarbeitung von reinem PHB, (C) Fingerknochen als Demonstrator mit reinem PHB, 25 % PLA und 75 % PLA; Fotos: Felix Berthold

Die Teststäbchen wurden mittels Dreipunktbiegung geprüft. Hierdurch kann beispielsweise die Sprödigkeit der Blends nach der Verarbeitung beurteilt werden. Interessant sind hier die maximale Biegespannung und die Randfaserdehnung. PHB alleine zeigt für beide Parameter die niedrigsten Werte im Vergleich zu PLA und TPE. PHB zeigt die relativ höchste Sprödigkeit, PLA eine größere als TPE. Bei Betrachtung der Blends mit zunehmendem PHB-Anteil (25 %, 50 %, 75 %) steigt die Biegespannung, die Randfaserdehnung jedoch nimmt ab. Die verringerte Randfaserdehnung deutet auf eine zunehmende Sprödigkeit und verringerte Elastizität der Blends mit steigendem PHB-Anteil hin. Die Biegespannung zeigt für PLA-Blends eine relativ konstante Zunahme unabhängig vom PHB-Anteil, wohingegen TPE eine direkt proportionale Zunahme mit steigendem Anteil zeigt.

Bei der Verarbeitung im FFF-Verfahren ergab sich, dass reines PHB sowie Blends mit 75 % und 50 % PHB-Anteil mit dem verwendeten 3D-Drucker (Wanhao Duplicator D6) nicht erfolgreich auf eine Glasplatte gedruckt werden konnten. Die Bauteile lösten sich während des Drucks vom Druckbett. Dieses sogenannte Warping lässt sich wie oben beschrieben durch auftretende Spannungen im Rahmen des Abkühlens und Kristallisierens des Polymers erklären (Abbildung 3; B). Um das Ablösen von Bauteilen zu verhindern, werden im FFF-Druck Haftgrundvermittler verwendet, wie zum Beispiel herkömmliches Haarspray oder das in diesem Projekt verwendete „Bluetape“, eine Art Krepp-Abdeckband (Alfa Blue Tape; Alfa GmbH, Ellwangen, D). Durch solche Haftgrundvermittler wird die Oberfläche der Druckfläche vergrößert und dadurch die Haftung verbessert (Spoerk et al., 2018). Es können jedoch Rückstände des verwendeten Haftgrundvermittlers am Druckobjekt zurückbleiben, die nachträglich entfernt werden müssen. Für eine biomedizinische Verwendung ist eine möglichst unkontaminierte Polymeroberfläche wünschenswert, weshalb Formulierungen, die keine Haftverstärker für die Verarbeitung benötigen, wünschenswert sind. Die Blends mit 25 % PHB-Anteil sowie die reinen PLA- und TPE-Filamente konnten ohne Probleme auf einer Glasplatte ohne Haftverstärker als Druckbett verarbeitet werden.

Nach den ersten Versuchen mit Teststäbchen wurde ein Mittelfingerknochen als komplexe Geometrie und medizinischer Demonstrator gewählt (Abbildung 3; C). Der Knochen wurde im Vergleich zu den Teststäbchen aufrechtstehend gedruckt, wodurch nur eine vergleichsweise kleine Kontaktfläche zur Druckplatte gegeben ist. Beim Drucken der Demonstratoren konnten daher keine Probleme mit Warping festgestellt werden, der Knochen konnte mit allen Polymerblends erfolgreich hergestellt werden. Lediglich die Oberfläche und die Druckqualität des Demonstrators zeigten Unterschiede zwischen den verschiedenen Formulierungen. Hier ist eine weitere Optimierung der Druckparameter nötig. Den Filamentdurchmesser konnten die Beteiligten während der Extrusion nur stichprobenartig manuell kontrollieren. Ein ungleichmäßiger Durchmesser führt im FFF-Druck dazu, dass zu viel oder zu wenig Polymer extrudiert wird, was sich negativ auf die Druckqualität auswirkt. Wünschenswert

ist daher zukünftig eine kontinuierliche Messeinrichtung zur Überwachung des Filamentdurchmessers bei der Extrusion.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass Blends von PHB mit geeigneten Polymeren die Verarbeitungs- und Produkteigenschaften stark verbessern. Eine Anpassung auf Verarbeitungsverfahren (FFF-Druck) und Produktanforderungen wurde dadurch ermöglicht.

Im Rahmen der Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Stephanie Stute (Fakultät Verfahrenstechnik) konnte ein Antrag zur Forschungsförderung ausgearbeitet werden. Dies war sinnvoll, da sich während der Arbeit zeigte, dass das verwendete Grundpolymer, hier reines PHB, einen erheblichen Einfluss auf die Verarbeitung hat. Mit dem Ziel, die Versuche langfristig mit hochschuleigenem PHB zu wiederholen, wurde dieser Antrag in Zusammenarbeit mit dem Süddeutschen Kunststoffzentrum in Würzburg ausgearbeitet. Er soll im April 2021 eingereicht werden. Eine Weiterführung der konkreten Projektbestrebungen konnte zum jetzigen Zeitpunkt leider nicht erfolgreich finanziert beziehungsweise realisiert werden.

5. Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Mit dem beantragten Projekt konnte das Forschungsteam die Verwendbarkeit von PHB im additiven Verfahren demonstrieren und grundlegende Daten für eine Anwendung im medizinischen Bereich in Form von 3D-gedruckten Bioimplantaten liefern. Die im Rahmen des Forschungsprojekts „ImplantPrint“ durchgeführten Untersuchungen und die erzielten Ergebnisse bilden eine vielversprechende Grundlage für zukünftige Forschung und Weiterentwicklung. Für diese müssen die Ausgangsmaterialien umfangreicher charakterisiert und weitere analytische Möglichkeiten geschaffen werden. Wichtige Methoden für die weitere Charakterisierung wären zum Beispiel Gel-permeationschromatographie (GPC; Molmassen und Molmassenverteilungen der Polymere) oder magnetische Kernspinresonanz (NMR; molekularer Aufbau der Polymere).

Im Rahmen von Projekt- und Abschlussarbeiten setzen Studierende die Arbeiten fort. PHB und PHB-Blends konnten dabei bereits erfolgreich extrudiert und gedruckt werden. Weitere polymerchemische und materialwissenschaftliche Charakterisierungen sollten Aufschluss über Rohstoffe und Produkte sowie deren Zusammenspiel liefern.

Die Ergebnisse bieten auch die Grundlage, um im Rahmen weiterer Forschung an der Herstellung von PHA im kontinuierlichen Prozess durch Prof. Dr. Stephanie Stute die Verarbeitung und Charakterisierung der im Haus produzierten PHA-Polymere ausführlicher untersuchen zu können.

Aufgrund der Pandemiesituation während der Projektbearbeitung kam es zu Verzögerungen in der Projektbearbeitung, da zum Beispiel das Enmat Y3000 PHB-Pulver erst im Mai aus China geliefert werden konnte.

Konferenzbeiträge und Veröffentlichungen konnten nicht realisiert werden.

6. Literatur

Chiulan et al. (2017): Chiulan, Ioana et al.: Recent Advances in 3D Printing of Aliphatic Polyesters, in: Bioengineering (Basel, Switzerland), 5. Jg., Heft 1, 2017

Kai/He/Inoue (2005): Kai, Weihua; He, Yong; Inoue, Yoshio: Fast crystallization of poly(3-hydroxybutyrate) and poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) with talc and boron nitride as nucleating agents, in: Polymer International, 54. Jg., Heft 5, 2005, S. 780–789

Li et al. (2005): Li, Zhang et al.: Preparation and in vitro investigation of chitosan/nano-hydroxyapatite composite used as bone substitute materials, in: Journal of materials science. Materials in medicine, 16. Jg., Heft 3, 2005, S. 213–219

Ligon et al. (2017): Ligon, Samuel Clark et al.: Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing, in: Chemical reviews, 117. Jg., Heft 15, 2017, S. 10212–10290

Lukas Bär (2019): Lukas Bär: Untersuchung des Verhaltens des Biopolymers Polyhydroxybutyrat (PHB) im 3D-Druck. Bachelorarbeit. Unter Mitarbeit von Michael Mirke. Nürnberg, 31.07.2019, 2019

Martínez/Kharissova/Kharisov (2018): Martínez, Leticia Myriam Torres; Kharissova, Oxana Vasilievna; Kharisov, Boris Ildusovich (Hrsg.): Handbook of Ecomaterials. Cham: Springer International Publishing, 2018

Panaiteescu/Frone/Chiulan (2016): Panaiteescu, Denis Mihaela; Frone, Adriana Nicoleta; Chiulan, Ioana: Nanostructured biocomposites from aliphatic polyesters and bacterial cellulose, in: Industrial Crops and Products, 93. Jg., 2016, S. 251–266

Rajan et al. (2018): Rajan, Krishna Prasad et al.: Polyhydroxybutyrate (PHB): A Standout Biopolymer for Environmental Sustainability, in: Martínez, Leticia Myriam Torres/Kharissova, Oxana Vasilievna/Kharisov, Boris Ildusovich (Hrsg.): Handbook of Ecomaterials. Cham: Springer International Publishing, 2018, S. 1–23

Serrano et al. (2004): Serrano, M. C. et al.: In vitro biocompatibility assessment of poly(epsilon-caprolactone) films using L929 mouse fibroblasts, in: Biomaterials, 25. Jg., Heft 25, 2004, S. 5603–5611

Singh (2018): Singh, Kunal: Experimental study to prevent the warping of 3D models in fused deposition modeling, in: International Journal of Plastics Technology, 22. Jg., Heft 1, 2018, S. 177–184

Spoerk et al. (2018): Spoerk, Martin et al.: Effect of the printing bed temperature on the adhesion of parts produced by fused filament fabrication, in: Plastics, Rubber and Composites, 47. Jg., Heft 1, 2018, S. 17–24

Weißbach/Dahms/Jaroschek (2018): Weißbach, Wolfgang; Dahms, Michael; Jaroschek, Christoph: Werkstoffe und ihre Anwendungen. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018









Asymmetrische Verzahnung

Prof. Dr.-Ing. Alexander Monz
Johannes Gründer, M.Sc.
Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik
TH Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Ziel des Vorhabens ist die Schaffung eines integrierten Berechnungsansatzes für die rechnerische Bewertung asymmetrischer Zahnprofile von Schneckenverzahnungen. Dazu adaptiert das Forschungsteam die Ansätze für symmetrische Zahnprofile und wendet sie auf flankenweise verschiedene Profile an. Zentrales Ergebnis ist ein Berechnungsmodell für Schnecken beliebiger Flankengeometrie. Mit diesem Modell ist es möglich, über die Bewertung der Materialbeanspruchung asymmetrischer Verzahnungen hinaus auch kritische Durchbiegungen und resultierende Störungen des Eingriffsfelds zu detektieren. Die Ergebnisse bringt das Projektteam in einen Forschungsantrag bei der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. ein und stellt sie auf der „International Conference on Gears 2021“ in München vor. Eine Aufnahme in die DIN-Normung ist zudem vorgesehen.

1. Projektdaten

Fördersumme	35.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2020
Fakultät / Institut	Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik, Institut OHM-CMP
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Alexander Monz
Kontaktdaten	alexander.monz@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Schneckengetriebe finden sich heutzutage in einer Vielzahl unterschiedlicher Antriebsaufgaben, insbesondere in Fördertechnik und Verpackungstechnik. Im Zusammenspiel mit elektrischen Antrieben liegt die Stückzahl von Schneckengetrieben beziehungsweise Schneckengetriebemotoren auf Seiten der deutschen Anbieter bei mehr als 500.000 Schneckengetrieben jährlich.

Die wesentlichen Bauformen sind zylindrische oder globoidische Schnecken („hourglass worm“) in Kombination mit globoidischen Schneckenrädern. Die internationale Forschung zu dieser Getriebegattung hat dabei zwei Schwerpunkte: Im chinesischen Wirtschaftsraum dominiert die Untersuchung von Herstellung und Auslegung globoidischer Schnecken. Im europäischen Wirtschaftsraum liegt der Fokus auf Werkstoffen und der Optimierung der Verzahnungsgeometrie von nahezu ausschließlich zylindrischen Schnecken. Die Forschung hierzu findet schwerpunktmäßig in Deutschland innerhalb der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. statt.

Im Zusammenhang mit der Erschließung bislang ungenutzter Auslegungsreserven sind asymmetrische Verzahnungen, bedingt durch Fortschritte in der Verzahnungsfertigung, ein wesentlicher Innovationstreiber. Solche asymmetrischen Verzahnungen unterscheiden sich im Wesentlichen im Eingriffswinkel von Vor- und Rückflanke. Da die Tragfähigkeit der Zahnflanke wesentlich von den Eingriffsverhältnissen und damit vom Eingriffswinkel abhängt, kann durch Asymmetrie im Zahnprofil die Tragfähigkeit jeder Flanke individuell entsprechend der Lastbedingungen eingestellt werden. Steilere Flanken (das heißt Eingriffswinkel $< 20^\circ$) sind günstig für Wirkungsgrad und Tragfähigkeit der Flanke, jedoch ungünstig für die Tragfähigkeit des Zahnfußes, der durch kleinere Eingriffswinkel einen immer geringeren Spannungsquerschnitt aufweist. Da Getriebe häufig eine Hauptbelastungsrichtung aufweisen und selten auf beiden Flanken gleichermaßen beansprucht werden, liegt es nahe, die Flanken

unterschiedlich auszuführen. Seit etwa 2015 stehen Programme und Werkzeuge zur Verfügung, die es erlauben, die Schleifwerkzeuge zur Herstellung asymmetrischer Verzahnungen passend abzurichten [1]. An Schneckengetrieben ist diese Form der Verzahnungsmodifikation bislang nicht untersucht worden, obgleich hier die zu erwartenden Vorteile, insbesondere in der Steigerung des Wirkungsgrades, noch größer ausfallen, als bei der Anwendung auf Stirnradverzahnungen.

Aus diesem Grund ist es notwendig, die relevanten Effekte, insbesondere Tragfähigkeitsgrenzen, asymmetrischer Schneckenverzahnungen einer Berechnung zugänglich zu machen.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Im Vorhaben soll ein Ansatz erarbeitet werden, mit dessen Hilfe die bestehenden Verfahren zur Berechnung der Tragfähigkeit nach DIN 3996 [2], der Flankenragfähigkeit nach Rank [3] und Stahl et al [4] sowie der Fußtragfähigkeit nach Thiele [5] und Reißmann [6] erweitert und auf die Geometrie asymmetrischer Schnecken adaptiert werden können. In diesem Zusammenhang gilt es, die Übertragbarkeit zu verifizieren, passende Modellvorstellungen abzuleiten und bestehende Lücken, insbesondere in der Berücksichtigung der Verzahnung der Schnecke, zu schließen.

Das innovative Ergebnis des Vorhabens ist die Etablierung eines Berechnungsmodells für die Verzahnung der Schnecke anhand real ausgeführter Verzahnungsgeometrien. Mit dem Modell steht ein deutschlandweit einzigartiges Berechnungsmodell zur Verfügung, mit dem die Auslegung von Schnecken beliebiger Geometrie über den bisherigen Stand der Technik hinaus erweitert werden kann. Die abgeleiteten Fragestellungen hinsichtlich des in DIN 3996 [2] nicht abgebildeten Zusammenhangs aus Durchbiegung unter Last, Eingriffsfeld und Materialbeanspruchung der Schneckenwelle finden Eingang in einen weiterführenden Forschungsantrag.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Im Vorhaben galt es zunächst, die maßgeblichen Vorarbeiten aufzubereiten und in ein angepasstes Berechnungsmodell zu integrieren. Hierbei müssen zwei Formen asymmetrischer Schneckenverzahnungen unterschieden werden:

- Typ A: Asymmetrie im Eingriffswinkel beider Flanken resultiert in Schneckenverzahnungen mit flankenweise verschiedenen Profilen, aber in Achsrichtung konstanter Zahndicke. Die Schneckenverzahnung ist quasi aus zwei Halbzähnen unterschiedlicher Profile zusammengesetzt.
- Typ B: Asymmetrie im Steigungswinkel beider Flanken führt zu Schneckenverzahnungen mit in Achsrichtung veränderlicher Zahndicke. Diese Verzahnungsform ist als „Duplex“-Schnecke bekannt.

Für beide Typen von asymmetrischen Verzahnungen entwickelte das Forschungsteam in der Folge Berechnungsmethoden.

Typ A lässt sich mit Ausnahme der Schneckenfestigkeit durch Adaption der etablierten Berechnungsansätze (siehe 3. Ziele des Forschungsprojekts) flankenweise beziehungsweise aus zwei Halbzähnen berechnen. In der Folge wurde der Fokus auf die bislang nicht standardisierte Berechnung der Schneckenfestigkeit gerichtet.

Hierbei wurde wie folgt vorgegangen:

- Ableitung der 3D-Geometrie beliebiger Schneckenverzahnungen aus Berechnungsprogrammen und Erweiterung um die korrekte Geometrie der Anschlussgeometrie der Schneckenwelle
- Aufbau eines Finite-Elemente--Berechnungsmodells für symmetrische Verzahnungen und Erweiterung auf asymmetrische Verzahnungsausführungen. Dazu wurden bestehende Berechnungsansätze ausgebaut und auf die Bedingungen einer asymmetrischen Schneckenverzahnung adaptiert
- Anwendung auf Verzahnungen mit verschiedenem Eingriffswinkel
- Berechnungsstudie mit dem aufgebauten Berechnungsmodell und Validierung anhand der Ergebnisse anderer Forschungsstellen
- Zum Zeitpunkt der Berichtslegung befinden sich ein Antragsentwurf zur Einreichung bei der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V. sowie eine Veröffentlichung zur Durchbiegung von Schneckenverzahnungen in Vorbereitung

Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau der Berechnungsmethode. Im Wesentlichen umfasst dieses drei Arbeitsschritte: das Erzeugen beziehungsweise Bereitstellen der zu analysierenden Geometrie, den Aufbau des Modells in einer FEM-Umgebung sowie das Verarbeiten und Aufbereiten der Berechnungsergebnisse im Post-Processing. Die Vorgehensweise lässt sich gleichermaßen auf symmetrische wie auf asymmetrische Verzahnungen anwenden.

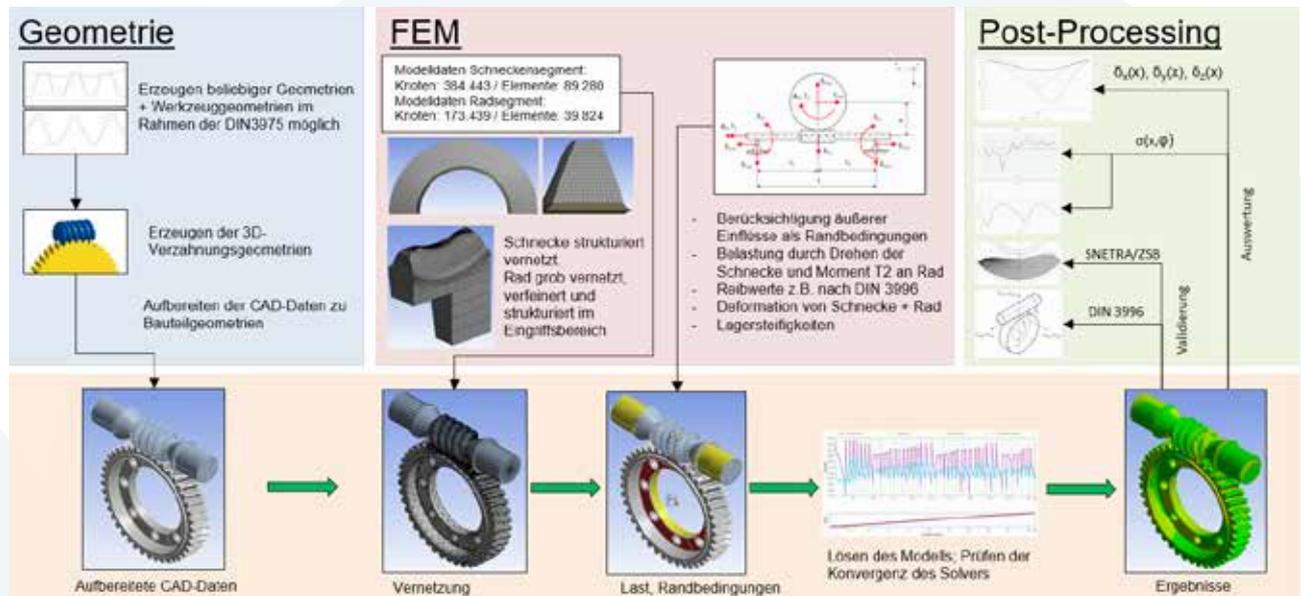


Abbildung 1: Berechnungsgang des Modells; Grafik: Alexander Monz und Johannes Gründer

Geometrie

Die Geometrie der Schneckenverzahnung inklusive zugehörigem Schneckenrad kann unter Zuhilfenahme von Berechnungsprogrammen im Rahmen der DIN 3975 [7] in beliebiger Variation durch Vorgabe elementarer Verzahnungsparameter erzeugt werden. Zur Berechnung des Schneckenrades wird als Bezugsprofil entweder die Geometrie der Schneckenverzahnung oder ein entsprechend daraus abgeleiteter (vergrößerter) Abwälzfräser gewählt. Zur Berücksichtigung geometrischer Größen wie der Steifigkeit und der Durchbiegung ist es für das Berechnungsmodell weiterhin notwendig, die Daten unter Einbezug realer Bauteilgeometrien anzupassen. Die geschieht durch Erweiterung in einer gängigen CAD-Software. Neben den Lagersitzen sind dabei auch Fasen und Kantenbrüche von besonderem Interesse.

Analog erfolgt das Vorgehen zur Erzeugung einer asymmetrisch verzahnten Schnecke. Dafür werden zwei Schneckenmodelle gleicher Geometrie, jedoch mit voneinander verschiedenen Eingriffswinkeln erzeugt. In einem CAD-Programm werden diese Modelle dann kombiniert. Ein Modell dient hierbei als Grundkörper, der um die Verzahnungsgeometrie des zweiten Modells erweitert wird. Die direkte Erzeugung auf Basis der elementaren Verzahnungsdaten ist noch Gegenstand weiterer Arbeiten.

FEM-Modellierung

Für die Berechnung der komplexen, kaum zu vereinfachenden Geometrie der Schneckenverzahnung wird eine FEM-Simulation eingesetzt. Zentral für die Ergebnisqualität ist dabei neben der Basisgeometrie die Vernetzung mit einem für die Analyse ausreichend feinen, zur Reduzierung von Rechenzeit jedoch möglichst groben Netz von gleichzeitig hoher Elementqualität. Die im vorherigen Arbeitsschritt erzeugten Geometrien importiert das Forschungsteam dafür zunächst in das Programm. Es zeigt sich, dass in diesem Falle eine sinnvolle, vom Programm ausgeführte Vernetzung mit dem programmeigenen Vernetzungsalgorithmus der gesamten Geometrie aufgrund der Komplexität nahezu unmöglich ist. Daher erfolgt die Zerlegung der Schnecken- sowie der Radgeometrie in einzelne, strukturiert vernetzbare Elemente. Dies ermöglicht nun eine schrittweise sowie gut steuerbare Vernetzung der Bauteile.

Für die Berechnung eines Schneckengetriebes ist es notwendig, den Kontakt zwischen den Wälzflanken zu modellieren. Hierfür wird ein reibungsbehafteter Mehrfachkontakt zwischen den sich im Eingriff befindenden Flanken der Schnecke und des Rades mit einem parametrierbaren Reibungskoeffizienten definiert. Dieser kann nun im Vorfeld der Simulation beispielsweise nach DIN 3996 [2] für konkrete Lastfälle berechnet oder im Experiment ermittelt und derart in die Modellierung mit eingespeist werden.

Die Einflüsse der Lager- und Gehäusesteifigkeiten und deren Verformung unter Last sind weitere wesentliche Aspekte bei der Auslegung von Schneckengetrieben, da diese das Tragbild und somit die Materialbeanspruchung durch veränderte Lastübertragung beeinflussen. Die Berechnungsmethode bietet die Möglichkeit, den Einfluss der Verformung der Lager an der Schneckenwelle (Fest- und Loslagerung) sowie das Schneckenrad in der Berechnung als Randbedingungen zu berücksichtigen. Hierfür werden im Vorfeld entsprechende Lagerverformungen definiert. Eine Erweiterung des Modells um die entsprechenden Lagersteifigkeiten und somit die iterative Berücksichtigung von deren Verformungen ist projektiert. Das Gehäuse wird zum jetzigen Zeitpunkt als steif angenommen.

Die Berechnung erfolgt als quasistatisches Modell. Um die Last in das Modell einzuleiten, wird das Drehmoment am Schneckenrad vorgegeben und die Schneckenwelle weggesteuert um einen bestimmten Winkel in kleinen Schritten gedreht. Dadurch wird der Flankenkontakt realitätstreu abgebildet und der Abwälzvorgang unter Last berechnet.

Post-Processing

Im Post-Processing erfolgt die Auswertung und Darstellung der ermittelten Spannungen, Dehnungen, Verformungen sowie des Verhaltens im Kontaktbereich. Die Auswertung entlang etablierter Pfade bietet die Möglichkeit des Abgleichs mit bestehenden analytischen Lösungsprogrammen (SNETRA [8], ZSB [9]). Die Schnittstelle ist offen und die Daten können zur Auswertung auch in andere Programme übernommen werden. Das Modell wurde mittels Betrachtung der Kontaktverhältnisse zwischen den Wälzpartnern umfangreich validiert. Berührlinien und die Lastverteilungen decken sich dabei vollständig mit Referenzrechnungen in den Programmen SNETRA [8] und ZSB [9]. Ebenso ermöglicht die Betrachtung des Kontakts Aussagen über die Art des Eingriffs sowie kritische Zonen der Beanspruchung (Rissausgang, plastische Deformation).

Eine kritische Größe für die Belastung von Schneckenwellen stellt deren Durchbiegung unter Last dar, da sich das Tragbild bei größeren Biegewerten bis hin zu Eingriffsstörungen verschlechtert. Das erarbeitete Modell ermöglicht durch die Simulation des Abwälzvorgangs unter Last eine realitätsgetreuere Analyse der tatsächlichen im Lastfall auftretenden Durchbiegung als bisherige übliche Verfahren. Bislang üblich war lediglich das punktförmige Aufbringen der nach DIN 3996 [2] berechneten Radialkraft.

Anwendung des Modells auf asymmetrische Verzahnung

Das Modell wurde im Verlauf des Vorhabens zur Anwendung auf asymmetrische Verzahnungen erweitert. Hierbei werden als Alternative zur Simulation des Abwälzvorgangs auf die Flanken der asymmetrischen Schneckenwelle Berührlinien aufgeprägt. Diese Berührlinien entsprechen in Ausprägung und Orientierung denen mit dem Modell im Eingriff auftretenden errechneten Berührlinien zwischen symmetrisch verzahnter Schnecke und Rad.

Eine Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse anhand eines Modells der Standard-Referenz-Verzahnung nach DIN 3996 [2] ($a = 100\text{mm}$, $i = 20,5$, Flankenform ZI) mit einer modifizierten asymmetrischen Variante zeigt Abbildung 2 für eine Last von $T_2 = 670\text{ Nm}$. Die symmetrische Verzahnung wird mit einem Normaleingriffswinkel $\alpha_0 = 20^\circ$ und die asymmetrische Verzahnung auf der einen Seite mit $\alpha_{0,A} = 18^\circ$ und auf der anderen Seite mit $\alpha_{0,B} = 20^\circ$ ausgeführt. Es wird der Lastfall eines Einzeleingriffs betrachtet, bei dem die gesamte Last im Eingriff von einem Zahn getragen wird. Die bei Moment T_2 wirkenden Zahnkräfte werden für beide vorhandenen Eingriffswinkel nach DIN 3996 [2] berechnet und entsprechend ihrer Wirkrichtung auf die Berührfläche eingeleitet. Die Kräfte in x- und in z-Richtung sind für beide Fälle identisch, die Kraft in y-Richtung ist in Abhängigkeit des Eingriffswinkels veränderlich, wobei sie für kleiner werdende Eingriffswinkel kleiner und für größer

werdende Eingriffswinkel größer wird. Einflüsse der Normaleingriffswinkel auf die Reibungsverhältnisse im Kontakt wurden nicht berücksichtigt.

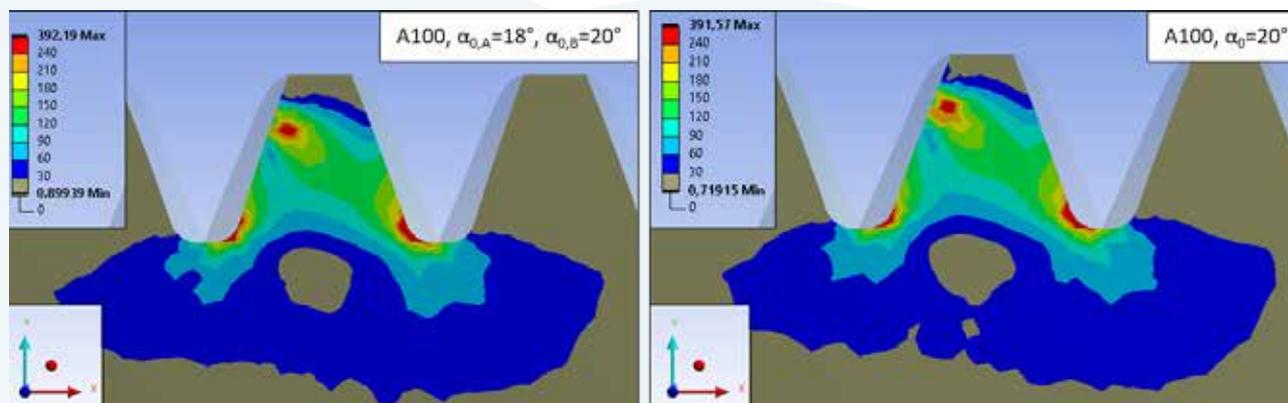


Abbildung 2: Vergleichsspannungen nach von Mises für asymmetrische (links) und symmetrische Schneckenverzahnung (rechts); Grafik: Alexander Monz und Johannes Gründer

Die Analyse der Spannungen im Axialschnitt der Zähne lässt hier ohne Berücksichtigung der veränderlichen Reibungsverhältnisse zunächst keine nennenswerten Unterschiede in der Materialbeanspruchung erkennen. Durch die Abhängigkeit der radialen Zahnkraft in y-Richtung besteht jedoch ein Unterschied in der Ausprägung und im Maximalwert der Biegelinie der beiden Wellen, siehe Abbildung 3.

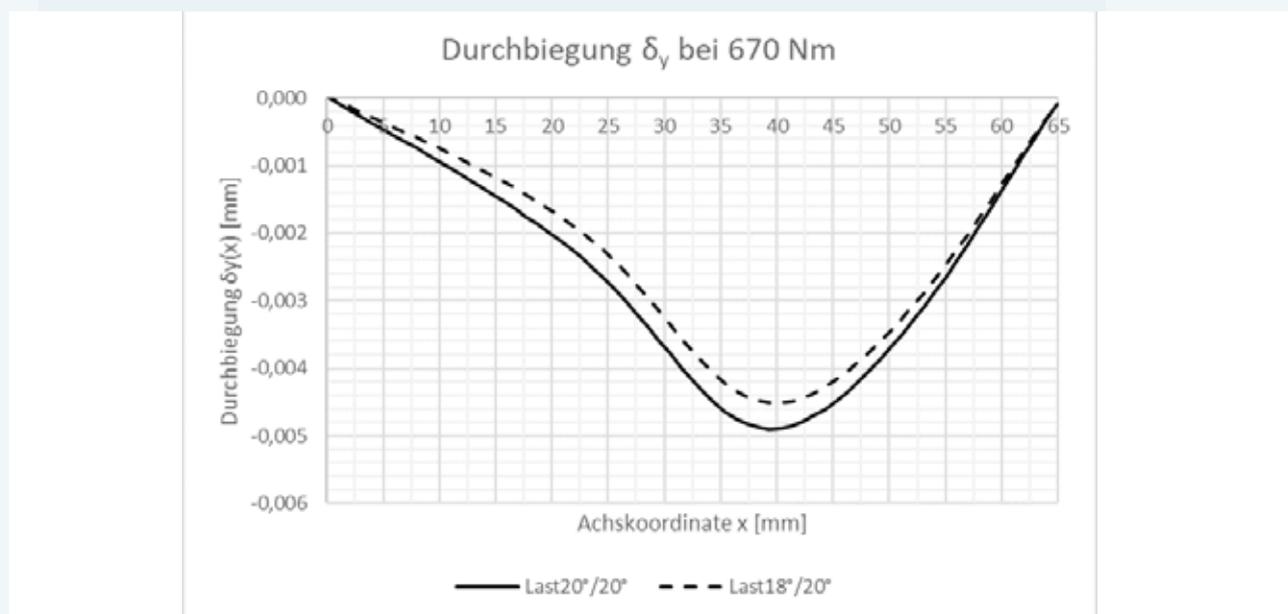


Abbildung 3: Durchbiegung der Schneckenwellenachse bei symmetrischer und asymmetrischer Verzahnung; Grafik: Alexander Monz und Johannes Gründer

Dieser Einfluss des Eingriffswinkels ist bislang nicht in den gängigen Berechnungsmethoden abgebildet. Da für die Tragfähigkeit der Schneckenwelle jedoch wie dargelegt bislang kein Auslegungsverfahren existiert, das über die Betrachtung der Durchbiegung gegen einen Grenzwert hinaus geht, bietet sich hier ein erhebliches Potenzial für eine Detaillierung der Auslegung.

Die asymmetrische Verzahnung vom Typ B (flankenweise verschiedener Steigungswinkel) ist in Hinblick auf eine geometrisch eindeutige Benennung bislang nicht beschrieben. Ebenso existieren keine Berechnungsansätze für diesen Verzahnungstyp. Zur Schaffung der zunächst benötigten Grundlagen gingen die Beteiligten daher wie folgt vor:

- Formulierung eines DIN-Normungsvorschlags zur oben genannten Verzahnungsart
- Abstimmung des Entwurfs mit den in Deutschland ansässigen Unternehmen, die den entsprechenden Verzahnungstyp im Portfolio haben
- Zum Zeitpunkt der Berichtslegung ist der Entwurf abgestimmt und wird in der nächsten Sitzung des DIN-Normungsausschusses vorgestellt.

5. Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Mit den Ergebnissen des Vorhabens lassen sich Schneckenverzahnungen beliebiger Geometrie unter Berücksichtigung der Herstellgeometrie hinsichtlich ihres Verformungsverhaltens sowie ihrer Materialbeanspruchung beschreiben. Damit können biegekritische Schneckenverzahnungen betrachtet und derart bestehende Auslegungsreserven genutzt werden. Das Ergebnis sind leistungsdichtere oder ressourcenschonendere, weil kleinere Schneckenverzahnungen. Die Anwendung des Modells erlaubt eine kürzere „Time-to-Market“, da überkritische Biegungen nicht mehr zwingend in aufwändigen Experimenten validiert werden müssen. Beide Anwendungen wurden bereits von industriellen Anwendern angefragt.

Die Beschreibung und Dokumentation des Berechnungsmodells sowie die geplante Weiterentwicklung im Rahmen eines Anschlussvorhabens erlaubt die Verstetigung der gewonnenen Erkenntnisse und deren fortgesetzte Anwendung/Erweiterung.

Unmittelbare Ergebnisse des Vorhabens sind primär ein Folgeantrag, eine geplante Veröffentlichung zur Durchbiegung sowie ein Normungsentwurf. Über diese Maßnahmen ist es gelungen, das eigene Kompetenzprofil auszubauen und zu schärfen.

Aus dem Vorhaben abgeleitete Fragestellungen bearbeiten Studierende im Rahmen einer Masterarbeit und zweier Bachelorarbeiten. Zudem finden sie Eingang in das Berechnungsmodell. Damit ist der Übertrag der wissenschaftlichen Erkenntnisse in die Lehre gewährleistet. Erarbeitete Vorgehensweisen und Erkenntnisse werden damit auch in die Industrie übertragen.

6. Literatur

- [1] KAPELEVIC, T.: „Vorteile durch Asymmetrie“, VDI-Z 03-2017, S.68-70 (2017)
- [2] DIN 3996 – 2019-09: Tragfähigkeitsberechnung von Zylinder-Schneckengetrieben mit sich rechtwinklig kreuzenden Achsen (2019).
- [3] RANK, B.: Untersuchungen zur Grübchenbildung bei Zylinderschneckengetrieben. Dissertation, TU München (1996).
- [4] STAHL, K., HÖHN, B.-R., HERMES, J., MONZ, A.: Pitting resistance of worm gears: Advanced model for contact pattern of any size, position, flank type. Gear Technology, October 2012. Pp. 44-49 (2012) Zylinderschneckengetrieben. Dissertation, TU München (1984).
- [5] THIELE, R., LEIDICH, E.: Zahnfuß-Tragfähigkeitsberechnung für Schneckenräder auf Basis des Zahnfuß-schädigungskonzeptes; FVA-Forschungsvorhaben Nr. 375 I + II, Heft 784, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt/Main (2014)
- [6] REISSMANN, J., LEIDICH, E.: Optimierung der Zahnfuß-Tragfähigkeit von Schneckenrädern; FVA-Forschungsvorhaben Nr. 375 VI, Heft 1008, Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V., Frankfurt/Main (2013)
- [7] DIN 3975-1 – 2017-09: Begriffe und Bestimmungsgrößen für Zylinder-Schneckengetriebe mit sich rechtwinklig kreuzenden Achsen – Teil 1: Schnecke und Schneckenrad (2017).
- [8] SIGMUND, W.: Untersuchung und Simulation des Verschleißverhaltens von Schneckengetrieben mit unvollständigem Tragbild. Dissertation TU München (2015).
- [9] PREDKI, W.: Hertzsche Drücke, Schmierpalhöhen und Wirkungsgrade von Schneckengetrieben. Dissertation Ruhr Universität Bochum (1982).

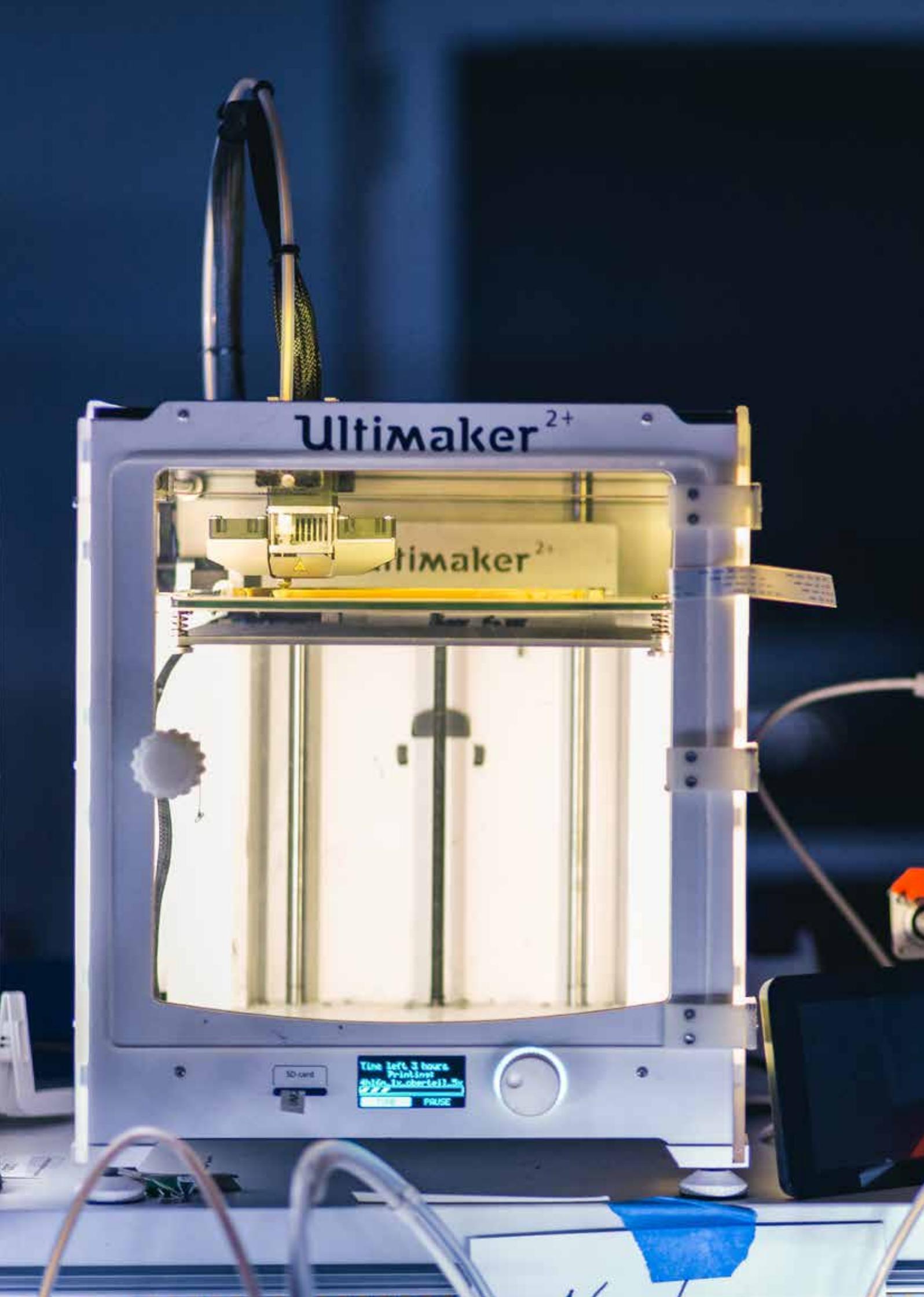


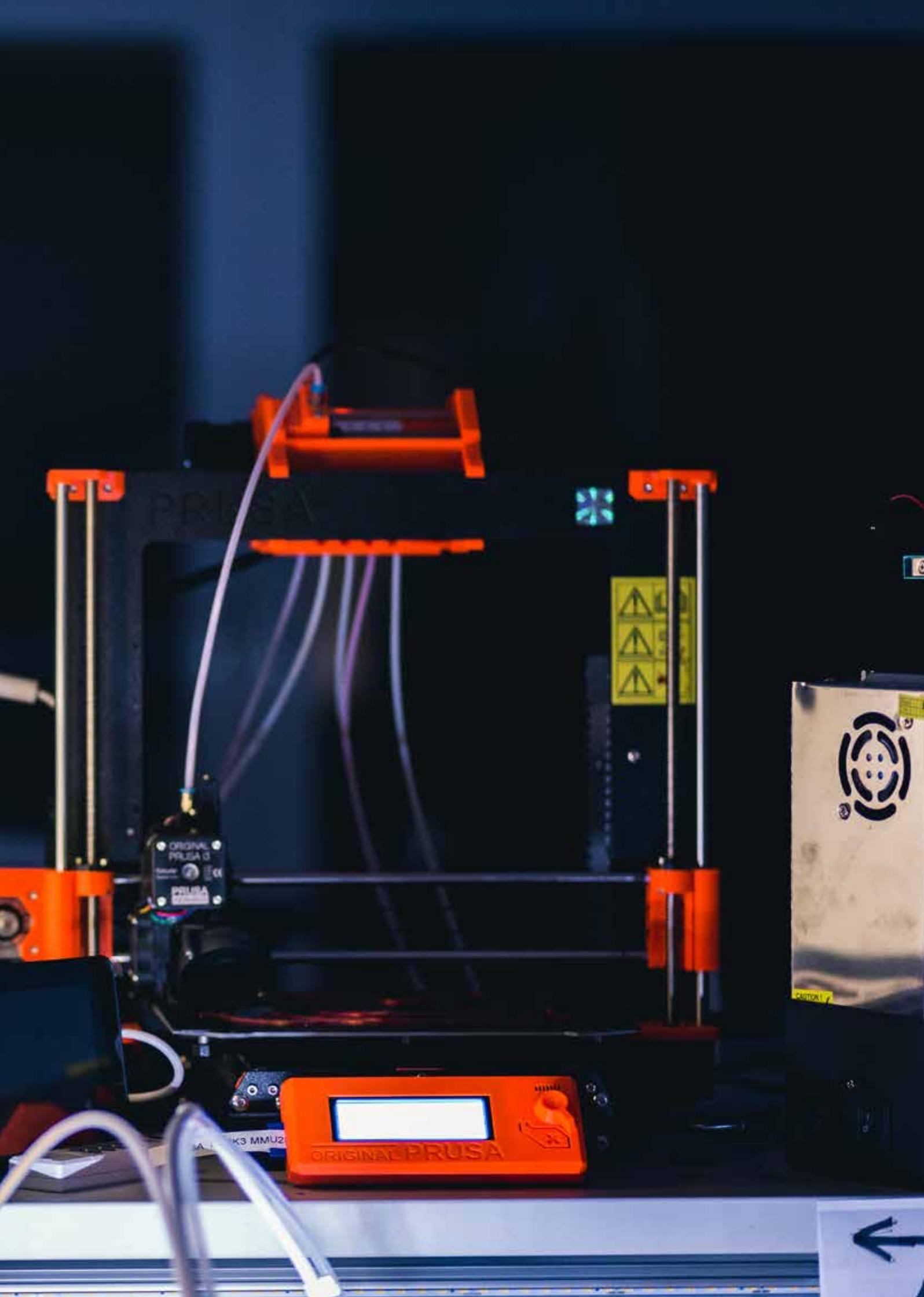
Ultimaker²⁺

Ultimaker²⁺

Time left: 3 hours
Printing: In progress
PAUSE

SD card





ORIGINAL PRUSA 3
PRUSA
MMU2+

ORIGINAL PRUSA

MMU2+





Digitaler (3D-) Lebensmitteldruck in Europa: Geschäftsmodelle und Lieferkettenaspekte

Prof. Dr. Helen Rogers
Fakultät Betriebswirtschaft
TH Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Basierend auf bisherigen Forschungsarbeiten, die sich mit den geschäftlichen Aspekten des 3D-Lebensmitteldrucks auseinandersetzen, wird das Projekt im ersten Schritt Anwendungen des 3D-Lebensmitteldrucks in europäischen, insbesondere in deutschen Unternehmen identifizieren, damit verbundene Geschäftsrisiken sowie Chancen bewerten und die allgemeine Nachfrage der Konsumenten nach 3D-gedruckter Nahrung messen.

Verstärkt beleuchtet das Forschungsteam dabei neu entstehende Geschäftsmodelle und Lieferkettenauswirkungen.

Anschließend soll im zweiten und wichtigsten Schritt ermittelt werden, wie erste Erfolge von additiver Lebensmittelherstellung in nachhaltige Erfolge umgewandelt werden können.

1. Projektdaten

Fördersumme	30.100 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2020
Fakultät	Betriebswirtschaft/International Management
Projektleitung	Prof. Dr. Helen Rogers
Kontaktdaten	helen.rogers@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Der 3D-Lebensmitteldruck, auch bekannt als additive Lebensmittelherstellung, ist eine interessante sowie emotionsbetonte Geschäftsidee, welche die Fantasie neugieriger Konsumentinnen und Konsumenten, Umweltschützerinnen und -schützer sowie Unternehmerinnen und Unternehmer anregen und mediale Aufmerksamkeit bekommen konnte.

Auch wenn sich die Technologie aktuell noch größtenteils im Stadium der Entwicklung befindet, kann die Quintessenz des Konzepts bereits erklärt werden: 3D-Lebensmitteldruck ermöglicht die Anfertigung einer personalisierten Mahlzeit, die basierend auf Ihren persönlichen Bedürfnissen (Alter, Aktivitätsniveau) eine bestimmte Anzahl an Nährstoffen sowie Kalorien enthält. Zusätzlich können allergisch bedingte Reaktionen (zum Beispiel aufgrund von Nüssen) vorgebeugt werden, da die Inhaltsstoffe der Nahrung flexibel anpassbar sind.

Die Möglichkeit, Nährstoffanzahl und Inhaltsstoffe flexibel an persönliche Bedürfnisse anpassen zu können, verringert nicht nur allgemeine Verschwendung, ausgelöst davon, dass jeder nur noch die Nahrungsmittel druckt, die sie/er wirklich braucht/verzehrt, sondern bietet zusätzlich ernstzunehmende Optionen für Menschen mit besonderen Ernährungsbedürfnissen (altersbedingt, Allergien und/oder fleischfreier Lebensstil) (Despeisse et al., 2017; McClements, 2019; Rogers and Streich, 2019). Stellen Sie sich vor, Sie möchten zum Beispiel einen Snack auf Obstbasis in Form einer Erdbeere essen. Alles, was Sie tun müssen, ist Ihren 3D-Drucker einzuschalten, und Minuten später ist Ihr Snack zubereitet und für Sie zum Verzehr bereit.

Oben genannte Vorteile/Chancen verkörpern selbstverständlich eine attraktive Zukunftsvision der additiven Lebensmittelherstellung, die etwas von der Realität abweicht. Denn 3D-Drucker für Lebensmittel sind zwar bereits im Handel erhältlich, werden aber größtenteils für Nischenanwendungen eingesetzt, beispielsweise für die

Zubereitung von leicht zu verzehrenden, aber optisch ansprechenden Mahlzeiten für Menschen mit Kau-/Schluckbeschwerden und für personalisierte Süßwaren (zum Beispiel hochwertige Schokolade).

Zeitgleich besteht die Unwissenheit, ob die Technologie der additiven Lebensmittelherstellung in der breiten Masse Fuß fassen kann. Denn auch wenn Studien darauf hindeuten, dass Verbraucher immer offener für alternative Nahrungsquellen (Insekten, Algen, Rübenblätter) sind, um ihre Geschmacksbedürfnisse zu befriedigen, führt das Konzept einer gedruckten Mahlzeit bei vielen Verbrauchern zu dem Gedanken, die Nahrung sei künstlich und stark prozessiert. Zudem bleiben in Bezug auf Rohstoffwahl, Materialien, Sicherheit, Legalität und Lieferketten weiterhin viele Schlüsselfragen ungeklärt (Brunner et al., 2018; Dabbene et al., 2018; D’Aveni, 2019).

Abschließend besteht die begründete Annahme, dass sich Anwendungen, Verfahren und Materialien der additiven Lebensmittelherstellung durchaus in der breiten Masse durchsetzen, sollten sich aktuelle Trends fortsetzen und Schlüsselfragen klären können.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Aufbauend auf früheren Forschungsergebnissen wird dieses Projekt bestehende Anwendungen der additiven Lebensmittelherstellung bewerten, wobei der Schwerpunkt auf neu entstehenden Geschäftsmodellen und Auswirkungen auf die Lieferkette liegt (Braziotis et al., 2019; Chaudhuri et al., 2019; Rogers et al., 2016, Rogers and Braziotis, 2020). Genauer gesagt soll das Projekt die derzeit vorliegenden Technologiegrenzen der 3D-Lebensmitteldrucker identifizieren und klassifizieren. Das andere Hauptziel ist, festzustellen, welche Anforderungen an Angebot und Nachfrage erfüllt beziehungsweise geklärt werden müssen, damit 3D-Lebensmitteldrucker die Massen erreichen. Das Gesamtziel besteht darin, die Auswirkungen des 3D-Lebensmitteldrucks auf Leistungsziele und Ressourcenanforderungen besser zu verstehen.

Der methodische Zugang des Forschungsteams war (Corona-bedingt) hauptsächlich nur durch sekundäre Quellen möglich. Zu diesen zählten Industrierberichte, Regierungsstatistiken, Verbraucherstudien, Zeitschriftenartikel und Firmenberichte. All das wurde durch ausgewählte Umfragen in akademischer sowie praktischer Form ergänzt.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Die Forschung identifizierte aktive Schlüsselakteurinnen und -akteure der 3D-Lebensmitteldruck-Industrie und bestätigte schnell, dass die Branche derzeit noch unausgereift ist und noch einen hohen Bedarf an weiteren Investitionen sowie Entwicklungen hat. Von Erstausrüstern hergestellte Systeme/Original Equipment Manufacturers (OEMs) und Komponenten werden in das Produkt eines anderen Unternehmens integriert. Die Idee besteht dabei darin, von der Expertise der OEM zu profitieren und Teile/Zubehör zu bündeln, um das Endprodukt an die Endkundin beziehungsweise den Endkunden liefern zu können. Lebensmittelherstellerinnen und -hersteller kaufen 3D-Lebensmitteldrucker entweder von einem OEM oder entwerfen ihren eigenen, um ihn direkt an ihre Bedürfnisse anpassen zu können. In dieser Studie konnten wir zehn Lebensmittelherstellerinnen und -hersteller und sieben OEMs identifizieren, die hauptsächlich in Europa und den USA angesiedelt sind. Die Studie identifizierte außerdem 18 Hauptforschungsinstitute. Insgesamt waren die Hauptakteurinnen und -akteure zwischen Europa (74 Prozent) und den USA (23 Prozent) aufgeteilt. Bei den Forschungsinstituten dominiert Europa mit einem Anteil von über 80 Prozent. Innerhalb der Forschungsinstitute sind die Niederlande, Schweden und Deutschland am aktivsten. Selbige leiten zudem Initiativen, die den nachhaltigen Verbrauch und Anbau von Lebensmitteln fördern. Die europäischen Schlüsselakteurinnen und -akteure sind in Abbildung 1 aufgelistet.



1. RISE	18. Weihenstephan-Triesdorf University of Applied sciences
2. TNO	19. Print2Taste Mycusini
3. Wageningen University and Research	20. byFlow Focus
4. Eindhoven University of Technology	23. Choc Edge Choc Creator V2 Plus
7. F3D	26. Natural Machines Foodini
8. Politecnico di Milano	27. Print2taste procusini 4.0
9. Hague University of Applied Sciences	29. ZMorph VX + Thick Paste Extruder
10. Robots in Gastronomy	31. Findus
11. Upprinting food	32. Solina
12. The University of Nottingham	33. Fazer Food Sevicecs
14. Nuremberg University of Applied Sciences GSO	34. Barilla
15. Kristianstad University	36. Redefine Meat
16. Cellink Life Sciences	37. Nova Meat
17. Lund University	

Abbildung 1: Schlüsselakteurinnen und -akteure in Europa; Grafik: Helen Rogers (based on Google Maps)

Umfrage

Die Akzeptanz von 3D-Lebensmitteln ist schwer zu ermitteln, da 3D-Lebensmittel derzeit noch nicht allgemein bekannt sind. Um eine Einsicht in diesen Bereich zu gewinnen, setzte sich die Forschung deshalb zuerst mit vergleichbaren Nahrungsalternativen auseinander, die bereits erhältlich sind. Im Zuge dessen wurde eine Umfrage hinsichtlich der Einstellungen gegenüber alternativen Proteinen mit 300 Teilnehmerinnen und Teilnehmern durchgeführt und ausgewertet. Das Ergebnis könnte darauf hinweisen, dass die Ähnlichkeit der 3D-gedruckten Nahrung mit echtem Fleisch eine wichtige Eigenschaft ist, da Verbraucherinnen und Verbraucher jene Produkte meist als Ersatzprodukte für normales Fleisch betrachten. 3D-gedruckte Lebensmittel sind in dieser Hinsicht relativ vorteilhaft, weil die Extrusion eine bessere Imitierung des Fleischgewebes ermöglicht. Erstaunlich ist, dass der Umfrage zufolge Nachhaltigkeitsvorteile von 3D-Lebensmitteln (niedrigere CO₂-Bilanz, weniger Lebensmittelabfälle) wichtiger sind, als potenzielle Gesundheitsvorteile durch gesunde Zusatzstoffe. Trotz der hohen Akzeptanz hinsichtlich der aktuell vermarkteten alternativen Proteine kann keine Akzeptanz hinsichtlich 3D-gedruckter Nahrung beobachtet werden. Merkwürdig dabei ist, dass es in Verbindung mit dieser Akzeptanz starke regionale Unterschiede gibt. Das sieht man daran, dass 37 Prozent der in Deutschland wohnenden Teilnehmerinnen und Teilnehmer dem Satz „3D-gedruckte Nahrung, die auf meine persönlichen Bedürfnisse abgestimmt ist, finde ich gut.“ überhaupt nicht zustimmen, während nur 18 Prozent der nichtdeutschen Teilnehmerinnen und Teilnehmer diese Meinung teilen. Um die Gründe hierfür weiter zu erforschen, ist eine weitere Studie nötig.

Geschäftsmodell

3D-Lebensmitteldruck bedient einen Nischenmarkt und muss anpassungsfähige Geschäftsmodelle akkommodieren (Rogers and Dastidar, 2020). Anders formuliert müssen Unternehmen Art und Weise ändern, mit der sie Werte schaffen, liefern und erwirtschaften, sowie mit den raschen Veränderungen ihres Umfelds Schritt halten, um mit potenziellen Beeinträchtigungen zurechtzukommen. In diesem Zusammenhang sind in Abbildung 2 mehrere, miteinander verbundene Kanäle dargestellt, die eine Zusammenarbeit (einschließlich des Austauschs von Ressourcen) ermöglichen.

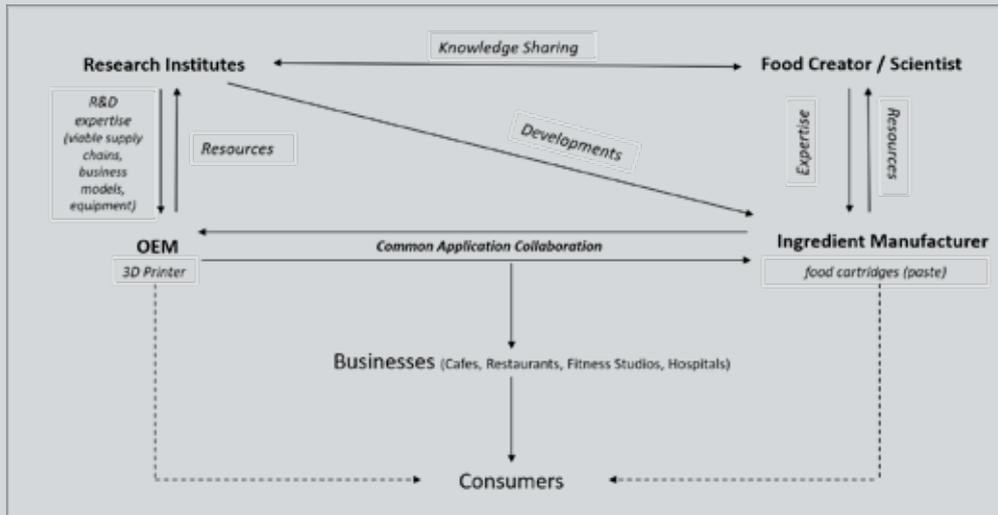


Abbildung 2: Wertschöpfungskette des offenen Geschäftsmodells. Grafik: Helen Rogers

Die Akteurinnen und Akteure des 3D-Lebensmitteldrucks müssen ein gesundes Gleichgewicht zwischen Material und Technologie finden, da allein diese zwei Faktoren über Prozessstabilität und Produktqualität entscheiden. Eine Möglichkeit, sich dieses benötigte Wissen anzueignen, ist die Schließung partnerschaftlicher Zusammenarbeiten mit Zubehörherstellerinnen und -herstellern. Auch Endbenutzerinnen und -benutzer können sich an Partnerschaften beteiligen und innerhalb dieser neue Anwendungen entwickeln, die bisher unerfüllte Bedürfnisse befriedigen. Lebensmittelschöpferinnen und -schöpfer, Köchinnen und Köche sowie Lebensmittelwissenschaftlerinnen und -wissenschaftler können mit Erstausrüstern sowie mit Lebensmittelherstellerinnen und -herstellern zusammenarbeiten, um ihre Bedürfnisse zu definieren (zum Beispiel Konsistenz, Geschmack und Temperatur). Ein Geschäftsmodell sollte also nicht nur die Abläufe und Aktivitäten der Wertschöpfungskette verstehen, sondern auch mit der Gesamtstrategie des Unternehmens übereinstimmen.

Diskussion

Unsere Ergebnisse weisen darauf hin, dass es im Hinblick auf eine vertikale Integration innerhalb der 3D-Lebensmitteldruck-Industrie hohe Chancen gibt. Es ist wahrscheinlich, dass sich Unternehmen integrieren, um aus niedrigeren Stückkosten zusätzlichen Nutzen zu ziehen. Ein Hauptproblem für die 3D-Lebensmitteldruck-Industrie ist der Mangel an vereinbarten Standards hinsichtlich der Eingangsmaterialien. Unternehmen brauchen deshalb Modelle, die Quellen von Lebensmittelzutaten klar und präzise zurückverfolgen können. Ein weiterer Aspekt der 3D-Lebensmitteldruck-Industrie, der oft übersehen wird, ist die von jeder Akteurin und jedem Akteur geleistete „Beratung“.

Da es sich um einen aktuell aufstrebenden Industriezweig handelt, ist das Wissen knapp. Daher benötigen viele Akteurinnen und Akteure entlang der Lieferkette Beratung und Fachwissen (zum Beispiel hinsichtlich der Verfeinerung ihrer Produktionsprozesse). Das wiederum zwingt Unternehmen, gebührenfreie Beratung anzubieten, nur um ihr Produkt verkaufen zu können. Außer Natural Machines wurde in diesem Zusammenhang kein Unternehmen gefunden, das für derartige Beratungs-Dienstleistungen Gebühren verlangte. Das Argument, dass 3D-Lebensmitteldruck allgemeine Arbeitskosten senken würde, ist zu zukunftsbezogen, da das Nachfüllen und Warten von Patronen derzeit erhebliche Handarbeit erfordert. Skeptikerinnen und Skeptiker bezweifeln, dass es möglich ist, konstant große Mengen an Lebensmitteln zu drucken, und aktuell existiert in dieser Hinsicht auch noch keine Massenproduktion. Darüber hinaus ist die Auswahl an druckbaren Lebensmitteln begrenzt, da jede Zutat ihre eigene Patrone benötigt und eine reihenfolgentechnisch gesehen korrekte Anordnung mehrerer Patronen innerhalb einer aktuellen 3D-Lebensmitteldruck-Maschine derzeit noch eine Herausforderung ist.

Die 3D-Lebensmitteldruck-Industrie muss Kundinnen und Kunden daher immer noch von ihren Werten jenseits der Nischenanwendungen überzeugen. Der Traum von personalisierten Lebensmitteln auf Abruf bleibt unerreichbar.

5. Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Ein Bereich, in dem die 3D-Lebensmitteldruck-Industrie konkretes Potenzial hat, ist in der Ausarbeitung und Gestaltung von alternativen Fleischprodukten. Aktuell verwenden Unternehmen „pflanzliches Fleisch“, gewonnen aus Soja-Bohnen und Erbsen. Der allgemeine Verbrauch von „pflanzlichen Fleischprodukten“ stieg in den USA von 2017 bis 2019 um 31 Prozent (Good Food Institute, 2019). Laut eines McKinsey-Berichts stieg das Interesse der Verbraucherinnen und Verbraucher an veganer Ernährung zwischen 2015 und 2019 jährlich um 16 Prozent (Zafer et al., 2019). In den USA wuchs die alternative Fleischindustrie im Jahr 2019 um 19 Prozent (obwohl Fleisch auf pflanzlicher Basis nur ein Prozent des gesamten Fleischumsatzes in Dollar ausmacht).

Gründe für den langsamen Durchbruch von „pflanzlichem Fleisch“ liegen im Geschmack und der Konsistenz. Beide Faktoren könnten mithilfe der additiven Lebensmittelherstellung verbessert werden, da der Schichtauf-Schicht-Extrusionsprozess der 3D-Lebensmittelherstellung fleischliche Muskelfasern realitätsnah nachahmen kann. Heute sind alternative Proteine vielleicht teurer als herkömmliches Fleisch, aber zusätzliche Nachfragen, weitere technologische Fortschritte und zusätzlich kooperative Geschäftsmodelle werden dem Markt nicht nur weitere Akteurinnen und Akteure, sondern auch kontinuierliches Wachstum bescheren. Es wird deshalb interessant werden, inwieweit zukünftige Innovationen und Forschungen unser bisheriges Konsumverhalten verändern werden.

Dieses Projekt diente als Basis für Folgendes:

- 1. Aufsicht:** Im Rahmen dieses Projekts verfassten Studierende zwei Bachelor- und Masterarbeiten, deren Ergebnisse in eine längerfristige Kooperation mit der University of Nottingham (UoN), UK, für eine kooperative Doktorarbeit einfließen (mit Dr Christos Braziotis, UoN).
- 2. Internationale Veranstaltungen:** Die Ergebnisse waren auf der virtuellen „Logistics Research Network Konferenz“ im September 2020 präsentiert. Zwei weitere Konferenzbeiträge sind schon zugesagt: am „25. Internationalen Symposium für Logistik“ und an der „6. Food Supply Chain Conference“ (beide Coronabedingt von 2020 auf 2021 verschoben).
- 3. Zeitschrift-Publikationen:** Ein Paper ist „in Prüfung“ bei der Zeitschrift „International Journal of Logistics Management“. Ein zweites Paper, adressiert an die Zeitschrift „Technology Forecasting and Social Change“, ist derzeit in Planung.
- 4. Finanzierung:** Das Projekt war ein wichtiger Baustein, um einen Antrag für längerfristige Finanzierung auf europäischer Ebene vorbereiten zu können. Geplant ist, das Netzwerk globaler, akademischer sowie praktischer Partner auszubauen und einen Antrag im Sommersemester 2021 einzureichen.

6. Literatur

- Braziotis, C., Rogers H., and Jimo, A. (2019) Strategic Deployment of 3D Printing: The Supply Chain Perspective, *Supply Chain Management: An International Journal*, 24 (3), pp.397-404.
- Brunner, T., Delley, M. and Denkel, C. (2017) Consumers' attitudes and change of attitude toward 3D-printed food. *Food Quality and Preference*, 68, pp. 389-396.
- Chaudhuri, A., Rogers, H., Soberg, P., and Pawar, K. (2019) Identifying future 3D printing related services: in-sights from Denmark and Germany, *Industrial Management and Data Systems*, 119 (6), pp. 1189-1205.
- Dabbene, L., Ramundo, L. and Terzi, S. (2018) Economic model for the evaluation of 3D food printing, *Pro-ceedings of IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation*, Stuttgart, Germany.
- D'Aveni, R. (2019) *The Pan-Industrial Revolution*, Houghton Mifflin Harcourt Publishing.
- Despeisse, M., Baumers, M., Brown, P., Charnley, F., Ford, S., Garmulewicz, A., Knowles, S., Minshall, T., Mortara, L., Reed-Tsochas, F., and Rowley, J. (2017) Unlocking value for a circular economy through 3D print-ing: A research agenda, *Technological Forecasting and Social Change*, 115, pp. 75–84.
- Good Food Institute. (2019). 2019 U.S. State of the Industry Report Plant-Based Meat, Eggs, and Dairy.
- McClements, D. (2019) *Future Foods: How Modern Science is Transforming the Way We Eat*. Cham: Springer, pp.9-14.
- Rogers, H., Baricz, N. and Pawar K. (2016) 3D Printing Services: Classification, Supply Chain Implications and Research Agenda, *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 46 (10), pp. 1-22.
- Rogers, H. and Braziotis, C. (2020), Operationalisation of 3D Printing Service Provision, Eysers, D. (Ed.), *Man-aging 3D Printing: Operations Management for Additive Manufacturing*, Springer, pp. 161-178.
- Rogers, H and Dastidar R (2020) What is 3D printed food and what does it mean for supply chains? *Logistics Research Network*, Cardiff, UK (Virtual conference) Sept. 2020.
- Rogers, H. and Streich, A. (2019) 3D food printing in Europe: Business model and supply chain aspects, *Pro-ceedings of the 24th International Symposium on Logistics*, Würzburg, Germany.
- Zafer B, McCullough, R., Liane Ong, L. and Ramirez, M. (2019). *Alternative proteins: The race for market share is on*. McKinsey & Company.







Wohnungslose Menschen in Figurationen

Prof. Dr. Frank Sowa
Benedikt Rösch, M.A.
Fakultät Sozialwissenschaften
TH Nürnberg

Wesentliche Projektziele

In einer Machbarkeitsstudie erforschte das Projektteam, inwiefern der Begriff der Figuration (Elias) geeignet ist, um bislang nicht berücksichtigte oder unentdeckte Aspekte des sozialen Phänomens Wohnungslosigkeit sichtbar zu machen und in für die Praxis anwendbare Erkenntnisse zu transformieren. Mit diesen Ergebnissen sollten weitere Mittel für ein mindestens zweijähriges Forschungsprojekt eingeworben werden.

1. Projektdaten

Fördersumme	35.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2020
Fakultät	Sozialwissenschaften
Projektleitung	Prof. Dr. Frank Sowa
Kontaktdaten	frank.sowa@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Menschen ohne eigene Wohnung leben in einer biografisch prekären Lebenssituation, die mit einem Mangel an ökonomischen, kulturellen und sozialen Ressourcen einhergeht. Aus der Perspektive der bürgerlichen, kapitalistischen (Leistungs-)Gesellschaft erscheint das Leben ohne eigene Wohnung als nicht-konformes, abweichendes Verhalten. Robert K. Merton (1995) erklärte dieses Verhalten mit dem sozialen Tatbestand, dass bestimmte Bevölkerungsgruppen die kulturell definierten Ansprüche und Ziele nicht weiterverfolgen können, da ihnen die sozial strukturierten Wege und Mittel zur Realisierung dieser Ansprüche verwehrt werden. Diejenigen, die sowohl die gesellschaftlich akzeptierten Ziele als auch die legalen Mittel zur Zielerreichung ablehnen, reagieren mit einem Rückzug aus der bürgerlichen Gesellschaft. Mit dem Verfolgen dieser Handlungsstrategie geht ein Bedeutungsverlust von allgemein anerkannten Werten und Normen einher und führt zu einem Leben am ‚Rand der Gesellschaft‘. Wissenschaftliche Forschung fokussierte sich daher häufig auf die Wege in die und aus der Wohnungslosigkeit, um nachzuvollziehen, wie präventiv ein ‚Herausfallen‘ aus bürgerlichen Verhältnissen verhindert werden kann beziehungsweise, wie die als anomisch wahrgenommenen Verhältnisse in bürgerlich konforme (Wohn-)Verhältnisse überführt werden können. Trotz des Ausbaus von vielfältigen institutionellen und informell-ehrenamtlichen Unterstützungsstrukturen und dem verbrieften Recht auf Wohnen als international anerkanntes Menschenrecht, verschärft sich derzeit das soziale Problem der Wohnungslosigkeit. Mit dem Fokus auf Mechanismen zur Integration von Menschen ohne eigene Wohnung in die bürgerliche Mehrheitsgesellschaft wird ein Othing (Fabian 1999) der Wohnungslosen als ‚urbane Andere‘ vollzogen, die als abweichende und passive ‚Objekte‘ wohlfahrtsstaatlicher, ordnungspolitischer und zivilgesellschaftlicher Prävention und Intervention konzipiert werden. Sie werden zu Zielgruppen von Angeboten und Maßnahmen der Sozialen Arbeit, der Sozial- und Arbeitsmarktpolitik, der Gesundheitsfürsorge, der Resozialisierung, der Sozialplanung oder der ‚Mitleidsökonomie‘, die subsidiären, aktivierenden, paternalistischen, resilienzfördernden, kontrollierenden, partizipativen oder philanth-

ropischen Charakter haben können. Der Umgang mit dieser ‚Randgruppe‘ der Gesellschaft ist spezifischen Deutungsmustern sowie relationalen Selbst- und Fremdbilder-Konstruktionen der Mehrheitsgesellschaft unterworfen, die sich in vorgegebenen Wegen der (Re-)Integration mit definierten Hilfeangeboten niederschlagen.

Diese Normalitätstsvorstellungen der Mehrheitsgesellschaft wird den pluralen Lebenswelten von Menschen ohne eigene Wohnung und ihren Deutungsmustern nicht gerecht und verhindern einen hermeneutisch-verstehenden Zugang. Statt Obdach- und Wohnungslosigkeit dem Individuum oder stark abstrahierend den gesellschaftlichen Strukturen zuzuschreiben, nahm das Projektteam eine neue, innovative Perspektive ein: Aus bereits erhobenem qualitativen Interviewmaterial mit wohnungslosen Menschen analysierten die Beteiligten mit Hilfe von qualitativen Auswertungsmethoden Figurationen, in denen sich wohnungslose Menschen befinden. Im Zentrum stand daher der von Norbert Elias vorgeschlagene Begriff der Figuration, der das komplexe Interdependenzgeflecht beziehungsweise Netzwerk von Beziehungen, in dem Menschen in einer Gesellschaft agieren, beschreibt (Elias 1991, 1997a, b, 2018). Menschen ohne eigene Wohnung werden im Projekt nicht als sozial Ausgeschlossene oder passive ‚Opfer der Verhältnisse‘ gesehen. Vielmehr vertritt das Forschungsteam die Position, dass Menschen in ihrem Sein und ihrer Existenz immer gesellschaftsbezogen agieren und über relative Autonomie, Handlungsfähigkeit sowie individuelle Lebensentwürfe und Erfahrungen verfügen. Sie interpretieren und deuten spezifische Situationen innerhalb von Beziehungsgeflechten mit anderen Menschen. Diese Beziehungsgeflechte lassen sich durch eine „Vielspältigkeit der Interessen“ (Elias 1997b: 231) und ungleiche Machtverhältnisse charakterisieren. Menschen ohne eigene Wohnung bleiben somit in irgendeiner Form auf andere Menschen angewiesen, die sowohl Freundinnen und Freunde, Verbündete oder Aktionspartnerinnen und -partner als auch Interessensgegnerinnen und -gegner, Konkurrentinnen und Konkurrenten oder Feindinnen und Feinde sein können. Die Analyse von interdependenten und relationalen Beziehungsgeflechten von Menschen ohne eigene Wohnung eröffnet den Blick auf involvierte und sich artikulierende Subjekte mit (sub-)kulturellen Sinn- und Identitätskonstruktionen und eigensinnigen kulturellen Praxisformen (vgl. auch Sowa 2021).

Ausgangslage:

- Prekäre Lebenssituation von Menschen ohne eigene Wohnung (Mangel ökonomischer, kultureller und sozialer Ressourcen)
- Devianz (Zuschreibung non-konformen Verhaltens aus Sicht der bürgerlichen, kapitalistischen Gesellschaft)
- Fehlende Mittel zur Realisierung gesellschaftlich akzeptierter Ziele
- Othering

Bisherige Perspektive:

- Entweder Transformation als anomisch wahrgenommener in konforme Verhältnisse
- oder abstrakte gesellschaftliche Verhältnisse

Neue Perspektive:

- Hermeneutisch-verstehender Zugang zu Figurationen der Wohnungslosigkeit

3. Ziele des Forschungsprojekts

Ziel des Projekts ‚Wohnungslose Menschen in Figurationen‘ (WoMeF) war die Erforschung der Lebenssituationen von Menschen ohne eigene Wohnung aus deren Sicht. In der Machbarkeitsstudie sollte das Team prüfen, ob sich aus den biografischen und lebensweltlichen Narrationen von wohnungslosen Interviewten Figurationen identifizieren lassen, die Wohnungs- und Obdachlosigkeit begünstigen beziehungsweise beenden. Darüber hinaus fokussiert das Projekt auf die Praxistauglichkeit der typisierten Figurationen. Die Mittel aus dem Vorlauforschungsantrag sollen dafür eingesetzt werden, erste konkrete Erkenntnisse über wohnungslose Menschen in (typisierten) Figurationen zu generieren, um anschließend Mittel für ein größeres anwendungsorientiertes Forschungsprojekt beantragen zu können. Insofern ist für das Projekt folgende Forschungsfrage von Interesse:

- Lassen sich aus biografischen und lebensweltlichen Erzählungen von Wohnungslosen Figurationen identifizieren, die Wohnungs- und Obdachlosigkeit begünstigen beziehungsweise beenden?

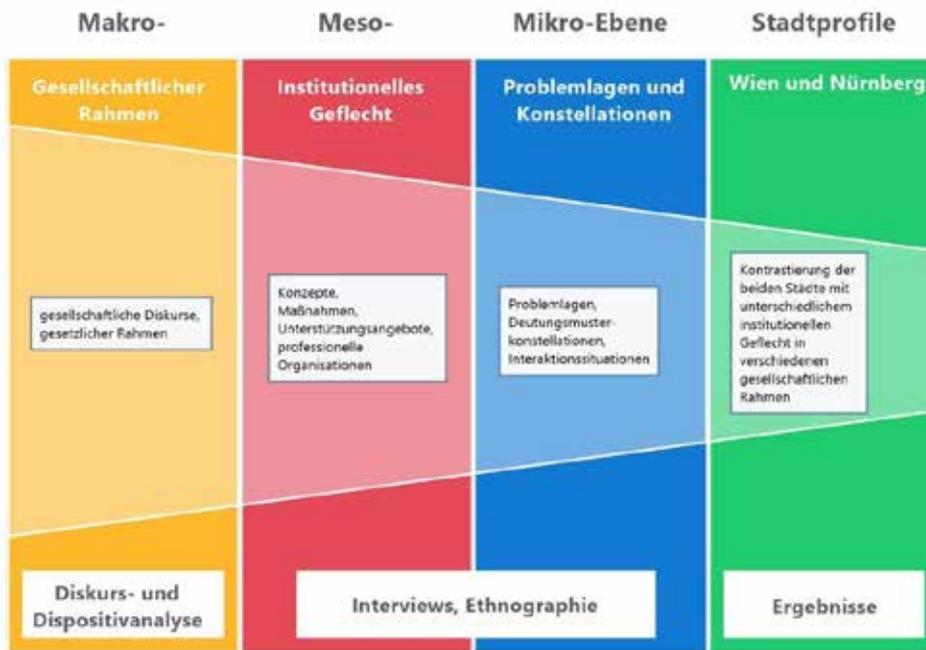
4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

In vier Semestern (WiSe 2017/18, SoSe 2018, WiSe 2018/19, SoSe 2019) konnten die Beteiligten im Rahmen von Lehrforschungsprojekten ein Netzwerk mit allen relevanten Akteurinnen und Akteuren der Wohnungslosenhilfe der Metropolregion aufbauen (Sowa 2018, 2020). Studierende erhielten mit Unterstützung von Organisationen der Sozialen Arbeit den Feldzugang zur Zielgruppe und erhoben 80 leitfadengestützte Interviews. Diese dauerten durchschnittlich 45 Minuten und wurden anschließend nach vorgegebenen Transkriptionsregeln vollständig verschriftlicht. In allen Interviews thematisieren die Studierenden die individuellen Biografien, den Weg in die Wohnungslosigkeit, den derzeitigen Alltag, die Beziehungen zu Familie, Peers, Fachkräften der Sozialen Arbeit und der Gesellschaft sowie die jeweiligen Zukunftsperspektiven wohnungs- und obdachloser Menschen.

Das Forschungsteam analysierte im Projekt dieses bereits vorhandene, reichhaltige Datenmaterial mit Hilfe qualitativer Auswertungsmethoden, um Figurationen zu identifizieren. Hierfür wurde eine Kombination aus Sequenzanalyse (Wernet 2009) und Grounded Theory (Glaser/Strauss 1998) eingesetzt. Zunächst nahmen die Beteiligten unter Anwendung der Sequenzanalyse tiefergehende Einzelfallrekonstruktionen von wenigen Interviews vor, um relevante Sinndeutungen und Kriterien für die Analyse interdependenter und relationaler Beziehungsgeflechte von Menschen ohne eigene Wohnung herauszuarbeiten. Parallel dazu codierten sie wesentliche Inhalte und behandelte Themengebiete in den fokussierten Auswertungen nach relevanten Kriterien. Durch permanentes Vergleichen der Interviews identifizierte das Projektteam Zusammenhänge, welche weitere Erkenntnisse über Figurationen, in denen sich wohnungslose Menschen befinden, ermöglichten.

Elias führte den Begriff der Figuration in Abgrenzung zum Begriff der Konfiguration nicht nur ein, um die sozial-historische Kontingenz gesellschaftlicher Verhältnisse und der in ihnen lebenden Individuen zu erfassen. Vielmehr sollte damit die Trennung zwischen Individuum und Gesellschaft insgesamt gelockert werden. Am empirischen Material haben sich diese theoretischen Impulse als sehr fruchtbar erwiesen. Es hat sich nämlich gezeigt, dass für ein adäquates Verständnis von Wohnungslosigkeit eine Perspektive eingenommen werden muss, die sowohl individuelle Sichtweisen der heterogenen Gruppe Wohnungsloser als auch die gesellschaftlichen Verhältnisse, in die diese eingebunden sind, berücksichtigt. Schließlich zeigt das Datenmaterial nachhaltig auch individuelle, vielfältige und kreative Bewältigungsstrategien in vergleichbaren, gesellschaftlichen Problemlagen. Nicht selten spielen Fragen von Verteilung, Zwang und Macht in prekären, konfliktgeladenen Verhältnissen eine entscheidende Rolle. Gesellschaftlicher Zwang in interdependenten Verhältnissen bringt ein konstitutives Element des Figurationsbegriffs zum Ausdruck: Im Zentrum des Figurationsbegriffs steht nämlich Elias' relationales, nicht-substantielles Machtkonzept. Dies bedeutet, dass der Begriff nicht auf die Akkumulation von Machtressourcen auf einer Seite bezogen wird, sondern Verteilung von Macht immer in Relationen begriffen wird. Neben dieser Schwäche, die objektivierte Materialität in Distributionsrelationen aus dem Blick zu verlieren, hat der Begriff Vorzüge in seiner Reichweite. Anders als dyadische Machtbegriffe (Weber 2002) kann der Begriff der Figuration auf sehr kleine Gruppen ebenso wie auf ganze Gesellschaften angewendet werden: Wohnungslosigkeit wird so nicht nur von beiden Polen her, sondern auch dazwischen erforschbar. So können kulturelle Dimensionen auf mehreren Ebenen erfasst werden. Dadurch wird der Elias'sche Machtbegriff anschlussfähig an die Konzepte symbolischer Macht (Bourdieu 1998) und produktiver Diskursmacht. Diese ermöglichen, repressive und gesellschaftliche Strukturen reproduzierende Effekte besser zu erfassen, als dies in Elias' Theoriegebäude möglich ist. Doch kann der Begriff der Figuration dazu beitragen, einen diskursiven Begriff produktiver (Disziplinar-)Macht (Foucault 1994, 2017), einen Begriff symbolischer Macht und ressourcenorientierte Begriffe theoretisch zu triangulieren.

Ein zentrales Ergebnis der Machbarkeitsstudie, die versuchte, den Figurationsbegriff zu verwenden, um Wohnungslosigkeit zu erforschen, ist die Notwendigkeit einer mehrdimensionalen Analyse (Mikro-Meso-Makro). Dies soll nun in einem in diesem Kontext eingeworbenen neuen Forschungsprojekt ‚Securing Housing. Wohnen, Wohnraumverluste und Wohnungslosigkeit in Nürnberg und Wien‘ verwirklicht werden. Die folgende Grafik illustriert das Forschungsvorhaben.



Potenziale und Impulse des Figurationsbegriff für die Erforschung von Wohnungslosigkeit (eigene Darstellung)

Die ausgewerteten Interviews zeigen neben der Heterogenität der Figurationen von Menschen und Institutionen im Kontext von Wohnungslosigkeit auch den zentralen Stellenwert von Macht für die Analyse von Wohnungslosigkeit. So haben die Fragen nach Verteilung und Verfügung von Wohnraum (substanziell) zentralen Stellenwert, werden jedoch symbolisch verschieden verhandelt. Beispielsweise konkurrieren Deutungen von einem Recht auf Wohnung und Unterstützung mit Deutungen zu einer Pflicht zur Unterbringung und Wohnungslosigkeit als einem ordnungspolitischen Problem. Daraus konnten idealtypisch zwei symbolische Figuren gewonnen werden, die aus Wohnungslosen in Figurationen gemacht werden: „Bürger mit Anspruch auf Rechte“ und „Problemfall und dankbarer Bittsteller“. Wenn Menschen in Figurationen treten, befinden sie sich durch Wissensübertragung in einer Symbolwelt, die schon vor ihnen da ist. Dadurch erhalten Figurationen eine gewisse Autonomie von einzelnen Individuen, aber niemals von Individuen überhaupt, ohne die sie nicht existieren würden. Ebenso haben Individuen – mit oder ohne Wohnung, Unterstützerinnen und Unterstützer, Vermieterinnen und Vermieter oder Behördenmitarbeiterinnen und -mitarbeiter – relative Autonomie gegenüber bestimmten Figurationen, aber niemals von Figurationen überhaupt.

Wohnungslosigkeit wird dabei weder nur von Individuen wie Wohnungslosen oder Vermieterinnen beziehungsweise Vermietern noch lediglich von gesellschaftlichen Strukturen her verstanden. Vielmehr gehen Menschen ohne Wohnung untereinander Figurationen ein oder mit anderen Menschen wie Freundinnen und Freunden, Bekannten, Fachkräften der Sozialen Arbeit, Polizistinnen und Polizisten, Mitarbeitenden von Jobcentern oder anderen Behörden usw. Auch Einrichtungen der Wohnungslosenhilfe bilden untereinander interdependente Figurationen oder auch Figurationen mit Behörden. Gesellschaftliche Reaktionen aus der Symbolwelt, seien es Abwertungen wie „Penner“ oder Mitleid, können als figurative Symbole verstanden werden. All dies unterliegt einem historischen Wandel, der nicht zuletzt selbst als figurativer Prozess verstanden werden kann, der mit anderen Phänomenen in Wechselwirkung steht. So kann beispielsweise der Wandel von der Armenfürsorge, über die Nichtsesshaften-Hilfe bis hin zu partizipativer und aktivierender Wohnungslosenhilfe oder Housing-First-Ansätzen als Figurationsprozess in stetigem Wandel verstanden werden. Diese symbolischen Figuren können sich jedoch durch die Beeinflussung von Handlungsoptionen materialisierend realisieren. So scheint die beschämende Deutung von Wohnungslosen als ordnungspolitisches Problem eher zu verhindern als zu fördern, dass Menschen ohne eigene Wohnung die Initiative ergreifen und versuchen, ihre Lage zu verändern. Andersherum scheint die Figur des Menschen mit Recht auf Wohnung eher zu begünstigen, dass Wohnungslose aktiv werden und ihre Rechte einfordern.

Als für die Erforschung von Wohnungslosigkeit besonders interessant, erwies sich des Weiteren die Etablierten-Außenseiter-Figuration, die sich nach Elias in menschlichen Gesellschaften immer wieder beobachten lässt. Einerseits sind Figurationen, in denen sich wohnungslose Menschen befinden, häufig von Machtungleichheiten gekennzeichnet, einem Charakteristikum der Etablierten-Außenseiter-Figuration. Andererseits gehört diese für Elias ohnehin zum Grundbestand des Sozialen. Dies zeigt auch, dass das Phänomen Wohnungslosigkeit weder als das vermeintlich ganz Andere, das im Gegensatz zur Normalität steht, begriffen werden kann, noch als Normalität. Vielmehr zeigen sich Aspekte des Normalen in zugespitzter Form. Elias beschreibt dabei vor allem, wie es Etablierten gelingt, Außenseiter-Gruppen eine Kollektivschande anzuhängen, sich selbst als überlegen darzustellen und „das ganze Arsenal Gruppenüberheblichkeit und Gruppenverachtung in den Beziehungen zwischen den Menschen“ (Elias/Scotson 1993: 11) zu mobilisieren. Die Stigmatisierung von Wohnungslosen kann in diesem Sinne als eine Machtquelle begriffen werden. Im Kern der Etablierten-Außenseiter-Figuration steht eine ungleiche Machtbalance mit daraus erwachsenden Spannungen. Daraus ergibt sich eine konfliktsoziologische Perspektive auf Wohnungslosigkeit, die die bereits genannten Vorzüge des Figurationsbegriffs behält und um den Stigmatisierungsbegriff ergänzt. In ihrer Studie über Figurationen sozialer Macht knüpfen Sofsky und Paris (1994) hieran an und analysieren die Grammatik sozialer Machtprozesse. Dort, wo Wohnungslose zu (Selbst-)Ermächtigungsstrategien greifen – wie beim „Kongress der StrassenexpertInnen“ (Art 2001), beim Wohnungslosentreffen oder durch Internetseiten wie www.berber-info.de – könnte dies in einer Analogie analysiert werden. Damit könnte auch zu Institutionen demokratischer Mitsprache geforscht werden. Die Etablierten-Außenseiter-Figuration ergänzen sie nämlich um eine Autoritäts-, eine Stellvertreter- und eine Koalitionsfiguration. Unmittelbar hieran anschließend lassen sich die figurationssoziologischen Arbeiten Hüttermanns zu Konflikten in der deutschen Einwanderungsgesellschaft nennen. Ausgehend von der konfliktsoziologischen Grunderkenntnis, dass die Destabilisierung von Machtbalancen zwischen sozialen Gruppen Eskalationspotenziale birgt, zeichnet Hüttermann „vier idealtypisch zugespitzte Sequenzen des konflikthanfälligen Figurationswandels der deutschen Einwanderungsgesellschaft nach“ (Hüttermann 2018: 213). Die Begriffe soziale Figur beziehungsweise Sozialfigur und Figurationsprozess, so, wie Hüttermann sie verwendet, liefern weiteres figurationssoziologisches Potenzial für die Erforschung von Wohnungslosigkeit. Zum einen können Relationen von (idealtypischen) Sozialfiguren herausgearbeitet werden. Ausgehend von sozialen Figuren von Wohnungslosen, Fachkräften, Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in Jobcentern und Behörden, Polizistinnen und Polizisten etc. können die Verhältnisse von diesen zum anderen auch als Figurationen abgebildet werden: zum Beispiel aktivierende Sozialarbeiterin beziehungsweise aktivierender Sozialarbeiter – partizipierende Wohnungslose beziehungsweise partizipierender Wohnungsloser. Gerade vor dem Hintergrund der sich immer weiter zuspitzenden Wohnungsnot und daran anschließenden Konflikten, ist eine derartige Perspektive erkenntnisversprechend. Kritisch muss hier jedoch angemerkt werden, dass die Zuspitzung der Wohnungsnot nur sehr schwer mit dem Figurationsbegriff erklärt werden kann und dass das Verhältnis der Wohnungsnot zum figurativen Wandel nicht aus dem Figurationsbegriff ableitbar ist. Wie oben bereits skizziert sind hierfür weitere Konzepte nötig.

Neckels (1991) machttheoretische Studie zur symbolischen Reproduktion sozialer Ungleichheit – Status und Scham – nimmt neben Simmel sowie am Rande auch Foucault und Sartre, Elias als zentralen theoretischen Bezugspunkt. Wenn auch die prozess- und zivilisationstheoretischen Aspekte aus Elias Werk hier einen hohen Stellenwert einnehmen, ist der Gegenstand Neckels Studie und insbesondere der in Auseinandersetzung mit Elias entwickelte Begriff der statusgebundenen Scham (vgl. ebd.: 141ff.) von großer Bedeutung für ein Verständnis von Wohnungslosigkeit. Ausgangspunkt Neckels Untersuchung bildet eine erste Definition von Scham als sozialem Gefühl (Verlust von Anerkennung in einem Beziehungsgeflecht), als normativem Gefühl (beschämender Verstoß gegen vorausgesetztes Idealbild des eigenen Selbst) und als moralischer Emotion (begleitet von dem Gefühl, sich etwas zu Schulden kommen lassen zu müssen) (ebd.: 16f.). Damit lässt sich der Bogen zur sozialen Ungleichheit und zur Reproduktion von Armut schließen. Der soziale Aspekt der statusgebundenen Scham hilft, zu verstehen, wie die beschämende Situation der Wohnungslosigkeit auch durch gut gemeinte Hilfe stabilisiert werden kann: „Ungleichheit geht immer mit einer Machtdifferenz einher, und so verliert auch derjenige, der sich geschämt hat und darin seine Unterlegenheit spürte, nicht nur an Achtung, sondern auch an Durchsetzungskraft, was seine eigenen Interessen betrifft. Zukünftig wird er besonders konform sein wollen, um weiterer Scham zu entgehen“

(ebd.: 17). Vor diesem Hintergrund lässt sich verstehen, warum viele Wohnungslose in dem ausgewerteten Interviewmaterial wiederholt betonten, im Einklang mit gesellschaftlichen Regeln und Konventionen zu handeln. Wenn Wohnungslose besonders konform sein wollen, kostet sie das nicht nur große Anstrengungen, sondern steht auch dem im Wege, dass sie sich als Mitglieder einer demokratischen Gesellschaft für ihre Teilhabe einsetzen. So entsteht eine paradoxe Situation, in der Wohnungslose besonders konform sein, aber dennoch nicht demokratisch teilhaben wollen. Der normative Aspekt statusgebundener Scham eröffnet eine Perspektive auf Normalitätsvorstellungen und kann zusammen mit dem Aspekt der moralischen Emotion helfen, zu verstehen, warum auch Wohnungslose individualisierende Schuldzuschreibungen, die gesellschaftliche Verhältnisse unberücksichtigt lassen, als Deutungen ihrer Lage anerkennen.

Potenziale des Figurationsbegriffs für die Erforschung von Wohnungslosigkeit:

- Mehrebenen-Perspektive
- Konfliktsoziologische Perspektiven auf Verteilungsfragen
- Machttheoretische Analysen
- Wirkung von Stigmatisierungseffekten
- Konformität und statusgebundene Scham

Exemplarische Figurationen:

- Etablierte
- Außenseiter
- Problemfälle
- Menschen mit Anspruch
- Stellvertreter- und Koalitionsfigurationen

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Frage, ob sich der Elias'sche Begriff der Figuration eignet, um Wohnungslosigkeit empirisch zu untersuchen, nicht einfach bejaht oder verneint werden kann. Vielmehr muss präziser zwischen positiven Impulsen, die von Elias'scher Theorie ausgehen, im Anschluss an Elias entwickelten und geeigneten Konzepten sowie alternativen Herangehensweisen mit Parallelen in der Theoriearchitektur differenziert werden, um Chancen und Grenzen des Theoriegebäudes für die Erforschung von Wohnungslosigkeit zu erfassen. Wichtige Impulse liefern Elias' Kritiken an theoretischer Trennung von Individuum und Gesellschaft, an voneinander isolierten wissenschaftlichen Disziplinen („homo clausus“) und an ahistorischen Perspektiven im Rahmen seiner Prozesssoziologie. Diese wesentlichen Impulse konnten auch in dem neu eingeworbenen Forschungsprojekt ‚Securing Housing. Wohnen, Wohnraumverluste und Wohnungslosigkeit in Nürnberg und Wien‘ aufgenommen werden, in dem neben einer Mehrebenen-Perspektive auch ein interdisziplinärer Beirat vorgesehen ist. Gerade in den macht- und konflikttheoretischen Elementen des Elias'schen Figurationsbegriff zeigen sich sowohl Grenzen wie auch Weiterentwicklungsmöglichkeiten. So stößt die fruchtbare Erkenntnis, dass sich im Zuge der Entwicklung gegenwärtiger Gesellschaften, Fremd- zu Selbstzwang transformiert, durch die starke Betonung der Repressionslosigkeit und des nicht-positionalen Charakters der so entstandenen Macht, für die Erforschung von Wohnungslosigkeit an ihre Grenzen. Vor dem Hintergrund der sich im Zuge fortschreitender Kommodifizierung von Wohnraum und zunehmender Finanzialisierung des Wohnungsmarktes zuspitzenden Wohnungsnot und Verknappung von passendem Wohnraum, zeigt es sich mehr denn je, dass die Verfügung über Wohnraum eine Machtressource ist, die mit sozialen Positionen korrespondiert. Doch um die Ver- beziehungsweise Anerkennung dieses Umstandes unter anderem durch Wohnungslose, wie sie sich im Interviewmaterial auch zeigte, zu erfassen, sind Konzepte nötig, die über positional-substanzielle Machtbegriffe hinausgehen, ohne diese zu negieren. Neben den beiden unmittelbar aus Elias'schen Konzepten heraus weiterentwickelten Begriffen der statusgebundenen Scham (Neckel) und der Machtfiguration (Sofsky/Paris) sowie den Elias'schen Grundbegriffen Etablierten-Außenseiter-Figuration und Stigmatisierungsprozess, sind auch Konzepte, die Analogien aufweisen, aber weitergehen, wie das Konzept der produktiven Diskursmacht (Foucault) oder der symbolischen Macht (Bourdieu), gut geeignet, um jene Momente zu erfassen. Mit Konzepten wie der statusgebundenen Scham oder der symbolischen Macht können Effekte auf mikrosoziologischer Ebene beobachtet

werden, die Wohnungslosigkeit und Armut stabilisieren und reproduzieren. Daran anschließend können mit der Etablierten-Außenseiter-Figuration und den beiden entdeckten Figuren „Ordnungspolitische Problemfälle“ und „Menschen mit Anspruch“ konkrete Wirkungen dieser Effekte beschrieben werden. Machtfigurationen reichen bis in die Mesoebene, wo die Begriffe produktiver Diskurs- und Disziplinarmacht ansetzen und bis in die Makroebene wirken. Diese erweitern die von Elias tendenziell eher individualisierungstheoretisch beschriebenen Prozesse der Internalisierung von Zwängen auf eine subjektivierungstheoretische Perspektive. Dadurch können nicht nur anthropologische, unbegründete Annahmen Elias', wie die der natürlichen Anlage zur Zivilisierung, vermieden werden, sondern auch repressive Effekte produktiver Macht erfasst werden, ohne diese zum wesentlichen Kriterium zu machen. Alles in allem konnte das Projektteam bei Elias und bei den an Elias anschließenden Konzepten viele konstruktive Impulse für weitere Forschung zu Wohnungslosigkeit finden, wenn diese auch mindestens erweitert werden müssen. Inwiefern die Elias'sche Terminologie beitragen kann, eine triangulierende Perspektive auf die Zuspitzung der Wohnungsfrage vor dem Hintergrund zunehmender Kommodifizierung und Finanzialisierung von Wohnraum (Makroebene), die institutionellen Einflüsse (Mesoebene) wie auch mikrosoziologischen Situationen (Mikroebene) berücksichtigend zu integrieren, konnte das Team nicht abschließend klären. Doch die Beteiligten konnten viele ausschlaggebende kritische Impulse herausarbeiten und in weitere Forschungsvorhaben übernehmen.

5. Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Ursprünglich sollte in dem Vorlauforschungsprojekt ein zweijähriges Anschlussprojekt eingeworben werden. Die Ergebnisse zeigten jedoch einen höheren Forschungsbedarf. So sind in Deutschland Studien selten, die Wohnungslosigkeit nicht als isoliertes Phänomen, sondern in seinem gesellschaftlichen Kontext wie beispielsweise Wohnen, Wohnungsnot oder Stadtentwicklung sehen. Dabei wurde in bisherigen Perspektiven eine Tendenz festgestellt, entweder individuelle Aspekte, insbesondere auf Seiten wohnungsloser Menschen (Mikroebene), Maßnahmen einzelner Institutionen (Mesoebene) oder strukturelle Aspekte wie den Wohnungsmarkt (Makroebene) zu betrachten. Eine mehrere Ebenen integrierende, ganzheitliche Perspektive in einem Städtevergleich fehlt bislang. Darüber hinaus lässt sich aufgrund aktueller Entwicklungen und der Zuspitzung der Wohnungsthematik, die das Feld Wohnungslosigkeit stark verändern, insgesamt ein großer Forschungsbedarf in dem Feld festhalten. So konnten im Rahmen der Vorlauforschung Mittel für ein neues Forschungsprojekt eingeworben werden, das an die Ergebnisse anknüpfen und diese weiter vertiefen kann.

In dem auf 36 Monate angelegten anwendungsorientierten Forschungsvorhaben werden im Zeitraum vom 1. Juli 2021 bis 30. Juni 2024 Faktoren identifiziert, die Wohnraumverlust sowie Wohnungslosigkeit verhindern und somit Wohnraum sichern. Dabei werden erstens die biografischen beziehungsweise sozialen Lagen, Deutungen und Praktiken von Individuen untersucht (Mikroebene), um herauszufinden, in welchen Lagen sich Betroffene zu verschiedenen Zeitpunkten einer Abwärtsspirale befinden und welche typischen Deutungsmusterkonstellationen in Interaktionssituationen vorliegen. Da diese typischen Deutungsmusterkonstellationen vom jeweiligen gesellschaftlichen Rahmen abhängen, erfolgt zweitens eine Kontextanalyse städtischer Diskurse über Wohnen, Wohnraumverlust und Wohnungslosigkeit (Makroebene). Drittens wird eine Kontextanalyse über bestehende Konzepte, Maßnahmen und Unterstützungsangebote durch professionelle Organisationen und Institutionen (Mesoebene) vorgenommen. Um die gesellschaftliche Einbettung und Relevanz von individuellen Problemlagen zu untersuchen, werden als Fallstudien die zwei Städte Nürnberg und Wien als maximal kontrastierende Fälle in das Forschungsdesign aufgenommen, sodass aus den Kontextanalysen zwei unterschiedliche Stadtprofile typisiert werden können, die Einfluss auf die Deutungsmusterkonstellationen nehmen. Die figurationssoziologische Theoriesprache erlaubt dabei eine Fokussierung auf bestehende Machtverhältnisse in interdependenten Beziehungsgeflechten, deren Offenlegung die Praxis der Wohnungslosenhilfe nachhaltig verändern könnte.

6. Literatur

Arlt, Peter (2001): Kongress der StrassenexpertInnen, Workshop und Tagung (CD), Linz.

Bourdieu, Pierre (1998): Praktische Vernunft. Zur Theorie des Handelns, 1. Aufl., dt. Erstausg., Frankfurt am Main: Suhrkamp.

Elias, Norbert (1991): Was ist Soziologie? Grundfragen der Soziologie, 6. Aufl., Weinheim: Juventa.

Elias, Norbert (1997a): Über den Prozeß der Zivilisation: Soziogenetische und psychogenetische Untersuchungen. Erster Band: Wandlun-

- gen des Verhaltens in den weltlichen Oberschichten des Abendlandes, 21. Aufl., Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Elias, Norbert (1997b): Über den Prozeß der Zivilisation: Soziogenetische und psychogenetische Untersuchungen. Zweiter Band: Wandlungen der Gesellschaft. Entwurf zu einer Theorie der Zivilisation, 21., neu durchges. und erw. Aufl., Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Elias, Norbert (2018): Figuration. in: Kopp, Johannes/Steinbach, Anja (Hrsg.): Grundbegriffe der Soziologie, Wiesbaden: Springer, S. 115-117.
- Elias, Norbert/Scotson, John L. (1993): Etablierte und Außenseiter, Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Fabian, Johannes (1999): Präsenz und Repräsentation. Die Anderen und das anthropologische Schreiben. in: Berg, Eberhard/Fuchs, Martin (Hrsg.): Kultur, soziale Praxis, Text. Die Krise der ethnographischen Repräsentation, 3. Aufl., Frankfurt am Main: Suhrkamp, S. 335-364.
- Foucault, Michel (1994): Überwachen und Strafen: Die Geburt des Gefängnisses, 1. Aufl., Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Foucault, Michel (2017): Der Wille zum Wissen. Sexualität und Wahrheit 1, 21. Aufl., Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Glaser, Barney G./Strauss, Anselm L. (1998): Grounded theory: Strategien qualitativer Forschung, Bern: Huber.
- Hüttermann, Jörg (2018): Figurationssoziologische Konfliktanalyse statt Kulturalismus. in: Ceylan, Rauf/Uslucan, Haci-Halil (Hrsg.): Transformation religiöser Symbole und religiöser Kommunikation in der Diaspora: Sozialpsychologische und religionssoziologische Annäherungen an das Diskursfeld Islam in Deutschland, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 213-249.
- Merton, Robert K. (1995): Soziologische Theorie und soziale Struktur, Berlin: de Gruyter.
- Neckel, Sighard (1991): Status und Scham. Zur symbolischen Reproduktion sozialer Ungleichheit Frankfurt am Main/New York: Campus.
- Sofsky, Wolfgang/Paris, Rainer (1994): Figurationen sozialer Macht. Autorität, Stellvertretung, Koalition, 1. Aufl., Frankfurt am Main: Suhrkamp.
- Sowa, Frank (2018): Engagiert die Lebenswelten von Wohnungslosen entdecken, in: Die Neue Hochschule (DNH), Heft 03, S. 26-29.
- Sowa, Frank (2020): „Meine Vorstellungen von Obdachlosen [wurden] (...) komplett zerstört“. Studentische Feldforschung als Beitrag zur Persönlichkeitsentwicklung? in: Sowa, Frank/Zitzmann, Christina (Hrsg.): Anders lehren und lernen. Forschendes Service Learning über Lebenswelten von Menschen in Wohnungsnot, Frankfurt am Main: Wochenschau Verlag, S. 34-58.
- Sowa, Frank (Hrsg.)(2021): Figurationen der Wohnungsnot. Kontinuität und Wandel sozialer Praktiken, Sinnzusammenhänge und Strukturen, Weinheim/Basel: Beltz Juventa (im Erscheinen).
- Weber, Max (2002): Soziologische Grundbegriffe (1920). in: Weber, Max (Hrsg.): Schriften 1894–1922, Stuttgart: Kröner, S. 653–716.
- Wernet, Andreas (2009): Einführung in die Interpretationstechnik der Objektiven Hermeneutik, 3. Auflage, Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.









Rückgewinnung von Katalysator-Platin aus Siliconen

Prof. Dr. Dennis Troegel
Fakultät Angewandte Chemie
TH Nürnberg

Wesentliche Projektziele

Platin ist das am häufigsten eingesetzte Katalysatormetall zur Additionsvernetzung von Siliconkautschuken zu Siliconelastomeren wie sie zur Herstellung von Siliconschläuchen, -dichtungen oder -backformen sowie für Papierbeschichtungen eingesetzt werden. Nach der Vernetzung verbleibt das Platin jedoch in den Produkten und wird am Ende des Produktlebenszyklus zusammen mit diesen entsorgt. Ziel des Projektes war es daher, etablierte Methoden zum Platin-Recycling auf ihre Übertragbarkeit auf Siliconelastomere zu prüfen beziehungsweise neue Verfahren zu entwickeln, um das Katalysator-Platin aus Siliconprodukten abtrennen und möglichst vollständig zurückgewinnen zu können. Das so zurückgewonnene Platin soll so der Wertschöpfungskette wieder zurückgeführt werden und zukünftig sowohl den Rohstoffverbrauch wie auch die Kosten für die Herstellung von Siliconprodukten reduzieren.

1. Projektdaten

Fördersumme	29.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2020
Fakultät / Institut	Fakultät Angewandte Chemie Institut für Chemie, Material- und Produktentwicklung (OHM-CMP)
Projektleitung	Prof. Dr. Dennis Troegel
Kontaktdaten	dennis.troegel@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Anorganisch-organische Hybridmaterialien auf Basis von Organopolysiloxanen („Silicone“) besetzen aufgrund ihrer besonderen Materialeigenschaften wichtige Anwendungsfelder in allen Industrie- und Wirtschaftszweigen und werden weltweit im Millionen-Tonnen-Maßstab hergestellt, vertrieben und eingesetzt. Beispiele für die besonderen Eigenschaften von Siliconen sind ihre hohe chemische und thermische Stabilität, ihre hervorragende Wasserabweisung, ihre dielektrischen Eigenschaften, ausgeprägte Oberflächenaktivität und physiologische Indifferenz [1–3].

Siliconelastomere, wie sie im Bereich der resistenten Polymere (Dichtungen, Treibstoffschläuche), der Papier-Beschichtung („release coatings“) oder im Lebensmittel- und Medizinsektor (Silicon-Backformen, künstliche Herzklappen) eingesetzt werden, werden industriell hauptsächlich durch platinkatalysierte Vernetzungsreaktionen („Hydrosilylierung“) hergestellt, um aus flüssigen Siliconkautschuken ein vernetztes, gummiartiges Siliconelastomer zu erhalten [4,5]. Je nach Eigenschaften und Anwendungsprofil werden hier zum Teil verhältnismäßig hohe Platin-Mengen für die Vernetzung eingesetzt. Beispielsweise enthalten siliconbasierte Papierbeschichtungen teilweise bis zu 100–200 ppm an Platin, in anderen Anwendungen liegt der Gehalt eher bei 1–100 ppm [5]. Im Gegensatz zur klassischen Definition eines Katalysators werden die platinhaltigen Komponenten bei der Vernetzung in dem Polymer eingeschlossen und verbleiben somit im Produkt, können also nicht zurückgewonnen werden. In manchen Anwendungen und Massenprodukten gehen auf diese Weise große Mengen an Platin aus den Wertschöpfungsketten verloren und stehen für andere Anwendungen nicht zur Verfügung. Da viele Siliconprodukte sowohl als Industrieabfall als auch durch die Anwenderinnen und Anwender über den normalen (Haus) Müll entsorgt werden, landet auch das enthaltene Platin oftmals ungenutzt auf Deponien.

Zur Vorbereitung neuer Forschungsprojekte zu einer nachhaltigeren Siliconchemie sollte das Projektteam im Rahmen dieses Vorlaufforschungsprojekts Möglichkeiten zur Rückgewinnung des Platins aus Siliconprodukten/-abfällen evaluieren und entwickeln, vor allem auch in Bezug auf eine industrielle Umsetzung und Verwertung.

Methoden zur Rückgewinnung von Platin sind grundsätzlich etabliert, zum Beispiel aus verbrauchten Industriekatalysatoren [6], Autoabgas-Katalysatoren [7] oder Elektronikabfällen [8]. Allerdings liegt das Platin dort elementar in Form von kleinen (Nano)Partikeln oder Beschichtungen auf der Oberfläche eines oftmals porösen Katalysatorträgers vor, welches durch meist hydrometallurgische Aufschlussprozesse, zum Beispiel durch Behandlung mit starken oxidierende Säuren wie Königswasser, herausgelöst und anschließend als schwerlösliche Platin-Verbindung (zum Beispiel $(\text{NH}_4)_2[\text{PtCl}_6]$) ausgefällt werden kann [9]. In vernetzten Siliconelastomeren liegt das Platin jedoch chemisch gebunden und eingeschlossen in einer wasserabweisenden Polymermatrix vor und ist damit bei Weitem nicht so zugänglich für wässrige Medien, Säuren und Laugen. Daher gingen die Beteiligten zu Beginn des Projektes davon aus, dass sich die etablierten Prozesse zur Platin-Rückgewinnung nicht auf verbrauchte Siliconabfälle übertragen lassen, sondern angepasst werden müssen beziehungsweise es der Entwicklung neuer, direkt auf die Platin-Rückgewinnung aus Siliconen zugeschnittener Prozesse bedarf.

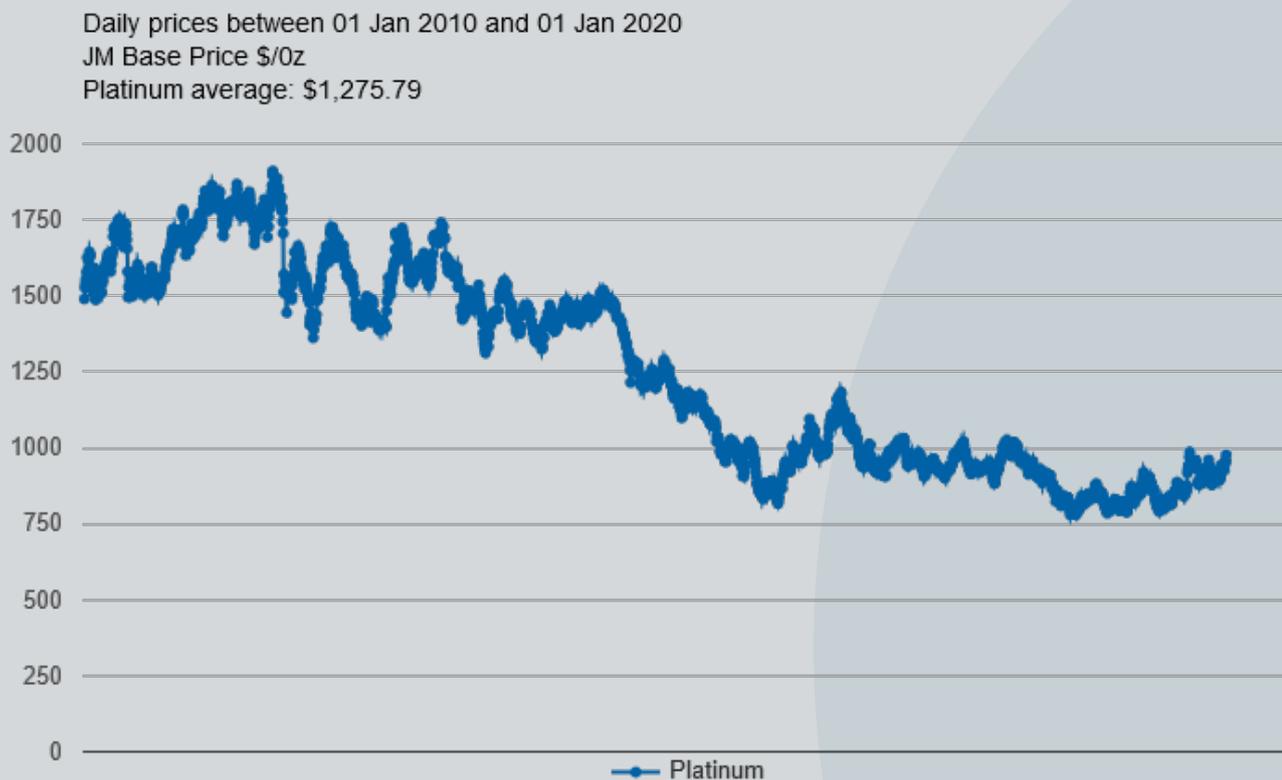
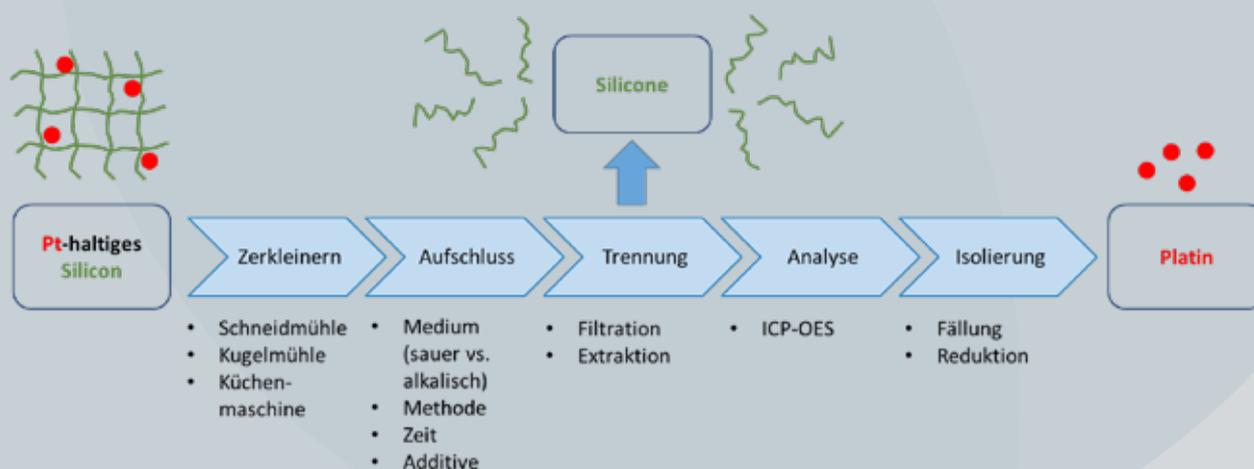


Abbildung 1: Entwicklung des Platin-Preises der vergangenen zehn Jahre [10]; Abbildung: <http://www.platinum.matthey.com/prices/price-charts> (Abrufdatum 22.10.2020, 13:00 Uhr)

3. Ziele des Forschungsprojekts

Ziel dieses Projektes war die Entwicklung eines geeigneten Verfahrens, um Platin-Rückstände aus additionsvernetzten Siliconelastomeren von der polymeren Matrix abzutrennen, als definierte platinhaltige Zwischenstufe zu isolieren und das Platin somit für neue Anwendungen zurückzugewinnen. Nachdem industriell etablierte Verfahren auf flüssigen Aufschlussmethoden („Leaching“) mit starken Säuren oder Laugen beruhen [9], lag der Fokus dieser Arbeit auf der Übertragung und Anpassung dieser Methoden auf platinhaltige Siliconelastomere, die analytische Erfassung des extrahierten Platins, die Rückgewinnung des Platins sowie die Bewertung der Verfahren in Hinblick auf Machbarkeit, Menge an erhaltenem Platin und Wirtschaftlichkeit der Verfahren.

Dazu wurden drei kommerzielle, repräsentative Siliconproben ausgewählt, an denen die verschiedenen Verfahren erprobt wurden: a) eine handelsübliche Backform aus 100 Prozent lebensmittelechtem Platin-Silicon (Kaiser); b) eine transparente Siliconplatte mit einem Millimeter Dicke (MVQ-Silicones GmbH); c) eine zweikomponentige Siliconabformmasse vom Typ ELASTOSIL® M 4601 (Wacker Chemie AG). Letztere hatte den Vorteil, dass über verschiedene Verhältnisse der Polymer- und der Katalysatorkomponente bei der Vernetzung auch verschiedene Platin-Gehalte eingestellt und untersucht werden konnten. Für die Aufschlüsse sollten verschiedene saure oder alkalische, flüssige Medien getestet werden, vor allem auf der Basis von Salzsäure, Schwefelsäure, Salpetersäure oder Mischungen daraus sowie Kalilauge. Diese Lösungsstrategie beruhte auf der Erfahrung, dass die stabilen Si–O–Si-Bindungen in Siliconen durch den Einsatz von starken Säuren oder Laugen reversibel gespalten oder geknüpft werden können („Äquilibrierung“) [11], was ein Auflösen der Siliconelastomer-Matrix und damit ein Freisetzen des enthaltenen Platins ermöglichen sollte. Weiterhin sollte der Einfluss von Additiven auf das Aufschlussverhalten geprüft werden. Neben der Wahl des Aufschlussmediums sollten auch unterschiedliche Aufschlussmethoden, darunter der Einsatz einer normalen äußeren Heizung oder von Mikrowellen, vergleichend getestet und bewertet werden. Die erhaltenen Aufschluss-Mischungen sollten durch geeignete Filtration oder Extraktion von unlöslichen Bestandteilen abgetrennt werden, und die erhaltenen Lösungen sollten mittels optischer Emissionsspektroskopie mit induktiv-gekoppeltem Plasma (ICP-OES) auf den Gehalt an gelöstem Platin untersucht werden. Dazu sollte zunächst auch eine geeignete Analysenmethode entwickelt werden, um die geringen Platin-Mengen zuverlässig quantitativ bestimmen zu können. Zuletzt sollte das gelöste Platin in Form schwerlöslicher Verbindungen wie $(\text{NH}_4)_2[\text{PtCl}_6]$ gefällt, abgetrennt und durch Erhitzen zu elementarem Platin reduziert werden, um die prinzipielle Machbarkeit der Verfahren zu demonstrieren und die Menge an maximal gewinnbarem Platin zu ermitteln. Das geplante Vorgehen ist in Schema 1 zusammengefasst:



Schema 1: Geplantes Vorgehen, Aufgaben und Lösungsstrategien innerhalb des Projektes. Grafik: Dennis Troegel

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Um Katalysator-Platin aus additionsvernetzenden Siliconelastomeren isolieren zu können, führte das Forschungsteam die in Schema 1 genannten Schritte nacheinander durch, optimierte und bewertete diese: Zerkleinerung der Siliconproben, Aufschluss mit sauren oder alkalischen Medien unter Variation der Bedingungen, Trennung der gelösten und ungelösten Bestandteile, analytische Erfassung des herausgelösten Platins und die Isolierung platinhaltiger Verbindungen.

a. Zerkleinerung von Siliconelastomeren

Die technischen beziehungsweise kommerziellen Siliconproben mussten die Beteiligten zunächst durch geeignete Methoden zerkleinern. Die Proben aus der Abformmasse ELASTOSIL® M 4601, der Siliconbackform und der Siliconplatte wurden dafür zunächst händisch grob zerschnitten und anschließend verschiedenen Schneid-

und Mahlprozessen unterworfen. Aufgrund der hohen Elastizität war eine Zerkleinerung der Proben mittels Schneid- und Universalmühlen nicht möglich; auch eine Mahlung via Kugelmühle brachte kein brauchbares Ergebnis. Um die Sprödigkeit der Siliconproben zu erhöhen, wurden diese zuvor in flüssigem Stickstoff bei -196 °C bis unter die Glasübergangstemperatur der Silicone vorgekühlt. Bei den genannten Zerkleinerungsmethoden tauten diese jedoch viel zu schnell wieder auf beziehungsweise wurden durch (Reibungs-)Wärme wieder in den elastischen Zustand überführt, sodass eine mechanische Zerkleinerung nicht möglich war. Überraschenderweise wurde das beste Ergebnis der Zerkleinerung mit einer handelsüblichen Küchenmaschine eines namhaften Herstellers erreicht, wenn das Silicon zunächst in flüssigem Stickstoff vorgekühlt wurde und die versprödeten Proben zügig bei höchster Stufe zerkleinert wurden. So wurde ein feines, gut handhabbares Silicongranulat erzeugt, das für die weiteren Verarbeitungsschritte eingesetzt werden konnte (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: Zerkleinerung einer mit Flüssig-Stickstoff schockgefrosteten Siliconbackform mit einer handelsüblichen Küchenmaschine. Fotos: Aseel Ali Fadhil

b. Aufschluss der Siliconproben („Leaching“), Trennung und Analyse

Die zerkleinerten Siliconproben wurden mit unterschiedlichen sauren oder alkalischen Aufschlussmitteln versetzt und erhitzt, um die Siliconstruktur zu zerstören und das enthaltene Platin herauszulösen. Hier wurden je nach Art des Erhitzens (konventionelle Heizung versus Mikrowelle) und Art des Aufschlussmediums unterschiedliche Ergebnisse erzielt.

Erste Versuche wurden auf Basis von Königswasser (konzentrierte Mischung aus einem Teil Salpetersäure und drei Teilen Salzsäure) durchgeführt, da bekannt ist, dass sich Platin unter diesen Bedingungen oxidativ unter Bildung von Hexachloridoplatin(IV)-Säure gemäß Gleichung 1 herauslöst:



Diese Reaktion ist auch für Siliconelastomere prinzipiell durchführbar, war allerdings mit mehreren Nachteilen verbunden. Neben der massiven Bildung nitroser Gase NO_x wurde die Siliconstruktur nur unvollständig aufgeschlossen, sodass große Mengen an unlöslichen Rückständen zurückblieben, die auch immer noch Platin enthielten (Abbildung 3).

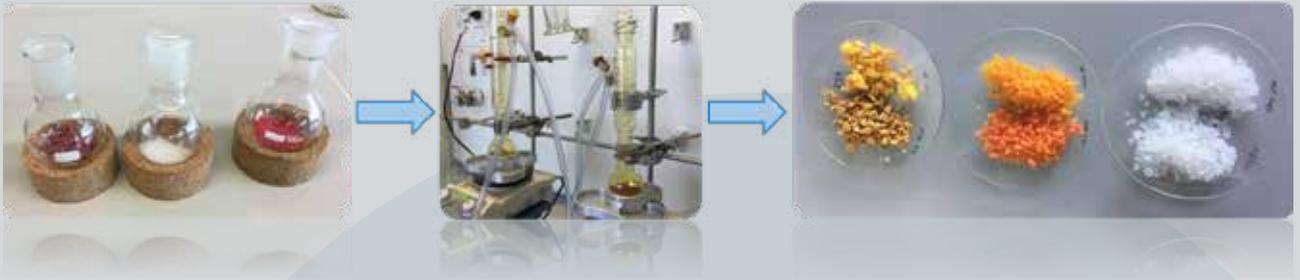
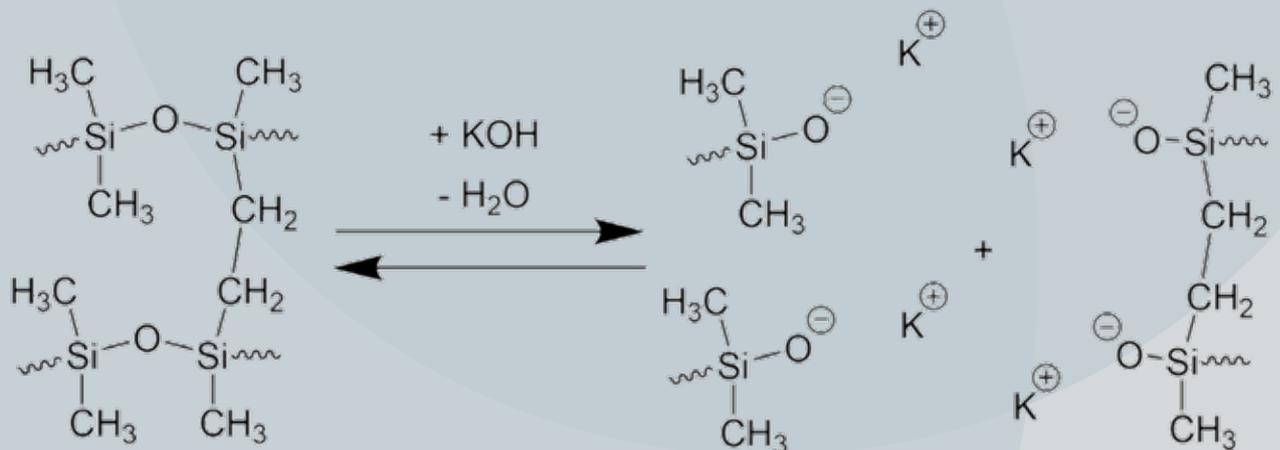


Abbildung 3: Die drei ausgewählten kommerziellen Siliconproben vor, während und nach dem Aufschluss mit Königswasser. Foto: Aseel Ali Fadhil

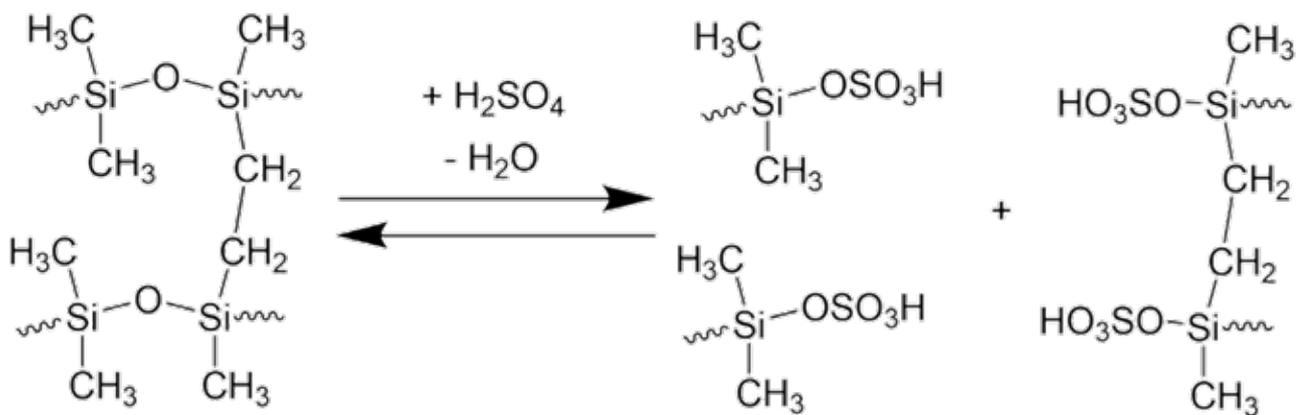
Sowohl bei dieser als auch bei anderen Aufschlussmethoden zeigte sich in allen Fällen, dass der Aufschluss über den Mikrowellenreaktor deutlich weniger Platin herauslöste als bei der konventionellen Heizmethode, weswegen der Mikrowellenansatz nicht weiterverfolgt wurde und bei den folgenden Untersuchungen die konventionellen Heizmethoden eingesetzt wurden. Insgesamt zeigte sich Königswasser als alleiniges Aufschlussmittel als ungeeignet, um die Siliconstruktur nachhaltig zu spalten und das enthaltene Platin herauszulösen (maximal extrahierte Pt-Menge: 0,8 mg Pt/kg Silicon bei der Abformmasse ELASTOSIL® M 4601 bei konventioneller Heizung).

Ähnliche Ergebnisse wurden auch bei der Behandlung der Siliconproben in Alkalischmelzen (KOH/KNO₃) oder in Mischungen aus Kalilauge und Isopropanol erzielt: Bei allen Versuchen wurden die Siliconproben nur unvollständig aufgeschlossen und die Mengen an isoliertem Platin waren gering ($\leq 0,6$ mg Pt/kg Silicon). Es ist zwar bekannt, dass Alkalien die stabilen Si–O–Si-Bindungen in Siliconen spalten können (Schema 2), nicht aber die Si–C-Bindungen, welche auch bei der platinkatalysierten Additionsvernetzung gebildet werden. Auch ist das Verfahren nachteilig, weil sich Platin unter diesen alkalischen Bedingungen als schwerlösliches wasserhaltiges Platinoxid abscheidet, weswegen dieser Ansatz nicht weiterverfolgt wurde.



Schema 2: Reversible Spaltung von Si–O–Si-Bindungen in Siliconen durch Kalilauge. Grafik: Dennis Troegel

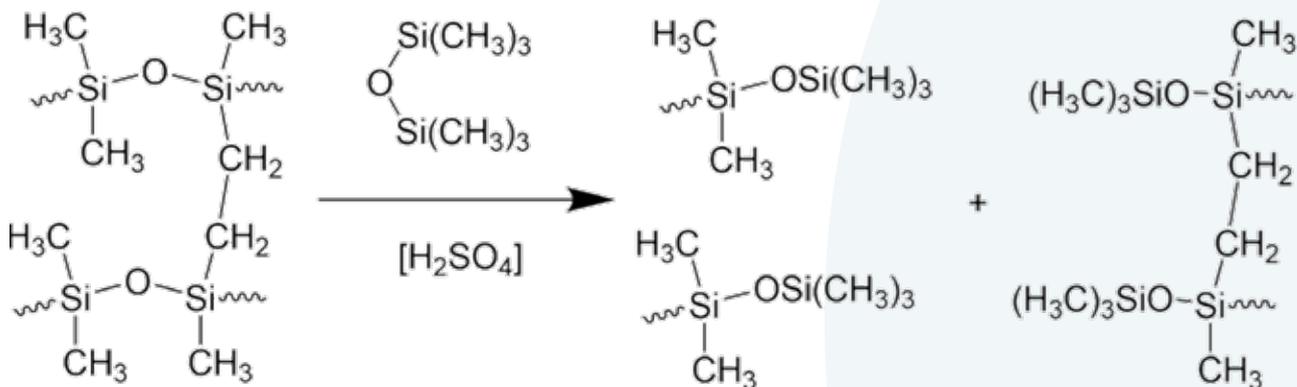
Deutlich vielversprechendere Ergebnisse wurden dagegen mit anderen Säuren sowie Säuremischungen, vor allem auf der Basis von konzentrierter Schwefelsäure, erhalten. Hier zeigte sich, dass sich alle drei Siliconelastomere vollständig aufschließen ließen und sich komplett in dem sauren Medium auflösten. Dieser Sachverhalt liegt darin begründet, dass die stabilen Si–O–Si-Bindungen in Siliconen durch den Einsatz von starken Säuren reversibel gespalten oder geknüpft werden können („Äquilibrierung“), zum Beispiel mit Schwefelsäure wie in Schema 3 gezeigt [11]:



Schema 3: Reversible Spaltung von Si–O–Si-Bindungen in Siliconen durch Schwefelsäure. Grafik: Dennis Troegel

Alleine durch den Wechsel von Königswasser auf Schwefelsäure als Aufschlussmittel konnte die Menge an gelöstem Platin von 0,8 mg Pt/kg Silicon auf 6 mg Pt/kg Silicon gesteigert werden. Weitere Verbesserungen wurden durch zusätzliche, chloridhaltige Additive wie Salzsäure oder Natriumchlorid erreicht, welche das gelöste Platin durch Bildung von Hexachloridoplatin(IV)-Säure in der Lösung stabilisieren. Hier zeigte sich aber vor allem das Problem, dass bei Verdünnung dieser stark sauren Aufschlusslösungen die in Schema 3 gezeigte Reaktion in die andere Richtung ablief und durch Neuknüpfung von Si–O–Si-Bindungen eine Fällung von gelartigem Siliconelastomer stattfand, in welchem wieder Platin-Rückstände eingeschlossen wurden (Abbildung 4a).

Dieses Verhalten konnte erfolgreich verhindert werden, indem zu der Aufschlussmischung zusätzlich Hexamethyldisiloxan ((CH₃)₃Si–O–Si(CH₃)₃, M₂) hinzugeben wurde, welches als sogenannte *endcapping*-Reagenz mit den reaktiven Endgruppen der gebildeten Siloxan-Spaltprodukte reagierte und diese an einer Neuknüpfung von Si–O–Si-Bindungen hinderte, vgl. Schema 4:



Schema 4: Irreversible Spaltung von Si–O–Si-Bindungen in Siliconen durch Schwefelsäure mit endcapping mit Trimethylsilyloxy-Gruppen. Grafik: Dennis Troegel

Nach Verdünnen der stark sauren Aufschlusslösung schieden sich die Silicon-Spaltprodukte somit nicht mehr als gelartiger Feststoff, sondern als wasserunlösliche, flüssige Siliconöl-Phase ab, welche mittels Phasenseparation abgetrennt und durch anschließende Extraktionsschritte weiter gereinigt wurde, während das gelöste Platin in der wässrigen Phase verblieb (Abbildung 4b). Dieses Vorgehen hat neben der Erhöhung des Anteils an abgetrenntem Platin den zusätzlichen Vorteil, dass die aufgeschlossenen Siliconelastomere (ursprünglich vernetzt) nun als Siliconöle (unvernetzt) zurückerhalten werden konnten, was ein prinzipielles Recycling der Siliconkomponente ermöglichen sollte. Dieser Sachverhalt wurde im Rahmen dieses Projektes vorerst nicht weiterverfolgt, wäre aber eine vielversprechende Basis für mögliche Folgeprojekte.

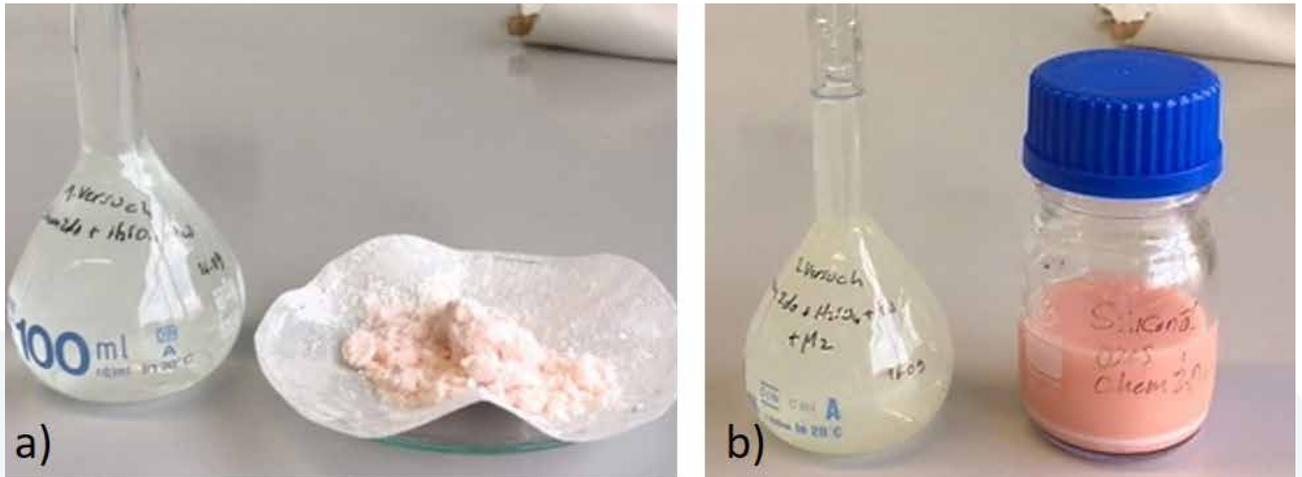


Abbildung 4: Links (a): Pt-haltiges Filtrat und feste Silicon-Rückstände aus der Aufschlussmethode mit konzentrierter Schwefelsäure ohne M_2 . Rechts (b): Pt-haltiges Filtrat und flüssiges Siliconöl aus der Aufschlussmethode mit konzentrierter Schwefelsäure mit M_2 . Fotos: Aseel Ali Fadhil

Die bisher besten Ergebnisse bezüglich Aufschließen und Trennung der Siliconelastomere und Herauslösen des enthaltenen Platins wurden mit einer Aufschlussmischung bestehend aus drei Komponenten erreicht:

- konzentrierte Schwefelsäure → Brechen der Si–O–Si-Bindungen und vollständiges Auflösen der Silicon-Matrix (siehe Schema 3)
- Königswasser → Oxidatives Auflösen von Platin als Hexachloridoplatin(IV)-Säure $H_2[PtCl_6]$ (siehe Gleichung (1))
- Hexamethyldisiloxan (M_2) → Blockieren der reaktiven Si–OH-Bindungen in den Silicon-Spaltprodukten und Verhinderung der Rückreaktion zu Elastomeren oder Gelen (siehe Schema 4)

Eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse aus den unterschiedlichen Aufschlussversuchen zeigt Abbildung 5.

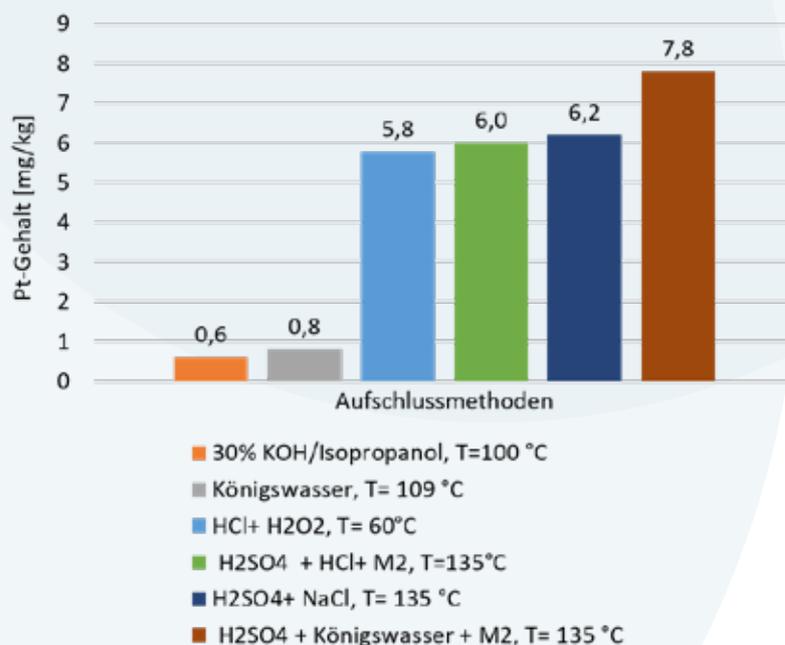
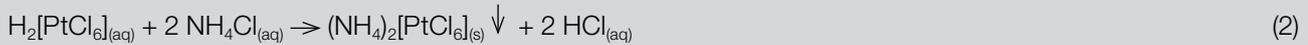


Abbildung 5: Bisher maximal erreichte Konzentrationen an herausgelöstem Platin aus Siliconproben, die mit konventioneller Heizung aufgeschlossen wurden (hier: Silicon-Abformmasse ELASTOSIL® M 4601). Die angegebenen Werte beziehen sich auf die Masse an herausgelöstem Platin pro Kilo Siliconelastomer. Grafik: Aseel Ali Fadhil und Dennis Troegel

c. Isolierung des Platins und Bewertung der Verfahren

Aufgrund der bisher nur sehr geringen Konzentrationen an gelöstem Platin konnte dieses bis zum jetzigen Zeitpunkt nicht erfolgreich durch Fällung abgetrennt und isoliert werden. Geplant war die Fällung des als Hexachloridoplatin(IV)-Säure gelösten Platins als schwerlösliches Ammoniumhexachloridoplatinat(IV) (Gleichung (2)), welches anschließend durch thermische Zersetzung in elementares Platin überführt werden sollte (Gleichung (3)):



Für die in (2) beschriebene Fällung waren die bisher erhaltenen Pt-Konzentrationen allerdings zu niedrig. Durch Kontrollexperimente mit einer kommerziellen Platin-Standardlösung bekannter Konzentration konnte das Projektteam anhand einer systematischen Konzentrationsreihe ermitteln, dass für die angestrebte Fällung von Ammoniumhexachloridoplatinat(IV) eine Pt-Konzentration von mindestens 250 mg/l erforderlich wäre, wogegen bei niedrigeren Konzentrationen die Fällung ausbleibt. So hohe Gehalte konnte das Team im Rahmen dieses Projektes bisher noch nicht erhalten, sodass die Machbarkeit der in Gleichungen (2) und (3) gezeigten Schritte zwar an dem kommerziellen Platin-Standard prinzipiell gezeigt werden, aber noch nicht mit den Aufschlussmischungen aus den Siliconelastomer-Proben umgesetzt werden konnte.

Insgesamt zeigt sich über alle Beobachtungen und Ergebnisse, dass das in Schema 1 gezeigte Konzept zum Vorgehen, Katalysator-Platin aus vernetzten Siliconelastomeren zurückzugewinnen zu können, prinzipiell funktioniert. Auch konnten wesentliche Verbesserungen vor allem im Aufschluss-Prozess durch Wahl geeigneter Säuremischungen und zusätzlicher Additive wie Hexamethyldisiloxan erreicht werden. Dennoch wird das bisherige Verfahren als nicht wirtschaftlich umsetzbar eingestuft. Dies hängt zum einen mit den relativ geringen Pt-Gehalten in den vernetzten Siliconprodukten zusammen (bei einem Pt-Gehalt von ~ 10 ppm ließen sich maximal ein Gramm Platin aus 100 Kilo Silicon recyceln), von denen nach jetzigem Stand nur ein Teil auch wirklich herausgelöst werden kann. Zum anderen steht dem der hohe Bedarf an konzentrierten Säuren in großen Volumina gegenüber, die im Prozess eingesetzt, verarbeitet, abgetrennt und entsorgt beziehungsweise einer weiteren Verwertung zugeführt werden müssten. Somit ist der nasschemische Ansatz über saure Aufschlüsse für sich allein gesehen nicht wirtschaftlich. Interessant ist der Ansatz aber im Hinblick auf die Tatsache, dass die vernetzten Siliconelastomere aufgelöst und in Form von Siliconölen abgetrennt werden können, die – gegebenenfalls nach einer weiteren Reinigung und Trennung der Bestandteile – wieder als Bausteine zur Herstellung neuer Silicone eingesetzt werden könnten. Dieser Ansatz sollte in möglichen Folgeprojekten weiterverfolgt und beleuchtet werden.

5. Nachhaltigkeit/Verwertung/wissenschaftliche Arbeiten

Im Zuge dieses Vorlaufforschungsprojektes führten Studierende mehrere studentische Abschluss- und Projektarbeiten durch, welche in folgender Tabelle zusammengefasst sind:

Art	Autor	Titel	Zeitraum
Masterprojekt	Denis Makhmutov	Rückgewinnung von Katalysator-Platin aus Siliconen Teil 1	10/2019 – 01/2020
Masterprojekt	Denis Makhmutov	Rückgewinnung von Katalysator-Platin aus Siliconen Teil 2	03/2020 – 09/2020
Masterarbeit	Aseel Ali Fadhil	Verschiedene Aufschlussmethoden zur Rückgewinnung von Katalysator-Platin aus Siliconen	03/2020 – 11/2020

Die Ergebnisse aus der Masterarbeit von Aseel Ali Fadhil wurden bereits erfolgreich als Konferenzbeitrag in Posterform auf der Online-Vortragstagung für Anorganische Chemie der Gesellschaft Deutscher Chemiker sowie dem *19th International Symposium on Silicon Chemistry* veröffentlicht:

- A. Fadhil, D. Troegel. Recovery of catalyst platinum from cured silicone elastomers. Online-Vortragstagung für Anorganische Chemie der Fachgruppen Wöhler-Vereinigung und Festkörperchemie und Materialforschung, Gesellschaft Deutscher Chemiker, Deutschland, 29. bis 30. September 2020, Nr. P022.
- A. A. Fadhil, D. Troegel. Recovery of Catalyst Platinum from Cured Silicone Elastomers. 19th International Symposium on Silicon Chemistry, Toulouse, Frankreich, 05. - 06. Juli 2021, Nr. P173.

Da im Rahmen dieses Projektes nicht nur Methoden zur Rückgewinnung von Platin getestet wurden, sondern sich parallel auch Möglichkeiten gezeigt haben, vernetzte Siliconelastomere wieder aufzulösen beziehungsweise in Siliconöle zu überführen, unterstützen die Ergebnisse aus dem Projekt auch die Forschungsarbeiten in einer laufenden kooperativen Promotion zwischen der TH Nürnberg und der Universität Würzburg. In diesem Projekt steht die Entwicklung von Siliconen im Fokus, die sich unter umweltnahen Bedingungen durch ein verbessertes Abbauverhalten auszeichnen und somit der Persistenz von Siliconen in der Umwelt entgegenwirken sollen (Projekt „Biologisch abbaubare Silicone“ (BioSil) am Institut für Chemie, Material- und Produktentwicklung). Auf diese Weise können beide Projekte sich inhaltlich und methodisch sinnvoll und synergistisch ergänzen.

Die im Rahmen des Projektes entwickelten Methoden und Erfahrungen zur analytischen Bestimmung von Platin-Gehalten sind anteilig in das zeitgleich ablaufende Vorlauforschungsprojekt „Brennstoffzellensensorik – Identifizierung von Zustands-, Diagnose- und Prognoseparametern für die Deaktivierung und Alterung von Brennstoffzellen“ (Prof. Dr. Maik Eichelbaum, Fakultät Angewandte Chemie) eingeflossen.

Zuletzt ist die Beantragung einer Förderung für mögliche Anschlussprojekte, vorzugsweise mit industriellen Partnerinnen und Partnern aus der Siliconbranche oder dem Bereich des Edelmetallrecyclings, angestrebt. Hier lassen sich gegebenenfalls über das „EIT Raw Materials“ geeignete Partnerinnen und Partner, auch aus dem Ausland, finden, um die bisher eher grundlegenden Erkenntnisse in eine direkte anwendungsorientierte Entwicklung einfließen zu lassen. Aber auch intern lassen sich die Ergebnisse aus dem Projekt, zum Beispiel im Rahmen der Aktivitäten des Kompetenzzentrums Metalle und Polymere (KMP), weiter wissenschaftlich und technisch verwerten .

6. Literatur

- [1] E. G. Rochow, „Silicium und Silicone“, Springer, Berlin/Heidelberg, 1987.
- [2] B. Pachaly, F. Achenbach, Ch. Herzig, K. Mautner, „Silicone“, in: Winnacker/Küchler, Chemische Technik: Prozesse und Produkte, Band 5: Organische Zwischenverbindungen, Polymere. Wiley-VCH, Weinheim, 2005, S. 1095–1213.
- [3] F. Achenbach, K. Hock, Chem. Unserer Zeit, 2019, 54, 2–13.
- [4] B. Marciniec, in: B. Cornils, W.A. Herrmann (Eds.), Applied Homogeneous Catalysis with Organometallic Compounds, 2. Aufl., Wiley-VCH, Weinheim, 2002, S. 491–512.
- [5] D. Troegel, J. Stohrer, Coord. Chem. Rev. 2011, 255, 1140–1459.
- [6] M. A. Barakat, M. H. H. Mahmoud, Hydrometallurgy 2004, 72, 179–184.
- [7] D. Jimenez de Aberasturi, R. Pinedo, I. Ruiz de Larramendi, J. I. Ruiz de Larramendi, T. Rojo, Minerals Engineering 2011, 24, 505–513
- [8] A. Patel, R. Dawson, Hydrometallurgy 2015, 157, 219–225.
- [9] M. K. Jha, J.-c. Lee, M.-s. Kim, J. Jeong, B.-S. Kim, V. Kumar, Hydrometallurgy 2013, 122, 23–32.
- [10] <http://www.platinum.matthey.com/prices/price-charts> (Abrufdatum 22.10.2020, 13:00 Uhr).
- [11] R. N. Lewis, Annals New York Academy of Sciences 1969, 159, 291–298



Impressum

Vorlaufforschung 2019/2020

Herausgeber:

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

Redaktion und Layout:

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

Bildnachweis:

- © Oliver Kussinger: Titel / Rücktitel, 2 / 3, 6 / 7, 76 / 77, 78, 112 / 113, 156 / 157, 158, 234 / 235
- © Melanie Scheller: 5, 94 / 95, 96, 220 / 221, 222
- © sebra - stock.adobe.com: 10 / 11
- © highwaystarz - Fotolia: 12
- © Lukas Rabenstein: 20 / 21, 22
- © everythingpossible - Fotolia: 30 / 31, 32
- © Ralf Lösel: 42 / 43, 44
- © Simon Kraus - stock.adobe.com: 52 / 53, 54
- © Photobank/Fotolia: 64 / 65, 66
- © schulzfoto - stock.adobe.com: 86 / 87, 88
- © Kurt Fuchs/EnCN: 116 / 117, 118
- © Tim Neiertz: 128 / 129, 130
- © Andreas Schkutow: 142 / 143, 144
- © Stihl024 - stock.adobe.com: 166 / 167, 168
- © Michael Mirke: 178 / 179, 180
- © andov - stock.adobe.com: 190 / 191, 192
- © TH Nürnberg: 200 / 201
- © Lumina Images - stock.adobe.com: 202
- © Leonid Andronov - stock.adobe.com: 208 / 209, 210
- © Petra Simon: 232

Stand: Juli 2021

