



# Vorlauftforschung 2016/2017

Schriftenreihe

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





Vorlauftforschung  
der TH Nürnberg  
2016/2017

# Vorlaufforschung

## Editorial

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

## Berichte zur Vorlaufforschung

Hohe Kompetenz und starkes Potenzial: Unsere dicke Doppelausgabe zur Vorlaufforschung 2016/2017 an der Technischen Hochschule Nürnberg präsentiert 20 vielversprechende Forschungsprojekte aus unterschiedlichen Fakultäten.



Die Vorlaufforschung finanziert mit rund 300.000 Euro jährlich die frühe Phase von einer sich manifestierenden Idee bis zu einer antragsreifen Forschungskonzeption. Damit unterstützt der Freistaat Bayern aus TH-Mitteln kleinere Vorprojekte, Machbarkeitsuntersuchungen oder Aufbaustudien in der entscheidenden Phase zur Entwicklung zukunftsfähiger Projekte.

Das interdisziplinär zusammengesetzte Gutachtergremium fokussierte auf eine Auswahl von Forschungsthemen, die eine hohe gesellschaftspolitische, rechtliche, wirtschaftliche und technologische Relevanz bieten. 44 Kolleginnen und Kollegen aus dem Sachverständigenausschuss für Wissens- und Technologietransfer, Forschung und Entwicklung sowie allen Fach- und Forschungsrichtungen haben sich engagiert an der Auswahl der eingereichten Beiträge beteiligt. Dafür ganz herzlichen Dank!

Aus den vorgestellten Vorlaufforschungsprojekten ergeben sich für die TH Nürnberg eine Reihe von direkten Ergebnissen, die deutlich machen: Die Förderung einer vielversprechenden Idee zahlt sich mehrfach aus, in Publikationen, Patentanträgen, Forschungs- und Entwicklungsanträgen sowie einer hohen Erfolgsquote in der Beantragung von Forschungsprojekten, einer Zunahme an Auftragsforschung und Dienstleistung, immer mehr Kooperationen mit Wissenschafts- und Wirtschaftspartnern, Ausgründungen...

Genauso wertvoll sind auch die mittelbaren Auswirkungen erfolgreicher Vorlaufforschungsprojekte: Sie bieten die Option zur Einbindung von Bacheloranden und Masteranden, sie bereichern die Attraktivität der Lehre in den Fakultäten, sie tragen zur bundesweiten Vernetzung unserer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler bei und schaffen grundlegende Voraussetzungen für die Initiierung weiterer Vorhaben.

Wir sind an der TH Nürnberg sicher: Da ist noch sehr viel Potenzial!



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





Vorlaufforschung  
der TH Nürnberg  
2016











# Routenwahlverhalten von Fußgängern

Prof. Ingrid Burgstaller  
Prof. Gunnar Tausch  
Jennifer Botzki, M.A.  
Fakultät Architektur  
Technische Hochschule Nürnberg

Prof. Dr.-Ing. Harald Kipke  
Fakultät Bauingenieurwesen  
Forschungsprofessur Intelligente Verkehrsplanung  
Nuremberg Campus Of Technology  
Technische Hochschule Nürnberg

## Wesentliche Projektziele

Sowohl in kultureller als auch in wirtschaftlicher Hinsicht kann dem Fußgänger im Kontext der Stadt besondere Bedeutung zugesprochen werden. Ziel des Projektes ist die Erarbeitung von Grundlagen im Bereich der Fußgängerforschung. Das Forschungsprojekt konzentrierte sich insbesondere auf die Sammlung bisheriger, interdisziplinärer Forschungsergebnisse sowie auf die Erarbeitung von Parametern mit Einfluss auf das Routenwahlverhalten. Dabei wurden u. a. zwei unterschiedliche Herangehensweisen zur Abbildung des Fußgängerverkehrs (1. Space Syntax zur stadtmorphologischen Beschreibung und 2. PTV Visum zur Beschreibung der Routenwahl) einem Vergleich auf Basis einer einfachen orthogonalen und ringsymmetrischen Struktur unterzogen. Damit verbunden war das Ziel, mögliche Unterschiede herauszuarbeiten. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Basis für Folgeprojekte.

### 1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Juni bis Dezember 2016
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen NCT - Intelligente Verkehrsplanung
Projektleitung	Prof. Ingrid Burgstaller
Kontaktdaten	E-Mail: <a href="mailto:ingrid.burgstaller@th-nuernberg.de">ingrid.burgstaller@th-nuernberg.de</a> <a href="mailto:harald.kipke@th-nuernberg.de">harald.kipke@th-nuernberg.de</a> <a href="mailto:gunnar.tausch@th-nuernberg.de">gunnar.tausch@th-nuernberg.de</a>

### 2. Ausgangslage

Der Mensch geht bereits seit Millionen von Jahren ausschließlich und seit ca. 2000 Jahren fast ausschließlich zu Fuß. Trotzdem ist das Zufußgehen das am wenigsten erforschte Mittel zur Realisierung von Mobilität. Die Anteile des Fußgängerverkehrs im Personenverkehr werden systematisch deutlich zu gering eingeschätzt. Derzeit werden noch 20 bis 25 Prozent aller Ortsveränderungen vollständig zu Fuß bewältigt. 70 Prozent der Ortsveränderungen mit motorisierten Verkehrsmitteln (Kfz, ÖPNV) beginnen oder enden jedoch mit einer Strecke, die zu Fuß zurückgelegt wird. Es ist wissenschaftlich erwiesen, dass das Zufußgehen das physische und psychische Wohlergehen fördert. Dennoch wird in unserer, von motorisierten Verkehrssystemen geprägten Welt das Zufußgehen offensichtlich als eine anachronistische Art der Fortbewegung gesehen und findet daher mit einigen wenigen Ausnahmen weder in der Stadtplanung noch in informellen Planungen Beachtung. Nach wie vor werden bis heute neue Baugebiete in erster Linie nach den Anforderungen des Autoverkehrs (Ausstattung und Zugänglichkeit von Abstellplätzen für Pkws, der Flüssigkeit des Kfz-Verkehrs u. v. m.), jedoch ohne die spezifische Berücksichtigung der Anforderungen der Fußgänger geplant. Obwohl Fußgänger aufgrund ihrer physiologischen Grenzen gegenüber Steigungen und Umwegen besonders empfindlich sind, rückt nach wie vor die Sicherstellung

des fließenden Kfz-Verkehrs in den Fokus aller Planungsbemühungen. Wichtige Ansätze zur Erforschung des Fußgängerverkehrs finden sich nicht in den Verkehrs- und Ingenieurwissenschaften, sondern im interdisziplinären Bereich zwischen Soziologie und Architektur. Der britische Wissenschaftler Bill Hillier entwickelte zusammen mit Julienne Hanson bereits 1986 mit Hilfe der Graphentheorie Space Syntax, als Hilfsmittel zur Beschreibung der abstrakten morphologischen Wirkung von Räumen in einer Stadt. [1] Die Art und Weise, wie der öffentliche Raum geformt und miteinander verbunden und vernetzt ist, gibt hierbei Rückschlüsse auf die Benutzungsdichten durch die Bewohner und Besucher auf ihren unzähligen Wegen von A nach B in der Stadt. Dies haben tausende von Studien mit Hilfe der Space-Syntax-Methode auf aller Welt dokumentiert ([www.spacesyntax.net](http://www.spacesyntax.net)). Das Programm DepthmapX (Freeware) wurde an der Bartlett School of Architecture von Hillier und Hanson und deren Team über die letzten 40 Jahre entwickelt. Der grundlegende Gedanke ist, dass Raumzusammenhänge graphisch und mathematisch bewertet werden können. Diese räumlichen Werte korrelieren mit sozialen Faktoren. Attraktoren können die Nutzungsintensität beeinflussen, im Idealfall im Sinne des morphologischen Netzes.

Ein, in der Intension anderer, diesmal physikalischer, Ansatz zur Beschreibung des Fußgängerverhaltens geht auf den Physiker Dirk Helbing zurück. Ihm gelang es, das kurzfristig-reaktive Fußgängerverhalten zu simulieren. Sein unter dem Namen „Social Force“ bekanntes Modell zielt jedoch nicht auf die Abbildung makroskopischer Routenwahl-Entscheidungen. Die Nachbildung dieser makroskopischen Entscheidungen in der Routenwahl von motorisierten Verkehrsteilnehmern ist jedoch mit dem seit Jahren auf dem Markt befindlichen Software Visum des Softwareunternehmens PTV möglich. Wie die Forschungen von Hillier bereits zeigen, ist das Entscheidungsverhalten von Fußgängern um ein vielfaches komplexer als das Entscheidungsverhalten der Nutzer motorisierter Verkehrssysteme, da sowohl die Entscheidungsfreiräume als auch die Parameter, die auf die Entscheidung einwirken, größer sind.

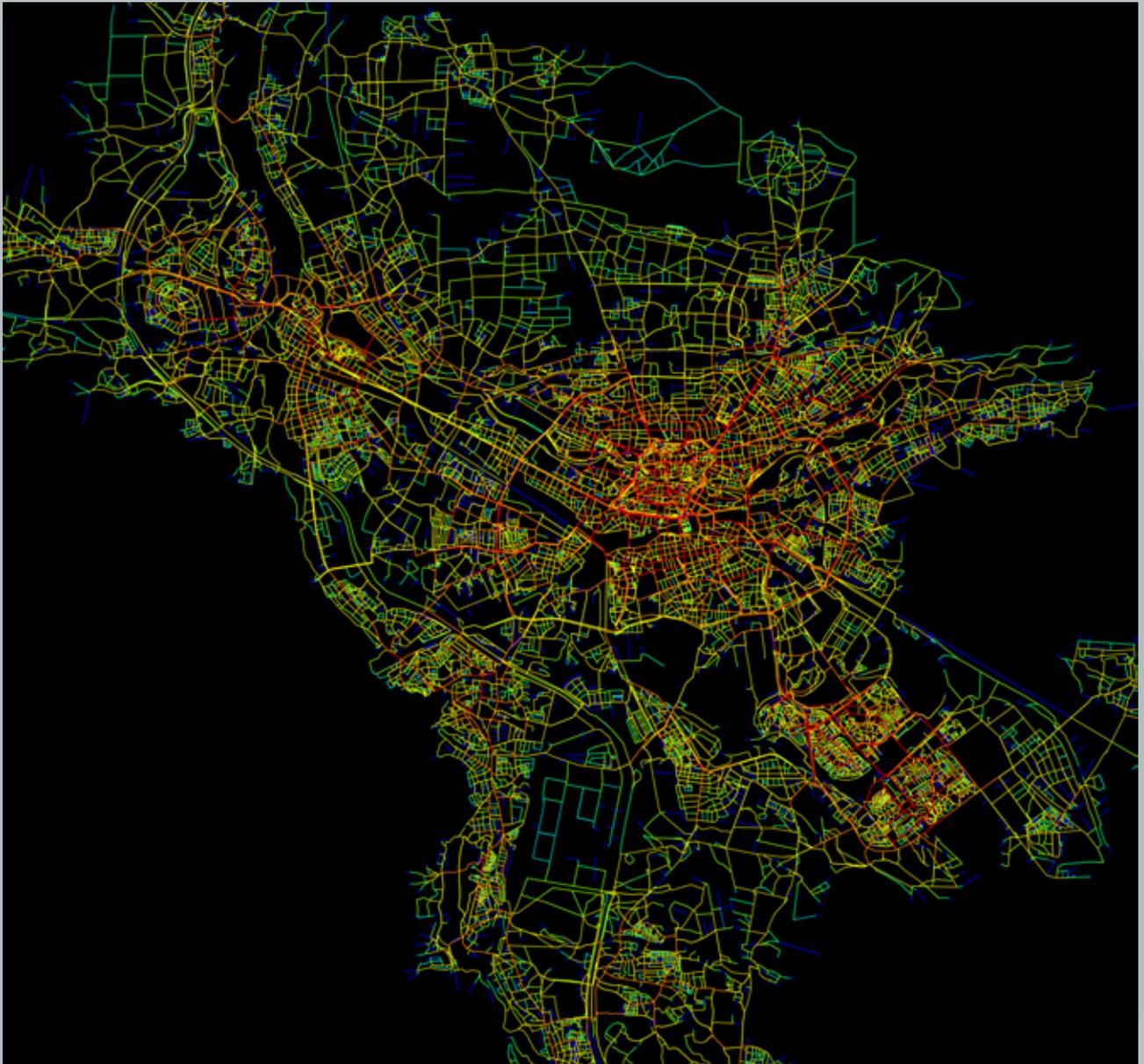


Abbildung 1: Karte von Nürnberg und Fürth mit dephmapx (LogChoice  $r=2000$  metric), studentische Vorarbeiten

### 3. Ziele des Forschungsprojekts

**Allgemeine Fußgängerforschung.** Anhand einer ausführlichen Literaturrecherche wurde die bisherige Fußgängerforschung über Verkehrsplanung und Städtebau hinaus in gesellschaftswissenschaftliche Disziplinen wie Psychologie oder Soziologie sowie in Teilbereichen von Ökonomie, Technik und Mathematik näher untersucht. Ziel ist das Erlangen eines umfassenden Blickes auf den Fußgänger mithilfe bereits entwickelter Forschungsergebnisse und die Darstellung möglicher Verbesserungen für die Situation des Fußgängers im Verkehr.

**Spezifische Fußgängerforschung.** Unter Betrachtung bereits entwickelter Fußgängermodelle wurden in Reflexion zu den Parametern des Routenwahlverhaltens mögliche Defizite ermittelt. Neben Space Syntax und PTV Visum wurden bisher nur wenige Versuche unternommen, den Fußgänger auf der Maßstabebene der Stadt realitätsgerecht zu simulieren. Es gilt, beide Programme mithilfe einfacher orthogonaler, beziehungsweise radialer

Raster einem Vergleich zu unterziehen, um Vor- und Nachteile herauszustellen und mögliche fehlende Parameter der Fußgängerroutrwahl zu ermitteln.

#### 4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Im ersten Schritt wurden mit Hilfe einer Mind-Map die Fachbereiche, die sich mit der Fußgängerforschung beschäftigen, untersucht. Das umfasst neben der Verkehrsplanung, Architektur und Stadtplanung, Psychologie und Soziologie auch Teilbereiche von Ökonomie, Technik und Mathematik. Die wichtigste Erkenntnis zu Beginn der Untersuchung ist in diesem Kontext, dass sich das ursprünglich erwartete Desinteresse der Forschung am Fußgänger auf Grund eines fehlenden offensichtlichen Nutzens [2] keineswegs bewahrheitet hat. So wurde und wird in den unterschiedlichen Fachdisziplinen mit jeweils eigenen Schwerpunkten und methodischen Ansätzen geforscht. Während sich die Fußgängerforschung in einigen Bereichen, wie der Informatik zur Erstellung digitaler Fußgängermodelle, erst in den letzten Jahren deutlich und verstärkt entwickelt hat, belegen psychologische und soziologische Studien schon seit Jahrzehnten die Probleme und Potentiale des Fußgängers. Bisher wurde er in der Forschung jedoch fast ausschließlich innerhalb der eigenen Fachdisziplin behandelt. Fachübergreifende Ansätze finden sich erst in neuerer Zeit, unter anderem durch den Architekten und Stadtplaner Jan Gehl oder den interdisziplinär denkenden Wiener Verkehrsplaner Hermann Knoflacher.

Zunächst wurde die Fülle vorhandener Forschungsergebnisse und -ansätze in thematische Kategorien eingeteilt. Im Fokus stand bei der Untersuchung des Routenwahlverhaltens eines Fußgängers die Unterscheidung zwischen der längerfristigen und der spontanen Wahl. Die Wahl des eigenen Wohnstandorts oder der Arbeitsweg sind auf länger angelegt. Bei der spontanen Wahl von Freizeiteinrichtungen oder Einkaufsgebieten handelt es sich um Orte mit nur schwacher dauerhafter Bindung. Das zieht eine ebenso spontane Verkehrsteilnahme nach sich. [3] Als schwächster Verkehrsteilnehmer ist der Fußgänger jedoch in beiden Situationen mit vielfältigen Problemen konfrontiert. War er im Mittelalter in der Mitte der Straße verortet, während sich Tiere und Wägen an den Seiten bewegten, verdrängte die Pflasterung der Straßen ihn nach und nach an die Ränder. [4] Der zunehmende motorisierte Verkehr führte zu verstärkten Sicherheitsproblemen, vor allem für Kinder und ältere Menschen. Weitere Problembereiche sind der Bewegungskomfort des Fußgängers, wie beispielsweise der Belagszustand oder fehlendes Verständnis und Rücksichtnahme des Autofahrers. Hier wird eine Sensibilisierung der Verkehrsteilnehmer im Umgang mit den zu Fuß Gehenden notwendig. Zuletzt führten auch ästhetische beziehungsweise psychologische Aspekte des Wohlbefindens, wie Lärm oder schlechte Luft, zu einer beeinträchtigten Interaktion im Verkehr. [5] Diese wurden bisher beinahe gänzlich in Fußgängermodellierungen vernachlässigt.

Nach der Betrachtung des Fußgängers im weitgefassteren Rahmen wird im Folgenden ein Schwerpunkt definiert, welcher sich im Schnittpunkt von Architektur und Verkehrsplanung, Informatik, Ökonomie und Technik befindet. Bei der Suche nach Modellen zur Simulation des Fußgängers zeigt sich, dass vor allem in den letzten drei Jahrzehnten intensiv geforscht wurde, was mitunter durch die steigende Rechnerleistung begründet werden kann. Hier muss zwischen stochastischen, deterministischen, gaskinetischen und fluiddynamischen Modellen sowie speziellen Routenwahlmodellen unterschieden werden. Anschließend können folgende Faktoren als für die Routenwahl relevant ermittelt werden: schnellster Weg / Faktor Zeit, kürzester Weg / Faktor Länge, lange Wege ge-

radeaus / Faktor Richtungswechsel, Orientierung an der Luftlinie, Effizienz, „land-marks“ / Zwischenziele, Steigung, Sicherheitsgefühl, Wohlbefinden, visuelle Reize, Barrieren, Interaktion (Personenaufkommen, Staubildung), Witterung.

Im ersten Schritt wurden beide Softwareansätze, zum einen der sozialmorphologische holistische Ansatz depthmapX von Space Syntax, zum anderen der diskrete entscheidungsbasierte Ansatz von PTV Visum, hinsichtlich ihrer Abbildungsmethodik verglichen. Anschließend erfolgte eine Untersuchung, inwiefern die beiden Programme in ihrer Gewichtung und Aussage bezüglich der Netzkanten übereinstimmen. Basis dieser Studie bildet ein orthogonales, aus Horizontalen und Vertikalen bestehendes System sowie ein ringsymmetrisches Netz. Die Untersuchung wurde bewusst auf einfache Systeme reduziert, um die Unterschiede deutlicher herausarbeiten zu können. Jede Struktur wurde in depthmapX und PTV Visum analysiert und deren errechnete Werte auf 100 Prozent umgelegt. Somit ergab sich die prozentuale Streckenbelastung, die in Addition 100 Prozent je System entsprechen. Durch den Schritt der Umrechnung werden die zunächst weit voneinander entfernten Zahlen vergleichbar.

Da in der Studie das Durchgangspotential jedes Segments im globalen Kontext von Interesse ist, kommt die Choice-Berechnung in depthmapX zum Einsatz. Bei PTV Visum stellt sich durch Testen verschiedener Routenwahlalgorithmen die stochastische Berechnung als besonders günstig und mit Space Syntax vergleichbar dar. Hierbei wird die Streckenbelastung auf Grundlage des optimalen Weges ermittelt, die einzelnen Routen jedoch zusätzlich subjektiv bewertet. [6] In den ersten beiden Darstellungen sind die Streckenbelastungen für PTV Visum und depthmapX in Prozent gegenübergestellt. Daraus ergibt sich in der folgenden Zeichnung die Differenz dieser Werte, die anschließend grafisch veranschaulicht wurden.

Das orthogonale System basiert auf einem Schachbrettmuster mit je fünf Quadraten in x- und y- Richtung und mit einer Abmessungen von 500 m x 500 m. Im störungsfreien Raster schwankt die Belegung der Segmente zwischen 0,83 Prozent und 2,95 Prozent. Die Streckenbelastung ist an den Außenkanten am geringsten und steigert sich Richtung Mitte. Die Ecksegmente sind identisch besetzt, wohingegen die Werte von depthmapX im Zentrum um bis zu 0,25 Prozent erhöht sind. Die Daten unterhalb des Mittelwerts sind nahezu kongruent, darüber entfernen sie sich zunehmend voneinander, weisen jedoch stets die gleiche Tendenz auf. Insgesamt ist eine große Übereinstimmung in der prozentualen Verteilung festzustellen. Es liegt eine Standardabweichung von 0,09 Prozent vor.

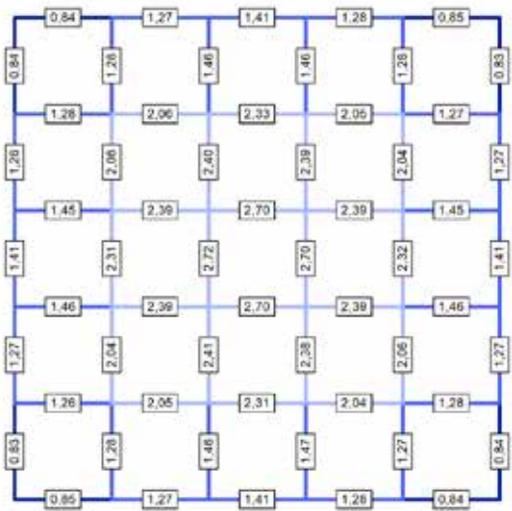


Abbildung 3: Orthogonales Raster, 500m x 500m pro Quadrat  
 Links die stochastische Umlegung in PTV Visum, rechts die Segment Map, Metric Choice in dephmapx/Space Syntax

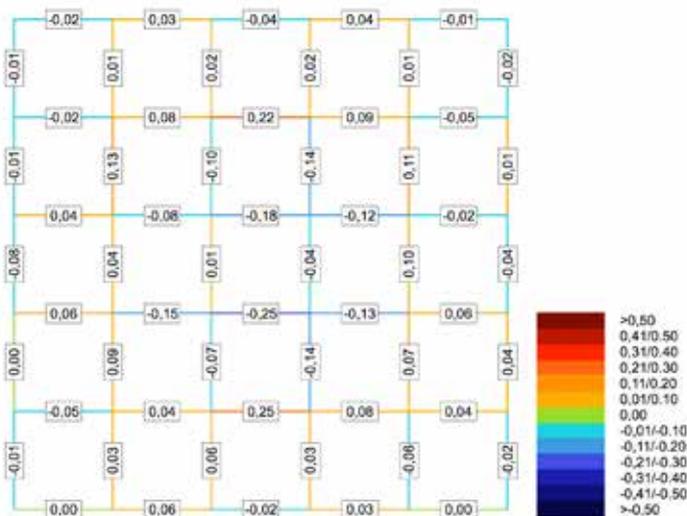
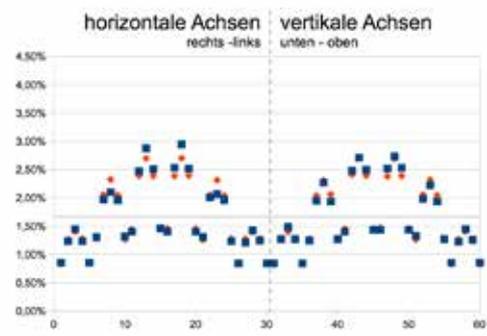


Abbildung 4: Orthogonales Raster, 500 m x 500 m pro Quadrat  
 Links die Unterschiede im prozentualen Anteil an 100 Prozent Einspeisung, Rechts die Unterschiede beider Programme im Vergleich (rot dephmapx, blau PTV Visum)



Um die Vergleichbarkeit der zwei Analysemethoden Space Syntax und PTV Visum weiter prüfen und evaluieren zu können, wurden reale Zahlen durch Fußgängerzählungen ermittelt und in das System eingespeist. Dazu wurden im Nürnberger Stadtteil Gostenhof im Bereich Bärenschanze an einem normalen Wochentag, in diesem Fall Mittwoch den 02. November 2016, um jeweils 9.00 Uhr, 12.00 Uhr, 15.00 Uhr, 18.00 Uhr und 21.00 Uhr, sowie an einem Freitagabend um 21.00 Uhr Fußgängerzählungen durchgeführt. Der Stadtteil Gostenhof wurde ausgewählt, da ihm ein orthogonales Raster zu Grunde liegt und, wie zuvor erläutert, die Analysewerkzeuge Space Syntax und Visum in Stadtgebieten mit Strukturen dieser Art ähnliche Resultate ergeben. Bärenschanze wird im Norden durch die vielbefahrene und vielbegangene Fürther Straße begrenzt, im Süden durch einen Bahndamm beziehungsweise durch das Gelände der Deutschen Bahn. Das Viertel ist von Ost nach West circa 1.000 m lang sowie in der anderen Richtung nur etwa 300 m breit und somit gut zu Fuß zu durchqueren.



Abbildung 5: Schwarzplan des Stadtteils Gostenhof in Nürnberg



Abbildung 6: Ergebnis der Fußgängerzählung in Gostenhof am Mittwoch, den 2. November 2016

Zu den genannten Uhrzeiten haben Teams von zwei Personen das Viertel in drei Routen nacheinander begangen und die Anzahl der Fußgänger aufgenommen, indem eine Person den Straßenraum durchgehend filmte und die andere die Fußgänger in einen ausgedruckten Lageplan händisch eintrug. Hierbei wurde zwischen gehenden und stehenden Fußgängern unterschieden. Gehende Personen wurden als Strich in die entsprechende Richtung eingezeichnet, stehende Personen als Punkt. Es wurden dabei nur die Personen betrachtet, die sich gleichzeitig mit dem Forschungsteam in einem Straßenabschnitt aufgehalten haben, dem Team entgegenkamen, mit ihm auf etwa einer Höhe in gleicher Richtung mitliefen oder den Straßenabschnitt querten. Im Anschluss an die Zählungen im Stadtteil Bärenschanze wurden die analog erfassten Ergebnisse via CAD digitalisiert. Abbildung 6: zeigt neben dem Schwarzplan die Überlagerung aller am Mittwoch durchgeführten Zählungen.

Interessant ist bei der überlagerten Darstellung des Personenaufkommens, dass die Verteilung der Fußgänger in diesem Gebiet sehr homogen ist. Die Fürther Straße im Norden, als große Stadtstraße, sowie die Kernstraße, die den Abschluss des Gebietes im Osten darstellt, sind überdurchschnittlich stark frequentiert. Weniger stark ist die Frequentation in der Austraße, im Süden des Zählungsgebietes, weil dort das Bahngelände südlich anschließt. Einige Fußgänger sind auch im Park anzutreffen, jedoch lässt sich erkennen, dass der Großteil den Park nur durchquert und sich dort nicht länger aufhält.

Im Anschluss an die Fußgängerzählung wäre im weiteren Verlauf dieser Forschungsarbeit eine Betrachtung der prozentualen Vergleichswerte von Space Syntax und PTV Visum in Referenz zu den Ergebnissen der Fußgängerzählung sowie eine eingehendere Untersuchung der hinter den Programmen liegenden Algorithmen und Parameter für die Routenwahl interessant.

## 5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Die geleisteten Untersuchungen und Ergebnisse im Rahmen der Vorlaufforschung bilden die Grundlage zur weiteren Antragstellung. Die während des Forschungsvorhabens gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse wurden im Rahmen der bereits mehrjährigen studentischen Erforschung des Raumes Nürnberg-Fürth mit Space Syntax auf dem Space Syntax Symposium 2017 in Lissabon vorgestellt.

Grundsätzlich soll das Ziel weiterer Forschungen die Verbesserung und Anerkennung des Fußgängers als Verkehrsteilnehmer durch nachhaltige städtebauliche beziehungsweise verkehrsplanerische Förderung sein. Dies kann auf kommunaler oder Bundesebene geschehen, aber auch eine Zusammenarbeit mit Space Syntax Limited oder PTV Group zur wechselseitigen Verbesserung der Fußgängersimulationsprogramme wäre vorstellbar.

Durch die Vorlaufforschung wurde die interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen der Fakultät Architektur und der Fakultät Bauingenieurwesen (Forschungsprofessur Intelligente Verkehrsplanung am NCT) gestärkt. In enger wechselseitiger Abstimmung wurden die bisherigen Ergebnisse gemeinsam erzielt, eine Weiterführung dieser Zusammenarbeit in einem möglichen Forschungsantrag ist daher erstrebenswert. Interesse zeigte sich im Verlauf der Forschung an den Fakultäten Betriebswirtschaft und Sozialwissenschaften, sowie nach einer Themenvorstellung im Rahmen der Vortragsreihe „Verkehr und Mobilität“ auch von Seiten des ÖPNV. Mit der Entwicklung eines Fußgängersimulators sollen am Nuremberg Campus Of Technology (NCT) ab 2018 Untersuchungen zur Zeit- und Aufwandswahrnehmung beim Zufußgehen unter unterschiedlichen visuellen Umgebungsreizen stattfinden.

## 6. Literatur

- [1] Hillier, Bill; Hanson, Julienne (1989): The social logic of space. Repr. Cambridge: Cambridge Univ. Press
- [2] Burckhardt, Lucius; Ritter, Markus; Schmitz, Martin (Hg.) (2011): Warum ist Landschaft schön? Die Spaziergangswissenschaft. 3. Aufl. Berlin: Schmitz.
- [3] Risser, Ralf (2002): Gut zu Fuß. Fußgänger als Verkehrsteilnehmer zweiter Klasse. Wien: Mandelbaum.
- [4] Schwedes, Oliver; Rammler, Stephan (2012): Mobile Cities. Dynamiken weltweiter Stadt- und Verkehrsentwicklung. 2., erg. und überarb. Neuaufl. Berlin: Lit (Mobilität und Gesellschaft, 2).
- [5] Anderson, Stanford (Hg.) (1986): On streets. 1. MIT Pr. paperback ed. Cambridge Mass u.a.: MIT Press.
- [6] Risser, Ralf (2002): Gut zu Fuß. Fußgänger als Verkehrsteilnehmer zweiter Klasse. Wien: Mandelbaum.
- [7] VISUM 12.5 Grundlagen von PTV GROUP, S.373









3dParFlow – Untersuchungen  
und Validierung eines neuartigen  
numerischen Rechenverfahrens  
zur 3d-Modellierung  
diskreter Partikel in einer Strömung

Prof. Dr.-Ing. Dirk Carstensen  
Carla Schneefeld, M. Eng.  
Fakultät Bauingenieurwesen  
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft  
Technische Hochschule Nürnberg

## Wesentliche Projektziele

Das Ziel des Projekts ist es, Erkenntnisse über die Möglichkeiten der Modellierung von bewegten Festkörpern, wie beispielsweise Sedimente und Geschiebe in einer Strömung mittels 3d-CFD-Methoden zu sammeln und für wasserbauliche, hydraulische Untersuchungen einzusetzen. Fachspezifische Softwarepakete liefern Lösungen und entsprechende numerische Ansätze. Die Überprüfung der physikalischen Plausibilität und die Einhaltung natürlicher Gesetzmäßigkeiten sind allerdings die Voraussetzung, um ein numerisches Modell in der Praxis anwenden zu können. Im Zuge dieser Arbeiten werden ausgewählte Lösungsansätze auf der Grundlage eines bestehenden, gegenständlichen Versuchsstandes untersucht. Das dadurch erzeugte kalibrierte Modell bietet mittelfristig beispielsweise die Möglichkeit zur Entwicklung von Bemessungsgrundlagen für die Dimensionierung von Wasserbausteinen, welche in Spezialfällen zur Füllung von Energieumwandlungsanlagen / Tosbecken an Hochwasserentlastungen verwendet werden.

### 1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2016
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Bauingenieurwesen / Labor für Wasserbau
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Dirk Carstensen
Kontaktdaten	E-Mail: dirk.carstensen@th-nuernberg.de

### 2. Ausgangslage

Durch die über die letzten Jahre steigende Rechnerleistung sowie stetige Neuerungen und Verbesserungen numerischer Methoden und CFD-Softwareanwendungen eröffnen sich neue Anwendungsfelder für Strömungssimulationen im Bereich des Wasserbaus.

Die Standardprozedur der numerischen Modellierung von Sedimenten und Geschiebe in Fließgewässern ist ein empirischer Ansatz. Anstatt die Bewegung jedes einzelnen Partikels zu modellieren, wird das Sediment in seiner Gesamtheit als Volumenanteil berechnet. Dies geschieht über Ansätze wie beispielsweise die Formel für Geschiebetransport von Meyer-Peter und Müller (Aigner & Carstensen, 2015). Die Methodik ermöglicht die großflächige Betrachtung von Sedimentbewegungen ganzer Flussgebiete, sie ist für lokale Detailuntersuchungen aber in der Regel nicht gut geeignet.

3d-CFD-Software liefert mittlerweile auch Methoden zur diskreten Modellierung einzelner Feststoffkörper in einer Strömung. Das kann beispielsweise dazu dienen, Sedimentbewegung im Nahfeld von Wasserbauwerken besser zu verstehen und derartige Effekte in Planung und Instandhaltung von Bauwerken berücksichtigen zu können. Vor allem bei komplexen und turbulenten Strömungsverhältnissen lassen sich aus der Anwendung empirischer Ansätze oftmals keine ausreichenden Erkenntnisse ableiten.

Modellversuche zur Überprüfung der Funktionalität von Hochwasserentlastungsanlagen mit einer neuartigen, umweltverträglichen Gestaltung der Energieumwandlungsanlagen (Tosbecken) im Labor für Wasserbau Nürnberg gaben den Anlass, die Modellierbarkeit von Feststoffkörpern in turbulenten Strömungsverhältnissen durch die bereits genannten Methoden genauer zu untersuchen. Das Ziel ist es, die Tosbecken durch eine Verfüllung mit Gesteinsmaterial besser in den Gewässerlauf zu integrieren. Die Voraussetzung hierfür ist, dass im seltenen, Fall eines entsprechenden Hochwasserereignisses das Füllmaterial durch die Kraft der turbulenten, schießenden Strömung aus dem Becken geräumt wird. Dieses wird anschließend seiner eigentlichen Funktion als Energieumwandler gerecht. Um das sicherzustellen, ist eine entsprechende Dimensionierung des Füllmaterials notwendig. Allerdings fehlen hierzu bisher Bemessungsrichtlinien und Empfehlungen. Die dreidimensionale, hydrodynamisch numerische (3D HN) Modellierung kann hierzu Grundlagen schaffen.

Ein bestehender, gegenständlicher Modellversuch – Standardüberfall mit anschließendem, mit gleichförmigen Kugeln ausgelegtem Tosbecken – diente als Basis der Untersuchungen. Der Versuch zeigte im Verlauf von Voruntersuchungen, dass die Simulation der Kugelbewegungen bei entsprechenden Randbedingungen möglich ist. Allerdings ließ er noch deutliche Defizite in der bestehenden Modellierung erkennen, die sich durch ein teilweise physikalisch nicht plausibles Verhalten der Kugeln zeigte. Als Ursachen werden ungenaue Randbedingungen, falsch gewählte Programmeinstellungen, Gittereffekte und ggf. Grenzen der Methodik angenommen.

### 3. Ziele des Forschungsprojekts

Ein wesentliches Ziel des Forschungsprojekts ist die Untersuchung und Anwendung numerischer Methoden zur Modellierung der Festkörperbewegung, um diese für wasserbauliche, hydraulische Untersuchungen einsetzen zu können. Das bestehende 3d-CFD-Modell soll weiterentwickelt und kalibriert werden, um eine maximal mögliche Übereinstimmung mit natürlichen Vorgängen zu entwickeln. Auf dieser Grundlage ist es möglich zu bewerten, ob numerische Methoden nach dem heutigen Stand in diesem speziellen Anwendungsbereich in der Lage sind, die Natur und die Physik abzubilden.

### 4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Im Rahmen des Projekts wurden unterschiedliche Untersuchungen zu Modellierung von Festkörpern in Strömungen durchgeführt. Gearbeitet wurde mit der CFD-Software Star-CCM+.

Anhand der Versuche wurden Möglichkeiten der Software untersucht, diskrete Partikel in Strömungen zu simulieren und diese entsprechend auch auf ihre Plausibilität und Nähe zu natürlichen Gesetzmäßigkeiten hin zu überprüfen. Folgende Szenarien wurden untersucht:

- Sedimentbewegung von Sand in einer Strömung über eine raue Sohle (nur numerisch)
- nicht-sphärische Körper in einer Strömung (nur numerisch)
- einzelne Kugel in einer Strömung (physikalischer Referenzversuch und numerische Modellierung)

Zwei von drei Modellen wurden mit gleichförmigen Kugeln als diskrete Körper aufgesetzt. Die Kugel als einfachste Form wird für die Grundlagenstudien herangezogen, da sie eine einfachere Validierung der Simulation ermöglicht und dadurch geometriebedingte Effekte nicht berücksichtigt werden müssen. Mit einem plausiblen „einfachen“

chen“ Modell könnte in einer nächsten Stufe mit einer Übertragung auf komplexere Szenarien begonnen werden. Dazu gehören beispielsweise nicht-sphärische Körper, bei denen bei einer Interaktion miteinander beispielsweise auch Verklammerungseffekten entstehen können.

Für die 3d-Modellierung ist die Auswahl geeigneter numerischer Methoden und Lösungsansätze essentiell. Soll die Lage der freien Oberfläche abgebildet werden, umfasst das Modellgebiet bei wasserbaulichen Anwendungsfällen oft einen Wasser- und einen Luftbereich. Durch Strömungshindernisse oder Strömungsbedingungen kommt es meist zu Turbulenzerscheinungen, die, je nach Ausprägung, einen maßgebenden Einfluss auf die Strömung haben. Dies muss in der Auswahl der numerischen Methoden für die Simulationen berücksichtigt werden. Für die Simulationen wurde mit folgenden Methoden gearbeitet:

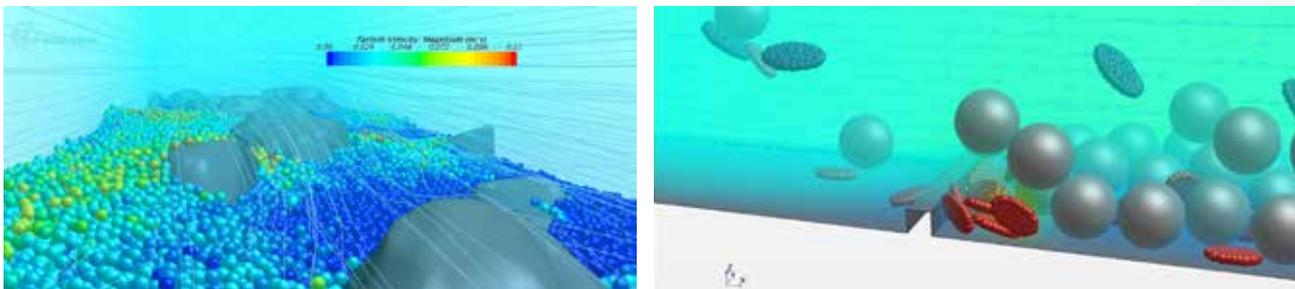
Als Modell für die Simulation von Mehrphasenströmungen (Wasser und Luft) wurde die Eulerian Multiphase gewählt, die zur Abbildung der Phasengrenzschicht (Wasseroberfläche) durch die Volume of Fluid (VOF)-Methode ergänzt wird. Als Turbulenzmodell wurde das Spalart-Allmaras Detached Eddy Modell verwendet, das als Kombination aus LES (Large-Eddy-Simulation) und RANS (Reynolds-Averaged-Navier-Stokes) Modellen eine Auflösung von größeren Wirbelstrukturen innerhalb des Modellgebiets gewährleistet (LES). Durch den Einsatz von RANS (keine direkte Modellierung von Wirbeln, Mittelung der Strömungsgrößen und Verwendung einer turbulenten Scheinreibung (Wirbelviskosität) zur Beschreibung der Turbulenzauswirkungen in den Randbereichen ist es möglich, signifikant Rechenzeit gegenüber einem reinen LES Modell einzusparen.

Zur diskreten Modellierung der Partikel wurde die Discrete-Element-Method (DEM) eingesetzt. Diese basiert auf dem Lagrange'schen Ansatz, bei dem einzelne Partikel bei ihrer Bewegung durch ein Kontinuum verfolgt werden, wohingegen bei dem Euler'schen Ansatz Parameter der vorbeiziehenden Strömung an fixen Punkten berechnet werden. DEM ermöglicht die Modellierung nicht-deformierbarer Partikel nahezu aller Formen mit verschiedenen Materialeigenschaften. Dabei werden nicht nur die Einwirkungen der Trägerphase auf die modellierten Partikel, sondern auch die Kontakte zwischen den Teilchen untereinander berücksichtigt, was vor allem für Strömungen mit einer hohen Partikeldichte maßgebend ist. Hier müssen im Multiphase Interaction Modell verschiedene Kontakteinstellungen vorgenommen werden, die maßgebenden Einfluss auf die Simulation haben.

Die Grafiken auf der folgenden Seite zeigen die Simulation von Sedimentbewegung in einer Strömung über eine raue Sohle (links) und die Modellierung sphärischer und nicht-sphärischer Körper in einer Strömung.

Für die Sedimentmodellierung wurde ein Modellgebiet mit der Sohlstruktur einer rauen Kiessohle (150 x 10 cm) erstellt. Im Nahbereich der Sohle, auf dem sich auch die Sandkörner bewegen sollen, wurde die Gitterweite auf bis zu 3,75 mm Zellgröße verfeinert, zudem wurden über der Sohle dünne Zellschichten eingefügt, da die Fließgeschwindigkeit hier gegen null geht. Die Sohle wurde mit Sandpartikeln mit einem Durchmesser von  $d = 1,5$  mm und einer Dichte von  $\delta = 2650$  kg/m<sup>3</sup> bedeckt. Die Partikel wurden über eine Injektions-Ebene wenige Zentimeter über der Sohle in das Modellgebiet eingespeist und konnten sich bei stehendem Wasserkörper absetzen. Bei anschließender Durchströmung des Modellgebiets bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von  $v_m = 0,28$  m/s kam es zu einer Bewegung der oberen Partikel. In der nachfolgenden Abbildung (linkes Bild) ist die Geschwindigkeit der Körner in der Simulation farblich dargestellt. Hier ist erkennbar, dass sich die Partikel in exponierter Lage und in Bereichen höherer Fließgeschwindigkeit mit der Strömung bewegen, während in der Mulde auf der rech-

ten Bildhälfte kaum eine Bewegung der Körner stattfindet, weil die Geschwindigkeit des Wassers durch den vorangehenden Strömungsschatten der Steine geringer ist und die kritische Sohlschubspannung somit nicht überschritten wird. Als Plausibilitätsprüfungen wurden neben visueller Beurteilung auch analytische Berechnungen durchgeführt. Nach dem Ansatz von Peter-Meyer-Müller ((1949), aus (Patt & Gonsowski, 2011)) wurden mit der angesetzten, mittleren Fließgeschwindigkeit von 0,28 m/s die vorhandene Sohlschubspannung und die Grenzschubspannung ermittelt. Erstere liegt wie erwartet über dem kritischen Grenzwert, wonach es per Definition zu einem Transportbeginn des Feststoffs kommt. Nach dem Ansatz von Shields wurden in einem weiteren Schritt die Froude- und Reynoldszahl der Körnung ( $Fr^*$  und  $Re^*$ ) berechnet und damit die Feststoffbewegung über das modifizierte Shields-Diagramm (nach SHIELDS (1936), aus (Aigner & Carstensen, 2015)) ebenfalls bestätigt. Ein gegenständlicher Modellversuch zu beschriebenen Modellversuch steht noch aus.



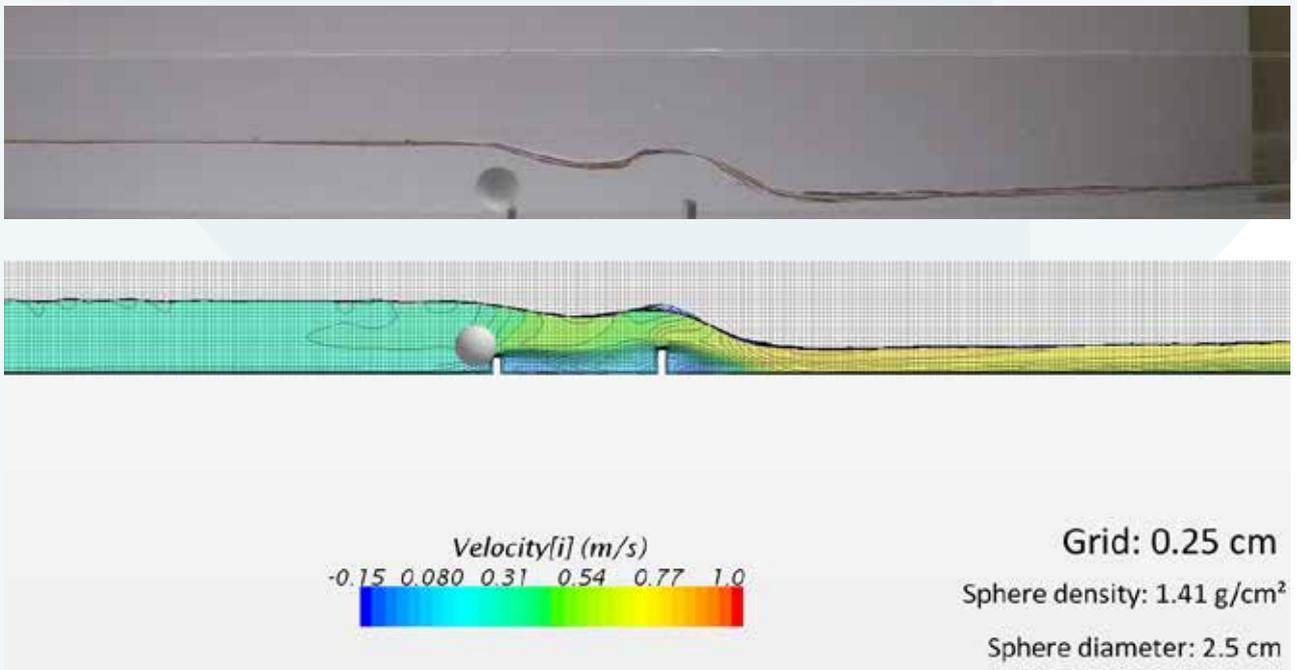
Modellierung von Sandbewegung in einer Strömung über eine raue Sohle (links) und Modellierung von Körpern unterschiedlicher Form (rechts).

Anhand einer zweiten Simulation wurden erste Versuche mit nicht-sphärischen DEM-Partikeln durchgeführt (vgl. vorangegangene Abbildung, rechts). Hierzu bietet die Software in der verwendeten (zum Zeitpunkt der Versuche aktuellsten) Version 10.6 zwei Möglichkeiten: Particle Clumps und Composite Particles. Bei beiden Varianten wird eine beliebige Form durch das zusammensetzen kleinerer, sphärischer Teilchen erzeugt. Bei Particle Clumps handelt es sich um deformierbare Partikel, deren interne Verbindungen aufgrund von Zug- oder Schubspannung brechen können und bei welchen die Kräfte zwischen Fluid und Partikel für jede einzelne Sphäre berechnet werden. Das Model Composite Particles dagegen beschreibt steife Partikel, an denen Lift-, Schlepp- und Rotationskräfte auf den Massenschwerpunkt des Partikels wirken und dieser sich wie ein einzelner Partikel mit komplexer Form verhält. In der Simulation mit sphärischen Körpern, Particle Clumps und Composite Particles kam es beim Auftreffen auf eine Wand oder beim Zusammenstoß mit anderen Teilchen zu einem unkontrollierbaren Brechen der Particle Clumps. Demnach kommt für eine Anwendung des DEM-Modells im Bereich Festkörperbewegung, wie beispielsweise eine Untersuchung der Ausräumung gefüllter Tosbecken, nur das Model Composite Particles in Frage, da ein Brechen der Partikel nicht erwünscht ist. Da für jeden nicht-sphärischen Partikel eine größere Anzahl an kleineren Sphären modelliert werden muss, steigt der Berechnungsaufwand für diese Art von Modell nochmals enorm an, was eine praktische Anwendung erschwert.

In einer dritten Versuchsreihe wird die Plausibilität der modellierten Kugelbewegung anhand eines einfachen Versuchs mit einer einzelnen Kugel (Durchmesser = 2,5 cm; Dichte = 1,41 g/cm<sup>3</sup>) in einer kleinen Versuchsrinne (Breite 4 cm) überprüft. Bei einer solchen Hybriden Modellierung werden ein physikalischer und ein numerischer Modellversuch kombiniert, um eine Referenz für die Numerik zu haben sowie auch, um ergänzende Informatio-

nen zu Strömungsparametern aus dem numerischen Modell herauslesen zu können. Der gegenständliche Versuch soll in diesem Fall zur Kalibrierung des numerischen Modells durch Auswahl und Festlegung geeigneter Modelleinstellungen dienen. Die beiden Abbildungen auf der folgenden Seite zeigen den durchgeführten Versuch im physikalischen und im numerischen Modell.

Die Versuchsrinne wurde mit zwei kleinen Sohlenschwellen (1,0 und 1,5 cm Höhe) bestückt, um das Verhalten der Kugel, beim Auftreffen auf ein Hindernis, in beiden Modellen (physikalisch und numerisch) vergleichen zu können. Die Kugel wurde aus definierter Position am Beginn der Rinne in die Strömung (0,44 l/s) fallen gelassen und anschließend vom Wasser durch die Rinne transportiert. 13 Versuche wurden mittels Video dokumentiert und ausgewertet. Der Weg der Kugel aus dem gegenständlichen Modellversuch wurde mit dem der Simulation verglichen (Position / Zeitpunkt). Diese wurden u.a. mit den zuvor aufgeführten Modelleinstellungen und verschiedenen Gitterweiten/ -arten aufgesetzt. Die Gitterstudie bestätigte die Annahme, dass die Bewegung der Kugel stark von Gitterparametern (Zellweite und Form) abhängig ist. Bei einem feineren Gitter bei sonst gleichbleibenden Parametern wird eine wesentlich schnellere Kugelbewegung festgestellt. Die Gitterweite wurde auf 0,25 cm im Wasserbereich und 0,125 cm im Bereich der Schwellen festgelegt, um mit diesen gleichbleibenden Einstellungen weitere Modellparameter der Methode Multiphase Interaction zu untersuchen. Diese legt fest, wie sich die Kugeln bei Kontakt mit einer anderen Kugel bzw. mit festen Randflächen verhalten. Modifiziert wurden die Parameter Model (Kontaktmodel, Ansatz nach Hertz-Mindlin oder Linear Spring), Static Friction (Haftreibung) sowie Normal und Tangential Restitution coefficient (Stoßzahl normal und tangential zur Aufprallfläche). Es wurden bislang 22 Simulationen durchgeführt, ausgewertet und dokumentiert. Die Untersuchungen sind derzeit noch nicht abgeschlossen, die Kalibrierung des Modells läuft noch.



Gegenständlicher (erstes Bild) und numerischer Modellversuch (zweites Bild) mit einzelner Kugel in einer Strömung zur Kalibrierung des numerischen Modells. Modellgitter hier mit einer Gitterweite von 0,25 cm und Layer an der Sohle aber ohne zusätzliche Verfeinerungsbe-reiche.

## 5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Durch einen vorangegangenen Auslandsaufenthalt von Carla Schneefeld M. Eng. (wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft Nürnberg) und vor Ort durchgeführter Arbeiten und Diskussionen zum Thema, steht das IWWN weiterhin in Kontakt mit Nils Rütther (Associate Professor). Das ermöglicht einen fachlichen Austausch mit der Technischen Universität Trondheim, Norwegen.

Durch das erarbeitete Wissen im Zuge dieses Projekts konnte ein kooperativer Antrag auf Forschungsförderung beim Bundesministerium für Umwelt Naturschutz Bau und Reaktorsicherheit mit fünf kooperierenden, bundesweiten Einrichtungen zum Thema „Haushebung in Überschwemmungsgebieten am Beispiel des Elbe-Dorfes Brockwitz“ gestellt werden, für welchen die Antragsteller im März 2017 den Zuschlag für eine Gesamtfördersumme von knapp 200.000 € erhielten. Weitergehend konnte im August 2017 die Arbeit an einem Projekt zur Wasseraufteilung und Sedimentbewegung am Oberen Wöhrder See in Nürnberg (Wasserwirtschaftsamt Nürnberg) aufgenommen werden.

Der derzeitige Wissensstand zur Thematik der diskreten Partikelmodellierung bietet die Grundlage, weitergehend auch einen Forschungsantrag bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG o. a. Förderern zu stellen. Die weiterführende Untersuchung der Thematik wird als zukunftssträftig eingestuft, da durch physikalisch richtige Modelle eine deutliche Erleichterung in der Bearbeitung entsprechender, wasserbaulicher Fragestellungen gegeben wäre.

## 6. Literatur

Aigner, D., & Carstensen, D. (2015). Technische Hydromechanik 2. Berlin: Beuth Verlag.

Patt, H., & Gonsowski, P. (2011). Wasserbau - Grundlagen, Gestaltung von wasserbaulichen Bauwerken und Anlagen. Springer.







	A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	
S	41.3	47.3	49.3	5
120	00.0			

35.5m<sup>2</sup>  
12.8 m

72.0m<sup>3</sup>

22700kg  
23.0t

14.04m  
VAZENG 04-21 02.17



31 54 5968



Autonom fahrende  
Rangierlokomotive – Prozessanalyse zur  
Automatisierung der  
Rangiervorgänge an Ablaufbergen unter  
besonderer Berücksichtigung des  
Antriebs der Lokomotive

Prof. Dr. Martin Cichon  
Markus Schmidt, B. Eng.

Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik  
Institut für Fahrzeugtechnik (IFZN)  
Technische Hochschule Nürnberg

## Wesentliche Projektziele

Das Ziel ist, aus Gründen der Energieeffizienz und des CO<sub>2</sub>-Einsparungspotenzials, den Güterverkehr auf der Schiene zu forcieren. Damit dies gelingt, ist es erforderlich, den zeitaufwendigen Rangierdienst bei der Verteilung der Güter an den Knotenpunkten zu optimieren. Das Forschungsvorhaben „Autonom fahrende Rangierlokomotive“ zielt daher darauf ab, durch Realisierung einer an Ablaufbergen autonom agierenden Lokomotive einen ersten Schritt zur Effizienzsteigerung der Rangierbahnhöfe mittels 24h / 7d - Betriebs zu erreichen. Dazu soll neben der wirtschaftlichen Verbesserung eine energetische Optimierung des Betriebsablaufs realisiert werden. In der Vorlauforschung wurden die für die Automatisierung notwendigen Arbeitsprozesse definiert und simuliert sowie mögliche Steuerungskonzepte entwickelt.

### 1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	April bis Dezember 2014
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik / Institut für Fahrzeugtechnik
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Martin Cichon
Kontaktdaten	E-Mail: martin.cichon@th-nuernberg.de

### 2. Ausgangslage

Nach Angaben des Statistischen Bundesamts wurde im Jahr 2015, ebenso wie in den vorausgegangenen Jahren, erneut ein Rekordwert an transportierten Gütern innerhalb Deutschlands erreicht. Demnach stieg das Transportaufkommen gegenüber dem Vorjahr um 1,1 Prozent auf einen Wert von 4,5 Milliarden Tonnen. Trotz der stetigen Zunahme des Transportaufkommens musste der Güterverkehr auf der Schiene in den letzten zwei Jahren einen Rückgang von 3,2 Prozent verzeichnen und verringerte den ohnehin schon geringen Anteil auf 7,9 Prozent des gesamten Transportvolumens. Im Vergleich dazu erfuhr der Gütertransport auf der Straße einen 5,6-prozentigen Zuwachs und baute den Anteil am Transportaufkommen auf 79 Prozent aus [1].

Aus Gründen der Energieeffizienz, der CO<sub>2</sub>-Einsparung und der begrenzten Kapazität der Straßeninfrastruktur ist das Ziel, diesen Trend umzukehren und mehr Güterverkehr von der Straße auf die Schiene zu verlagern. Durch eine Verkehrsverlagerung entsteht ein hohes Umweltschutzpotenzial, weil sich die Emissionen und der Energieverbrauch reduzieren. So besitzt der Schienenverkehr eine dieselläquivalente Energieverbrauchseinsparung von 80 Prozent pro transportierter Masse und zurückgelegter Strecke gegenüber dem Lkw. Durch den verringerten Energieverbrauch des Bahnverkehrs lässt sich ebenfalls eine Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstosses um ca. 70 bis 80 Prozent pro Tonnenkilometer erreichen [2].

Dadurch können Güter speziell auf langen Strecken und in großen Mengen auf der Schiene grundsätzlich wirtschaftlicher als auf der Straße transportiert werden. Diesem Vorteil der Schiene steht die Flexibilität des Lkws gegenüber. Um im Schienenverkehr Transportaufgaben effektiv durchführen zu können, sind Rangierbahnhöfe zur Verteilung der Güter auf die verschiedenen Strecken und Zugläufe notwendig. Diese Knotenpunkte im Güterverkehr machen allerdings den Vorteil der Schiene zum Teil wieder zunichte, da der manuelle Rangierbetrieb zeitaufwendig und kostenintensiv ist. Hinzu kommt, dass das Umverteilen der Güter an den Rangierbahnhöfen durch den bundesweit bestehenden Mangel an Spezialisten und Fachkräften im Schienenverkehr ausgebremst wird. Dazu gehören neben den Lokführern und Rangierern ebenso Fachkräfte für die Steuerung und Überwachung des Eisenbahnbetriebs. Laut einer Fachkräfteengpassanalyse der Bundesagentur für Arbeit hat der Eisenbahnverkehr die Mangelberufe, die, verglichen mit anderen technischen Berufen, am längsten unbesetzt bleiben. So liegt die Vakanzzeit für Berufe im Eisenbahnverkehrsbetrieb 64 bis 86 Prozent über dem durchschnittlichen Wert aller anderen Berufe [3].

Um die Nutzung umweltfreundlicher Transportmittel in Deutschland voranzutreiben, muss der Güterverkehr auf der Schiene durch eine Abschwächung seiner Nachteile wieder wettbewerbsfähig gemacht werden. Eine Automatisierung der Rangieraufgaben würde eine schnellere, effizientere und flexiblere Koordination der Güter im 24h / 7d-Betrieb ermöglichen. Das würde die Unabhängigkeit zwischen dem Transportaufkommen und den zur Verfügung stehenden Fachkräften und Spezialisten im Schienenverkehr ermöglichen.

Ein erster Ansatz ist die Automatisierung des Rangierbetriebs im Bereich von Ablaufanlagen. Sie dienen der Neugruppierung von Güterzügen und sind von zentraler Bedeutung für die Verteilung der Güterwagen von ankommenden Zügen auf weiterführende Ziele. Das zentrale Element einer Ablaufanlage ist der sog. ‚Ablaufberg‘ (vgl. Abbildung 1). In einer Ablaufanlage werden Güterzüge in Wagengruppen oder Einzelwagen zerlegt und in einem teilautomatischen Prozess zu neuen Zügen zusammengestellt. Die nicht automatisierten Teilprozesse betreffen den Entkuppelvorgang, das Lösen der Bremsen an den Wagen, das Heranfahren der Lokomotive an den zu zerlegenden Zug sowie das Umsetzen der Lokomotive nach der Wagenaufteilung an einen neuen zu zerlegenden Zug.

### 3. Ziele des Forschungsprojekts

Das Ziel ist, im Vorlaufforschungsprojekt die grundlegenden Prozesse des Lokomotivbetriebs in einer Ablaufanlage zu analysieren und hinsichtlich der Automatisierbarkeit zu bewerten. Mögliche Lösungsszenarien wurden durch Simulationen untersucht. Das Ziel ist es, mit den erarbeiteten Grundlagen Anträge zu Forschungsvorhaben zu formulieren, die eine konkrete Ausarbeitung und Umsetzung zum Ziel haben. In diesen Forschungsvorhaben sollen die Rangiervorgänge an Ablaufanlagen zur Umverteilung der Güter im Schienenverkehr automatisiert und optimiert werden. Im Speziellen wurden dazu die einzelnen Betriebsszenarien definiert und charakterisiert. Der Fokus liegt auf dem Antrieb der Rangierlokomotive und dem dafür notwendigen Steuerungsalgorithmus. Vorrangige Aufgabenstellungen sind dabei:

- Ermittlung des aktuellen technischen Stands im Rangierbetrieb sowie der Stand der Technik in der Automatisierung von Fahrzeugen

- Definition der Arbeitsprozesse an Rangierbahnhöfen sowie Charakterisierung der Betriebsszenarien in Ablaufanlagen
- Analyse der definierten Arbeitsprozesse anhand entwickelter Antriebstrangsimulationsmodelle mittels Systemsimulation
- Entwicklung von Steuerungskonzepten für einen vollständigen autonomen Fahrbetrieb innerhalb von Ablaufanlagen
- Entwicklung und Ausarbeitung eines energetisch optimierten Betriebsablaufs zur ökonomischen und ökologischen Verbesserung von Rangierbahnhöfen

Das langfristige Ziel ist es, eine autonome sowie effiziente Rangierlokomotive mit bereits erprobten und kostengünstigen Sensoren / Aktoren aus der Automobilbranche zu entwickeln. Das zielt darauf ab, den Schienengüterverkehr zu stärken und eine Reduzierung von Emissionen und des Energieverbrauchs zu erreichen. Als Basis für die Entwicklung einer solchen autonomen Lokomotive wird eine bestehende Rangierlokomotive der Baureihe 294 umgebaut. Dazu wird im Rahmen dieser Vorlauftforschung ein Forschungsantrag mit größerem Projektumfang ausgearbeitet. In Hinblick auf den geplanten Forschungsantrag werden in dieser Vorlauftforschung erste Grundlagen entwickelt. Mit Hilfe des weiterfolgenden Forschungsvorhabens sollen insbesondere nachfolgende Ziele erreicht werden:

- Entwicklung von effizienten und intelligenten Fahr- und Betriebsstrategien für den Rangierbetrieb
- Ausarbeitung von Steuerungskonzepten für den gesamten Dienst am Rangierbahnhof
- Realisierung eines autonom agierenden Prototypen auf Basis einer bestehenden Lokomotive
- Umfeld- und Hinderniserkennung durch Implementierung verschiedener Sensoren
- Validierung und Evaluierung des Prototypen anhand durchgeführter Feldtests

#### 4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

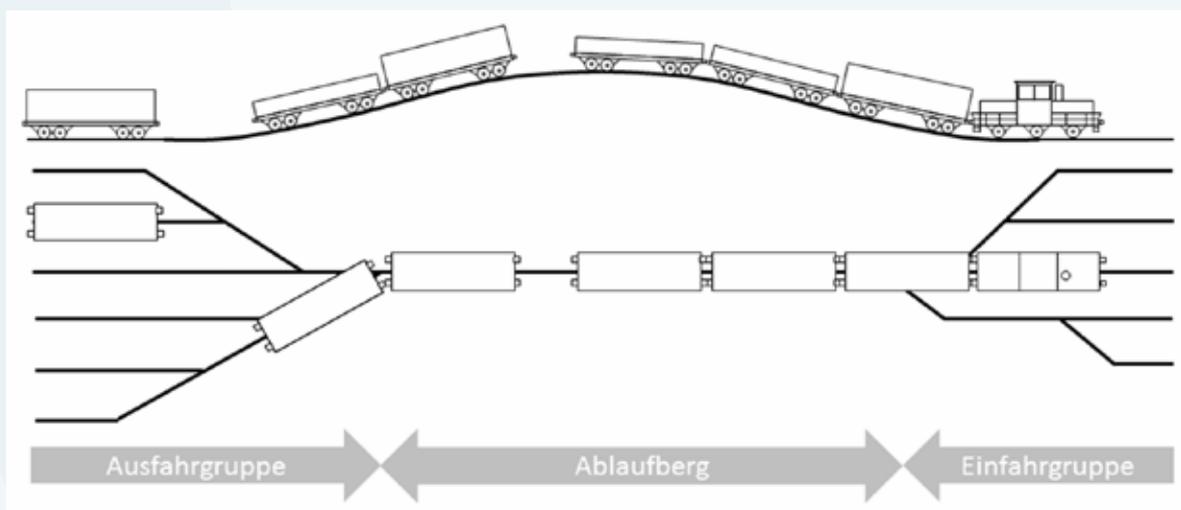


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Ablaufbergs

Für die Betrachtung der Umsetzungsmöglichkeit einer autonom fahrenden Rangierlokomotive wurde im Vorfeld der Betriebsablauf sowie der Aufgabenbereich des Rangierers am Ablaufberg recherchiert.

Damit die Güter ihren Zielort erreichen, müssen diese an Knotenpunkten im Streckennetz aufgeteilt und neu sortiert werden. Dazu werden die ankommenden Güterzüge in den Gleisen der sogenannten Einfahrgruppe abgestellt. Die Zugverbände werden dann je nach Disposition von einem „Löser“ entkuppelt. Anschließend werden die entkuppelten Zugverbände aus der Einfahrgruppe von einer Rangierlokomotive über den Ablaufberg gedrückt und durch automatisch gesteuerte Weichen sowie Bremsen zu neuen Zugverbänden in der Ausfahrgruppe zusammengestellt (vgl. Abbildung 1). Der tatsächliche Abdrückvorgang wird dabei heute schon von einem zentralen Rechner koordiniert. Dieser steuert die Abdrücklokomotive, übernimmt die Weichenstellungen und regelt die Rollgeschwindigkeit der Wagen über die Gleisbremsen. Bei diesem Vorgang hat der Lokführer nur eine überwachende Funktion. Rollt der letzte Wagen über den Berg, übergibt der Zentralrechner wieder dem Lokführer das Kommando. Dieser fährt die Lokomotive manuell über dasselbe Gleis wieder zurück zum nächsten Zugverband in der Einfahrgruppe (vgl. Abbildung 2).

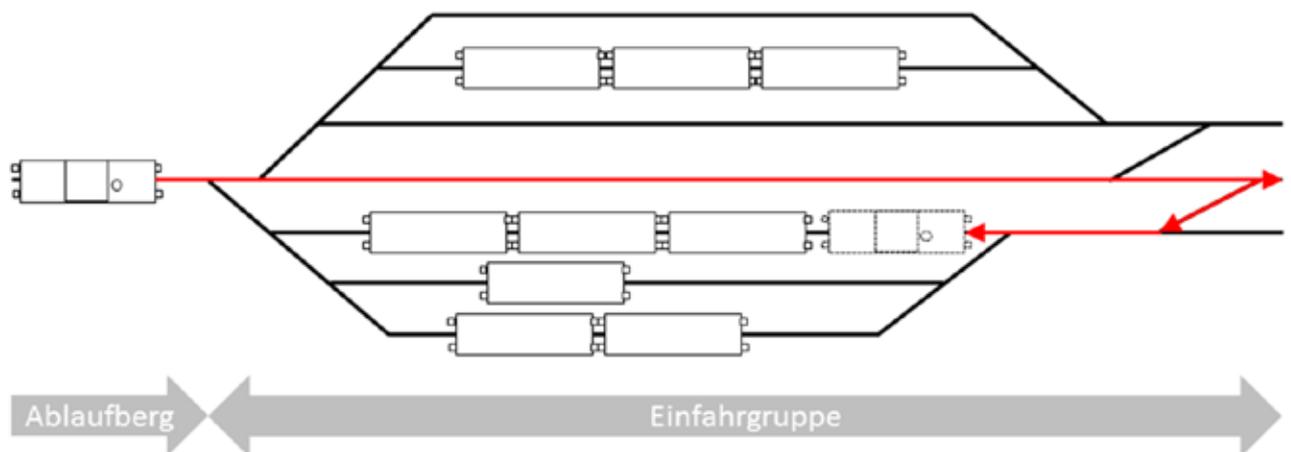


Abbildung 2: Schematischer Aufbau eines Ablaufbergs

Die Rangieraufgaben am Ablaufberg lassen sich in fünf Teilprozesse (Annähern, Ansetzen, Anrücken, Abrücken, Umsetzen) untergliedern. Davon werden bereits das Anrücken und Abdrücken automatisch von einem zentralen Rechner gesteuert. Mit einer Rangierlokomotive, die auch die verbleibenden Teilprozesse autonom durchführen kann, wäre der gesamte Rangierbahnhof automatisiert. Damit dies erreicht werden kann, müssen zunächst die verbleibenden Teilprozesse analysiert und charakterisiert werden.

Teilprozess	Charakteristik
Annähern	Die Lokomotive fährt in das mit der abzudrückenden Zerlegeeinheit besetzte Einfahrgleis und wird in einem geringen Abstand vor dem nächsten Wagen zum Stillstand abgebremst.
Ansetzen	Die Lokomotive wird langsam an die Zerlegeeinheit herangefahren. Dieser Teilprozess ist dann beendet, wenn die Abdrücklokomotive Pufferkontakt mit dem ersten Wagen hat.
Abdrücken	Die Lokomotive drückt die Zerlegeeinheit auf Anforderung des Bergmeisters über den Ablaufberg. An der Kuppe des Ablaufbergs rollen die zuvor entkuppelten Einzelwagen oder Wagengruppen durch Schwerkraft in ihre Zielgleise der Ausfahrgruppe.
Umsetzen	Nach dem Abdrücken fährt die Lokomotive über das zuvor benutzte Gleis zurück in die Einfahrgruppe und darüber hinaus bis über die Weichen, um sich nach Fahrtrichtungswechsel an die nächste Zerlegeeinheit anzunähern. Je nach Gleisfreimeldung und Weichenstellungen setzt sich das Umsetzen aus mehreren Teilfahrten mit Zwischenhalten und Fahrtrichtungswechseln zusammen.

Tabelle 1: Charakterisierung der Teilprozesse am Ablaufberg

Diese Teilprozesse lassen sich mit Hilfe der Fahrweise beschreiben. In diesem Kontext wird die Bewegungsart zwischen einem definierten Anfangspunkt zu einem definierten Endpunkt dargestellt. Ein Teilprozess zwischen zwei Haltepunkten kann aus einer Abfolge verschiedenster Fahrzustände bestehen.

Fahrzustände können z. B. Stillstand, Beschleunigung, Halten der Geschwindigkeit, Ausrollen oder Verzögerung sein (vgl. Abbildung 3). Die in Abhängigkeit von den äußeren Randbedingungen zu wählende Fahrweise beschreibt die Fahrstrategie [4].

Auf Basis ausgearbeiteter Antriebsstrangsimulationsmodelle verschiedener Rangierlokomotiven werden die Teilprozesse anhand einer Abfolge von Fahrzuständen in der Systemsimulation umgesetzt. Diese Antriebsstrangmodelle repräsentieren alle wichtigen Komponenten der Rangierlokomotive. Dazu gehören neben der Generierung der Antriebsleistung (Verbrennungsmotor, Generator, Traktionsbatterie) auch die Komponenten für die Leistungsübertragung sowie die Fahrmotoren, die die Räder antreiben und die Lokomotive in Bewegung setzen.

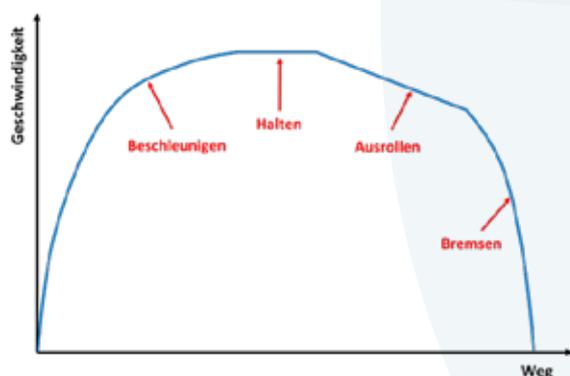


Abbildung 3: Beispielhafte Abfolge verschiedener Fahrzustände



Der in der Abbildung 5 simulierte Geschwindigkeitsverlauf der Rangierlokomotive spiegelt das Verhalten der Lokomotive im regulären Fahrbetrieb wieder. Dabei wird die Lokomotive für den Umsetzprozess beschleunigt, bis die gewünschte Rangiergeschwindigkeit erreicht ist, und anschließend gehalten. Je nach Entfernung zum Haltepunkt lässt sich die Lokomotive ausrollen oder bremst bis zum Stillstand ab. Das Bremsverhalten wird mittels einer Bremskurve beschrieben und garantiert so einen Stillstand der Lokomotive am gewünschten Haltepunkt. Der anschließende Prozess des Annäherns wird dabei ähnlich ausgeführt. Hierbei unterscheiden sich lediglich der Beschleunigungswert sowie die Rangiergeschwindigkeit der Lokomotive. Beim abschließenden Ansetzen wird der Sicherheitsabstand zwischen Rangierlokomotive und Wagengruppe mit einer geringen Geschwindigkeit zurückgelegt. Nachdem der Pufferkontakt vorliegt, wird die Lokomotive zum Stillstand abgebremst.

Für die Berücksichtigung von unerwarteten Ereignissen wird neben den Betriebsbremskurven zusätzlich eine Gefahrenbremsung berücksichtigt, die die Lokomotive schnellstmöglich bis zum Stillstand verzögert.

Für die Durchführung eines reibungslosen Betriebsablaufs benötigt die Lokomotive zusätzlich verschiedene Sensoren zur Umfeld- und Hinderniserkennung. Sie liefern die für die Antriebsregelung notwendigen Informationen. Im Zuge des Vorlaufforschungsprojekts wurden neben der Steuerungslogik auch die für ein Automatisierungsvorhaben infrage kommenden Sensorarten betrachtet. Eine Vorauswahl der möglichen Sensortypen erfolgte hauptsächlich anhand der gestellten Systemanforderungen. Mögliche Sensorsysteme zur Automatisierung einer Rangierlokomotive sind dabei:

- Radarsystem, zur witterungsunabhängigen Hindernisdetektion
- Laserscanner, zur Hinderniserkennung im Ultra-Nahbereich
- InGaAs – Kamerasystem, zur Erkennung von Signalen sowie zur Spur- und Hinderniserkennung bei sämtlichen Licht- und Witterungsverhältnissen
- Globales Navigationssatellitensystem (GNSS), zur genauen Positionsbestimmung im Gleisnetz
- Inertialsensorik, zur gleisgenauen Querpositionsbestimmung

Jedes dieser Sensorsysteme weist Vor- und Nachteile in der Umfeld- und Hinderniserkennung auf. Ein großer Vorteil von Radarsystemen liegt in der Unempfindlichkeit gegenüber schlechten Witterungsbedingungen. Nachteilig an diesem Sensorsystem sind die schwache laterale Auflösung sowie die unklare Kontur der detektierten Gegenstände. Kamerasysteme dagegen verfügen neben einem hohen lateralen Auflösungsvermögen eine gute Konturerkennung, wodurch eine Klassifizierung der Objekte möglich ist. Nachteilig beeinflussen schlechte Licht- und Wetterverhältnisse das Kamerasystem erheblich. [5] Dieser Nachteil kann durch Verwendung von InGaAs - Kamerasystemen ausgeglichen werden.

Für die Erkennung im Ultra-Nahbereich – das entspricht einer Entfernung von 0 bis 20 cm - eignen sich Laserscanner am besten [6]. Ein erheblicher Nachteil des Laserscanners ist dagegen die Anfälligkeit gegenüber Witterungsbedingungen [7].

Für einen autonomen Rangierbetrieb müssen die verschiedenen Sensorsysteme kombiniert werden. Dadurch wird die Erkennungsleistung gesteigert und gleichzeitig die Fehlmeldungen minimiert.



Für die Realisierung einer autonomen Abdrücklokomotive müssen diese Tätigkeiten / Überprüfungen als Vorbereitungs- bzw. Abschlussdienst automatisiert durchgeführt werden. Dadurch ist die Lokomotive in der Lage, ohne örtliche Unterstützung des Menschen den Rangierbetrieb aufzunehmen bzw. den Status „Betriebsbereit“ zu erreichen.

Im weiteren Verlauf der Vorlaufforschung wurde eine energetische Optimierung der Rangierprozesse im Simulationsmodell realisiert und die Potenziale hierzu aufgezeigt. Dafür wurden insbesondere die Fahr- und Betriebsstrategien am Ablaufberg berücksichtigt.

## 5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Auf Basis der geleisteten Untersuchungen und Ergebnisse im Rahmen der Vorlaufforschung wurde ein Antrag für ein Folgeprojekt mit einer Laufzeit von fünf Jahren ausgearbeitet. Der Forschungsantrag soll beim Förderprogramm „Neue Fahrzeuge- und Systemtechnologien“ mit den Programmsäulen „Automatisiertes Fahren“ und „Innovative Fahrzeuge“ eingereicht werden. Damit verbunden ist das Ziel, die Folgefinanzierung durch Fördermittel zu gewährleisten. Weiterhin wurden zusammen mit den Kooperationspartnern DB Cargo (Rangierbahnhöfe München Nord und Nürnberg), Angewandte Eisenbahntechnik GmbH Nürnberg (AEbt), Logomotive GmbH Nürnberg, Zwiehoff GmbH Rosenheim und DB Instandhaltung Werk Nürnberg zwei Forschungsförderungsanträge gestellt. Unter dem Akronym AutoDreh4.0 im Förderprogramm FHProfUnt sowie unter dem Akronym VAL.

Im Zuge dieses Vorlaufforschungsprojekts wurden mehrere Abschlussarbeiten vergeben. Eine Auflistung der wissenschaftlichen Arbeiten im Zusammenhang mit dem Projekt ist in Tabelle 2 dargestellt.

Art	Autor	Titel	Status
Masterprojekt	Katharina Jungkunz	Entwicklung einer Steuerlogik für den automatisierten Rangierbetrieb	beendet
Masterprojekt	Johanna Klein	Anforderungen an Infrastrukturinformationen hinsichtlich autonomer Rangierbewegungen	beendet
Masterprojekt	Sandro Schäftlein	Erstellung einer Steuerlogik für den autonomen Betrieb einer Rangierlok mit anschließender Validierung in Matlab / Simulink	beendet
Masterprojekt	Sezgin Ademoglu	Entwicklung eines Simulationsmodells zur Regelung von Anfahrvorgängen für den autonomen Rangierbetrieb im Schienenverkehr	beendet

Tabelle 2: Wissenschaftliche Arbeiten im Zuge der Vorlaufforschung

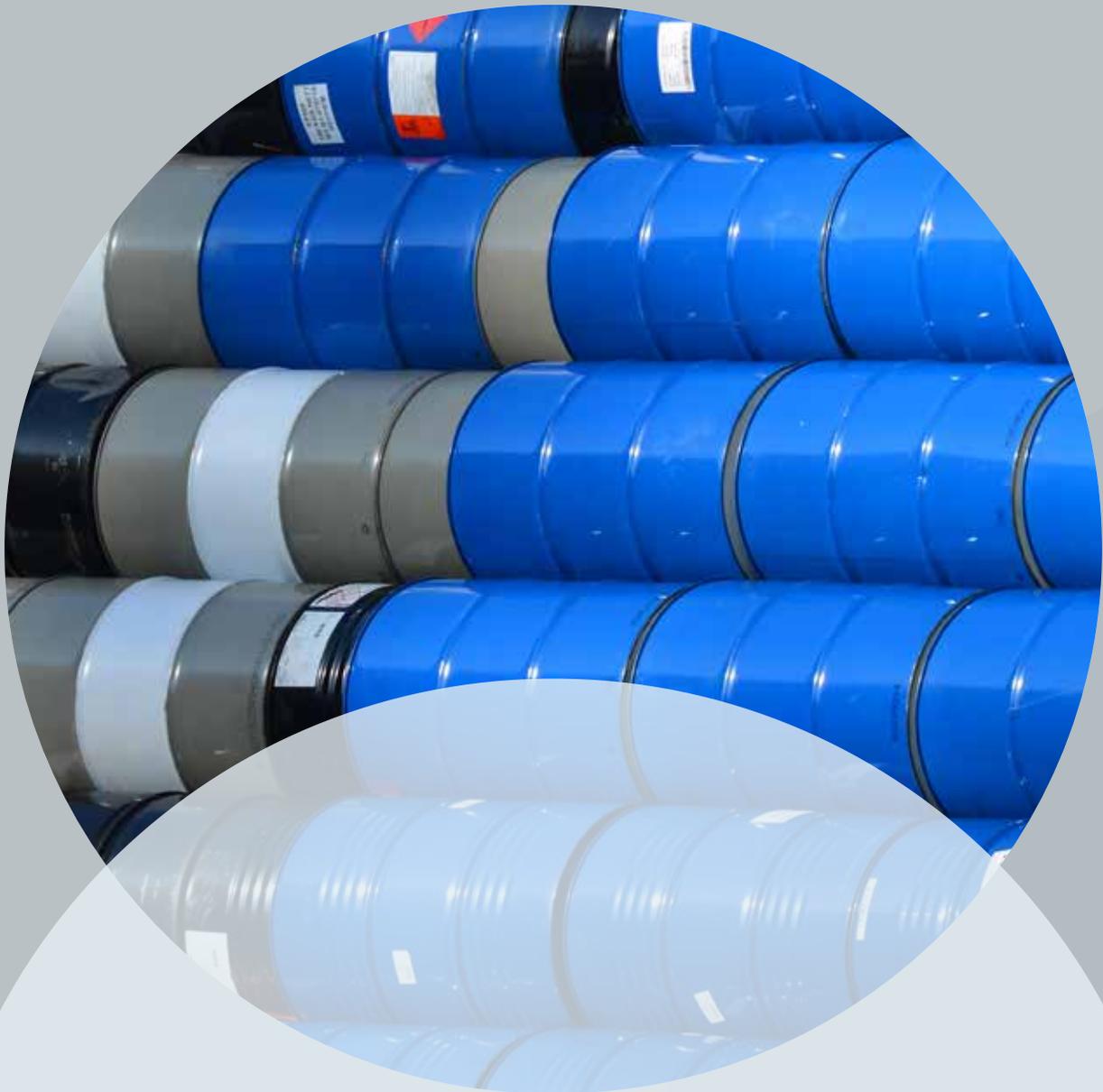
## 6. Literatur

- [1] Bundesamt für Statistik, „DESTATIS,“ 16.02.2016. [Online]. Available: [https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2016/02/PD16\\_050\\_463.html](https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2016/02/PD16_050_463.html). [Zugriff am 14.11.2016].
- [2] H. Corsten und S. Roth, Nachhaltigkeit - Unternehmerisches Handeln in globaler Verantwortung, Technische Universität Kaiserslautern: Springer Gabler, 2011.
- [3] Bundesagentur für Arbeit, Statistik/Arbeitsmarktberichterstattung, „Der Arbeitsmarkt in Deutschland - Fachkräfteengpassanalyse,“ Nürnberg, 2015.
- [4] U. Dr.-Ing. Linder, „Optimierung von Fahrweisen im spurgeführten Verkehr und deren Umsetzung,“ Berlin, 2004.
- [5] G. Föll und R. Bruns, „Hinderniserkennung für mobile Arbeitsmaschinen durch Fusion von Radar- und Videodaten,“ Logistics Journal, 2016.
- [6] Siemens AG, „Fahrerassistenzsysteme – eine wichtige Etappe auf dem Weg zum vollautomatischen Bahnverkehr,“ in Telematik-Kongress, Nürnberg, 2016.
- [7] T. Trautmann, Umfeldsensorik mit dem Lidar: Vor- und Nachteile ggü. Radar, Dresden, 2012.









# Rheologisches Tieftemperaturverhalten von Schmierölen und -fetten

Prof. Dr. Karl-Heinz Jacob  
Jonas Eck, M. Sc.  
Fakultät Angewandte Chemie  
Institut OHM-CMP  
Technische Hochschule Nürnberg

## Wesentliche Projektziele

In der Rheologie wird das Verformungs- und Fließverhalten eines Materials untersucht. Rheologische Messungen an Schmierstoffen (Schmieröle und Schmierfette) als komplexe „Flüssigkeiten“ sind durch zwei parallel ablaufende Prozesse gekennzeichnet: Ölbestandteile gefrieren aus und zugleich verfestigen sich Verdickerstrukturen. Deshalb sind die Messungen vor allem bei tiefen Temperaturen schwer zu interpretieren. Um beurteilen zu können, in welchem Maße die Bildung von Kristallen und / oder die Verfestigung die Fließfähigkeit eines Schmierfettes beeinträchtigt, wird ein Mikroskop an ein Rheometer angekoppelt. Damit lässt sich unter Verwendung von polarisiertem Licht die Kristallisation verfolgen und mit der gemessenen Viskosität verknüpfen. Die Beobachtung der „Beweglichkeit“ eingebrachter Partikel in einem oszillierenden Scherfeld ermöglicht Rückschlüsse auf die Festigkeit von Verdickerstrukturen.

### 1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Mai bis Dezember 2016
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Angewandte Chemie / Institut OHM-CMP
Projektleitung	Prof. Dr. Karl-Heinz Jacob
Kontaktdaten	E-Mail: karl-heinz.jacob@th-nuernberg.de

### 2. Ausgangslage

Die räumliche Mobilität ist eine zentrale Säule einer modernen Gesellschaft. Alle für die Mobilität notwendigen Verkehrsmittel wie Fahrräder, Automobile, Züge, Schiffe oder Flugzeuge haben in ihren Antrieben und Motoren bewegliche Teile, die zur Gewährleistung eines störungsfreien Betriebs geschmiert werden müssen. Aber nicht nur für Verkehrsmittel ist die Schmierung beweglicher Teile von Bedeutung, sondern auch für Antriebe und Generatoren, beispielsweise in der Energieerzeugung oder in der Rohstoffgewinnung. In vielen Anwendungsfällen stehen Schmierstoffe unter stark schwankenden klimatischen Bedingungen. So sind Offshore-Windparks im Sommer Temperaturen bis über + 40 °C und im Winter bis unter - 30 °C ausgesetzt. Sie müssen bei diesen tiefen Temperaturen ihre Aufgabe genauso gut erfüllen wie bei moderaten 25 °C. Schmiermittel haben als viskoelastisches Material naturgemäß ein stark temperaturabhängiges rheologisches Verhalten und versteifen bzw. verspröden bei tiefen Temperaturen. Um dieses Problem zu lösen, greifen viele Firmen für eine erste Beurteilung des Tieftemperaturverhaltens von Schmierölen und -fetten auf die Ergebnisse genormter „Tieftemperatur“-Prüfverfahren zurück. Dazu gehören z. B. Pour Point (ISO 3016, ASTM D5985), Drehmoment in Lagern (ASTM D 4693-97) oder Fließdruck (DIN 51805). Deren Ergebnisse können aber nur selten auf reale Anwendungsfälle übertragen werden, da diese Methoden immer nur einen Aspekt des komplexen rheologischen Verhaltens bei tiefen Temperaturen erfassen. Deshalb unterwerfen viele Unternehmen die Schmiermittel, die sie bei tiefen Tem-

peraturen verwenden wollen, internen praxisbezogenen Eignungsprüfungen. Auch die Hersteller von Schmiermitteln wissen um die sehr begrenzte Aussagekraft genormter „Tieftemperatur-Prüfverfahren“ und haben für die Entwicklung und Weiterentwicklung ihrer Produkte ebenfalls eigene Prüfmethode etabliert. Es fehlen allgemeingültige Prüfverfahren, die Herstellern und Anwendern von Schmierölen und -fetten gleichermaßen eine praxisrelevante Beurteilung erlauben. Praxisrelevant ist es zu wissen, ob Schmiermittelbestandteile bei tiefen Temperaturen auskristallisieren und ob sich Schmiermittel bei tiefen Temperaturen wie viskoelastische Flüssigkeiten oder eher wie glasartig erstarrte Feststoffe verhalten. Die gewünschten Informationen können prinzipiell über rheologische Messungen nach DIN 51810-1 und DIN 51810-2 gewonnen werden. Da diese Normen noch im Entstehungsprozess sind, ist aktuell noch nicht geklärt, welche Rückschlüsse sie hinsichtlich des tatsächlichen Fließ- und Schmierverhaltens von Ölen und Fetten bei tiefen Temperaturen (bis - 40 °C) ermöglichen.

### 3. Ziele des Forschungsprojekts

Das Fließverhalten von Schmierölen und -fetten wird bei tiefen Temperaturen durch Strukturbildungsphänomene bestimmt, die von der Zusammensetzung (Typ und Zusammensetzung des Grundöls, Verdicker, Additive etc.) des jeweiligen Schmiermittels bestimmt werden. Bei tiefen Temperaturen bilden sich Strukturen über die Kristallisation von Ölbestandteilen und / oder durch die Versteifung von Verdickern (vgl. Abbildung 1). Um rheologische Tieftemperaturmessungen an Schmierölen und -fetten korrekt auswerten und beurteilen zu können, ist die Voraussetzung die Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses und eine modellhafte Beschreibung der Strukturbildung in verschiedenen Öl- und Schmierfettklassen. Insbesondere ist zu klären, welchen Einfluss Grundöl, Verdicker und Additive auf die Temperaturabhängigkeit der Viskosität bzw. der Nachgeb- und Fließgrenze haben und wie sich die Wahl der Messparameter bei unterschiedlichen Öl- und Schmierfettzusammensetzungen auf die Bestimmung der rheologischen Größen auswirkt (vgl. Abbildung 2).

Rheologische Messungen geben Auskunft darüber, wie sich viskose und / oder viskoelastische Proben unter einem äußeren Zwang verhalten. Sie lassen bei komplexen Proben wie Schmierfette keine Rückschlüsse darauf zu, welche Vorgänge (z. B. Kristallisation, Bildung von Überstrukturen, Versteifung von Strukturen etc.) für das beobachtbare viskoelastische Verhalten verantwortlich sind. Bislang werden aufgrund von Erkenntnissen, die an einfachen Ölen oder viskoelastischen Modellsubstanzen gewonnen worden sind, rheologische Messergebnisse bestmöglich interpretiert. Um Kenntnisse über die tatsächlichen stofflichen Vorgänge an Proben zu gewinnen, sind mikroskopische Untersuchungen während rheologischer Messungen von entscheidender Bedeutung. Die Koppelung von Rheologie und Mikroskopie ermöglicht erst eine Korrelation messbarer Änderungen rheologischer Größen (Schubspannung, Schubmodul, Verlustmodul etc.) mit Strukturänderungen in Proben. Solche gekoppelten Experimente sind in diesem Zusammenhang noch nicht veröffentlicht.

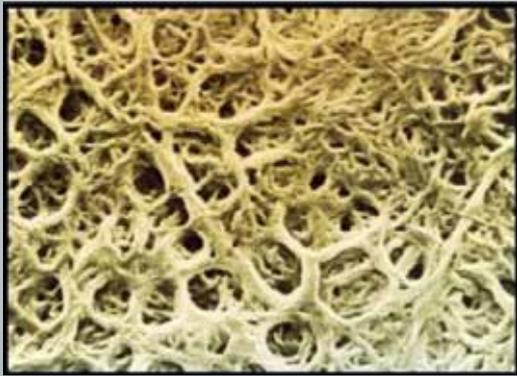


Abbildung 1: Die REM-Aufnahme (5000-fache Vergrößerung) eines Lithium-Komplexfettes zeigt ein „Geflecht“ aus Lithiumhydroxystearat; das eigentliche Schmieröl befindet sich dazwischen (J.E. Martin-Alfonso, et. al.; Development of new lubricating grease formulations using recycled LDPE as rheology modifier additive, European Polymer Journal; 43; 2006).

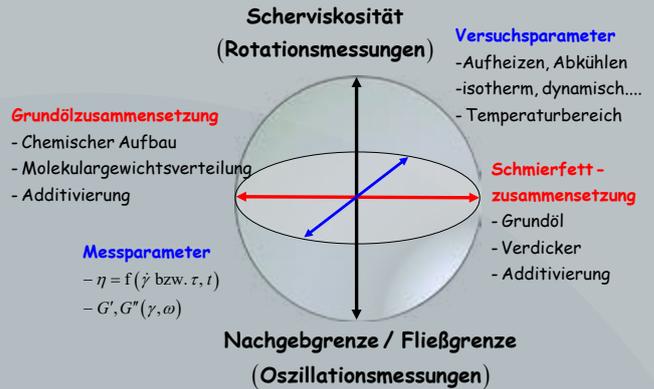


Abbildung 2: Rheologische Messungen an Schmiermitteln sind einem komplexen Beziehungsgeflecht von Messmethoden (Rotation und Oszillation), Mess- und Versuchsparametern und dem Aufbau von Schmierölen und -fetten unterworfen.

Der Grundgedanke des vorliegenden Projekts ist, mithilfe der Mikroskopie Vorgänge wie die Kristallisation von Ölbestandteilen oder die Versteifung von Verdickerstrukturen direkt beobachtbar zu machen und die Beobachtungen mit zeitgleich erhobenen rheologischen Messergebnissen in Verbindung zu bringen. Damit können gemessene Änderungen rheologischer Messgrößen zweifelsfrei interpretiert werden. Dieses Projekt konzentriert sich auf die Sichtbarmachung der Kristallisation von Grundölbestandteilen und auf die Sichtbarmachung der Festigkeit von Verdickerstrukturen. Kristallisation und Verfestigung von Verdickerstrukturen sind die zwei wesentlichen Prozesse, die in Schmierfetten bei tiefen Temperaturen stattfinden.

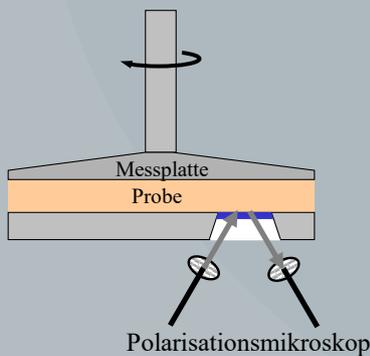


Abbildung 3: Schematische Darstellung einer gekoppelten rheologisch-en Messanordnung. Die Messplatte dreht sich mit einer vorgegebenen Winkelgeschwindigkeit und schert dadurch die im Spalt befindliche Probe. Kristallisationsvorgänge lassen sich durch ein digitales Polarisationsmikroskop optisch verfolgen.

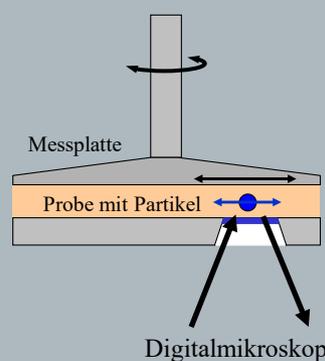


Abbildung 4: Schematische Darstellung einer gekoppelten rheologisch-en Messanordnung. Die Messplatte oszilliert mit einer vorgegebenen Kreisfrequenz und schert die im Spalt befindliche Probe. Die Bewegungen von „Tracerpartikel“ und obere Messplatte lassen sich durch ein digitales Mikroskop aufzeichnen und miteinander ins Verhältnis setzen..

Kristallisationsvorgänge lassen sich mit Hilfe der Polarisationsmikroskopie verfolgen. Solange beim Abkühlen einer Probe keine Kristallisation erfolgt, bleibt bei der Polarisationsmikroskopie das Bild dunkel, weil eine anisotrope Probe keinen Einfluss auf die Polarisationssebene des polarisierten Lichts nimmt. Erst wenn Kristalle entstehen, ändert sich durch die anisotrope Kristallstruktur die Polarisationssebene des Lichts. Erreichen die Kristallite einen Durchmesser von  $0,4\mu\text{m}$  und mehr werden sie optisch sichtbar, wodurch sich das Kristallwachstum verfolgen lässt. Bei tiefen Temperaturen ist vor allem eine Versteifung von Verdickerstrukturen innerhalb eines Schmierfettes zu erwarten. Diese Versteifung lässt sich optisch nicht direkt beobachten. Indirekt lässt sie sich aber sicht-

bar machen, indem „Tracerpartikel“ (kugelförmige Partikel) mit einem Durchmesser  $> 1\mu\text{m}$  eingebracht werden und ihre Bewegung im Scherfeld verfolgt wird. Entscheidend ist dabei die relative Bewegung der Tracerpartikel im Vergleich zur Messplatte. Solange eine strenge Korrelation beider Bewegungsamplituden beobachtet wird, liegt ein steifer Festkörper vor. Nimmt dagegen die Bewegungsamplitude der Tracerpartikel im Vergleich zu der der Messplatte ab und / oder beginnen die Partikel sich zu bewegen, verhält sich die Probe wie eine hochviskose Flüssigkeit.

#### 4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Um Kristallisationsvorgänge und die Versteifung von Verdickerstrukturen optisch verfolgen und mit rheologischen Messdaten verknüpfen zu können, werden drei Arbeitsschritte definiert:

- a. Koppelung eines Mikroskops mit einem Rheometer,
- b. Rheologische und Polarisationsmikroskop-Messungen zur Identifizierung der Kristallisation in einer abkühlenden Probe,
- c. Rheologische und Mikroskopie-Messungen zur Identifizierung der Steifheit von Verdickerstrukturen in einer Probe bei verschiedenen Temperaturen.

In den Arbeitsschritten b) und c) werden Modellsysteme und nicht reale Schmierfette verwendet, um in der „Einführungsphase“ eine zweifelsfreie Interpretation von Messdaten sicherstellen zu können.

##### ■ Koppelung Mikroskop / Rheometer

Ein kommerzielles digitales Mikroskop (VHX-1000 mit einem Objektiv VH-Z50L und Polfiltern der Fa. Keyence) wurde an ein Rheometer (MCR 702 TwinDrive der Fa. Anton Paar) angebaut. Der Messaufbau ist zur Umgebung schwingungsentkoppelt. Eine untere Messplatte mit Fenstern ermöglicht die optische Beobachtung von Proben während rheologischer Messungen. Die Abkühlung der Proben erfolgt über einer „universell optischen Kammer“ (P-PTD120/GL) und einer dazugehörigen Haube (H-PTD200) mit Peltier-Temperierung. Die Kühlung der Peltier-Elemente übernimmt ein Thermostat (Unistat Tango Nuevo der Fa. Huber). Die Einleitung von technischer Luft in den Probenraum stellt sicher, dass auch bei Temperaturen weit unterhalb der Raumtemperatur die Luftfeuchte nicht kondensiert oder ausfriert. Alle Messungen erfolgen mit einem Platte-Platte-Messsystem (PP25) und einem Plattenabstand von 1,0 mm. Die exakte Temperaturführung des Probenraums wird über Kalibriermessungen mit einem PT100-Temperatursensor, der im Probenraum fixiert wird, sichergestellt.



Abbildung 5: Unterhalb des Rheometers wird das Mikroskop schwingungsentkoppelt angeflanscht (links). Durch zwei kreisförmige Öffnungen in der unteren Messplatte ist die Probe optisch zugänglich. Die Bilder bzw. Videos des Digitalmikroskops lassen sich während einer rheologischen Messung direkt mitverfolgen.

### ■ Identifizierung der Kristallisation in einer abkühlenden Probe

Im zweiten Arbeitsschritt wird Cyclohexan als Modellsubstanz eingesetzt. Diese Substanz hat den Vorteil, dass sie optisch isotrop ist und schon bei 6,7 °C gefriert, was kurze Messzeiten ermöglicht.

Gemessen wird die dynamische Viskosität  $\eta$  des Cyclohexans bei einer konstanten Scherrate ( $\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1}$ ) in Abhängigkeit der Temperatur. Die Temperatur wird in mehreren Experimenten von 25 °C auf 0 °C mit verschiedenen Abkühlraten (5, 2, 1 K min<sup>-1</sup>) abgesenkt. Solange Cyclohexan nicht auskristallisiert, ist es auch bei Temperaturen unterhalb der Gefrieretemperatur (6,7 °C) so niedrigviskos wie Wasser. Setzt allerdings die Bildung von Kristallen ein (Gefrierprozess), nimmt die Viskosität in der Fließkurve sofort zu (Abbildung 6). Die Polarisationsmikroskopie liefert bei dieser Temperatur noch „schwarze“ Bilder. Die Ursache ist, dass die gebildeten Kristallite zu klein sind, um optisch erfasst werden zu können. Das Kristallwachstum lässt sich dagegen sehr gut mit der Polarisationsmikroskopie verfolgen. Das Wachstum der kristallinen Bereiche korreliert mit der Viskositätszunahme (Abbildung 7). Diese Experimente zeigen, dass die Interpretation eines Viskositätsanstiegs bei späteren Messungen an Schmierfetten durch die Polarisationsmikroskopie erleichtert wird, da ein Viskositätsanstieg durch Auskristallisieren von Ölbestandteilen eindeutig identifiziert werden kann.

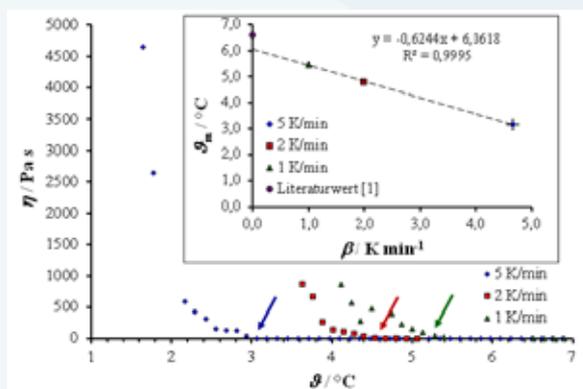


Abbildung 6: Cyclohexan wird bei Rotationsmessungen mit konstanter Scherrate ( $\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1}$ ) mit definierten Abkühlraten ( $\beta$ ) abgekühlt. Als Gefrierpunkte gelten die Temperaturen, bei denen die Viskosität merklich ansteigt. Die Auftragung der Gefrieremperaturen gegen die Abkühlraten führt zur „echten“ Gefrieretemperatur (Achsenabschnitt).

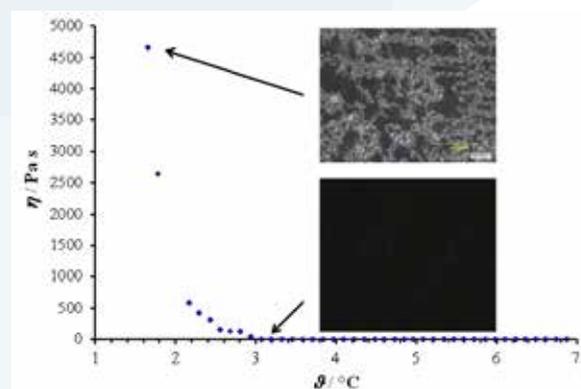


Abbildung 7: Während einer Rotationsmessung ( $\dot{\gamma} = 1 \text{ s}^{-1}$ ) kühlt Cyclohexan mit einer konstanten Kühlrate von 5 K min<sup>-1</sup> ab. Die Viskosität steigt, wenn Cyclohexan zu kristallisieren beginnt. Die Bildung von Kristalliten ist optisch nicht zu sehen. Das Wachstum der Kristalle lässt sich Hilfe der Polarisationsmikroskopie verfolgen.

## ■ Identifizierung der Steifheit von Verdickerstrukturen

Im dritten Arbeitsschritt wird mit einem Modellsystem aus Cyclohexan / o-Xylol als Lösemittel und Polystyrol als organischer „Verdicker“ gearbeitet. Dieses System hat den Vorteil, dass es optisch isotrop ist und der Gefrierpunkt bei  $-30\text{ °C}$  liegt. Damit kommen seine rheologischen Eigenschaften denen eines Schmierfetts nahe. Um die viskoelastischen Eigenschaften des Modellsystems visualisieren zu können, werden in die Proben kugelförmige Amberlit-Partikel gegeben. Es werden Oszillationsmessungen, bei gleichbleibender Kreisfrequenz ( $10\text{ rad s}^{-1}$ ) und steigender Amplitude (0,001 - 1000 Prozent), bei drei verschiedenen Temperaturen durchgeführt:  $-15\text{ °C}$ ,  $0\text{ °C}$  und  $+15\text{ °C}$ . Die Oszillationsbewegungen der oberen Messplatte und der Partikel werden in Videofilmen aufgezeichnet. Mit einem Softwaretool der Fa. Keyence lassen sich die Bewegungsamplituden von Messplatte und Partikeln gleichzeitig erfassen.

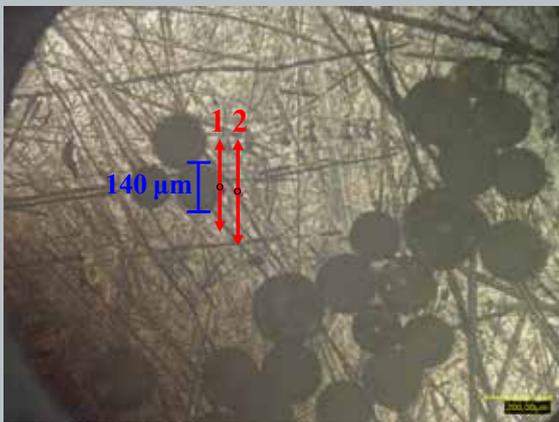


Abbildung 8: Das Bild zeigt kugelförmige Partikel in dem viskoelastischen Probenmaterial. Die obere Messplatte verrät sich durch ihre Rillen. Ein Softwaretool verfolgt die Oszillationsamplituden zuvor definierter Punkte auf Partikel (1) bzw. Messplatte (2).

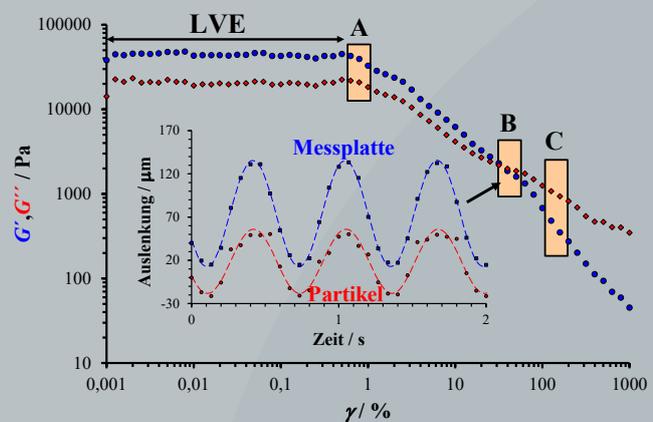


Abbildung 9: Bei  $-15\text{ °C}$  fängt das Modellsystem an steif zu werden ( $G' > G''$ ). Bei kleinen Deformationen sind die Bewegungsamplituden von Partikel und Platte konstant zueinander (A), bei größeren Deformationen (B) nimmt die Bewegungsamplitude der Partikel ab; bei sehr großen Deformationen (C) fangen die Partikel an zu „wandern“. Die Bewegungsamplituden von Messplatte und Partikel können den rheologischen Daten zugeordnet werden.

Videoaufnahmen zeigen, dass im sogenannten linear-viskoelastischen Bereich (LVE - Abbildung 9) die Bewegungsamplituden von Messplatte und Partikel in einem konstanten Verhältnis zueinander bleiben, so wie es für elastische Festkörper zu erwarten ist. Erst wenn der Schubmodul ( $G'$ ) und der Verlustmodul ( $G''$ ) abnehmen (Abbildung 9 – A), löst sich diese strenge Beziehung auf und die Bewegungsamplitude der Partikel wird im Vergleich zu der Bewegungsamplitude der Messplatte kleiner. Die Ursache dafür ist die Erweichung der Probe, die von einem viskoelastischen Feststoff in eine viskoelastische Flüssigkeit übergeht. Der Übergang erfolgt in dem Bereich, in dem Schubmodul ( $G'$ ) und Verlustmodul ( $G''$ ) sich angleichen (Abbildung 9 – B). In den Videos sind in diesem Bereich die Verformungen von Luftblasen (B) zu erkennen. Bei weiter zunehmenden Deformationen (Abbildung 9 – C) bewegen sich die Partikel und ordnen sich zu Bändern an. Dies beweist, dass sich ein viskoelastisches Material bei großen mechanischen Beanspruchungen wie eine Flüssigkeit verhält.

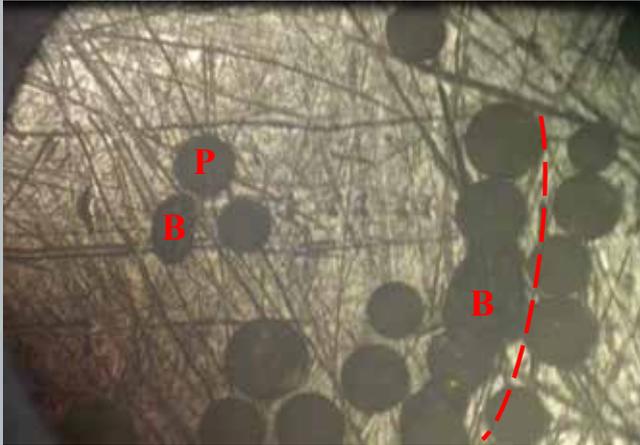


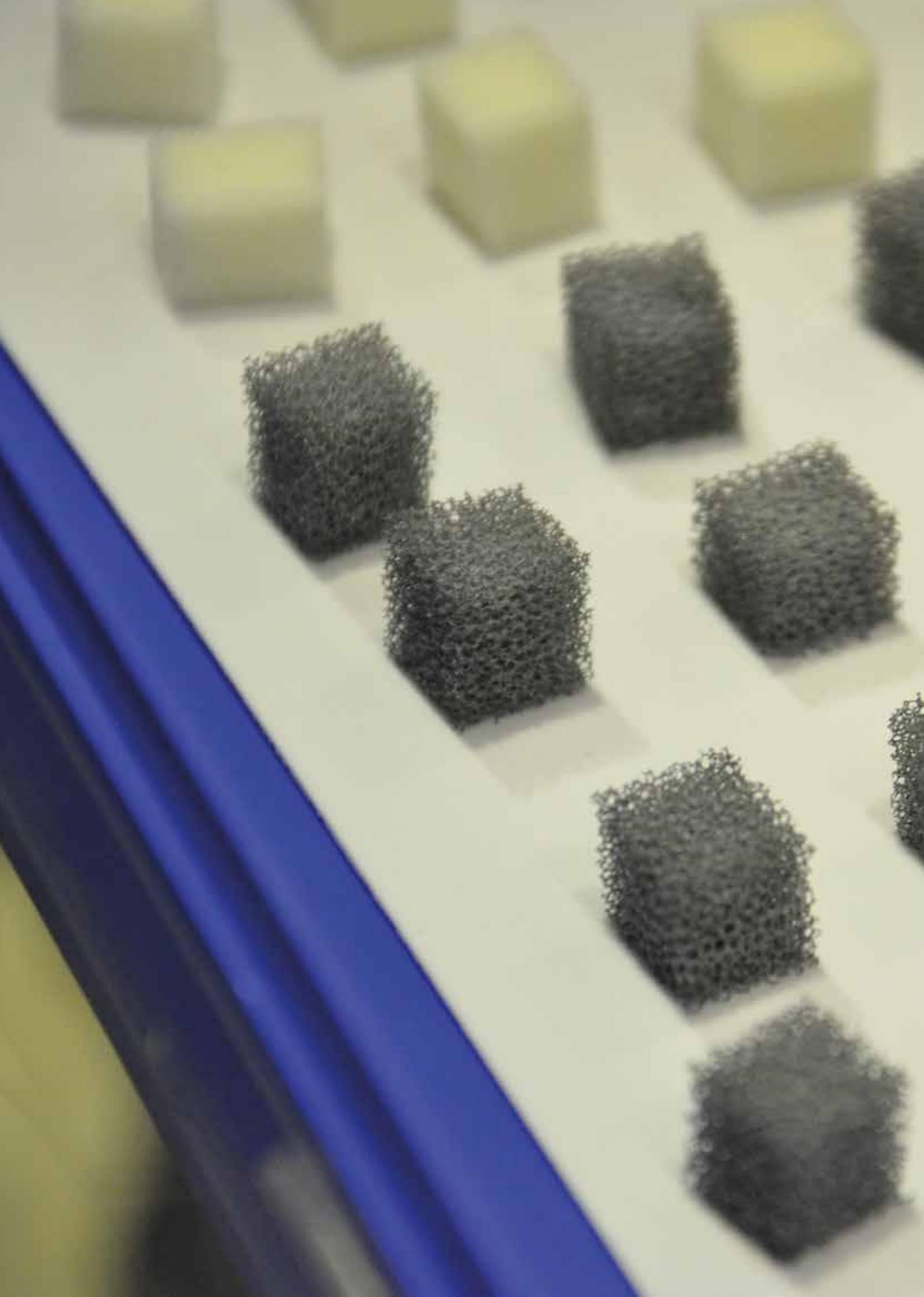
Abbildung 10: Bei großen Deformationen verformen sich Luftblasen (B) und Partikel (P) ordnen sich zu Bändern (--) an.

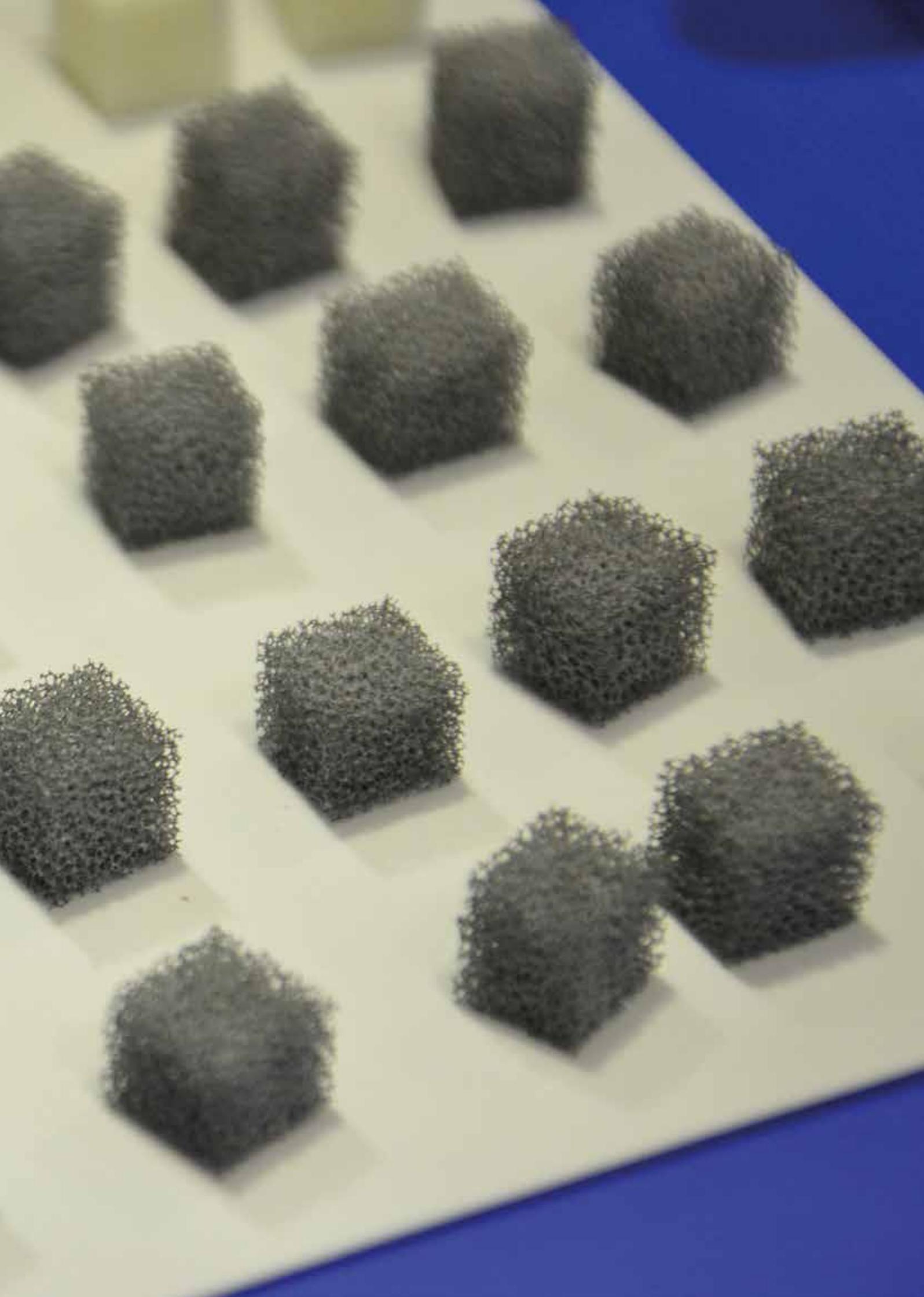
## 5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

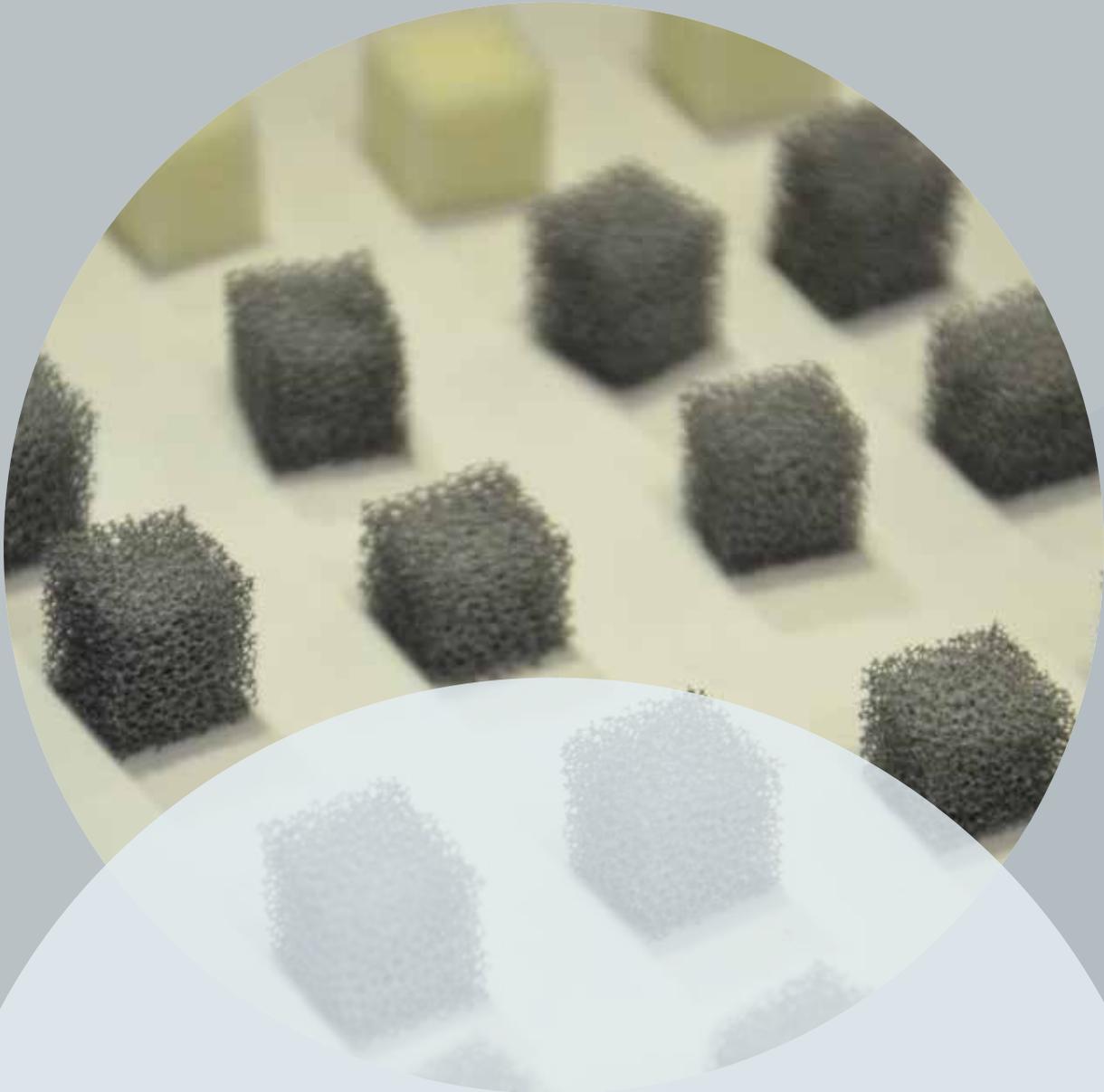
Die vorgestellten Ergebnisse zeigen auf, dass die Kopplung von rheologischen und mikroskopischen Messungen zu einer sicheren Interpretation der Fließeigenschaften und viskoelastischen Eigenschaften von zähflüssigen Materialien mit Verdickerstrukturen führt. Die erarbeiteten Verfahren müssen hinsichtlich ihrer Aussagekraft noch robuster werden. Da die aufgebaute Messanordnung prinzipiell funktioniert, wird das in absehbarer Zeit zu erreichen sein. Ein verbesserter Messaufbau wird, wie in dem vorliegenden Projekt, zuerst an Modellsystemen geprüft, bevor reale Schmierfette damit untersucht werden.

Der Antragsteller hat während dieses Projektes zusammen mit Prof. Dr. Norbert Willenbacher auf dem Gebiet der rheologischen Tieftemperaturcharakterisierung von Schmierölen und -fetten einen Forschungsantrag über die Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) bei der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) eingereicht. Prof. Dr. Norbert Willenbacher ist Leiter des Bereiches Angewandte Mechanik im Institut für Mechanische Verfahrenstechnik und Mechanik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Der eingereichte Forschungsantrag ist geplant für die Zeitdauer von drei Jahren und beinhaltet zwei wissenschaftliche Mitarbeiterstellen. Eine der beiden Stellen ist für die TH Nürnberg vorgesehen. Die Forschungsvereinigung Antriebstechnik (FVA) unterstützt diesen Antrag bei der AiF.

Es ist geplant, die Ergebnisse des beantragten Forschungsprojektes sowohl über Dissertationen als über bekannte anwendungsorientierte Zeitschriften (z. B. Applied Rheology) zu veröffentlichen. Die Ergebnisse sollen in die Arbeit des Arbeitskreises DIN 51810 einfließen und damit auch in die Normen DIN 51810-1 (Prüfung von Schmierstoffen – Bestimmung der Scherviskosität von Schmierfetten mit dem Rotationsviskosimeter – Teil1: Messsystem Kegel / Platte) und DIN 51810-2 (Prüfung von Schmierstoffen – Prüfung der rheologischen Eigenschaften von Schmierfetten – Teil 2: Bestimmung der Fließgrenze mit dem Oszillationsrheometer und dem Messsystem Platte / Platte). Die genannten Normen werden zukünftig eine realitätsnähere Beurteilung der Fließeigenschaften sowie der viskoelastischen Eigenschaften von Schmierfetten bei tiefen Temperaturen ermöglichen.







# BioGlas - Scaffolds aus Glas für ‚Tissue Engineering‘ mit einstellbaren Wachstumsfaktoren

Prof. Dr. Armin Lenhart  
Fakultät Werkstofftechnik  
Technische Hochschule Nürnberg

Prof. Dr. Ralf Lösel  
Fakultät Angewandte Chemie  
Technische Hochschule Nürnberg

## Wesentliche Projektziele

Beim Krankheitsbild der Arthrose werden die Knorpel in den Gelenken angegriffen und teilweise aufgelöst. Die Forschung an der TH Nürnberg zielt darauf ab, körpereigenes Gewebe in vitro zu züchten und es anschließend in den Körper zu übertragen. Die Zellen sollen auf einem Träger wachsen, in der Form der geschädigten Stelle im Gelenk des Patienten. Das Ziel ist, dass dieser Träger sich zu einem späteren Zeitpunkt selbsttätig restlos auflöst. Im Rahmen des Projekts werden bioaktive poröse Gläser entwickelt, die sich besonders für das Wachstum von Knorpelgewebe eignen. Durch die Optimierung der Zusammensetzung kann die Auflösungsgeschwindigkeit mit einem kontrolliertem Zellwachstum auf den Gläsern gesteuert werden.

### 1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	März bis Dezember 2016
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Werkstofftechnik und Fakultät Angewandte Chemie
Projektleitung	Prof. Dr. Armin Lenhart Prof. Dr. Ralf Lösel
Kontaktdaten	E-Mail: armin.lenhart@th-nuernberg.de ralf.loesel@th-nuernberg.de

### 2. Ausgangslage

Die regenerative Medizin entwickelt vielversprechende Ansätze, um eine vollständige Wiederherstellung eines geschädigten Gewebes / Organs zu realisieren. Eine Möglichkeit ist das Verfahren des ‚Tissue Engineerings‘, bei dem zunächst in vitro eine Zellproliferation durch adhärente Zellen auf einem 3D-Scaffold erreicht wird.

Die Lebenserwartung der Menschen nimmt weltweit in den letzten Jahrzehnten konstant zu. In Kombination mit einem geänderten Lebensstil mit mangelnder Bewegung und nicht angepassten Essgewohnheiten treten insbesondere im Alter Folgeschäden und Organversagen auf. So sind vor allem die Organe des Bewegungsapparates von dieser Entwicklung erheblich betroffen.

Vor diesem Hintergrund wurden 2004 etwa sieben Mrd. Euro für Behandlungen von Arthrose ausgegeben, Tendenz steigend. [Quelle: Statistisches Bundesamt].

Arthrose ist eine Erkrankung, bei der in den Gelenken unter anderem die Knorpel angegriffen und teilweise aufgelöst werden. Eine Möglichkeit der Therapie sind chirurgische Eingriffe, die in der Regel mit einem vollständigen Ersatz des Gelenks durch ein Implantat verbunden sind. Sehr viel effizienter ist dagegen die Züchtung von entsprechendem körpereigenem Gewebe in vitro mit anschließender Übertragung in den Körper.

Um ein in vitro Wachstum von Knorpelzellen zu erreichen, werden aus dem Körper entnommene Zellen in einer

geeigneten Umgebung stimuliert. Eine passende geometrische Form unterstützt die Bildung von neuem Gewebe. Zu diesem Zweck werden weltweit die Techniken des sogenannten ‚Tissue Engineerings‘ (Gewebebau oder Gewebezüchtung) erforscht und weiterentwickelt. Für das *in vitro* Wachstum des Gewebes sind vier grundlegende Faktoren von hoher Bedeutung: Erstens wird ein geeignetes Gerüst für das Wachstum der Zellen benötigt (sog. Scaffold), zweitens müssen lebende und vermehrbare Zellen auf dem Scaffold ansiedelbar sein, drittens ist eine Kontrolle der Signaltransduktion an die lebenden Zellen erforderlich (Wachstumsfaktoren) und viertens wird ein für die Zellproliferation (Wachstum und Vermehrung) förderliches extrazelluläres Medium in dem Scaffold und um die Zellen herum benötigt.

Von besonderem Interesse sind neben dem geometrischen Aufbau vor allem die Wachstumsfaktoren, die steuern, wie sich die Zellen auf dem Scaffold proliferieren. Bei den Wachstumsfaktoren wird im Wesentlichen zwischen mechanischen und (elektro-) chemischen Faktoren unterschieden. Für die gute Vermehrung der angesiedelten Zellen, müssen diese Faktoren passend für jede Zelllinie angeglichen werden.

Dies ist eine zentrale Frage des Tissue Engineerings, die nicht durch Analogschlüsse mit dotierten Zelllösungen beantwortet werden kann. Durch das Auflösen der bioaktiven Scaffolds entstehen Konzentrationsgradienten mit entsprechenden chemischen und elektrochemischen Potentialen, die die Zellproliferation unterstützen. Glas ist in diesem Kontext ein exzellenter Werkstoff.

### 3. Ziele des Forschungsprojekts

Im Rahmen des Forschungsprojektes werden in einer interdisziplinären Zusammenarbeit mit Prof. Dr. Gundula Schulze-Tanzil von der Paracelsus Medizinischen Privatuniversität in Nürnberg bioaktive poröse Gläser entwickelt, die sich besonders für das Wachstum von Knorpelgewebe eignen. Die generellen Anforderungen an bioaktive Gläser sind die Sterilisierbarkeit, die Biokompatibilität (nicht toxisch), die 3D-Struktur, die Zelladhäsion und Zelldifferenzierung, die ausreichende mechanische Stabilität für den Implantationsort und die nichttoxische, rasche Degradation beim *in vivo*-Einsatz. Darüber hinaus muss die Struktur in einfacher Weise dem Defekt anzupassen sein. Eine hohe Bioaktivität wird in der Literatur oft mit einem erhöhten Ion-Release korreliert. Allerdings ist eine gezielte Adhärenz der Zellen an der Scaffoldoberfläche nur dann möglich, wenn unter diesen dynamischen Korrosionsbedingungen keine Toxizität (erhöhter pH-Wert durch Alkalien) auftritt. Bei den gut untersuchten bioaktiven Gläsern zur Bildung eines Knochengewebes wird hierbei die sich auf der Glasoberfläche bildende Hydroxylapatitschicht genutzt. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wird eine Korrosionsschicht erzeugt, die die Rolle der diffusionssperrenden Hydroxylapatitschicht übernimmt. Ein Glasscaffold zur Knorpelzüchtung sollte also von Anfang an eine geeignete bioaktive Oberfläche und ein rasches biokompatibles Auflösungsvermögen innerhalb weniger Wochen gewährleisten.

Eine schnelle Auflösung eines Silikatglases lässt sich relativ einfach durch eine hohe Konzentration nicht bindender Sauerstoffe erreichen. Dies führt aber zu einem nicht akzeptablen pH-Wert-Anstieg in der extra-zellulären Matrix. Deshalb ist ein Ziel des Projekts die Entwicklung neuartiger Gläser, die diese Anforderungen erfüllen.

### 4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Die experimentelle Herangehensweise der Glasentwicklung gliedert sich in vier Bereiche: Die Schmelztechnologie, die optimierte Scaffoldherstellung, die Bestimmung der chemischen Stabilität bezüglich der einzustellenden

Korrosionsschicht und der Auflösungsgeschwindigkeit einschließlich der Bestimmung der resultierenden pH-Wert-Änderung. Die Glaszusammensetzungen werden so gewählt, dass keine selektive Verdampfung und unerwünschte Kristallisation bei der Verarbeitung eintritt.

### Schmelzen des Rohglases

Die hochreinen, pulverförmigen, hauptsächlich oxidischen Rohstoffe werden entsprechend der gewählten Zusammensetzung eingewogen, im Keramikmörser homogenisiert und zur Vermeidung von Schmelzkontamination in einem Platin-Gold-Tiegel geschmolzen. Die Schmelztemperatur von etwa 1300 °C und die Haltezeit von ca. 6 h werden entsprechend der Glaszusammensetzung jeweils neu gewählt. Die Schmelze wird anschließend bei einer Viskosität von 10<sup>2</sup> dPa·s in eine vorgewärmte Stahlform gegossen, entformt und in einer festen Form in einen weiteren Ofen – einen sogenannten Kühllofen – überführt, um Kühlspannungen abzubauen (Bild 1).



Bild 1: a) Rohstoffgemenge im Platin-Gold-Tiegel, b) Ausgießen der Schmelze, c) Abschneiden der Glasschmelze.

### Scaffoldherstellung

Die mechanischen und glastechnischen Eigenschaften der entwickelten Glaszusammensetzungen ermöglichen es, Spongiosa-ähnliche Glasstrukturen mit einzustellender Stegdicke, Porengröße und Raumfüllgrad herzustellen (Bild 3 a). Hierzu wird fraktioniertes Glaspulver mit Hilfe von Dispergatoren und Bindemittel in wässrigen oder organischen Lösungsmitteln dispergiert. Ein Schwamm auf Polyurethanbasis kann in der Lösung so mit Glaspulver beschichtet werden, dass eine gleichmäßige, partikuläre Schicht auf den Oberflächen entsteht. Durch eine geeignete Wärmebehandlung degradieren die Organikbestandteile. Das Glas sintert durch viskoses Fließen und bildet die Schwammstruktur kongruent verkleinert ab.

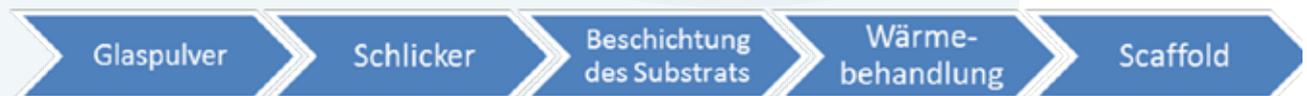


Bild 2: Verfahrensweg der Scaffoldherstellung

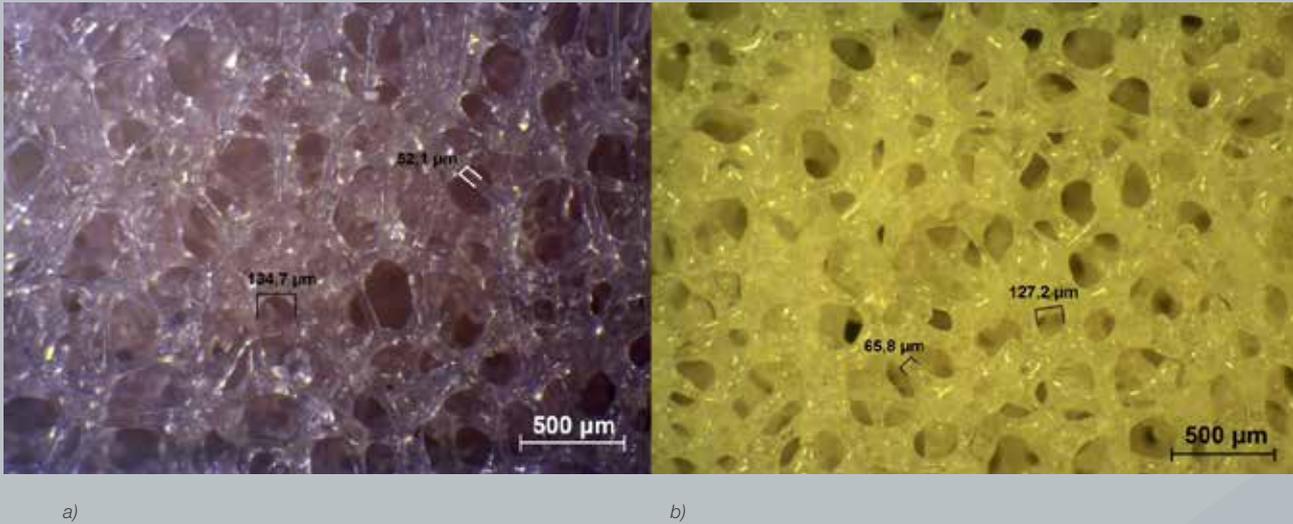


Bild 3: Scaffold der Zusammensetzung Bio6; a) ohne, b) mit Korrosionsschicht

### Bestimmung der chemischen Stabilität – Bildung einer Korrosionsschicht

Entscheidend für die Bioaktivität der Glasscaffolds ist die Adhärenz der Zellen an der Glasoberfläche. Aufgrund der Kenntnis vielfältiger Untersuchungen verfolgt das Forschungsprojekt das Ziel, eine definierte Korrosionsschicht zu erzeugen.

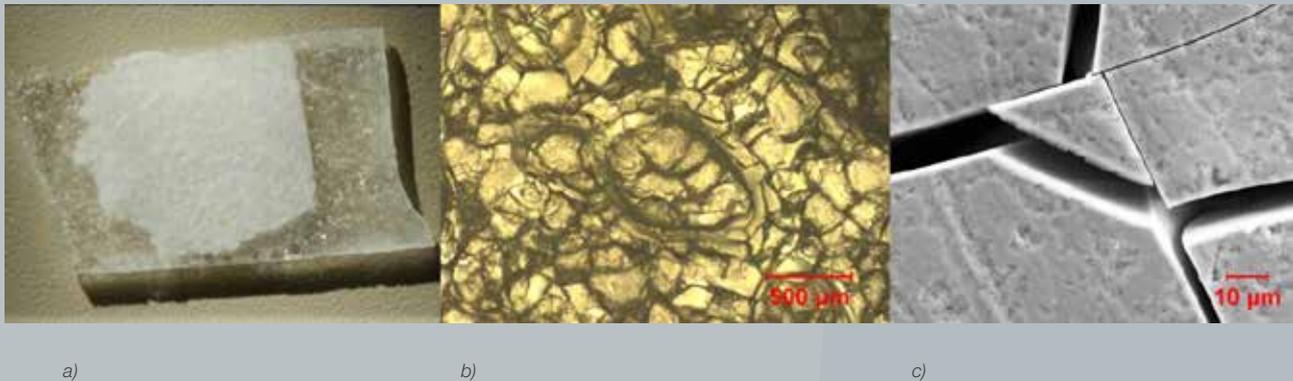


Bild 4: a) Korrosionsschicht auf Glasplättchen, b) im Interferenzkontrast Durchlicht, c) Rasterelektronenmikroskop (REM)

Diese Schicht ist im Bild 4 a) als helle Schicht auf einem Glasplättchen zu sehen. Die milchige Trübung resultiert aus der elastischen Streuung des Lichts an rauen Oberflächen (Mie-Streuung) und an Rissen in dieser getrockneten Schicht. Sowohl die Topologie als auch die chemische Zusammensetzung dieser Schicht erwiesen sich als hervorragend bioaktiv in Bezug auf die Adhärenz der Zellen. Die Rissbildung ist nicht erwünscht. Sie lässt sich prinzipiell vermeiden, ist aber noch Gegenstand der aktuellen Forschung. In den Bildern 4 b) und c) sind lichtmikroskopische und REM-Bilder der Schicht zu sehen. In den Bildern 5 a), b) und c) sind Querschnitte dieser Korrosionsschichten abgebildet. Durch die Elementanalyse mit Hilfe des EDX-Verfahrens werden die stattfindenden chemischen Prozesse erklärbar.

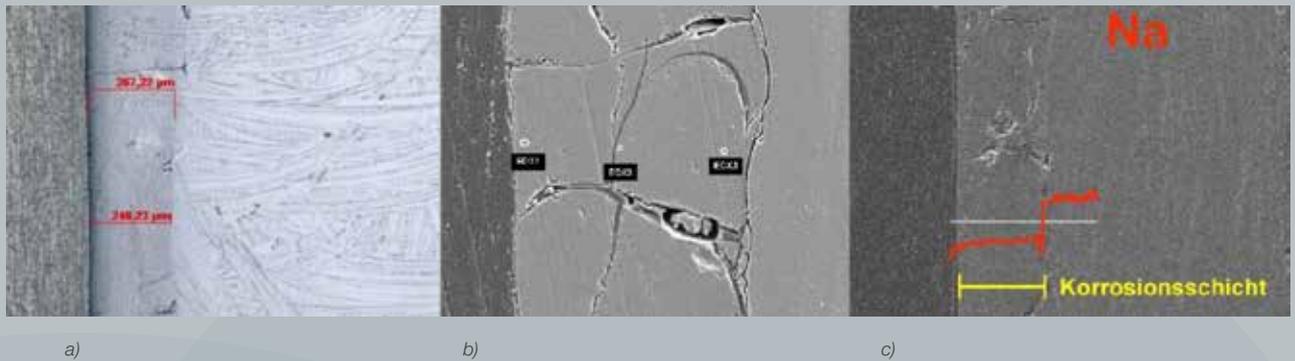


Bild 5: a) Querschnitt der Korrosionsschicht im Interferenzkontrast, b) REM-Abbildung, c) punktuelle EDX-Analyse und semiquantitativer Linescan

### Bestimmung der chemischen Stabilität – Auflösegeschwindigkeit der Scaffolds

Gebrauchsgläser auf Silikatbasis zeichnen sich oft durch hervorragende chemische Stabilität gegen wässrige Lösungen aus. Eine reduzierte chemische Stabilität kann sehr einfach durch Hinzufügen von einwertigen Kationen und durch Verringerung der Konzentration höherwertiger Ionen erreicht werden. Diese einfache Maßnahme ist für den aktuellen Anwendungsfall allerdings nicht brauchbar, weil der pH-Wert der umgebenden wässrigen Lösung zu stark steigen würde und damit eine inakzeptable Toxizität erreicht würde. Durch die erzeugten Glasproben, bei denen das Glas innerhalb von sieben Tagen bei erhöhten Temperaturen ohne zu starkem pH-Wertanstieg aufgelöst wird, wird dieses Problem entschärft. Für die Optimierung sind allerdings noch mehrere Untersuchungen nötig.

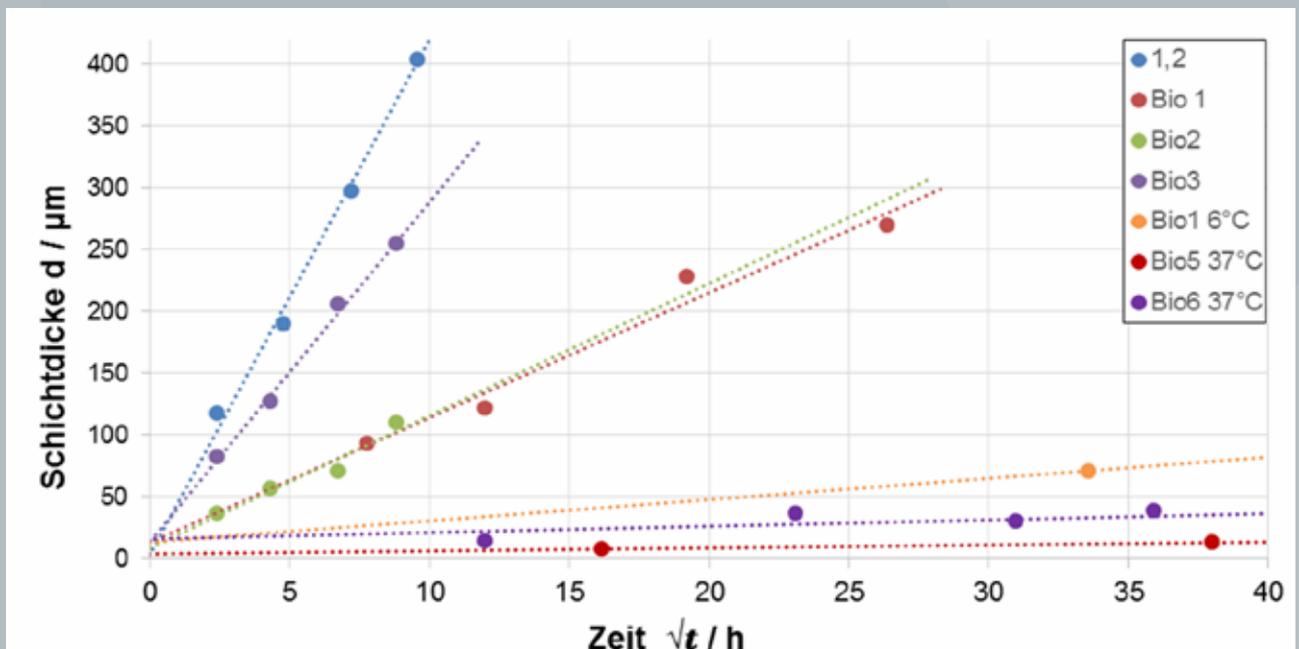


Bild 6: Korrosionsschichtdicken verschiedener Biogläser bei Raumtemperatur bzw. angegebener Temperatur

Der diffusive Korrosionsvorgang kann durch die Fick'schen Gesetze beschrieben werden. Anhand der Schichtdicke  $d$  kann für eine vorgegebene Temperatur der mittlere Diffusionskoeffizient  $D$  einfach ermittelt werden. Durch Exposition der Gläser bei unterschiedlichen Temperaturen erhält man auch die wichtigen Größen  $D_0$  und  $Q$  (Aktivierungsenergie) für diesen Prozess.

$$D = D_0 \cdot e^{-\frac{Q}{RT}}$$

Die Ergebnisse sind in Bild 6 für verschiedene Gläser dargestellt. Bei gleichen Zeiten kann die Schichtwachstumsgeschwindigkeit um den Faktor 100 variiert werden. Nun ermöglicht die Auftragung einerseits, die Stabilität einer neuen Glaszusammensetzung abzuschätzen, und andererseits eine definierte Gelschicht auf den Stegen der Scaffolds einzustellen (Bild 3 b).

### **Evaluation der Glassubstrate mit in vitro kultivierten Zellen**

Ein Knorpel in Gelenken ist dadurch charakterisiert, dass vergleichsweise wenige Knorpelzellen in einer sehr elastischen, von diesen Zellen gebildeten extrazellulären Matrix vorliegen. Typische Bestandteile dieser Matrix sind das Gerüstprotein Collagen II sowie das Glykoprotein Aggrecan, das durch die große Zahl seiner Sulfatgruppen Wasser fest bindet und bei mechanischer Belastung reversibel wieder abgibt. Ein Problem der Regeneration von funktionellen Knorpeln besteht darin, dass differenzierte Knorpelzellen, wie sie aus dem Gelenk gewonnen werden könnten, sich nicht mehr teilen und deswegen auch nicht mehr vermehren lassen. Stattdessen besteht bei der Kultur außerhalb des Organismus die Gefahr, dass Knorpelzellen transdifferenzieren, d. h. ihre Eigenschaften so verändern, dass sie ebenfalls nicht mehr funktionell sind. Eine Lösung besteht darin, nicht fertig differenzierte Zellen – sondern stattdessen Vorläuferzellen – zu verwenden, die noch nicht die typischen Produkte einer Knorpelzelle herstellen, sich aber noch mit ausreichender Geschwindigkeit vermehren lassen. Im Rahmen dieses Projekts wurden die artikulären Vorläuferzellen CP5, die aus den Gelenkköpfen von Rindern stammen, eingesetzt. Allerdings müssen diese Zellen zu einem späteren Zeitpunkt ebenfalls differenzieren. Um diesen Prozess gezielt einleiten und steuern zu können, werden Wachstumsfaktoren (Peptidhormone) zugesetzt. Dieser Teil des Projekts hat also mehrere Ziele:

- Evaluierung des Wachstums der Vorläuferzellen auf den verschiedenen Glassubstraten
- Etablierung eines Systems zur Beurteilung des Differenzierungsgrads
- Optimierung der Bedingungen für die Differenzierung

Zur Verwendung in der Zellkultur ist es erforderlich, die Glassubstrate (Plättchen oder Scaffolds) vorher zu sterilisieren. Die üblichen physikalischen Sterilisationsmethoden (feuchte Hitze 121 °C, 2 bar oder trocken 180 °C) schädigen die meisten Glasproben so stark, dass sie im Kulturmedium innerhalb von 48 h vollständig hydrolysieren. In einigen Fällen verfestigt sich das Medium durch das entstandene Silikat. Deshalb wurden im Projektverlauf mehrere chemische Sterilisationsmethoden miteinander verglichen. Die Desinfektion mit Ethanol erweist sich als sehr leicht handhabbar, allerdings kommt es in Einzelfällen wegen der ungenügenden sporoziden Wirkung zur Verkeimung. Die Sterilisation mit Aldehyden ist erheblich arbeitsintensiver, außerdem erweisen sich die Reste der Reagenzien als toxisch für die Zellen.

Die verwendeten bovinen Progenitorzellen wurden vor der Aussaat auf die Gläser (Plättchen oder Scaffolds) in üblichen Polystyrol-Kulturflaschen vermehrt. Nach einigen Tagen zeigten die Zellen die typische verzweigte fibroblastenähnliche Morphologie, was auf eine Anhaftung an der Oberfläche hindeutet (Bild 7 links).

Nach der Besiedelung erwiesen sich einige der Glassubstrate als inkompatibel mit lebenden Zellen. Bild 7 rechts zeigt tote, kugelförmige Zellen (Pfeile) ohne Anhaftung an die Oberfläche.

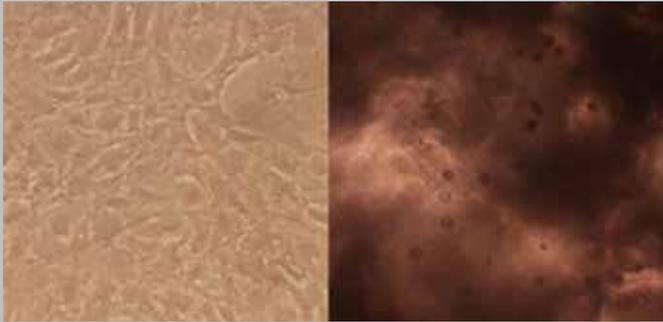


Bild 7: CP5-Zellen, links auf Polystyrol-Oberfläche, rechts auf Bioglas 1

Ergebnisse aus dem kooperierenden Institut für Anatomie der Paracelsus medizinischen Privatuniversität (Leitung Prof. Dr. Gundula Schulze-Tanzil) deuten jedoch darauf hin, dass die Kompatibilität von den eingesetzten Zellen abhängt. So zeigen dort menschliche Zellen ein anderes Verhalten als Zellen vom Schwein.

Es können auch lebende und tote Zellen gleichzeitig mit einer Doppelfärbung (Diacetylfluorescein als zellgängiger Farbstoff, der lebende Zellen grün färbt; Propidiumiodid als roter Farbstoff, der nur tote Zellen mit defekter Membran färbt) an demselben Präparat dargestellt werden (Bild 8). Wie zu erkennen ist, sind auf den späteren Bioglasvarianten nur vereinzelt tote Zellen (rot) zu erkennen, der größte Teil ist vital (grün).

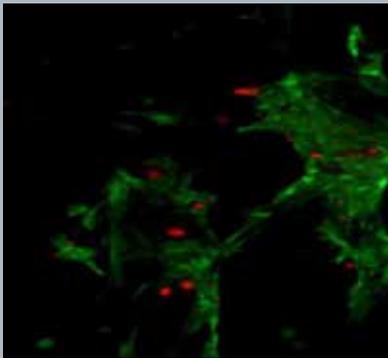


Bild 8: Lebend/tot Färbung von primären Knorpelzellen. Aufnahme von Clemens Gögele B. Sc. und Prof. Dr. Gundula Schulze-Tanzil, PMU Nürnberg

### Differenzierung der Zellen in vitro

Zur Beurteilung des Differenzierungsgrads mussten geeignete Verfahren etabliert werden. Das stark sulfatierte Aggrecan lässt sich vergleichsweise einfach durch kationische Farbstoffe wie Alcianblau oder Safranin anfärben (Bild 9). Andere Verfahren nutzen den immunhistologischen Nachweis von Collagen II (das typisch für Knorpel ist) oder des Aggrecan-Proteingerüsts. Eine derart vollständige Differenzierung wie im lebenden Organismus ist in der Zellkultur jedoch nach derzeitigem Stand der Forschung nicht zu erreichen.

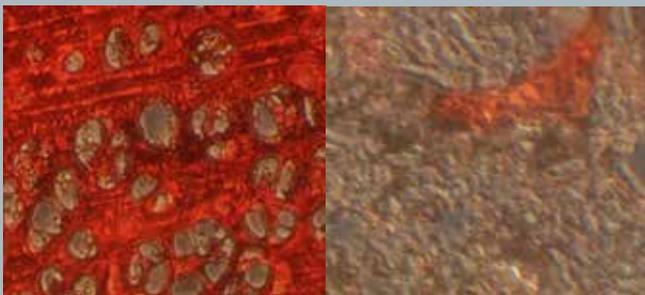


Bild 9: Schnittpräparate von Gelenkknorpeln vom Schwein, gefärbt mit Safranin. Links Knorpelzone, rechts Übergang zum Knochen, nur einzelne Inseln von Knorpelzellen sind sichtbar

Um in der Kultur Differenzierung gezielt zu induzieren, werden Wachstumsfaktoren als eine Art Katalysator benötigt. Diese liefern das Signal für die Zelle, ihren Phänotyp zu ändern. Für die Differenzierung zu Knorpelzellen wurden in der Literatur häufig das synthetische Glucocorticoid Dexamethason sowie die Peptidhormone IGF-1 und TGF- $\beta$ 3 eingesetzt, oft zusammen mit der Aminosäure Prolin (die einen großen Anteil des Collagens ausmacht) sowie Ascorbinsäure (Vitamin C), das für das Crosslinking der Collagen-Peptidketten benötigt wird.

Da die Differenzierung ein langsamer, viele Wochen dauernder Prozess ist und die Färbungen zur Beurteilung nicht zerstörungsfrei sind, werden entsprechend viele Ansätze unter identischen Bedingungen angelegt, die dann zu verschiedenen Zeitpunkten entnommen, fixiert, gefärbt und beurteilt werden. Im Rahmen dieses Vorlaufprojekts wurde aufgrund des begrenzten Materials und der knappen Zeit nur eine Phase von drei Wochen untersucht.

Die Kombination aller drei Wachstumsfaktoren erweist sich als die effektivste Variante. Bild 10 zeigt die mit Safranin gefärbten Zellen nach Exposition gegen alle drei Substanzen nach drei Wochen. Deutlich erkennbar sind Zonen von Zellaggregaten, die offensichtlich von extrazellulärer Matrix zusammengehalten werden und mit Safranin färbbar sind. Die Zusätze Prolin und Ascorbinsäure zeigen jedoch keinen nachweisbaren Effekt. Im Rahmen dieser Versuchsreihe kann jedoch keine Dosis-Wirkungsabhängigkeit der Wachstumsfaktoren bestimmt werden, da dies die Anzahl der nötigen Ansätze vervielfacht hätte. Es ist daher anzunehmen, dass die hier verwendeten Bedingungen zwar wirksam, aber nicht optimal sind.

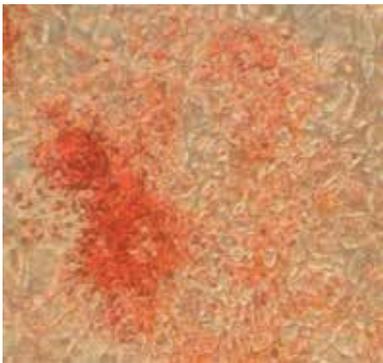


Bild 10: Teildifferenzierte CP5 Zellen nach drei Wochen, gefärbt mit Safranin

### **Dreidimensionale Kultur in Alginate**

In der Literatur wird die dreidimensionale Kultur in einer Matrix als Verfahren beschrieben, die Entdifferenzierung von reifen Knorpelzellen zu verhindern und in anderen Fällen die Differenzierung zu unterstützen. In Alginate-Beads eingeschlossene CP5 Zellen (hergestellt durch Eintropfen in Calciumchloridlösung) wurden ebenfalls denselben Differenzierungsbedingungen ausgesetzt. Bei der Beurteilung war eine leichte Steigerung der Differenzierung erkennbar, die aber aufgrund des qualitativen Ansatzes nicht quantifiziert werden konnte. Da die Zellen in den relativ großen Poren der Scaffolds jedoch auch in einer quasi dreidimensionalen Kultur vorliegen, ist zu vermuten, dass von den Scaffolds auch eine, die Differenzierung unterstützende, Wirkung ausgeht. Deren Ausmaß kann jedoch gegenwärtig noch nicht abgeschätzt werden.

### Durchfluss-System für die Zellkultur

Ausgehend von der Überlegung, dass beim Auflösen der Gläser erhebliche Mengen Alkaliionen frei werden und die Zellschicht schädigen könnten, wird ein sehr einfaches Durchflusssystem entwickelt, um den Alkalianteil möglichst schnell zu entfernen.

Dieses System kam jedoch nicht zum Einsatz, aufgrund der sehr einfachen Handhabung ist es aber ein brauchbares Nebenprodukt des Projekts, dargestellt in Bild 11. Die Kulturkammer besteht aus Silikon (Sylgard184) und kann in jeder beliebigen Form im Labor hergestellt werden. Alle Teile mit Kontakt zu den Zellen oder dem Medium bestehen aus Silikon oder Polyethylen und sind getrennt von den Pumpen autoklavierbar. Das System kann sehr einfach unter Thermostatbedingungen betrieben werden, die Kosten liegen (ohne Pumpen) bei etwa 20 Euro. Dieses low-cost System hat verschiedene Einsatzmöglichkeiten in Zellkultur-Laboratorien.

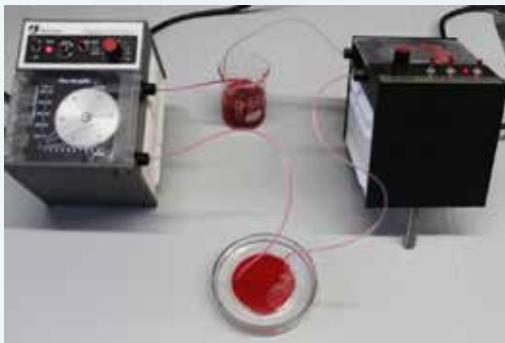


Bild 11: Durchfluss-Zellkultursystem mit zwei Peristaltik-Pumpen

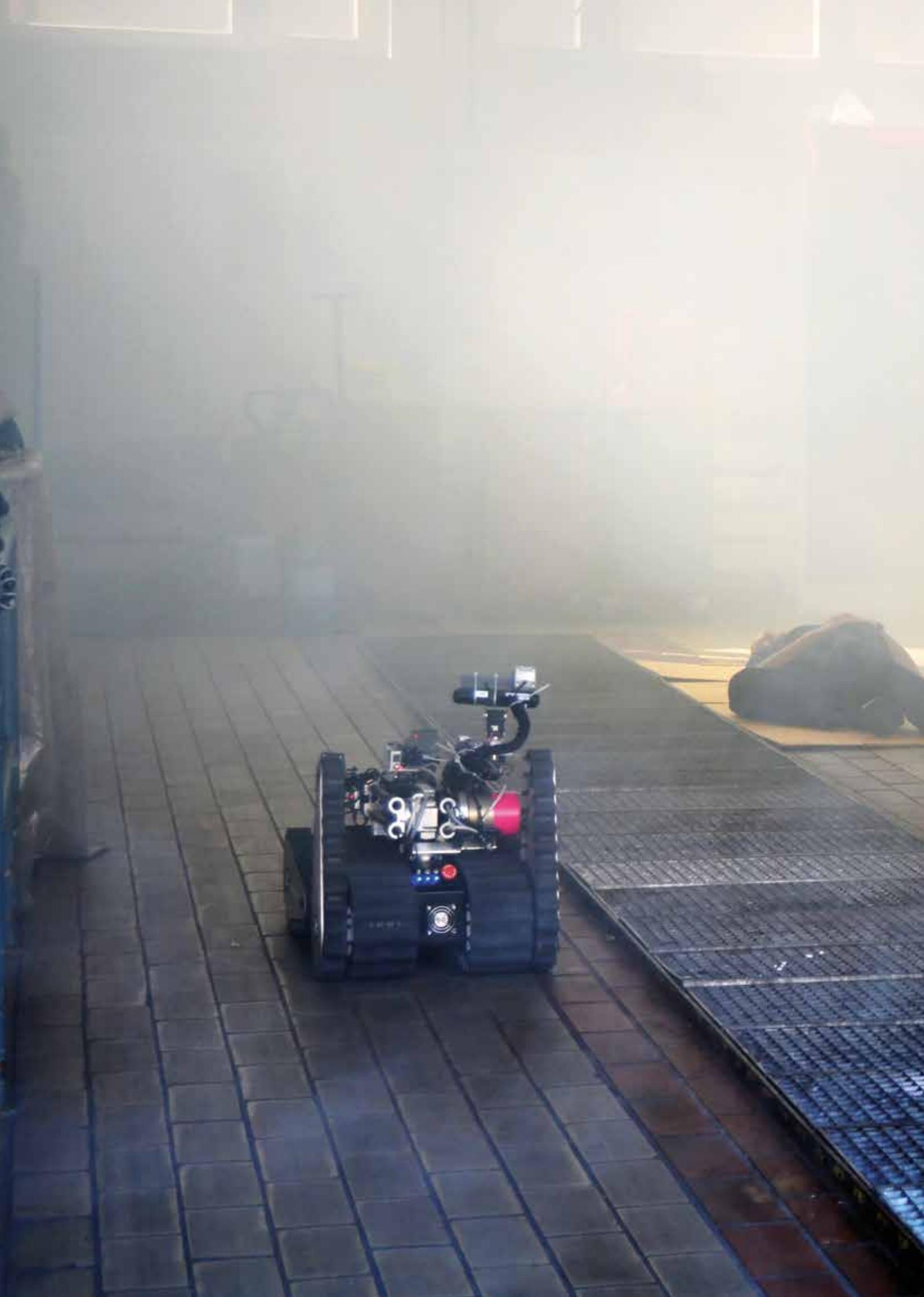
## 5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

In den beschriebenen Versuchen wurden Glaszusammensetzungen entwickelt, die unter Zellkulturbedingungen hinreichend lange beständig sind. Die Zusammensetzung unterstützt das Wachstum von Zellen in einer definierten geometrischen Form und löst sich danach auf. Es wurde gezeigt, dass Zellen für mehrere Wochen auf diesen Substraten überleben können, sich teilen und differenzieren. Außerdem wurden Verfahren entwickelt, mit denen aus den genannten Glasmaterialien poröse, dreidimensionale Formkörper (Scaffolds) in nahezu beliebiger Geometrie hergestellt werden können.

Die Versuche zur Besiedlung der Gläser mit Zellen zeigen, dass Zellen adhärieren und sich teilen.

Durch die Kombination verschiedener Wachstumsfaktoren konnte eine Differenzierung der vermehrten Zellen in Richtung Knorpelzellen gezeigt werden.

Aufgrund der begrenzten Zahl der Versuche konnte bisher kein quantitativer Zusammenhang zwischen der Wachstums-/ Teilungsrate der Zellen auf den verschiedenen Gläsern ermittelt werden, ebenso konnte bisher keine Dosis / Wirkungsbeziehung für die Differenzierung erstellt werden. Die nächsten Schritte erfordern daher den Übergang zu quantitativen Messungen, was einen größeren Projektrahmen erfordert.







# SensorVista - Sensorik für das Nullsicht-Problem bei Feuerwehreinsätzen

Prof. Dr. Stefan May  
Johannes Vollet, M. Eng.  
Johanna Gleichauf, B. Eng.  
Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik  
Technische Hochschule Nürnberg

## Wesentliche Projektziele

Ziel des Vorlaufforschungsprojekts „SensorVista“ ist die Vertiefung von Wissen und Entwicklung von Erfahrungen mit Sensoren, die für Nullsichteinsätze geeignet sind. Das umfasst Radar-, Thermographie- und Ultraschallsensoren sowie Multi-Echo-Laserscanner und InGaAs-Kameras. Einsatzszenarien sind die Erkundung von verrauchten Umgebungen, wie beispielsweise im Brandfall. Das Projekt fokussiert darauf, auf Basis der Projektergebnisse weitere Forschungsanträge im Bereich der mobilen Robotik für die zivile Sicherheit zu stellen.

### 1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2016
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik / Labor für mobile Robotik
Projektleitung	Prof. Dr. Stefan May
Kontaktdaten	E-Mail: stefan.may@th-nuernberg.de

### 2. Ausgangslage

Feuerwehreinsätze sind vielfältig: Von technischer Hilfeleistung bis zur Brandbekämpfung werden hohe heterogene Anforderungen an Einsatzkräfte gerichtet. Brandeinsätze stellen für Feuerwehren eine der gefährlichsten Aufgaben dar. Das mögliche Vorhandensein brennbarer, giftiger oder explosiver Objekte ist für Feuerwehreinheiten beim Betreten des Gefahrenbereichs ein unkalkulierbares Risiko. Dabei sind neben hohen Temperaturen schlechte Sichtverhältnisse bis hin zur Nullsicht das größte Problem. Neue Sensortechnologien können technische Vorteile bieten, wenn die menschliche Wahrnehmungsfähigkeit durch die Umgebungsbedingungen zu stark eingeschränkt ist.

Im Vorfeld wurde im Rahmen einer Masterarbeit das Potential des Vorhabens erkannt (Titel: „Entwicklung eines Sensorkonzepts zur Kartierung bei Nullsicht im Feuerwehreinsatz“, Autor: Johannes Vollet). Hierbei wurden Ultraschallsensoren, ein prototypisches Radarsystem sowie eine Wärmebildkamera untersucht. Die Sensoren wurden einer erhöhten Temperatur in einer verrauchten Umgebung ausgesetzt. Messwerte der Radartechnik wurden dadurch am wenigsten beeinflusst. Die verwendeten Ultraschallsensoren lieferten noch brauchbare Messwerte bis zu einer Objektentfernung von einem Meter. Diese beiden Distanzsensoren weisen in einer Fusion mit einer Wär-

mebildkamera ein deutliches Potential zur Erleichterung der Umgebungswahrnehmung unter widrigen Bedingungen auf.

Im EU-Projekt „Smokebot“<sup>1</sup> befasst sich das Wissenschaftlerteam ebenfalls mit dem Nullsichtproblem. In diesem kommt, neben einem 3D-Laserscanner und einer Wärmebildkamera, ein großes (13,5 dm<sup>3</sup>) und somit auch schweres (3,4 kg) 3D-Radar zum Einsatz. Konzepte zur Behebung dieses Nachteils sind Kernbestandteile des Vorlaufforschungsprojekts.

### 3. Ziele des Forschungsprojekts

Grundsätzlich ist zwischen zwei verschiedenen Robotersystemen zu unterscheiden. Zum einen soll ein großer Roboter zum Einsatz gebracht werden, der mit einem Manipulator ausgestattet ist. Dieser könnte später ganz autonom Erkundungsaufgaben durchführen. Als Technologieträger dient der Roboter „Schrödi“<sup>2</sup> des RoboCup-Wettkampfteams AutonOHM der Technischen Hochschule Nürnberg. Dieser verfügt derzeit über eine Wärmebildkamera, einen Projektionsscanner, eine Time-of-Flight Kamera, zwei RGB-Kameras sowie einen Laserscanner. Ein solches Gesamtsystem stellt für den späteren Feuerwehreinsatz einen hohen Kostenfaktor dar und ist vermutlich nur bei Katastrophen zwingend erforderlich (Nuklear- oder Chemieunfälle). Für normale Brandeinsätze soll die Entwicklung schon frühzeitig in Richtung einer kostengünstigen und leicht tragbaren Alternative gelenkt werden, die einen Verlust des Robotersystems vertretbar macht. Geplant ist, dass der Roboter von Einsatzkräften ins Einsatzgebiet getragen wird, um möglichst schnell Informationen aus diesem Bereich zu generieren. Das umfasst die Erstellung einer groben Karte des Einsatzgebietes sowie die Detektion von Opfern und Gefahrstoffen.

Ein weiteres Ziel ist es, komplementäre Sensoren, die bisher noch nicht im Anwendungsfeld der Rettungsrobotik Verwendung finden, hinsichtlich ihrer Eignung in einem Brandszenario zu untersuchen. Die Kalibrierung verschiedener Sensoren zueinander ist ein weiterer notwendiger Arbeitspunkt.

Neben den genannten technischen Gesichtspunkten stellt das Beantragen von Förderprojekten eine wichtige Zielsetzung dar. Geplant ist, zur Sicherstellung der Nachhaltigkeit mindestens eine Promotionsstelle zu beantragen, die weiterhin auf eine Erforschung der Problemstellungen eines Nullsichtszenarios fokussiert.

Zusammenfassend sind die im Rahmen der Vorlaufforschung zu bearbeitenden Themengebiete im Folgenden genannt:

- Aufbau einer Testplattform für Demonstrationszwecke bei Anwendern und für Öffentlichkeitsarbeit
- Evaluierung komplementärer Sensorsysteme
- Kalibrierung von Sensorsystemen
- Konzeptionierung eines radarbasierten Sensorsystems
- Evaluierung kostengünstiger Thermographie-Kameras
- Beantragung von Förderprojekten für mindestens eine weiterführende Promotionsstelle

## 4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

### Betrachtung der beiden technischen Schwerpunkte:

#### Demonstrationssystem „Schrödi“

Beim Einsatz in einem Feuerwehrszenario steht für das Demonstrationssystem das Überwinden von Treppen im Vordergrund. Die mechanische Entwicklung des Roboterfahrwerks wurde von dem Partner-RoboCup-Team der Fachhochschule Kärnten durchgeführt und von der TH Nürnberg zugekauft. Die Entwicklung des Manipulators wurde durch den Forschungsmaster-Studenten (MAPR) Martin Fees durchgeführt.

Im Rahmen der Vorlauforschung wurden diese beiden Teilsysteme „verheiratet“ und gemeinsam in Betrieb genommen. Darüber hinaus wurde das gesamte Energiekonzept des Roboters entwickelt sowie die zuvor im Labor implementierten Motorcontroller zum Einsatz gebracht.

Der Einsatz des Robotersystems bei der RoboCup-Weltmeisterschaft (Leipzig, Juni 2016) in der Rescue League (Platz 5) wie auch bei einer Feuerwehübung war sehr erfolgreich.

Bei der gemeinsamen Übung mit der Feuerwache 3 der Berufsfeuerwehr Nürnberg waren zahlreiche Medienvertreter (Zeitung, Rundfunk und Fernsehen) anwesend. Der Einsatz autonomer Roboter in zivilen Rettungsszenarios fand eine deutliche Medienresonanz.



Abbildung 1: Roboter „Schrödi“

## Evaluation komplementärer Sensorsysteme

Die derzeit zum Einsatz gebrachten Sensorsysteme arbeiten in verschiedenen Wellenlängenbereichen. Bislang wurden auf dem Demonstrationssystem zwei Genius WideCam F100 für den RGB-Bereich (etwa 400 nm - 700 nm Wellenlänge) sowie eine Optris PI160 Wärmebildkamera (7500 nm - 13000 nm) eingesetzt. Die Fähigkeit, Rauch und Nebel zu durchdringen, hängt direkt vom detektierbaren Wellenlängenbereich einer Kamera ab. Schwebeteilchen in der Luft, deren Abmessungen im entsprechenden Wellenlängenbereich der Kamera liegen, dämpfen die eintreffende Strahlung. Mit der Kamera ist hierdurch ab einem gewissen Anteil an Rauch in der Luft keine Sicht mehr möglich.



Abbildung 2: Vergleich von Kamerasystemen (li:RGB, mi: RPi NoIR, re:SWIR)

Für die Evaluierung der Sichtweite von Kamera-basierten Sensoren werden drei spezielle Modelle gegenübergestellt. Eine Logitech C930e (Handelsübliche RGB-Webcam, vergleichbares sichtbares Spektrum zur Genius WideCam), eine Raspberry Pi NoIR Kamera (fehlender NIR-Filter, 400 nm - über 950 nm) sowie eine NIT WiDy SWIR 640 InGaAs-SWIR-Kamera (900 nm - 1700 nm). Letztere ist eine Leihgabe der Firma Acal BFI. Der Test wurde in den Räumlichkeiten der Feuerwache 3 durchgeführt. Die minimale Sicht war laut Aussage der Feuerwehrleute vergleichbar mit einem üblichen Szenario, in dem auf dem eingeschalteten Herd Essen vergessen wurde.

In Abbildung 2 sind die Bilder der verschiedenen Kameras zum selben Zeitpunkt der Aufnahme zu sehen. Die Vorteile einer SWIR-Kamera sind in dieser Szene nicht deutlich. Erst bei grellem Gegenlicht (2000 W Baustrahler) zeigt sich durch die hohe Dynamik, bedingt durch die logarithmische Kennlinie des Sensors, ein besseres Bild (vgl. Abbildung 3).



Abbildung 3: SWIR-Kamera bei Gegenlicht

## Kalibrierung von Sensorsystemen

Um eine robuste Lokalisierung und Opferdetektion unter schlechten Sichtbedingungen zu gewährleisten, ist die Fusion mehrerer Sensoren notwendig. Typischerweise werden in der Robotik 2D-Laserscanner eingesetzt, um Distanzinformationen zu erhalten. In Kombination mit einer Kamera können zusätzlich visuelle Informationen der Umgebung gewonnen werden. Thermokameras sind gut geeignet, um Objekte mit einem Temperaturunterschied zur Umgebung zu detektieren. Die Schwierigkeit, einen Laserscanner mit einer Thermokamera zu fusionieren, liegt darin, einen Bezug zwischen jeder Distanzmessung und dem entsprechenden Thermokamera-Bildpunkt zu finden. Da der 2D-Laserscanner nur eine Ebene darstellt, ist dies keine intuitive Aufgabe. Dazu wurde ein spezielles dreieckiges Kalibriermuster entwickelt (vgl. Abbildung 4). Das Muster ist mit beiden Sensormessprinzipien detektierbar und geometrisch so gestaltet, dass eine Kalibrierung alle sechs räumlichen Freiheitsgrade (3 x Translation, 3 x Rotation) abdeckt. Die Schnittpunkte zwischen der Laserscanlinie und den Kanten des Kalibrierungsmusters wurden im Laserscan und im Thermokamera-Bild ausgewählt. Da die Laserscanlinie im Thermokamera-Bild nicht erkennbar ist, wurde eine Raspberry Pi NoIR Kamera als Hilfssensor verwendet. Letztendlich kann mit Hilfe verschiedener Algorithmen die extrinsische Transformation zwischen dem Laserscanner und der Thermokamera berechnet werden, sodass es möglich ist, jedem Distanzwert eine Temperatur zuzuordnen. Die finale Applikation wird dabei helfen, die Position eines Menschen genau zu bestimmen. Ein solches System kann auf dem oben genannten Robotersystem „Schrödi“ eingesetzt werden.

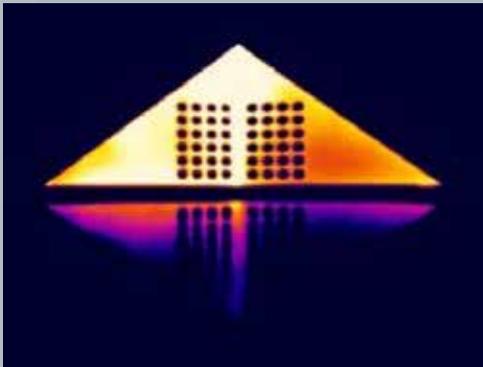


Abbildung 4: Kalibrierungsmuster zu Kalibrierung zwischen Wärmebildkamera und Laserscanner

## Entwicklung eines radarbasierten Sensorsystems

Für die tragbare Robotersystemvariante bieten radarbasierte Sensorkonzepte eine kleinere und kostengünstigere Alternative zu Laserscannern. Auf dem freien Markt konnten jedoch keine Sensoren gefunden werden, die die notwendigen Eigenschaften aufweisen, um sie im Feuerwehrszenario verwenden zu können. Vor diesem Hintergrund ist eine Neuentwicklung notwendig. Lediglich aus einem anderen Einsatzgebiet konnte ein kommerzielles System mit einem verwandten Messverfahren gefunden werden. Das Walabot-Radar der israelischen Firma Vayyar basiert auf einem UWB-Radar (Ultra-wideband). Im Gegensatz dazu ist im Rahmen des Promotionsvorhabens geplant, ein FMCW-Radar (Frequency Modulated Continuous Wave) zu entwickeln. Das Walabot wurde als Evaluationssystem beschafft. Dieses Radarsystem ist vordergründig für die Verwendung an einem Smartphone gedacht, kann jedoch auch zur Hinderniserkennung auf mobilen Robotern eingesetzt werden (siehe Abbildung 5).

Ziel des Promotionsvorhabens ist es, ein kleineres Radarsystem als das Walabot zu entwickeln, das zusätzlich auch für den Feuerwehreinsatz tauglich ist.

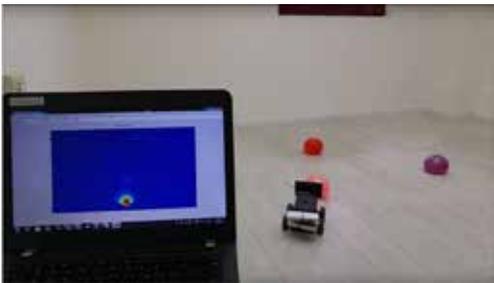


Abbildung 5: Hinderniserkennung mittels Walabot (Quelle: [https://www.youtube.com/watch?v=C\\_8ZIVrcGtU](https://www.youtube.com/watch?v=C_8ZIVrcGtU))

### Evaluation kostengünstiger Thermosensoren

Für den Einsatz kleiner Robotersysteme wird auch deren Verlust einkalkuliert. Daher ist die Suche nach einer kostengünstigen Alternative zu den bisher verwendeten Thermokameras ein wichtiger Aspekt. Das Forschungsteam hat mit der Berufsfeuerwehr diskutiert, ob eine robuste Variante auf Basis industrietauglicher Sensoren oder eine „Wegwerf“-Variante auf Basis billiger Unterhaltungselektronik zu präferieren ist. Die Bildwiederholungsfrequenz der derzeit eingesetzten Optris PI160 Wärmebildkamera beträgt bis zu 120 Hz bei einer Auflösung von 160 x 120 Pixel. Neben den Kosten für solch ein industrietaugliches System ist auch die Baugröße von 45 mm x 45 mm x 62 mm für ein kompaktes Gesamtsystem hinderlich.

Aus diesem Grund werden handelsübliche Wärmebildkameras für Smartphones auf ihre Einsetzbarkeit im Rettungsszenario untersucht.

Untersuchte Wärmebildkameras:

- FLIR One – 9 Hz Bildwiederholungsfrequenz, 160 x 120 Pixel Auflösung (FLIR Lepton 3 Modul), ca. 300,- €
- FLIR Lepton 2 (Modul) – 9 Hz Bildwiederholungsfrequenz, 80 x 60 Pixel Auflösung, ca. 200,- €
- Seek Thermal Compact – 9 Hz Bildwiederholungsfrequenz, 206 x 156 Pixel Auflösung, ca. 300,- €
- Seek Thermal CompactPRO – 15 Hz Bildwiederholungsfrequenz, 320 x 240 Pixel Auflösung, ca. 500,- €

Derzeit befindet sich das Lepton 2 Modul im Rahmen einer Bachelorarbeit in der Inbetriebnahme. Es zeigt sich schon jetzt, dass diese Sensoren fähiger sind, als vom Hersteller angegeben. Das Lepton 2 kann beispielsweise mit einer Bildfrequenz von 27 Hz robust betrieben werden. Geplant ist, diesen Sensor am Manipulator von „Schrödi“ anzubringen, um auch versteckte Opfer finden zu können. Die Untersuchung der weiteren Kameras wird Gegenstand der weiteren Forschung und Entwicklung sein.

## 5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Im Rahmen der oben genannten Promotionsstelle ist das Ziel, das Thema Nullsichtsensorik auf Basis von Radar weiter zu verfolgen. Zusätzlich wird derzeit eine Forschungsmasterarbeit betreut, die komplementäre Ansätze verfolgt. Hierbei handelt es sich um die Positionsbestimmung von Personen.

Erfahrungen mit für Nullsicht geeigneten Sensoren fließen in das Know-how des RoboCup-Teams für Rescue-

Robotik ein und tragen dadurch zur Lehre bei.

Die entwickelten Sensorkonzepte werden in halbjährlichen Abständen bei Übungen mit der Berufsfeuerwehr evaluiert. Damit verfolgt die TH Nürnberg das Ziel, die Feuerwehrleute direkt in den Entwicklungsprozess einzubeziehen und ihre Anforderungen frühzeitig aufzunehmen.

---

<sup>1</sup> <http://www.smokebot.eu>

<sup>2</sup> Der Name Schrödi nimmt Bezug auf „Schrödingers Katze“ (Erwin Schrödinger 1887-1961, österreichischer Physiker und Wissenschaftstheoretiker). Bis zum RoboCup in Leipzig konnte der Roboter nicht vollständig in Betrieb genommen werden, wodurch dessen Funktionsfähigkeit nicht sichergestellt war. Sein Zustand wurde scherzhaft mit dem von „Schrödingers Katze“ verglichen, die in Schrödingers Gedankenexperiment zum gleichen Zeitpunkt sowohl lebendig als auch tot war, und erst im Moment einer Messung (=RoboCup) eindeutig festgelegt wurde. Die Katze eines der Roboter-Konstrukteure des österreichischen Partnerteams trägt zudem den gleichen Namen.







# OCT-push – Optische Kohärenztomographie mit gesteigerter Auflösung

Prof. Dr. Wolfgang Mönch  
Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik  
Technische Hochschule Nürnberg

Die optische Kohärenztomographie (OCT) ist ein auf Interferenz basierendes optisches Verfahren, das im Gegensatz zur Mikroskopie Information auch aus der Tiefe von biologischem Gewebe gewinnt.

Damit ist es für die medizinische Diagnostik beispielsweise in der Dermatologie und in der Ophthalmologie von höchstem Interesse.

## Wesentliche Projektziele

Zentrales Ziel des Projektes OCT-push ist der Aufbau eines OCT-Systems im Labor für Technische Optik, das im Gegensatz zu aktuell verfügbaren Systemen mit einer fokusvariablen Linse ausgerüstet ist, die eine verbesserte Auflösung in tieferliegenden Gewebeschichten verspricht. Das Ziel ist es, damit den Nachweis dieses gesteigerten Auflösungsvermögens zu führen. Weitere Ziele sind die Gewinnung eines vertieften Anwendungsverständnisses, die Recherche des Standes der Technik, Konzeptüberlegungen für ein Folgeprojekt, sowie Diskussionen mit potentiellen Projektpartnern.

### 1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2016
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik / Labor für Technische Optik
Projektleitung	Prof. Dr. Wolfgang Mönch
Kontaktdaten	E-Mail: wolfgang.moench@th-nuernberg.de

### 2. Ausgangslage

Die optische Kohärenztomographie (OCT) ist ein auf Interferenz basierendes optisches Verfahren, das im Gegensatz zur Mikroskopie Information auch aus der Tiefe von biologischem Gewebe gewinnt und dadurch für die medizinisch-klinische Diagnostik von höchstem Interesse ist. Es wurde zu Beginn der 1990er Jahre erfunden und hat sich in den letzten Jahren einen bedeutenden Platz unter den abbildenden diagnostischen Verfahren der Medizintechnik erobert. In der klinischen Praxis dient es heutzutage unter anderem der Diagnostik von Hohlräumen und des Verdauungstraktes, kommt aber hauptsächlich in der Dermatologie und insbesondere in der Ophthalmologie zum Einsatz.

Der Aufbau eines (Zeitdomänen-) OCT-Systems entspricht dem System eines Michelson-Interferometers, wie in Abbildung 1 dargestellt. Die Lichtquelle soll eine möglichst kurze Kohärenzlänge aufweisen. Damit bestimmt die Position des beweglichen Spiegels im Referenzarm denjenigen axialen Bereich der Probe, aus dem der Detektor ein Interferenzsignal mit maximalem Kontrast empfängt. In einem streuenden biologischen Gewebe beträgt die maximale Tiefe, aus der ein Signal detektiert werden kann, etwa 1 mm bis 2 mm; die laterale Ortsauflösung beträgt 1  $\mu\text{m}$  bis 10  $\mu\text{m}$ . Damit weist die OCT ein Tiefen-zu-Auflösungs-Verhältnis von über 100 auf und zählt zu

den hochauflösenden Verfahren [1]. Das Vorlaufprojekt OCT-push zielt auf die Steigerung der lateralen Auflösung der OCT in tiefliegenden Gewebeschichten durch den Einsatz fokusvariabler Optiken.

Die axiale Auflösung  $\Delta z$  eines OCT-Systems ist bestimmt durch die Bandbreite der Lichtquelle,  $\Delta\lambda$ , und gegeben durch die Kohärenzlänge der Lichtquelle,  $l_c$  [2]:

$$\Delta z = l_c = \frac{2 \ln 2}{\pi} \cdot \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}. \quad [1]$$

Dabei ist  $\lambda_0$  die Wellenlänge der Lichtquelle. Je breitbandiger die Lichtquelle ist, desto feiner können die Tiefenstrukturen einer Probe aufgelöst werden.

Die laterale Auflösung ist dagegen durch den konfokalen Bereich des fokussierten Strahls gegeben, der im Meßarm auf die Probe gerichtet wird. Somit bestimmen die Fokusslage und die numerische Apertur der verwendeten Fokussierlinse die laterale Auflösung. Dabei ist zusätzlich auch eine Brechung im Material der Probe zu berücksichtigen.

Für den axialen Scan sind heute festbrennweitige und mechanisch entlang der optischen Achse bewegte Linsen Stand der Technik. Dadurch kann zwar die Lage des Fokus in der zu untersuchenden Probe, nicht aber die numerische Apertur der Linse gesteuert werden. Diesen Nachteil würde der Einsatz einer fokusvariablen Linse überwinden. Solche fokusvariablen Linsen werden seit etwa 15 Jahren erforscht und sind inzwischen auch auf dem Markt erhältlich. Der Einsatz einer fokusvariablen Linse in einem OCT-System sollte daher die laterale Auflösung auch bei tiefer liegenden Gewebeschichten deutlich verbessern.

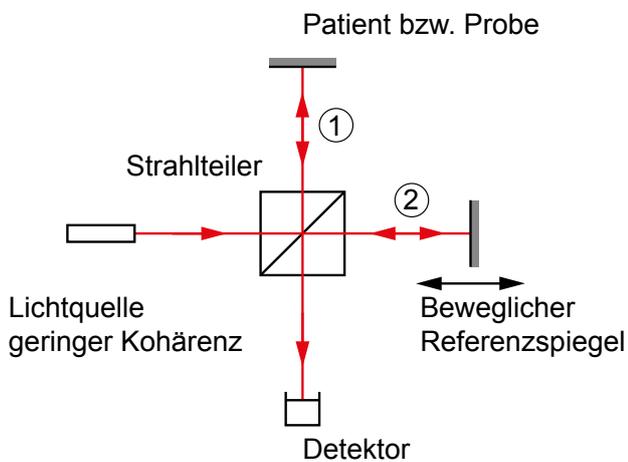


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Michelson-Interferometers. Der Aufbau entspricht dem Aufbau eines OCT-Systems. Entscheidend für die axiale Auflösung ist die Linienbreite der kurzkohärenten Lichtquelle. Der bewegliche Spiegel im Referenzarm (2) sorgt für die axiale bzw. Tiefen-Abtastung („A-scan“) durch die Probe, ein hier nicht dargestellter xy-Scanner im Messarm (1) für die laterale Abtastung der Probe.

In der früheren Arbeitsgruppe des Projektleiters an der Universität Freiburg konnte diese gesteigerte Auflösung bereits experimentell demonstriert werden. [3] Jedoch hatten die damaligen Arbeiten nicht das Methoden- und Anwendungsverständnis zum Ziel, sondern hauptsächlich technologische Aspekte, wie die Konstruktion von Mikro-Kippspiegeln und fokusvariablen Mikrolinsen sowie deren Integration in den Kopf eines Endoskops.

Eine wichtige Anwendung der OCT liegt im Bereich der ophthalmologischen Diagnostik. Der Einsatz der OCT hat das Potenzial, Schichtstrukturen in der Netzhaut (Retina) des Auges hoch aufgelöst zu zeigen und die Dicke der

einzelnen Schichten zu messen. Die Dicke der Retina beträgt etwa 200  $\mu\text{m}$ . Ein offener Punkt ist dagegen die hochaufgelöste Darstellung der hinter der Netzhaut liegenden Aderhaut. Diese wird mit heutigen OCT-Geräten nicht zufriedenstellend aufgelöst dargestellt. Eine verbesserte Visualisierung der Aderhaut mit der Möglichkeit zur präzisen Schichtdickenbestimmung wäre seitens der klinischen Anwendung ein dringender Wunsch und würde die diagnostischen Möglichkeiten der OCT nochmals deutlich steigern.

### 3. Ziele des Forschungsprojekts

Aus der beschriebenen Ausgangslage ergeben sich folgende Ziele des Vorlaufprojektes OCT-push:

- Gewinnung von System- und Methodenverständnis durch den Aufbau eines OCT-Laborsystems, die Integration einer fokusvariablen Linse in das System und die Durchführung von Testmessungen an verschiedenen Proben
- Experimenteller Nachweis der gesteigerten Auflösung durch den Einsatz der fokusvariablen Linse
- Gewinnung von Anwendungsverständnis durch Diskussionen mit Anwendern und potentiellen Projektpartnern im Hinblick auf ein mögliches Forschungskonsortium
- Überlegungen für einen Folgeantrag und ggf. Aufsetzen einer Skizze

### 4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

#### 4.1 OCT-Laboraufbau

Der OCT-Laboraufbau wurde als time-domain OCT entsprechend dem Schema in Abbildung 1 aufgesetzt. Bei der Konzipierung des Aufbaus hat die Forschungsgruppe einige Entscheidungen getroffen, die Konsequenzen für die spätere Anwendung aufweisen.

- **Verwendung faseroptischer Komponenten**, möglichst wenig Freistrahl-Optik. Die faseroptischen Komponenten erleichtern den Aufbau und die Justage des Systems.
- **Verwendung eines integrierten, faseroptischen Michelson-Interferometer-Moduls**. Dieses Modul vereinfacht den Aufbau erheblich, ist allerdings nur für den Wellenlängenbereich um 1300 nm erhältlich.
- **Arbeitswellenlänge um 1300 nm**. OCT-Systeme für die Ophthalmologie verwenden dagegen wegen der Absorption des Auges und der erforderlichen z-Auflösung bevorzugt Wellenlängen um 850 nm. Mit dem erstellten Aufbau liegen daher bevorzugte Zielanwendungen nicht mehr im Bereich der Ophthalmologie (wie ursprünglich als bevorzugtes Zielanwendungsfeld diskutiert), sondern vielmehr im Bereich der Dermatologie oder in der Diagnostik von Hohlorganen.

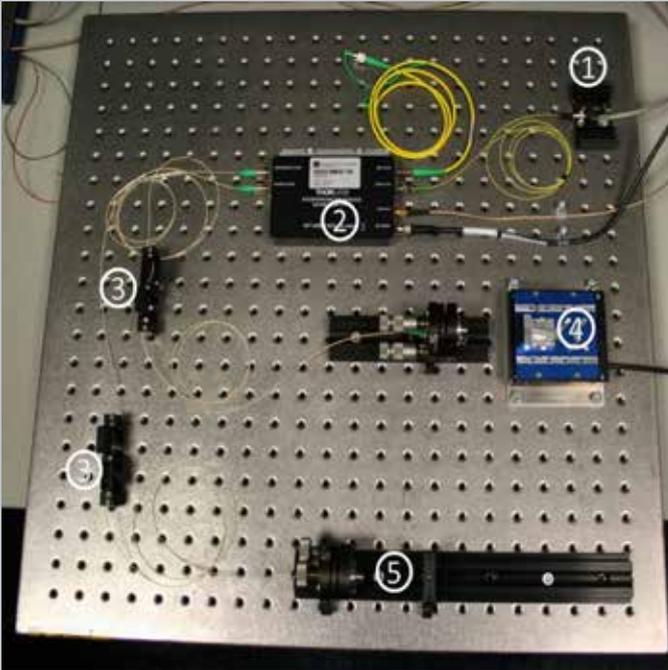


Abbildung 2: time-domain OCT-Labora Aufbau. Komponenten: (1) Superlumineszenz-LED als Lichtquelle, (2) Michelson-Interferometer-Module, (3) Polarisationskontrollen, (4) motorisierter Lineartisch mit Referenzspiegel für den z-Scan, (5) Messarm.

Der realisierte Laboraufbau ist in Abbildung 2 dargestellt und besteht aus folgenden Komponenten:

1. **Superlumineszenz-Leuchtdiode (SLED).** Die OCT benötigt eine leistungsstarke, inkohärente Lichtquelle. Die angeschaffte SLED (EXALOS, Typ EXS210028, mit Faser-Pigtail) hat nach Datenblatt eine Wellenlänge von 1315,8 nm, eine spektrale Breite von 38,5 nm und eine fasergekoppelte Leistung von 3,23 mW (bei Vorwärtsstrom  $I_{\text{Max}} = 200 \text{ mA}$ ). Die gemessenen Werte weichen davon geringfügig ab, wie die folgende Tabelle 1 zeigt.

	Mittenwellenlänge (3 dB)	Spektrale Breite (3 dB)
Datenblatt	1315,8 nm	38,5 nm
Gemessen	1313,2 nm	34,0 nm

Tabelle 1: Gegenüberstellung von Datenblattangaben und gemessener spektraler Größen der SLED.

2. **Michelson-Interferometer-Modul.** Dieses Modul (Thorlabs INT-MSI-1300) enthält einen X-Koppler, einen optischen Zirkulator, einen balanced detector und einen WDM-Koppler für den Einsatz eines Justierlasers. Durch die Faseranschlüsse entfällt jeglicher Justieraufwand.
3. **Polarisationskontrollen.** Für ein möglichst großes Interferenzsignal muß die Polarisation der Lichtwellen von Referenz- und Messarm übereinstimmen. Hierfür wurde je ein Polarisationskontrollen (Thorlabs FPC025) in den Referenz- und Messarm integriert.
4. **Motorisierter Lineartisch mit Referenzspiegel.** Da die Messung des OCT-Systems im Zeitbereich erfolgen soll, ist die Länge der Referenzstrecke anzupassen. Dazu wird mit Hilfe eines Lineartisches die Position eines Spiegels verändert. Um brauchbare Messgeschwindigkeiten zu erreichen, wird ein Lineartisch mit VoiceCoil-Antrieb (Physik Instrumente GmbH V-524.1AA) eingesetzt. Dieser Lineartisch hat eine Hublänge von 10 mm und ermöglicht Scan-Frequenzen bis zu einigen 10 Hz. Zur Umlenkung des Lichts in der Referenzstrecke

wird ein mit Gold beschichteter Spiegel mit einem Durchmesser von 12,7 mm und einer Genauigkeit von  $\lambda/10$  eingesetzt (Thorlabs PF05-03-M01).

5. **Messstrecke.** Nach Auskopplung der Strahlung aus der Faser werden hier die fokusvariable Linse (Optotune) und anschließend die Probe positioniert.

Setzt man die gemessenen Werte der SLED für die Wellenlänge (1313,2 nm) und die spektrale Breite (34 nm) in Gleichung [1] ein, so ergibt sich als Ergebnis eine Kohärenzlänge von  $l_c = 22,4 \mu\text{m}$ . Alternativ kann man die Kohärenzlänge auch aus dem Korrelogramm einer OCT-Messung definieren. Hierfür bestimmt man das Korrelogramm einer ebenen Spiegelfläche, wie in Abbildung 3 gezeigt. Die FWHM-Breite des Korrelogramms gibt die Kohärenzlänge der Lichtquelle an. Für die eingesetzte SLED lässt sich aus Abbildung 3 eine Kohärenzlänge von etwa  $24 \mu\text{m}$  ermitteln, also geringfügig mehr als der theoretische Wert.

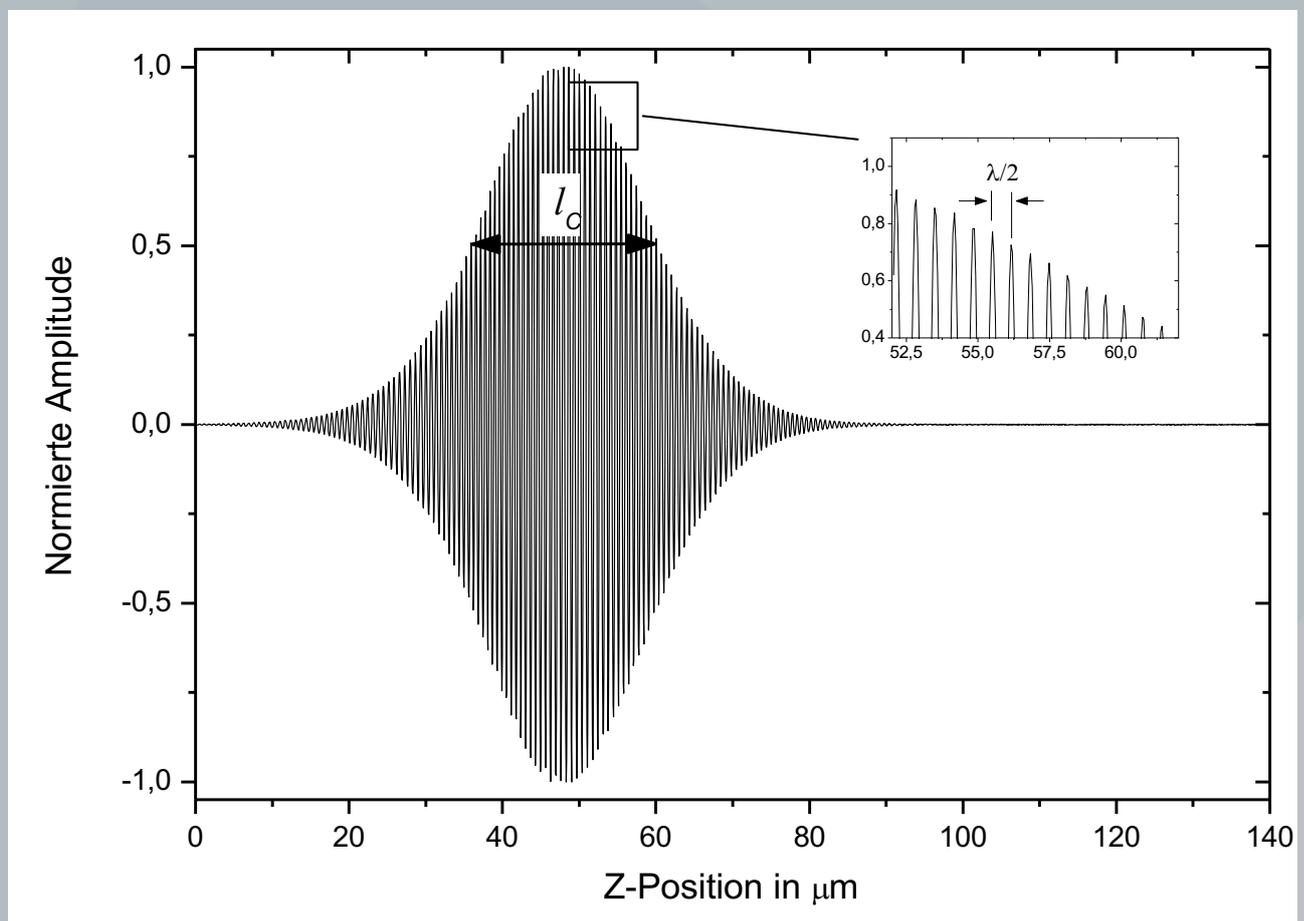


Abbildung 3: Gemessenes Korrelogramm (OCT-Signal) mit einem Planspiegel als Probe.

Beim Laboraufbau verzichtete man auf einen xy-Scanner, da er für den angestrebten Prinzipnachweis einer gesteigerten Tiefenauflösung nicht unbedingt erforderlich ist, aber die Komplexität des Aufbaus und insbesondere die Datenauswertung erheblich erhöht.

Die fokusvariable Linse (Optotune EL-10-30-Ci-NIR-LD, Brechkraftbereich +5 dpt – +10 dpt) stellt die zentrale Komponente für die Idee dieser Studie dar. Um sie in die LabView-basierte Steuersoftware des OCT-Systems

integrieren zu können, ist eine umfangreiche Charakterisierung der Linse erforderlich. Insbesondere die Einschwingzeit und der Zielwert der Brennweite sind hierbei von Interesse.

Bei der Einschwingzeit stellt sich ein Bessel-Filter mit einer Grenzfrequenz von 50 Hz als bester Kompromiss heraus; damit beträgt die Einschwingzeit 12,5 ms und Über- bzw. Unterschwinger werden weitestgehend vermieden. Die Einstellung einer exakten Zielbrennweite ist zudem dadurch limitiert, dass die Brennweite der Linse sehr empfindlich auf die Temperatur reagiert. Die Brennweitenänderung mit der Temperatur beträgt maximal 11 mm/K (gemessen) bzw. 14 mm/K (Datenblattwert). Abweichungen ergeben sich dabei sowohl durch die Umgebungstemperatur als auch während des Betriebs, wenn sich die Linse durch die Bestromung erwärmt.

#### 4.2 Messergebnisse

Um den Einfluss der Fokuseinstellung der fokusvariablen Linse auf die OCT-Signalamplitude zu zeigen, werden Messungen an einer bzw. zwei Schichten Klebefilm durchgeführt. Für eine Schicht Klebefilm ergeben sich die zwei Grenzschichten Luft-Klebefilm (Vorderseite) und Klebefilm-Luft (Rückseite). Für zwei Schichten Klebefilm kommt noch die Grenzschicht Klebefilm-Klebefilm (Mitte) mit einer dazwischenliegenden Klebstoffschicht hinzu.

##### Einzelne Schicht Klebefilm

Für die Messung der Korrelogramme wurde einmal auf die Vorderseite und anschließend auf die Rückseite des Tesafilms fokussiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5 dargestellt. Wie man in Abbildung 5 erkennen kann, ist die Signalamplitude bei Fokussierung auf die gewünschte Grenzschicht (Vorder- oder Rückseite) deutlich größer. Die Verschiebung der Signale in z-Richtung ergibt sich aufgrund der durch die Fokussierung veränderten optischen Weglänge.

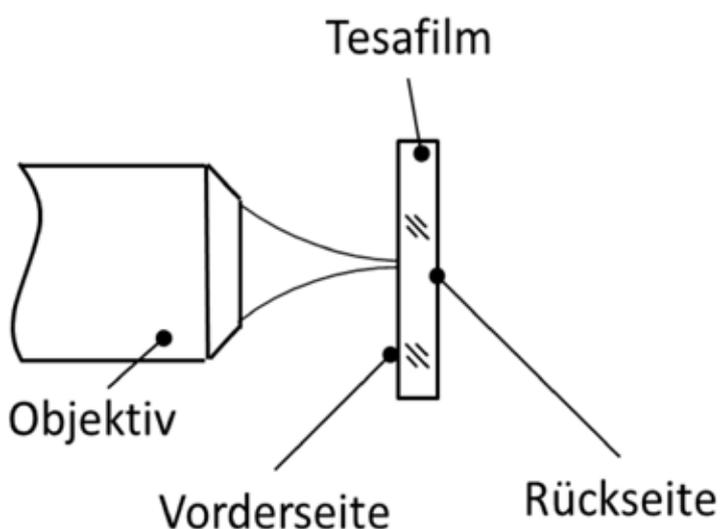


Abbildung 4: Experimentelle Situation und Zuordnung der Bezeichnungen

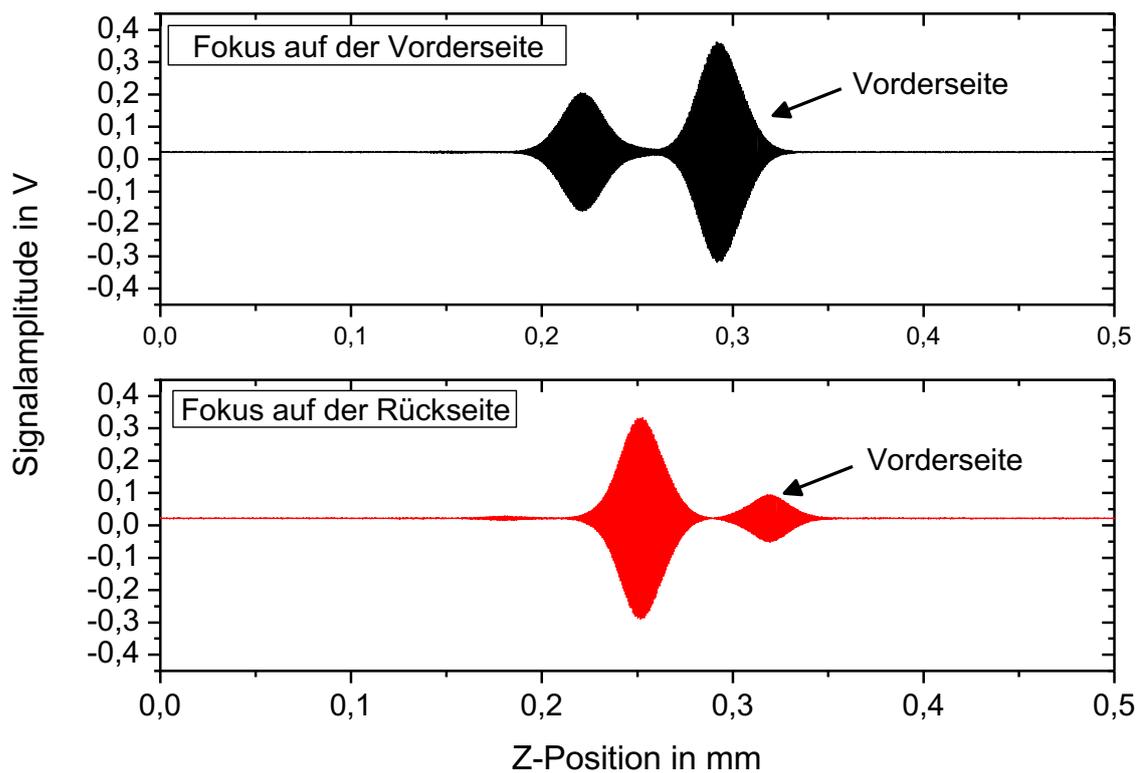


Abbildung 5: Gemessene Korrelogramme mit Fokussierung auf die Vorder- und Rückseite einer Schicht Klebefilm

### Doppelschicht Klebefilm

Identische Messungen wurden auch an zwei übereinander geklebten Schichten Klebefilm durchgeführt. Das Ergebnis zeigt Abbildung 7.

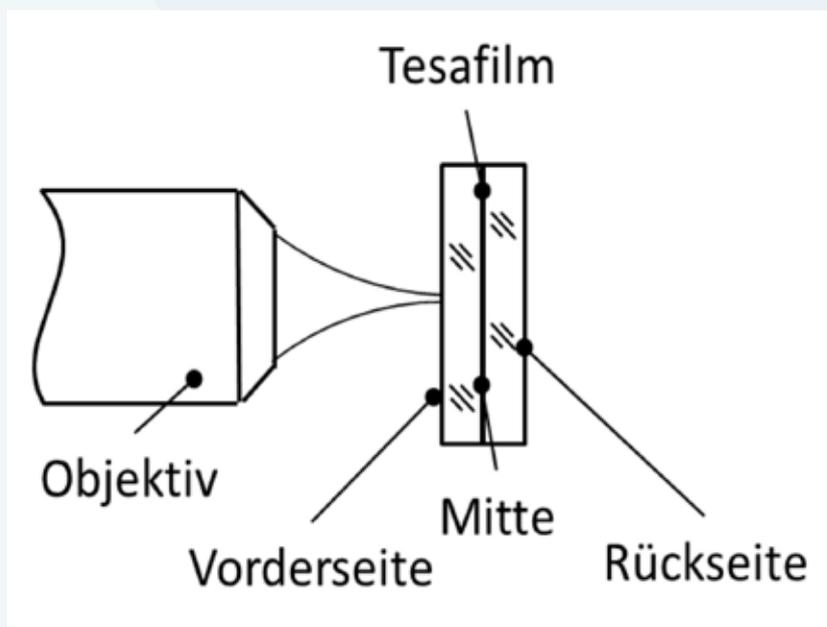


Abbildung 6: Experimentelle Situation und Zuordnungen der Bezeichnungen.

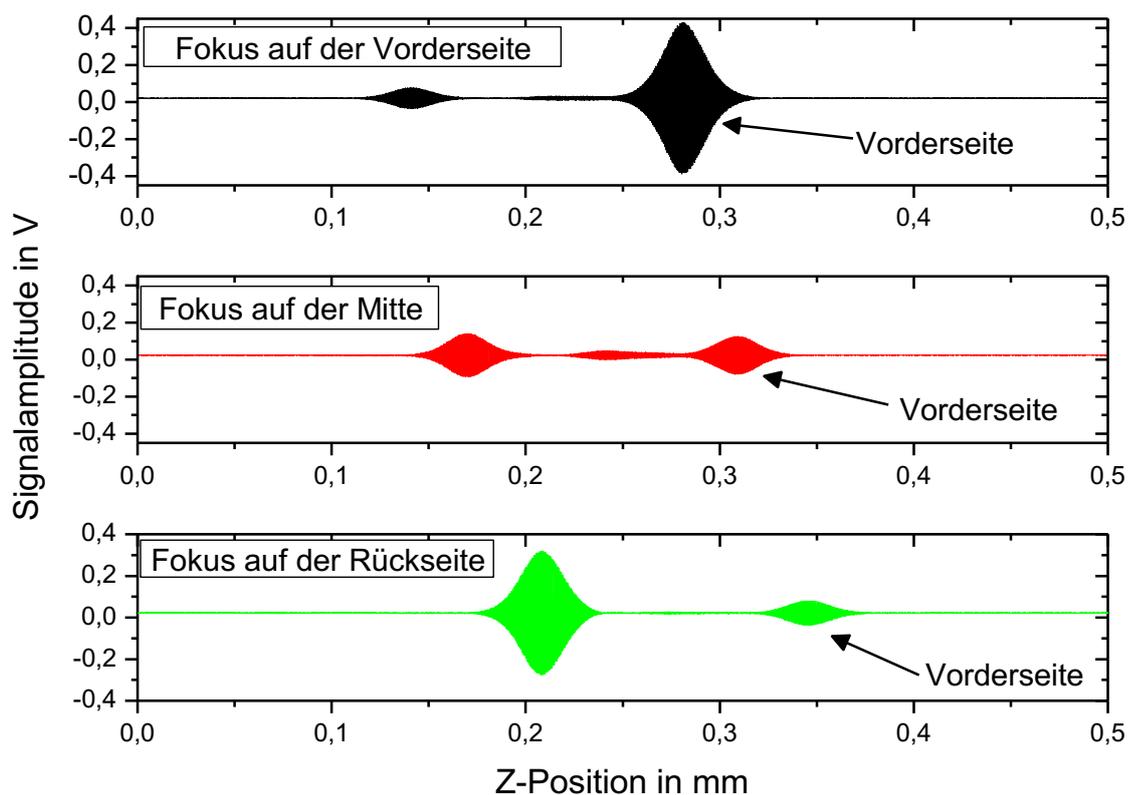


Abbildung 7: Gemessene Korrelogramme mit Fokussierung auf die Vorderseite, Mitte und Rückseite zweier Schichten Klebefilms.

Die Abbildungen 5 und 7 stellen die wichtigsten bisher erzielten Projektergebnisse dar. Sie zeigen klar, dass die OCT-Signalamplitude von einer bestimmten Grenzschicht dann am größten ist, wenn die Fokusposition mittels der fokusvariablen Linse auch in die Nähe dieser Schicht gelegt wird. Somit lässt sich die Lage der Grenzschicht auch präziser bestimmen. Das belegt den angestrebten Prinzipnachweis.

Für eine detaillierte Auswertung der in den Abbildungen 5 und 7 gezeigten Daten, insbesondere die Bestimmung des Abstandes der Grenzflächen, ist die Voraussetzung, dass die Brechungsindizes der Schichten bei der Arbeitswellenlänge bekannt sind. In Abbildung 7 ist zu erkennen, dass das OCT-Signal von der Grenzfläche zwischen beiden Klebestreifen deutlich kleiner ist als das Signal der Luft-Klebefilm-Grenzflächen. Die Ursache hierfür liegt darin, dass der Klebstoff, ein organisches Material, einen Brechungsindex aufweist, der sich von dem Brechungsindex der Kunststoffstreifen nicht wesentlich differenziert. Demgegenüber ist die Brechungsindexstufe zwischen der Luft und dem Kunststoffstreifen erheblich größer, so dass von diesen Grenzflächen mehr Strahlung reflektiert wird.

### Untersuchung des Einflusses einer Defokussierung auf die Signalamplitude

Zur Untersuchung des Einflusses einer Defokussierung wird ein Spiegel im Fokus der Optik justiert. Anschließend werden der Spiegel in  $\pm z$ -Richtung bewegt und die zugehörigen Korrelogramme aufgezeichnet. Zur Fokussierung wird ein 20-fach vergrößerndes Mikroskopobjektiv eingesetzt. Die numerische Apertur (NA) der Optik liegt

dabei im Bereich von 0,15 bis 0,20.

Aus den gemessenen Korrelogrammen, siehe Abbildung 9 (rechts), werden für die maximale Signalamplitude die Spitze-Spitze-Werte ermittelt und durch zwei dividiert. Die berechneten Werte werden anschließend in Bezug auf den Maximalwert (Fokusposition) logarithmisch als Dämpfung dargestellt, siehe Abbildung 9 (links).

Wie Abbildung 9 (links) zeigt, führt bereits eine Defokussierung von nur 100  $\mu\text{m}$  zu einer Dämpfung der Signalamplitude in Höhe von etwa 10 dB.

Diese Ergebnisse demonstrieren nochmals die Bedeutung der Fokusposition für die Signalamplitude. Für ein optimal starkes OCT-Signal von einer bestimmten Grenzschicht ist es demnach unumgänglich, mit Hilfe der fokusvariablen Linse den Fokus in deren unmittelbare Nähe zu legen. Umgekehrt bedeutet dies, dass sich auch ein Fokussierungsfehler der fokusvariablen Linse etwa aufgrund der Temperatur deutlich auf die Signalamplitude auswirkt. Da die fokusvariable Linse keine Rückmeldung über ihre aktuelle Brechkraft liefert, ist ihre eingehende Charakterisierung für die Datenauswertung des OCT-Laborsystems unverzichtbar.

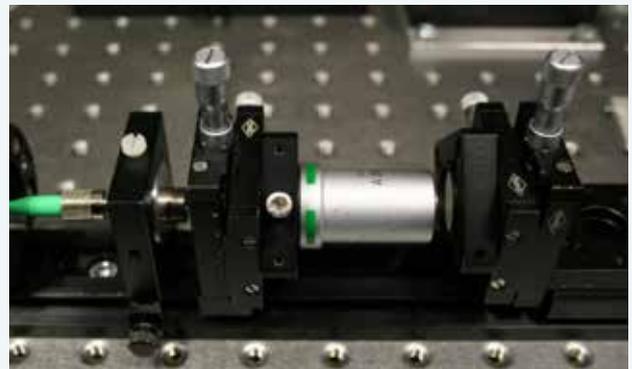
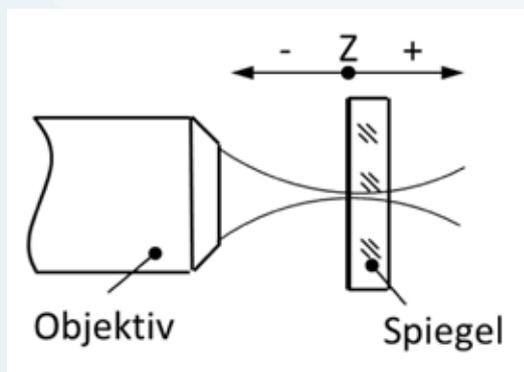


Abbildung 8: Schematische Darstellung (links) und Bild des Messaufbaus (rechts)

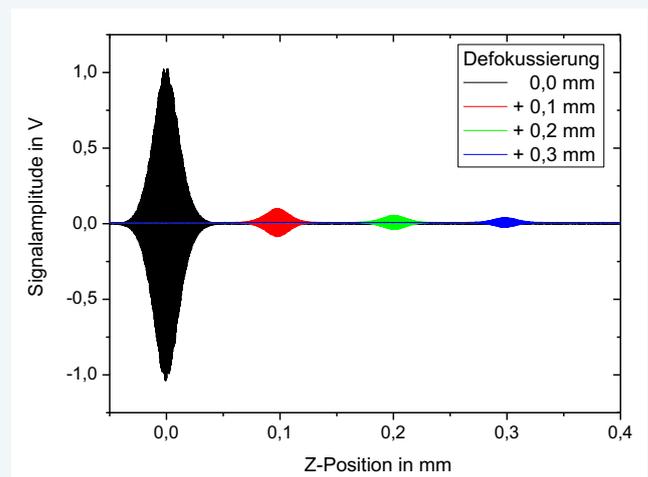
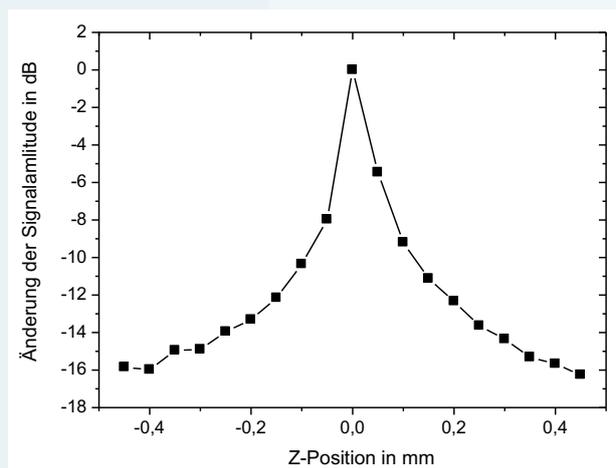


Abbildung 9: Dämpfung der Signalamplitude bei Defokussierung (links), Beispiele gemessener Korrelogramme bei Defokussierung (rechts)

## 5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Wie in Abschnitt 4 beschrieben, hat sich der Zielanwendungsbereich der Projektidee im Verlauf der Arbeiten weg von der Ophthalmologie und hin zur Dermatologie, zur Diagnostik von Hohlorganen und eventuell auch zur Materialprüfung verschoben. Die Gründe dafür sind zusammengefasst folgende:

- Die Arbeitswellenlänge des Laborsystems wurde auf 1300 nm festgelegt, da sich der gewünschte Prinzipnachweis aufgrund der Verfügbarkeit eines integrierten Interferometermoduls bei dieser Wellenlänge schneller und einfacher führen ließ.
- OCT-Systeme für die Ophthalmologie hat bedingt durch das weit entfernte Aufnahmeobjektiv und die gegebene Öffnung der Augenpupille sehr kleine Werte der numerischen Apertur (im Bereich von  $NA = 0,01$  bis  $0,1$ ) und damit sehr lange Fokusbereiche aufgewiesen. Somit ergab sich durch den Einsatz einer fokusvariablen Linse hierbei kaum ein Vorteil, da das gesamte Zielobjekt (Retina und Aderhaut) jederzeit im Fokusbereich der Aufnahmelinse lag.
- Vorteile durch die Anpassung der Fokusslage entstanden, wenn die Werte der numerischen Apertur nicht allzu klein sind, d.h. eher bei Werten, die oberhalb von  $0,15$  bis  $0,20$  liegen. Dies ist bei den oben genannten Anwendungsfeldern der Fall.

Die bestehenden Kontakte zur Augenklinik des Universitätsklinikums Erlangen haben sich während des Projektverlaufs für die Diskussion als sehr wichtig und nützlich herausgestellt. Inwiefern diese Kontakte aufgrund der veränderten Arbeitswellenlänge des Systems Interesse an der Mitarbeit im Konsortium eines möglichen Folgeprojektes haben, ist offen.

Der Aufbau des OCT-Systems, die Programmierung der Steuerung und die Messungen in diesem Bericht wurden von Dipl.-Ing. (FH) Alexander Bachmann vom Institut POF-AC an der TH Nürnberg durchgeführt. Das Projekt hat dazu beigetragen, auch am POF-AC Kompetenz in der OCT-Thematik aufzubauen und dort erstmals auch medizintechnisch orientierte Themen zu bearbeiten.

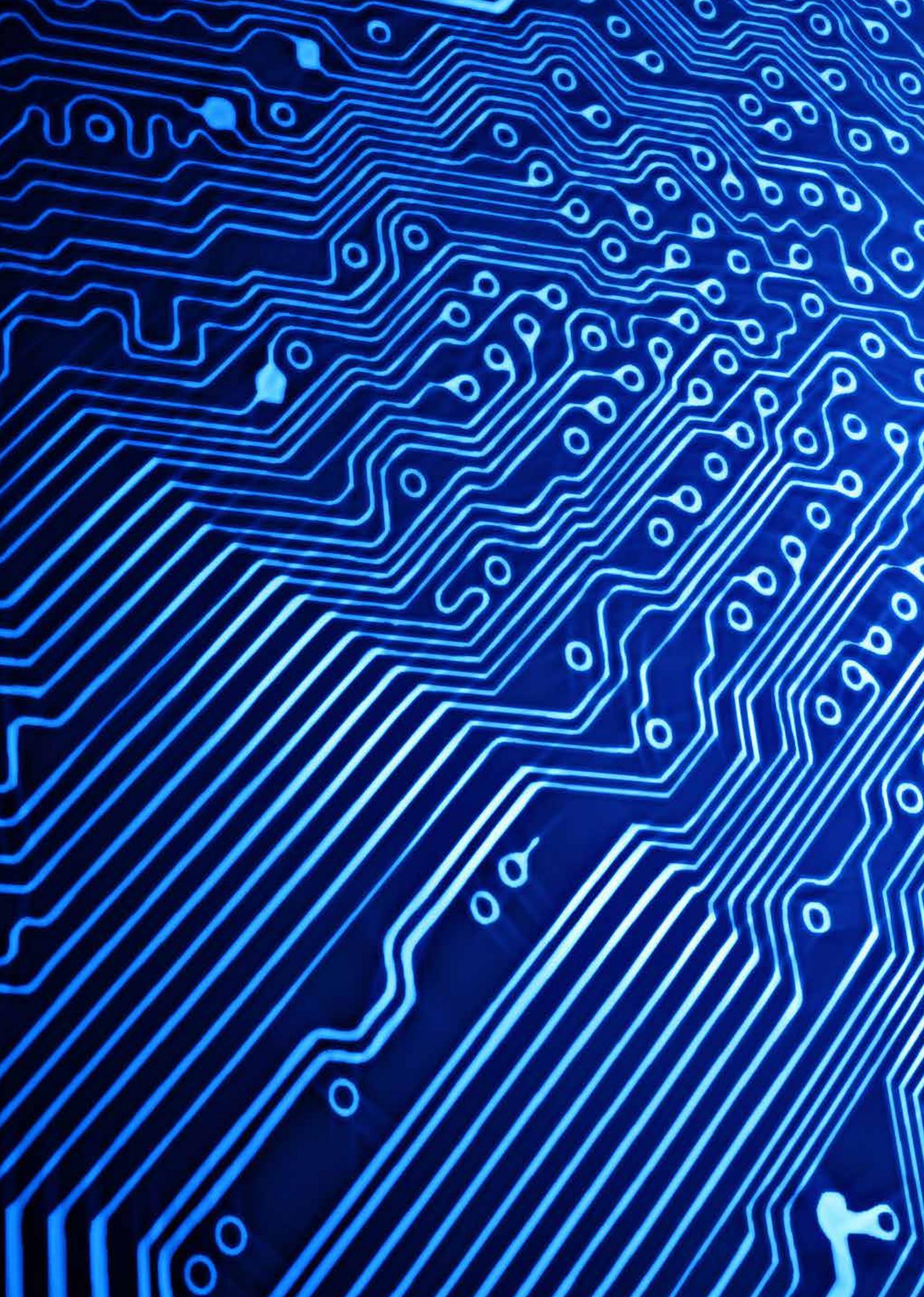
Neue und völlig überraschende Perspektiven haben sich im Laufe des Projekts bei einem Besuch der Firma Arnold & Richter Cine Technik GmbH (ARRI), München, in anderem Zusammenhang ergeben. Die Firma ARRI hat sich dabei an der OCT-Thematik stark interessiert gezeigt, da sie aktuell auch in den medizintechnischen Bereich einsteigt. Ein Besuch an der TH Nürnberg mit Vorstellung der Ergebnisse und Diskussion über ein mögliches Folgeprojekt wurde für Herbst / Winter 2016 vereinbart.

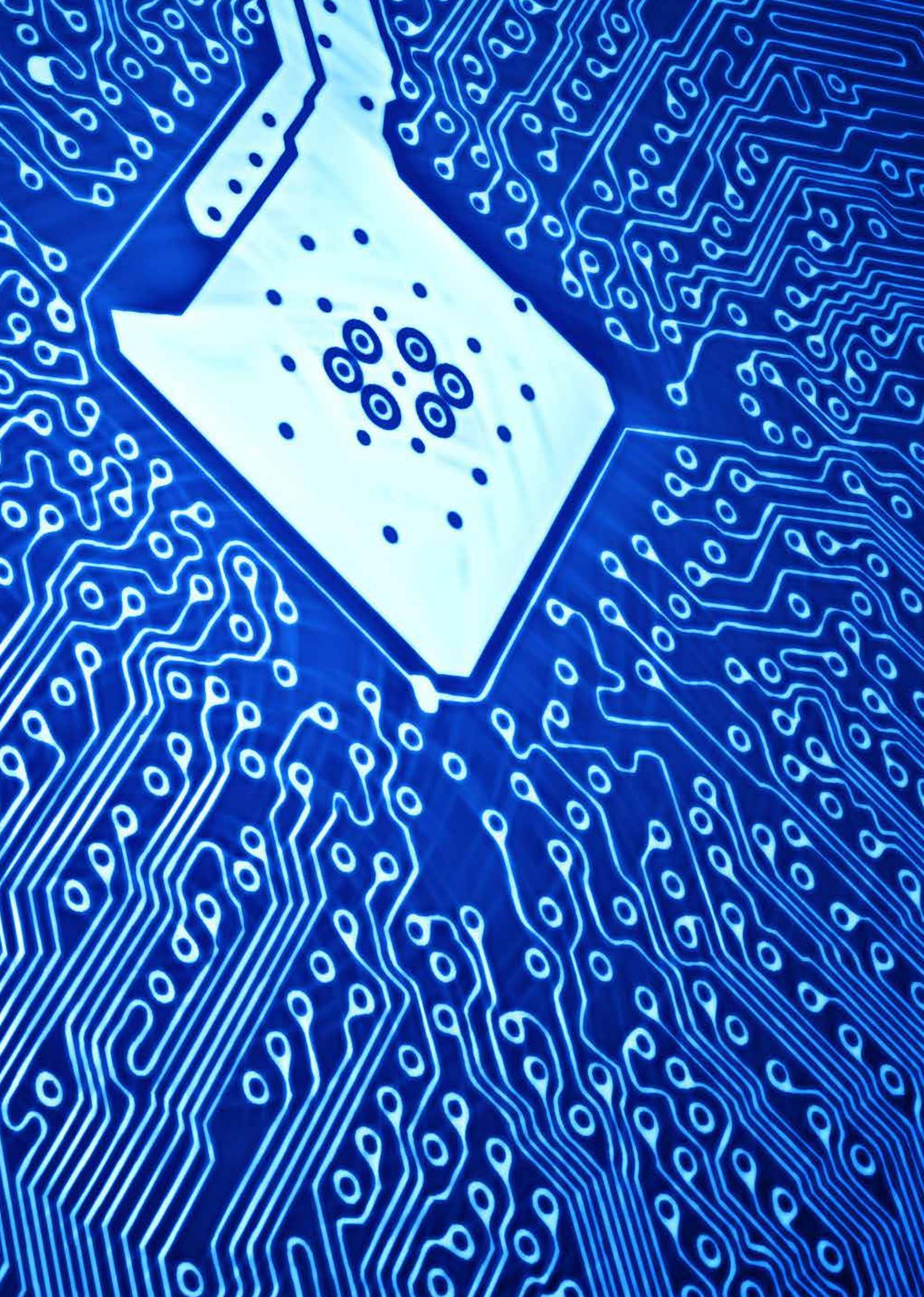
Für wissenschaftliche Veröffentlichungen ist es zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch zu früh; dazu bedarf es einer breiteren Datenbasis, einer detaillierten Charakterisierung der fokusvariablen Linse im Zusammenhang mit der Anwendung, einiger Hilfsmessungen (z. B. Brechungsindex von Probenmaterialien), der Anfertigung und Messung weiterer Proben, sowie des Ausbaus der Software zur Ansteuerung des Demonstrators und der Datenanalyse.

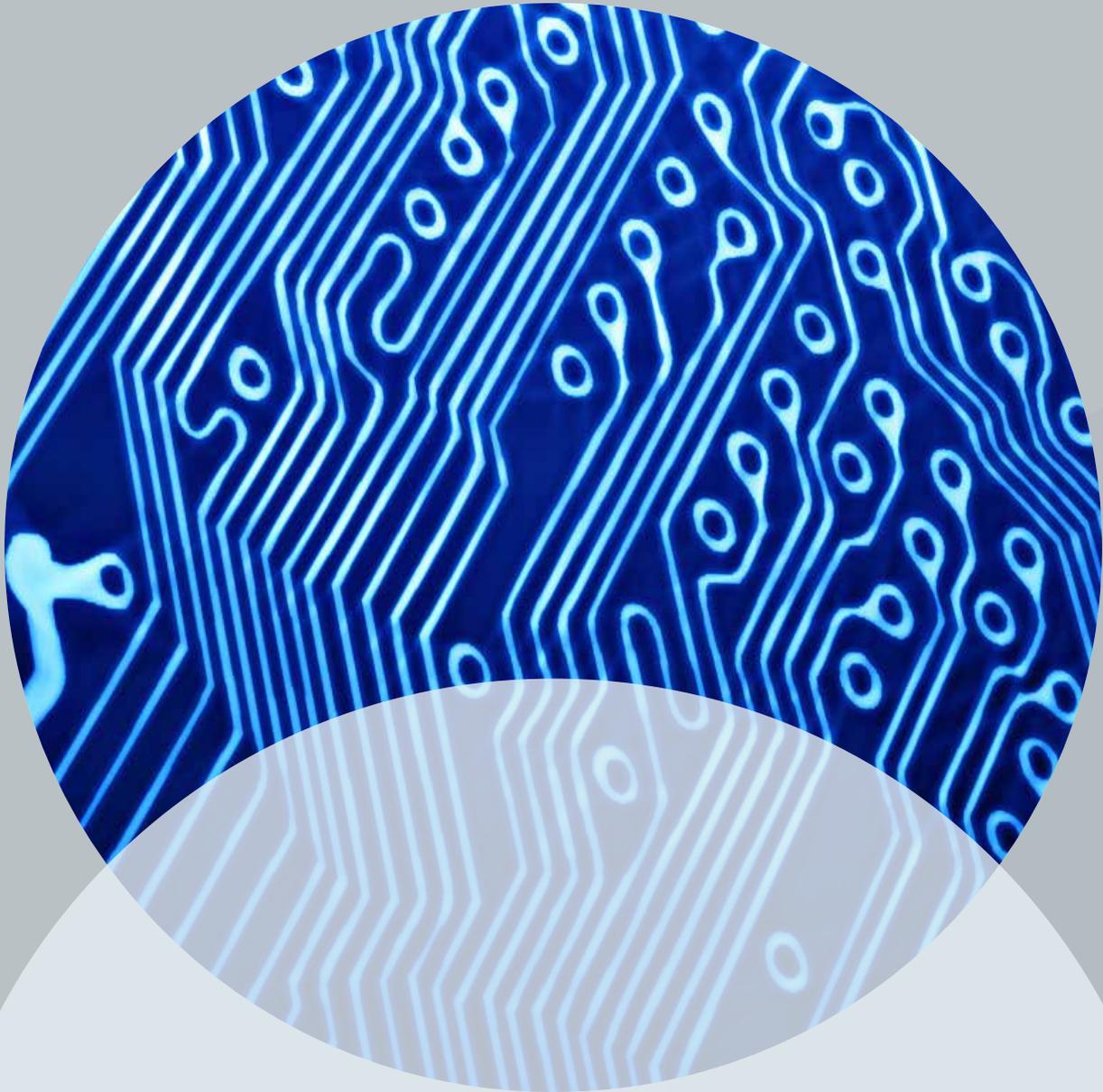
Zusammenfassend hat der Projektleiter daher entschieden, das Thema in 2017 zunächst im Rahmen von Studien- und Abschlussarbeiten weiter voranzutreiben. Von November 2016 bis März 2017 lief die Bachelorarbeit von Christiane Pfaff (Studiengang Bachelor Medizintechnik). Es ist geplant, ab Sommersemester 2017 einen Studierenden aus dem Studiengang Master Applied Research auf die Thematik anzusetzen. Parallel dazu ist geplant, die Außendarstellung des Themas und die Verstärkung der bestehenden Industriekontakte im Hinblick auf ein aufbauendes Förderprojekt voranzubringen.

## 6. Literatur

- [1] Lihong V. Wang, Hsin-I Wu: Biomedical Optics. Principles and Imaging. Hoboken, New Jersey, John Wiley & Sons, 2007, S. 181
- [2] M. Kaschke, K.-H. Donnerhacke, M. S. Rill: Optical Devices in Ophthalmology and Optometry. Weinheim: Wiley-VCH, 2014.  
Online über die Bibliothek der TH Nürnberg verfügbar unter: <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/9783527648962>
- [3] Khaled Aljaseem: Integrated Micro-optics for endoscopic optical coherence tomography. Dissertation. Universität Freiburg, 2010, S. 133-135. Online verfügbar unter: <https://www.freidok.uni-freiburg.de/fedora/objects/freidok:7710/datastreams/FILE1/content>







# „GeStieFI - Gedruckte leitfähige Strukturen für hinterspritzte tiefgezogene Folien“

Prof. Dr.-Ing. Marcus Reichenberger  
Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik  
Technische Hochschule Nürnberg

Das Drucken von elektronischen Funktionalitäten in Kombination mit etablierten Fertigungsprozessen, was auch als hybride gedruckte Elektronik bezeichnet wird, ist eine Form der additiven Fertigung mit hoher Innovationskraft. Von besonderem Interesse ist ein neuartiger Ansatz, der es unter Nutzung von Drucktechnologien zur elektrischen Funktionalisierung flexibler, dielektrischer Substrate in Kombination mit dem sogenannten Hinterspritzen ermöglichen soll, räumliche elektronische oder mechatronische Baugruppen technologisch vorteilhaft herzustellen. Das Ziel des Projektes ist die Erarbeitung von Grundlagen für ein vertieftes Verständnis der elastischen und plastischen Verformbarkeit drucktechnisch funktionalisierter Foliensubstrate. Im Fokus steht, inwiefern die elektrische Integrität gedruckter Strukturen bei mechanischer Belastung durch Zugdehnung – abhängig von Leiterbildlayout, Material und Druckverfahren – erhalten bleiben kann. Das Ziel ist, die gewonnenen Erkenntnisse anschließend als Basis für Folgeprojekte zu nutzen.

## Wesentliche Projektziele

### 1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	März bis Dezember 2016
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik / Institut OHM-CMP
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Marcus Reichenberger
Kontaktdaten	E-Mail: marcus.reichenberger@th-nuernberg.de

### 2. Ausgangslage

Eine inzwischen weitverbreitete Methode zur Herstellung von großen Kunststoffbauteilen ist das Vorverformen einer thermoplastischen Folie mit anschließendem Hinterspritzen mit Thermoplasten oder Hinterschäumen mit Polyurethan. Dabei dient derzeit die Folie im Wesentlichen als dekoratives Element, die es ermöglicht, eine hochwertig aussehende Oberfläche mit minimalem Material- und damit Kosteneinsatz zu erzeugen und mit kostengünstigerem Material auf der Rückseite zu verstärken (In-Mould Decoration). Solche Bauteile werden vielfach im Consumer- und Automotivebereich eingesetzt. Neben der reinen optischen und haptischen Funktion haben auf diese Art hergestellte Oberflächen keine weitere Funktion.

Dagegen ist die Funktionsintegration in mechatronischen Modulen, d. h. Baugruppen mit kombinierter elektrischer und mechanischer Funktionalität, für eine Vielzahl von Branchen von besonderem Interesse. Diese Tatsache wird beispielsweise durch die zunehmende Verwendung räumlicher elektronischer oder mechatronischer Baugruppen (MID) unterstrichen. Allerdings bringt der Einsatz herkömmlicher MIDs für die Realisierung mechatronischer Module spezifische verarbeitungstechnische Nachteile mit sich. Das umfasst beispielsweise die Notwendigkeit der dreidimensionalen Bestückung mit elektronischen Bauteilen. Dieses Verfahren ist aktuell nur mit

großem prozesstechnischem und finanziellem Aufwand realisierbar.

Von besonderem Interesse ist ein neuartiger Ansatz, der es unter Nutzung von Drucktechnologien zur elektrischen Funktionalisierung flexibler, dielektrischer Substrate in Kombination mit dem oben genannten Hinterspritzen ermöglichen soll, räumliche Baugruppen ohne die oben genannten Nachteile zu realisieren. Folgendes Vorgehen wäre als Alternative für die heute eingesetzte MID-Technologie denkbar: Thermoplastisch verformbare, zunächst isolierende Folien wie etwa Polycarbonat, werden im ebenen Zustand mit elektrischen Funktionsmaterialien bedruckt. Dabei werden durch den Einsatz additiver physikalischer Prozesse elektrische Funktionen wie Leiterbahnen, Sensoren o. ä. möglichst im ebenen Zustand hergestellt. Anschließend werden die so erzeugten Schaltungsträger mit passiven und aktiven Bauelementen bestückt, um im Anschluss durch den Einsatz geeigneter Verfahren dreidimensional verformt zu werden. Im nächsten Schritt werden die verformten Folien mit entsprechenden Materialien durch Hinterspritzen oder Hinterschäumen verstärkt. Durch die Realisierung der Schaltungsfunktion auf der Folienoberfläche wird eine direkte Elektronikintegration auf der Folie erreicht – dadurch kann der Einsatz separater elektronischer Baugruppen vermieden werden.

Bis heute ist allerdings ungeklärt, bis zu welcher Grenze die bedruckte Folie verformt werden kann, ohne dass die gedruckten Strukturen elektrisch nicht mehr nutzbar sind und infolge Rissbildung versagen. Für eine Entwicklung der beschriebenen neuen Technologie ist dies aber von besonderer Bedeutung.

### 3. Ziele des Forschungsprojekts

Das Projekt zielte darauf ab, mit ersten Antworten auf die oben genannten Fragestellungen die Machbarkeit des Prozesses zu analysieren:

- Welche Druckmaterialien/ -verfahren und Leiterbahngeometrien sind am Besten für das weitere Verfahren geeignet?

Hierbei standen auf der einen Seite die mechanische und thermische Robustheit der gedruckten Leiterbahnen und auf der anderen Seite die thermische Beständigkeit der zu bedruckenden Folien im Fokus. Im Forschungsprojekt wurden zwei verschiedene Druckverfahren, der funktionelle Inkjetdruck und das Sieb-/ Schablonendruck miteinander verglichen: Geeignete Tinten / Pasten auf Basis von Silber, mit denen Teststrukturen auf Thermoplast-Folien gedruckt und in ebenem Zustand weiterbearbeitet wurden. In diesem Kontext wurden auch mit Nanostäbchen gefüllte Pasten und Tinten untersucht. Geht man von der Modellvorstellung aus, dass diese Stäbchen im ungedehnten Zustand als Haufwerk vorliegen, dann kann als Arbeitshypothese angenommen werden, dass derartig gefüllte Werkstoffe eine bestimmte Dehnungstoleranz aufweisen. So sind geringe Änderungen der elektrischen Kennwerte zu erwarten, diese Aspekte werden unter Punkt 2) verifiziert werden

- Bis zu welcher Grenze kann die bedruckte Folie nach dem Druck verformt werden?

Die Herstellung der gedruckten Leiterbahnen und das Bestücken der Folie mit passiven und aktiven Bauelementen fanden im ebenen Zustand statt. Im Anschluss wurde die Folie dreidimensional verformt. Hierfür war zu ermitteln, wie stark die Folie verformt werden kann. Ein weiterer Aspekt war zu klären, inwieweit sich die gedehnten Bereiche und die bedruckten Bereiche der Folie decken dürfen. Es war zu erwarten, dass eine zu hohe Streckung bedruckter Bereiche bei der Verformung zu einer Schädigung der Bedruckung und damit zu einer

erheblichen Eigenschaftsverschlechterung führt. Dazu sollten die bedruckten leitfähigen Folien in einer Zugprüfung untersucht werden, die Folien gedehnt und dabei die elektrische Leitfähigkeit der gedruckten Leiterbahnen während der Deformation untersucht werden.

#### 4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Das Ziel des Forschungsprojektes war die Untersuchung der Dehnbarkeit von ausgewählten gedruckten elektronischen Leiterbahnen und die Ermittlung der Grenzen der Dehnungen. Das Projekt wurde in folgende Arbeitspakete unterteilt:

- Literaturrecherche zum Stand der Technik
- Materialrecherche und Beschaffung potentieller geeigneter Tinten und Pasten
- Layouterstellung und Beschaffung der Druckwerkzeuge
- Drucken der Funktionsmuster
- Charakterisierung der Funktionsmuster
- Bericht

##### Stand der Technik

Herkömmliche elektronische Leiterbilder - also Leiterbahnen, Bauteilanschlussflächen etc. - sind meist auf starren Leiterplatten auf der Basis von glasfaserverstärkten duroplastischen Harzen aufgebracht. Bei flexibler oder auch verformbarer Elektronik befinden sich diese Leiterbilder dagegen auf flexiblen Kunststofffolien. Bei der in der Verarbeitung oder Anwendung wirkenden mechanischen Belastung handelt es sich vorwiegend um Biegung. Abhängig davon, wo sich die funktionale Schicht befindet, können dabei verschiedene Spannungsarten auftreten (z. B. Zugspannungen, Druckspannungen, Biegespannungen). Problematisch ist dabei, dass Schichten, die gute elektronische Eigenschaften aufweisen, in der Regel relativ unnachgiebig und nur wenig verformbar sind. So weist das in der Elektronik standardmäßig eingesetzte Leitermaterial Kupfer (Cu in Form von Elektrolytkupferfolien) meist nur eine Bruchdehnung zwischen zwei und zehn Prozent auf. Somit sind zur Realisierung von flexibler oder verformbarer Elektronik neue Ansätze erforderlich. Eine Möglichkeit besteht nun, als Alternative zu Cu elektrisch leitfähige, aber dennoch mechanisch belastbare Beschichtungsmaterialien einzusetzen, die Dehnungen ohne Rissbildung bzw. ohne übermäßige Verschlechterung der elektrischen Leitfähigkeit ertragen können. Zudem wurde durch eine geeignete geometrische Gestaltung der Leiterbilder versucht, ihre Widerstandfähigkeit gegen Versagen infolge Rissbildung zu steigern.

Inzwischen beschäftigen sich einige Forschungsprojekte mit dem Einsatz dehnbare elektronischer Strukturen zum Beispiel auf Textilien. Der Ansatz, auf herkömmliche Kupfer-Metallisierungen zu verzichten und drucktechnisch durch den Einsatz leitfähiger Tinten und Pasten metallisierte und strukturierte Folien mit elektronischen Bauteilen zu bestücken, zu verformen und abschließend zu hinterspritzen, ist bisher kaum verfolgt worden. Insofern waren die im Vorlauforschungsprojekt geplanten Untersuchungen von hohem Innovationscharakter.

## Materialrecherche und Auswahl

Zur drucktechnischen Herstellung von elektrisch leitfähigen Strukturen finden sich auf dem Markt kommerziell erhältliche Pasten und Tinten. Der Großteil der Anbieter solcher Produkte bzw. Rohstoffe kommt aus dem US-amerikanischen Raum, einige wenige auch aus Deutschland. Die Zusammensetzung der Pasten bzw. Tinten besteht aus Matrixwerkstoffen, Füllstoffen, Lösungsmitteln und Hilfsstoffen. Als Matrixwerkstoffe werden in den meisten Fällen dehnbare Kunstharze oder Polymere verwendet, die die Pasten bzw. Tinten nach dem Aushärten dehnungsfähig machen. Als Füllstoffe werden oftmals leitfähige Materialien wie Kohlenstoff (Carbon) oder Metalle (Silber und Kupfer) verwendet. Darüber hinaus werden die Pasten hinsichtlich der Partikelform ihrer Füllstoffe unterschieden. Die herkömmlichsten Partikelformen sind Flocken, Kugeln und Stäbchen (oftmals auch als Drähte bezeichnet). Es sind aber auch einige wenige Pasten mit Plättchen geformten und korallenartig geformten Partikeln auf dem Markt. Die Pasten lassen sich zudem hinsichtlich der Größe der darin enthaltenen Füllstoffe unterscheiden. Die meisten Pasten beinhalten Füllpartikel im Mikrometerbereich, einige weisen Partikelgrößen im Nanometerbereich auf.

Im Rahmen des Projektes wurden unterschiedliche kommerziell erhältliche Materialien (Tinten und Pasten) identifiziert, die grundsätzlich mit dem Begriff „dehnbar“ beworben werden. Die nachfolgend aufgeführten Pasten bzw. Tinten haben die Eigenschaft, dass mit ihnen dehnbare elektrisch leitfähige Strukturen auf Folien gedruckt werden können.

Pastentyp	Füller	Schichtwiderstand bei Dicke von 25µm	Viskosität
DuPont PE671	Karbon	< 0,5 Ω/square	40-75 Pas (10 rpm)
DuPont PE872	Silber	< 0,1 Ω/square	40-70 Pas (10 rpm)
DuPont PE873	Silber	< 0,075 Ω/square	50-80 Pas (10 rpm)
CreativeMaterials 125-19FS	Silber	0,05 Ω/square	16-20 Pas (k.A.)
CreativeMaterials 124-33FS	Silber	0,2 Ω/square	k. A.
CreativeMaterials 120-07	Silber	0,01 Ω/square	26-30 Pas (k.A..)
ECM_CI-1036	Silber	< 0,01 Ω/square	10 Pas (20 rpm)
ECM_CI-2051	Carbon	< 40 Ω/square	53 Pas (0,5 rpm) 37 Pas (5,0 rpm)
ECM_CI-4040	Silber	<0,05 Ω/square	26 Pas (0,5 rpm) 19 Pas (5 rpm)
ECOS_HC	Silber-Nanodrähte	8-10 Ω/square	<10 mPas (k.A.)
GSB Wahl SLB	Silber	k. A.	k. A.

Tabelle 1: Ergebnis der Marktrecherche

Für die weiteren Untersuchungen wurden folgende Pastenmaterialien ausgewählt:

- DuPont PE 872
- GSB Wahl SLB

Für alle Untersuchungen wird als Referenz das Material DuPont 5000 eingesetzt, eine Silber gefüllte Druckpaste, die nicht speziell als dehnbare Leitpaste bezeichnet wird.

Im Rahmen des Projektes wurden alle Versuche mit Siebdruck als ausgewähltes Druckverfahren durchgeführt. In weiterführenden Untersuchungen ist darüber hinaus geplant, digitale Druckverfahren einzubeziehen.

Bei der als Basismaterial eingesetzten Kunststoffolie handelt es sich um die Polycarbonatfolie des Typs Tecfilm® TC 00112, die über die Dr. Dietrich Müller GmbH bezogen wird. Die Dicke beträgt bei allen Untersuchungen 250 µ, die Folie liegt als DIN A4-Bogen vor. Im weiteren Bericht wird die Folie als Substrat bezeichnet.

### Layouerstellung

Im Rahmen des Projektes wurden vier Leiterbildgeometrien entwickelt und in Hinblick auf ihr Verhalten unter Dehnungsbelastung untersucht. Der Abstand der quadratischen Kontaktflächen, zwischen denen der elektrische Gleichstromwiderstand als Maß für die Eigenschaftsänderung unter Dehnung ermittelt wird, liegt in allen Fällen bei 86,5 mm. Durch die Variation des Anschlusswinkels beim Einfach-Mäander wurde der Einfluss auf die Widerstandsänderung analysiert. Beim Dreifach-Mäander wurde durch die Realisierung von drei parallelen Leiterbahnen bei identischer resultierender Gesamtbreite von 0,6 mm eine zusätzliche Robustheit in das Layout hinein designt. Auf Basis der so definierten Einzellayouts wurde im Anschluss ein Drucksieb konzipiert, bei dem alle vier Varianten sechsfach auf einen DIN A4-Substratbogen gedruckt werden können.

<b>Einfacher-Mäander-30°</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Linienbreite <b>W</b>: 0,6mm</li> <li>• Innerer Radius <b>R</b>: 4mm</li> <li>• Anschlusswinkel <math>\theta</math>: 30°</li> </ul>

<b>Einfacher-Mäander-26°</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Linienbreite <b>W</b>: 0,6mm</li> <li>• Innerer Radius <b>R</b>: 4mm</li> <li>• Anschlusswinkel <math>\theta</math> : 26°</li> <li>• Kreis zur Unterscheidung 30° ↔ 26°</li> </ul>

<b>Dreifach-Mäander-30°</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Linienbreite <b>W</b>: 3 x 0,2mm</li> <li>• Abstand zw. den Linien <b>A</b>: 0,1mm</li> <li>• Innerer Radius <b>R</b><sub>1</sub>: 3,9mm</li> <li>• Mittlerer Radius <b>R</b><sub>2</sub>: 4,2mm</li> <li>• Äußerer Radius <b>R</b><sub>3</sub>: 4,5mm</li> <li>• Anschlusswinkel <math>\theta</math> : 30°</li> </ul>

<b>Gerade-Linie</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Linienbreite <b>W</b>: 0,6mm</li> </ul>


Abbildung 1: Layoutvariationen und geometrische Details der unterschiedlichen Leiterbilder

## Herstellung der Funktionsmuster

Die Herstellung der Funktionsmuster erfolgte mittels Siebdruck. Dabei wird die DIN A4 große Folie auf den Siebdrucktisch gelegt und anhand geeigneter Markierungen ausgerichtet. Der Drucktisch saugte die Folie an und erzeugte dabei ein Vakuum, dadurch wurde die Folie auf dem Tisch fixiert. Die jeweilige leitfähige Paste wurde zunächst fünf Minuten aufgerührt, damit sich die Bestandteile der Paste vermischen und anschließend mit einer Spritze in der erforderlichen Menge auf das Sieb aufgebracht. Das Flutrakel bedeckte das Sieb mit der Paste, indem es über das Sieb gezogen wurde. Das geflutete Sieb wurde auf die Siebabsprunghöhe gefahren und das Druckrakel drückte beim Überfahren des Siebes die Paste durch die Sieböffnungen auf die Folie. Nach dem Aufdrucken der jeweiligen Paste wurde diese durch eine thermische Behandlung in einem Umluftofen getrocknet bzw. ausgehärtet, damit die mechanischen und elektrischen End Eigenschaften erreicht werden können. Um die thermische Belastbarkeit von PC nicht zu überschreiten und irreversible Verformungen des Substrats zu vermeiden, wurde für alle Pasten eine maximale Ofentemperatur von 130 °C festgelegt. Nach dem Trocknen und Härten wurden manuell einzelne Teststreifen aus dem Substrat ausgeschnitten und für die Zugprüfung vorbereitet.

Nachfolgende Abbildung 2 zeigt den Druckprozess sowie auf der rechten Seite ein bedrucktes Substrat nach Einlegen in den Trockenofen. Gut erkennbar sind die vier Layoutvarianten, die sich jeweils sechsmal auf einem Substrat befanden.

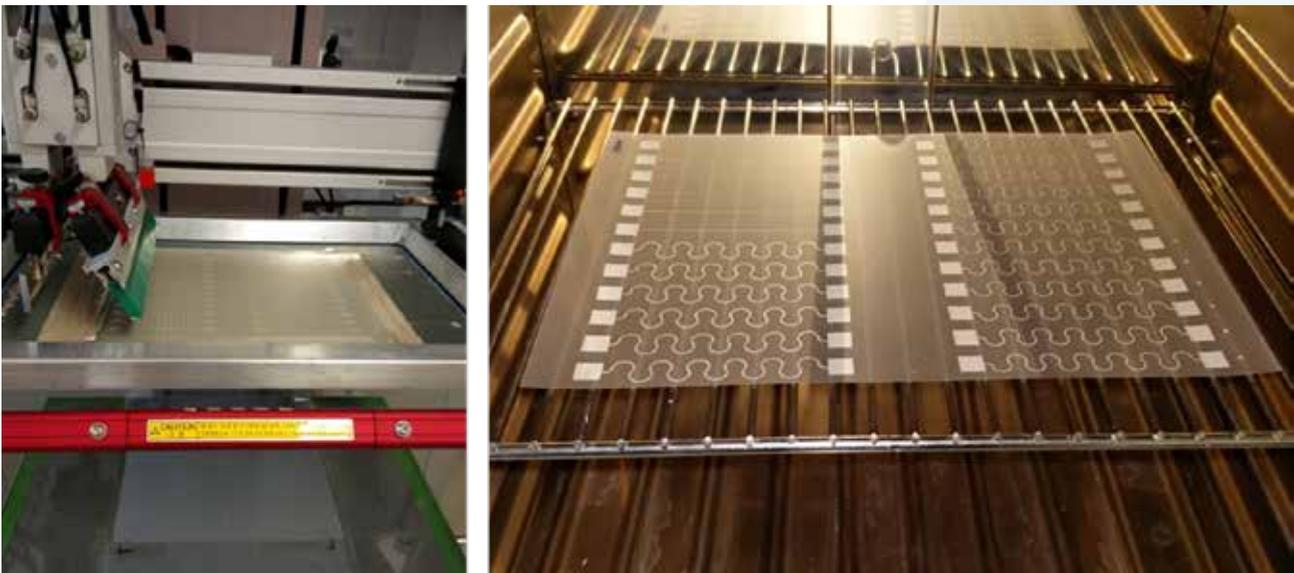


Abbildung 2: Siebdruck der Polymerpaste (links), gedruckte Leiterbahnstrukturen auf flexiblem Substrat (rechts)

## Charakterisierung der Funktionsmuster

Zur Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften wurde eine In-Situ-Messung des elektrischen Widerstands während der Zugprüfung durchgeführt. Eine einfache Kontaktierungsmethode mittels Kontaktklemmen war ausreichend. Über die Klemmen, die mit den quadratischen Kontaktpads der Strukturen verbunden sind, wird im 4-Leiter Modus mit zwei Klemmen ein konstanter Strom eingepreßt, während die verbliebenen beiden Klemmen für die Spannungsmessung verwendet wurden. Damit konnte der Einfluss von Leitungs- und Kontaktwiderständen reduziert werden, das ermöglichte eine exakte Messung des Widerstands der gedruckten Schicht.

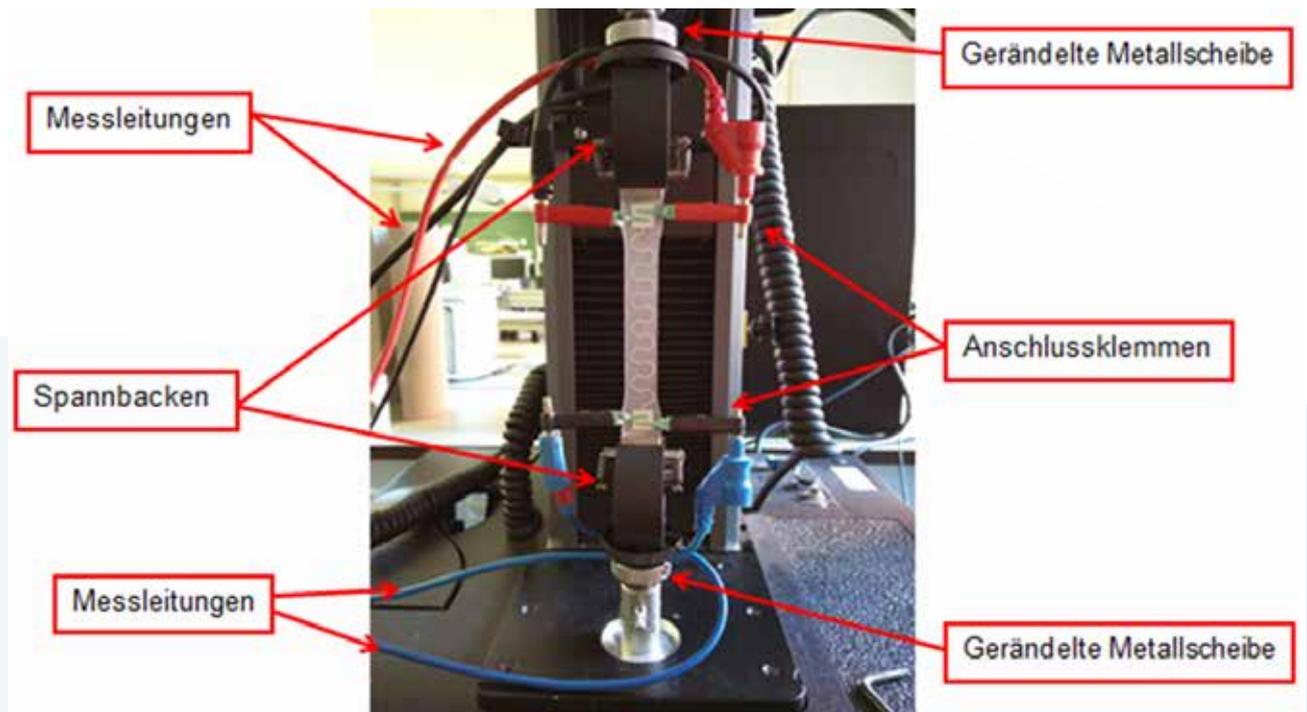


Abbildung 3: In-Situ-Widerstandsmessung an einer gedruckten Mäanderstruktur

Durch die simultane Messung des Widerstands war es möglich, den Einfluss der Dehnung zu quantifizieren. Dazu wurde zunächst die Situation im Ausgangszustand beschrieben. Der elektrische Widerstand jedes Leiters veränderte sich bei einer Deformation durch beispielweise Kraft oder Drehmoment usw. Für einen Leiter mit dem rechteckigem Querschnitt gilt im ungedehnten Zustand:

$$R = \rho \frac{l}{A},$$

wobei  $\rho$  den spezifischen Widerstand des Leitermaterials,  $l$  die Länge und  $A$  die Querschnittsfläche des Leiters darstellt.

Wird ein Leiter gestreckt, verjüngt sich dieser durch die Querkontraktion. Das hat zur Folge, dass die Fläche  $A$  kleiner wird und die Länge  $l$  sich vergrößert. Sofern keine Risschädigung eintritt, wird davon ausgegangen, dass unter Zugbelastung der spezifische Widerstand und das Schichtvolumen konstant bleiben.

Zum Zeitpunkt der Erstellung des vorläufigen Berichts liegen lediglich ausgewertete Ergebnisse für das Material DuPont PE 872 vor. Die Durchführung der Zugversuche wurde entsprechend DIN EN IOS 527-3 mit einer Prüfgeschwindigkeit von 25 mm/min bei Raumtemperatur durchgeführt. Die freie Einspannlänge betrug dabei etwa 70 mm, die Substrate wurden mechanisch gespannt. Auf der Basis von Vorversuchen konnte ermittelt werden, dass es bei dieser Probengeometrie und den vorliegenden Testbedingungen ab einer absoluten Dehnung von mehr als 6 mm zum vermehrten Auftreten von Durchrissen oder dem örtlichen begrenzten Auftreten von Scherbändern in der Kunststoffolie kommt. Dadurch entstanden sehr inhomogene Dehnungsbedingungen für die aufgedruckten Leiterstrukturen. Infolge dessen wurde für alle durchgeführten Versuche eine Absolutdehnung von 6 mm festgelegt, was einer relativen Dehnung von etwa 8,5 Prozent bezogen auf die freie Einspannlänge von

70 mm entspricht. Für die Bewertung des Widerstandsverhaltens wurde dann der Widerstandswert bei Maximaldehnung auf den Wert im Ausgangszustand bezogen.

Die Abbildung unten stellt das Verhalten der silbergefüllten Druckpaste DuPont PE 872 in Abhängigkeit vom gewählten Leiterbildlayout dar: Die Basis bildet eine Stichprobe von jeweils 15 Einzelmessungen je Variante. Es ist gut erkennbar, dass alle untersuchten Mäanderstrukturen einen signifikant niedrigeren Widerstandsanstieg gegenüber der linearen Referenzstruktur zeigen. Zudem ist erkennbar, dass die Schwankungsbreiten (im Bild dargestellt ist die Standardabweichung der Einzelwerte) offenbar relativ unabhängig von der gewählten Layoutstruktur sind. In keinem Fall kommt es zu einem kompletten Versagen der gedruckten Strukturen und damit zu mikroskopisch erkennbaren Rissen in den gedruckten Leiterstrukturen. Die beobachteten Widerstandsänderungen liegen allerdings mit etwa 60 Prozent und mehr deutlich oberhalb der erwarteten Werte. Diese wurden vorab unter der Voraussetzung „keine Rissbildung“ im Bereich von etwa 20 Prozent abgeschätzt.

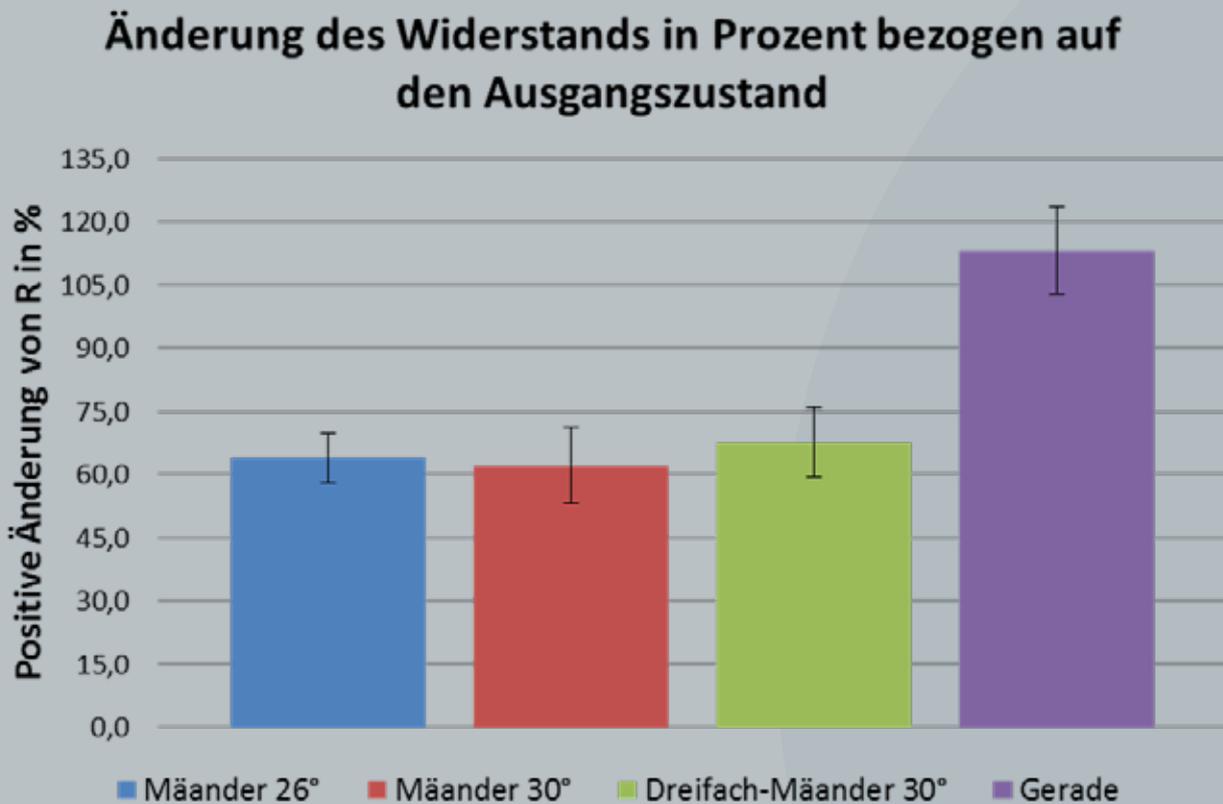


Abbildung 4: Widerstandsänderung abhängig von der Leiterbahngeometrie bei einer Dehnung von 8,5 Prozent (DuPont PE 872)

Um diese Ergebnisse abschließend bewerten zu können, sind weitere Untersuchungen von Druckpasten erforderlich.

## 5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

### Studentische Arbeiten:

Fragestellungen, die sich im Verlauf der Bearbeitung dieses Projektes ergeben haben, wurden in drei zusätzlichen Bachelorarbeiten untersucht. Neben der Fortführung der Arbeiten zur Untersuchung der dehnungsabhängigen Veränderungen der elektrischen Widerstände wurde in einer zweiten Arbeit ein Versuchsstand zur Temperierung der Foliensubstrate während der Zugprüfungen konzipiert, aufgebaut und bewertet. Das Ziel ist eine gleichmäßige Verformung der Folien über die gesamte Einspannlänge zu ermöglichen, so dass letztliche größere plastische Verformungen, wie sie bei Thermo- oder Hochdruckformen auftreten, realisiert werden können. Erst damit werden sich Dehnungen von über 10 Prozent voraussichtlich ohne lokal starke Einschnürungen und ungleichmäßige Dehnungen über die gesamte Einspannlänge realisieren lassen. Weitere Bachelor- und Masterarbeiten zur Montage elektronischer Bauteile auf gedruckten Leiterbildstrukturen – ein wesentlicher Schritt auf dem Weg zur Realisierung hybrider gedruckter Elektronik – sowie zur orts aufgelösten Dehnungsmessung mittels Digital Image Correlation (DIC) wurden in der Zwischenzeit ausgegeben und erfolgreich bearbeitet.

### Folgeprojekte:

Zusammen mit der Hochschule Hof wurde im Frühjahr 2016 eine Projektskizze im BMBF-Programm „Forschung an Fachhochschulen“ - Förderlinie „IngenieurNachwuchs – Kooperative Promotion“ mit dem Titel „Herstellung Mecha-tronischer Module auf Basis von Kunststofffolien durch Kombination von Drucktechnologien und Hochdruckumformen“ eingereicht. Dieses Projekt konnte nach positiver Begutachtung als Vollantrag eingereicht und im Mai 2017 gestartet werden. Bei einer Projektdauer bis April 2021 beläuft sich die Gesamtfördersumme auf > 800 T€, wobei knappe 450 T€ auf die TH Nürnberg entfallen. Im Projekt sind mit der RF Plast GmbH und der MSE GmbH zwei mittelständische Unternehmen aus der Kunststoff- bzw. Elektronikbranche als Wissenschafts-Praxispartner vertreten. Im Rahmen des Projektes konnte mit der FAU Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik, die Durchführung einer kooperativen Promotion erfolgreich initiiert werden.

Inhaltlich ist geplant, die Integration elektronischer Funktionalitäten in Kunststoffbauteile mittels Hochdruckumformen und Folienhinterspritzen drucktechnisch strukturierter Polymerfolien ganzheitlich zu bewerten. Im Rahmen des Projektes soll dementsprechend gerade die holistische Bewertung der oben genannten Teilaspekte im Vordergrund stehen. Folgende zu erwartende Ergebnisse können beispielhaft genannt werden:

- Layoutempfehlungen für den Entwurf verformbarer Leiterbahnstrukturen und Ermittlung entsprechender Einsatzgrenzen
- Qualifizierte Materialien und Druckprozesse für hochdruckverformbare und hinterspritzbare gedruckte elektronische Strukturen
- Geeignete Materialien und Prozesse für die Aufbau- und Verbindungstechnik elektronischer Bauteile sowie deren Wechselwirkungen und Einsatzgrenzen in Kombinationen mit den vorhergehenden und nachfolgenden Prozessschritten
- Ergebnisse zu Zuverlässigkeit und Langzeitverhalten hinterspritzter gedruckter elektronischer Komponenten

- Darstellung der Umsetzbarkeit des verfolgten Ansatzes unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse anhand eines zu entwickelnden Technologiedemonstrators

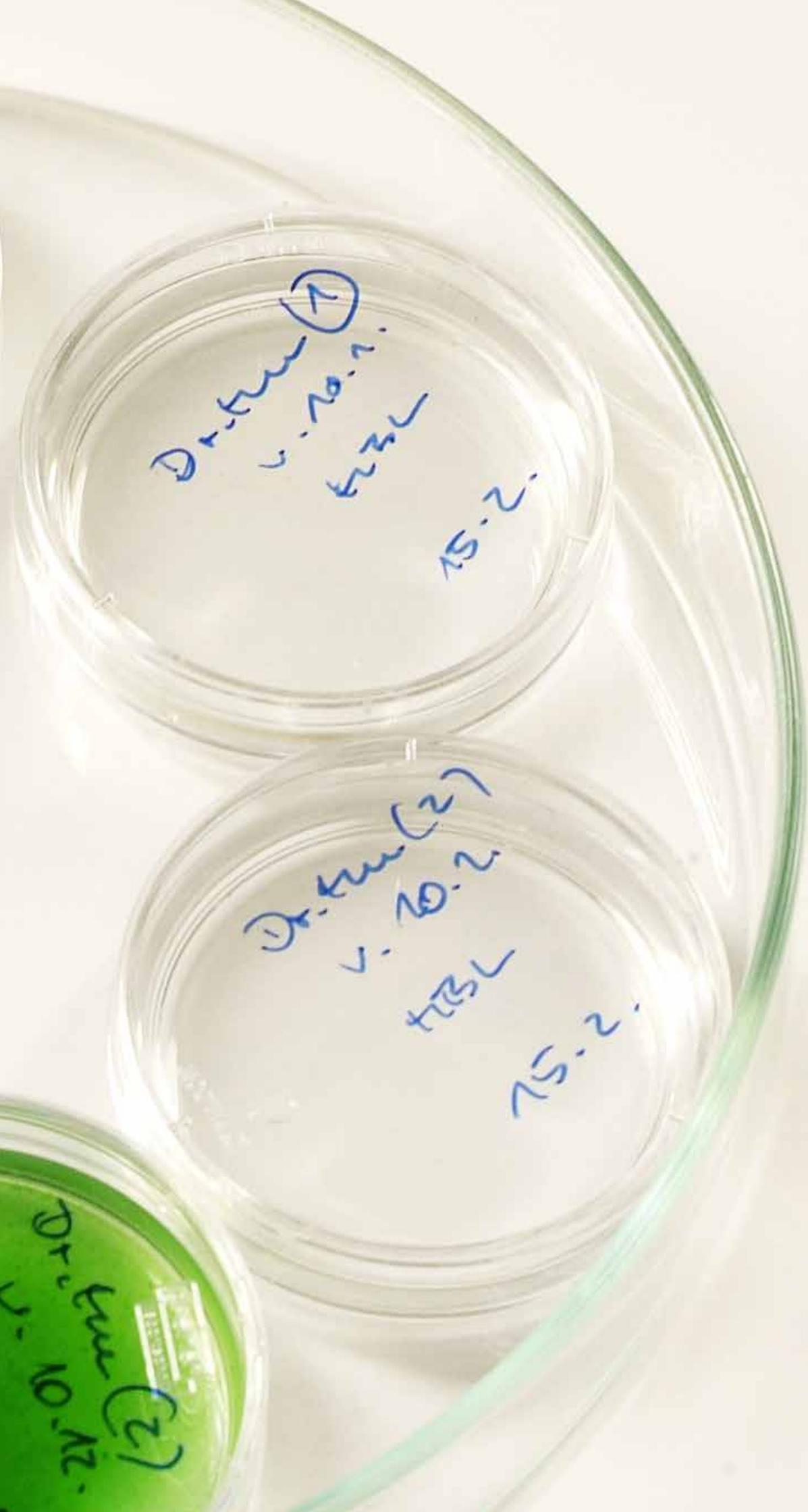
Die in diesem Vorlaufforschungsprojekt erzielten Ergebnisse fließen als grundlegende Vorarbeiten direkt in das begonnenen BMBF-Forschungsprojekt ein.

#### **Veröffentlichungen, Patente, Tagungsbeiträge:**

- Teile der Arbeit bzw. darauf aufbauende Fortführungen konnten bereits auf der internationalen Konferenz zur Fachmesse für gedruckte Elektronik LOPEC 2018 dem interessierten Fachpublikum vorgestellt werden.
- Im Rahmen der internationalen Kongresse ISSE 2018 und Molded Interconnect Devices 2018 werden wissenschaftliche Mitarbeiter Ergebnisse von Forschungsaktivitäten zum Thema gedruckte, hybride Elektronik vorstellen. Die Impulse für diese Aktivitäten wurden im Zuge der Bearbeitung des Vorlaufforschungsprojekts gegeben. Die dazugehörigen Schriftbeiträge werden in wissenschaftlichen IEEE-Journals veröffentlicht.
- Wenn komplette Ergebnisse vorliegen, sollen auch (englischsprachige) Veröffentlichungen folgen (z. B. Journal of Electronic Materials).
- Darüber hinaus werden geeignete Ergebnisse auf laufenden nationalen Veranstaltungen präsentiert, wie beispielsweise bereits im Herbst 2017 auf der Sitzung des Kompetenznetzwerkes Nano-Ink in Würzburg.







Handwritten text on the top inner dish:  
①  
Dr. Kim  
7.02.  
7.02  
7.02  
2.52

Handwritten text on the bottom inner dish:  
②  
Dr. Kim (2)  
7.02.  
7.02  
7.02  
2.52





# Herstellung und Charakterisierung biogener mikrostrukturierter Partikel

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Teipel  
Makrina Chairpoulou  
Fakultät Verfahrenstechnik  
Forschungsgruppe (FPR)  
Technische Hochschule Nürnberg

## Wesentliche Projektziele

Das Projekt „Herstellung und Charakterisierung biogener mikro-strukturierter Partikel“ zielt darauf ab, die Kultivierung der Mikroalge *Emiliania Huxleyi*, eine spezielle Algen-Spezies im Labormaßstab zu erforschen. Im Fokus steht die Fähigkeit des biogenen Systems, Partikel mit definierter Struktur zu erzeugen. In den Reaktoren der TH Nürnberg wird zuerst der Kultivierungsprozess für das biogene Gemisch etabliert und eine hinreichende und fehlerfreie Menge von Coccolithen, sogenannte Kalzitplättchen, hergestellt. In der Aufbereitungsstrategie werden die Coccolithen bis zu einer hinreichenden Konzentration (nahe dem Konzentrationsmaximum) produziert und einem Reinigungsprozess zugeführt. Bei dem derzeitigen Prozess kann es zum Teilverlust der Coccolithen kommen. Es ist geplant, an der TH Nürnberg ein Alternativverfahren zu entwickeln, so dass die komplexe Struktur dieser Partikel erhalten bleibt. Der zweite Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der Charakterisierung der Partikel mit Fokus auf die Struktur der Coccolithen.

### 1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Februar bis Dezember 2016
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Verfahrenstechnik / Mechanische Verfahrenstechnik / Fraunhofer Forschungsgruppe (FPR)
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Ulrich Teipel
Kontaktdaten	E-Mail: ulrich.teipel@th-nuernberg.de

### 2. Ausgangslage

Im Fokus dieses Projekts steht die Fähigkeit einer speziellen Algen Spezies, Partikel mit definierter Struktur herzustellen. Basierend auf statistischen Analysen für den zukünftigen globalen Markt wird ein Bedarf von 108,5 Mio. t/a an Calciumcarbonatpartikeln prognostiziert. In diesem Umfeld haben die hier entwickelten, neuen Partikel mit deutlich komplexer Struktur hinreichend gute Chancen am zukünftigen Markt. Diese spezielle Struktur, die synthetisch nicht herstellbar ist, in dem Gesamtprozess zu erhalten, stellt besondere Herausforderungen an den Aufbereitungsprozess.

Im ersten Schritt wurde in drei Bioreaktoren an der TH Nürnberg eine ausreichende Menge Biosuspension hergestellt. Die Arbeitsgruppe des Kooperationspartners Karlsruher Institut für Technologie (KIT) von Prof. Dr. Clemens Posten stellte dafür eine Stammkultur (CCMP 3266) bereit. Diese wird in den Laboren der Mechanischen Verfahrenstechnik an der TH Nürnberg kultiviert. Es konnte eine hinreichende Produktion von Coccolithen erreicht und die Untersuchungen der folgenden Arbeitspakete durchgeführt werden:

- Aufbereitung der Suspension
- Charakterisierung der Partikel

### 3. Ziele des Forschungsprojekts

Ziele dieses Projektes sind die Kultivierung, aber vor allem die Aufbereitung der biogenen Suspensionen und die anschließende Charakterisierung der Partikel und der komplexen Struktur.

### 4. Versuchsdurchführung

In den Reaktoren der TH Nürnberg wurde in einem ersten Schritt der Kultivierungsprozess für die biogenen Suspensionen etabliert und eine hinreichende Menge hergestellt und drei verschiedene Reaktorsysteme wurden im Labor untersucht. Diese Reaktorsysteme unterscheiden sich in verschiedenen Bautypen und Möglichkeiten (siehe Tabelle 1). Zwei wichtige Unterschiede sind zum Beispiel das Belüftungssystem und die Durchmischung der biogenen Suspension, die zu deutlich unterschiedlichen Wachstumsraten führen.

Die drei verwendeten Systeme werden in der Abbildung 1 vorgestellt:

- Plattenreaktor, Labfors 5 Lux, Infors (R1)
- Schottflasche Reaktor, KIT System (R2)
- selbstgebauter Bagreaktor (R3)



Abbildung 1: Plattenreaktor, Labfors 5 Lux mit LED flat panel (Infors HT) (l.), Schottflasche Reaktor, KIT System (m.) und Bag-Reaktor (r.).

Die Bedienungen für die Kultivierung sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

	Plattenreaktor (R1)	Schottflasche	Bag Reaktor
pH-Wert	pH 8,5 Automatisierte Regelung (2M NaOH)	pH 8,5 Tägliche Regelung (0.5 M HCl)	pH 8,5 Tägliche Regelung (1 M NaOH)
Gaszufuhr	Druckluft (1 L·min <sup>-1</sup> , 1 bar)	Keine Begassung	Druckluft (36 mL·min <sup>-1</sup> , 1 bar)
Temperatur	19 °C	17 °C	20 °C
Medium	1.8 L	5 L	1.2 L
Lichtquelle	LED-Platte (PFD = 300 μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) 10/14 Stunden Tag/Nacht- Zyklus	LED-Band (PFD = 300 μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) 10/14 Stunden Tag/Nacht- Zyklus	LED-Band (PFD = 38 μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ) 10/14 Stunden Tag/Nacht- Zyklus
Durchmischung	Zirkulation durch Begassung	Magnetrührer (300 rpm)	Begassung über Belüftersteine
Kohlenstoffquelle	CO <sub>2</sub> -Gas (1.0 mL·min <sup>-1</sup> , 1 bar)	37.5 mL NaHCO <sub>3</sub>	7.5 mL NaHCO <sub>3</sub>

Tabelle 1: Parameter für die drei Reaktor Systeme

In einem zweiten Schritt untersuchte die Arbeitsgruppe die Aufbereitung der hergestellten Suspension. Hierbei ist es von besonderer Bedeutung, eine Aufbereitungsstrategie zu entwickeln, bei der die Partikelstruktur nicht beschädigt wird. Zur Aufbereitung (zum Aufschluss des Zellsystems) wurde ein Temperaturgradient eingesetzt. Ein weiterer wichtiger Parameter ist die Aufkonzentrierung der Suspension. Je höher die Anzahldichte von Partikeln im System ist, d. h. je weniger Medium vorhanden ist, umso wahrscheinlicher ist es, dass die Partikel agglomerieren. Eine spätere Separation wird dadurch immer aufwendiger. Vor weiteren Untersuchungen wurde die Konzentration der Kultivierungsbrühe auf 80 Prozent ihres Volumens reduziert.

Die produzierten Coccolithen wurden mit folgendem Verfahren gereinigt:

#### Ablauf des Reinigungsprozesses:

Die Coccolithen wurden bis zu einer hinreichenden Konzentration (nahe dem Konzentrationsmaximum) produziert und anschließend in einem für diese spezifische Anwendung entwickelten Reinigungsprozess behandelt.

Im ersten Schritt wurde die Kultivierungsbrühe in einem Klimaschrank auf 80 °C erhitzt. Durch diese Temperierung der Trübe schließen sich die Zellen auf. Nach dem Zellaufschluss sedimentieren die Coccolithen und der Überstand wird entfernt. Im Anschluss wurde das Sediment in eine Zentrifuge bei 8000 xg behandelt, um weitere Restfeuchte zu entfernen. Zunächst wurden die Partikel in einer 12-prozentigen NaOCl Lösung resuspendiert.

Das Sediment wurde für 15 bis 20 Minuten inkubiert und anschließend mit einer  $\text{NaHCO}_3$  Lösung gewaschen. Dieser Prozess wurde mehrmals wiederholt. Nach dem Waschprozess wurden die Partikel getrocknet. In diesem Verfahren wurde eine Zentrifuge eingesetzt – ein Nachteil dieses Prozesses ist ein Teilverlust der Coccolithen. Ein weiterer ungünstiger Aspekt des beschriebenen Prozesses ist der zeitintensive Ablauf und dass zudem nur kleine Mengen an Suspension bearbeitet werden können.

Aufgrund dieser Erkenntnisse zielen wir als Arbeitsgruppe darauf ab, ein Alternativverfahren an der TH Nürnberg zu entwickeln. Eine zentrale Vorgabe für das Redesign dieses Prozesses ist, dass die komplexe Struktur dieser Partikel erhalten bleibt. Aufgrund der hohen strukturzerstörenden Kräfte ist das eine besondere Herausforderung.

Der zweite Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Charakterisierung der Partikel. Auch hier wird der Fokus auf der weiteren Analyse der Struktur der Coccolithen liegen.

## 5. Ergebnisse

Der nachfolgende Teil stellt die geplanten Arbeitspakete und die bereits produzierten Ergebnisse vor und diskutiert sie.

### Arbeitspaket 1: Aufbereitungstechnologie

Die Aufbereitung der Biogenen Suspension ist in hohem Maße von dem eingesetzten Kraftfeld und den möglichen Lösungsmitteln abhängig. Zur Ermittlung ausgewählter Einflussparameter führte die Arbeitsgruppe folgende Versuchsreihen durch:

#### ■ Untersuchung der Biogenen Suspension

Der erste Schritt zielt auf die Entwicklung eines geeigneten Separationsmechanismus, dazu wurden die in der Suspension vorhandenen biogenen Agglomerate untersucht. Das zentrale Ergebnis dieses Arbeitspaketes ist es, die Gestalt und die Größe der Agglomerate nach der Kultivierung definieren zu können.

#### ■ Ultraschallbehandlung der Suspensionen

Schon in früheren Forschungsarbeiten wurde diskutiert, dass es möglich ist die Coccolithen aus den Zellen mittels Ultraschall trennen zu können. Die freie Coccolithenzahl in der Suspension kann hierdurch i. d. R. gesteigert werden. Eine Behandlung der Suspension mit Ultraschall wurde in verschiedenen Zeitintervallen durchgeführt.

#### ■ Untersuchung der Fraktionen im Produkt

Ein weiterer wichtiger Parameter dieser Systeme ist die Partikelgrößenverteilung der gereinigten Coccolithen. Dieser Arbeitsschritt zielt auf die Untersuchung des Agglomerationsgrades im System.

### Arbeitspaket 2: Charakterisierung

Die komplexe und charakteristische Form der Coccolithen zeigt Abbildung 2. Jeder Partikel besteht aus zwei gekrümmten ovalen Platten mit Strahlen, die in der Mitte durch einen Ring verbunden sind. Bei dem derzeitigen Aufbereitungsprozess werden Teilerstörungen an den Partikeln beobachtet. Die vorliegenden Ergebnisse repräsentieren nur einen Teil der im System vorhandenen Partikeleigenschaften. Hier besteht noch ein deutlicher Optimierungsbedarf.

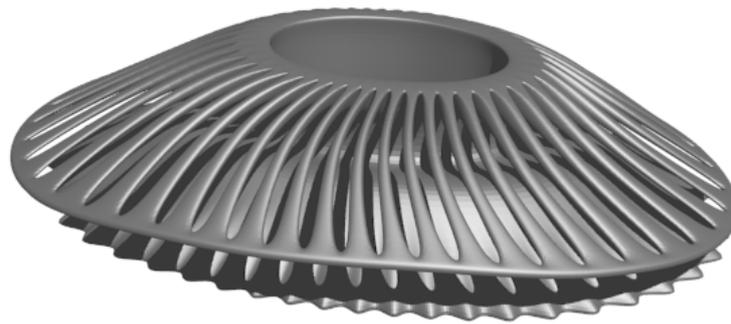


Abbildung 2: Aufbau und Struktur der Coccolithen

Die Grundform dieser Partikel ist eine kreisförmige Scheibe mit einer Vielzahl von Stegen mit einem Zwischenraum. Die spezifische Oberfläche wurde durch eine Gasadsorption (multi-BET) im Bereich von 12 bis 19 m<sup>2</sup>/g ermittelt. Der mittlere Durchmesser der Partikelgrößenverteilung (Laserbeugungsspektrometrie) ergibt sich zu  $x_{50,3} = 3,11\mu\text{m}$ . Der Äquivalentdurchmesser  $x_{St,50,3}$  aus der Sedimentationsanalyse liegt bei  $x_{St,50,3} = 0,95\mu\text{m}$ . Der Versuch zeigt, dass diese Partikel aufgrund ihrer Struktur geometrisch und physikalisch deutlich unterschiedliches Verhalten aufweisen. Abbildung 3 zeigt beispielhaft einige Ergebnisse von Partikelgrößenverteilungen in Abhängigkeit der Ultraschallenergie. Durch Ultraschallbehandlung verschiebt sich die Verteilung leicht in den Fein- gutbereich.

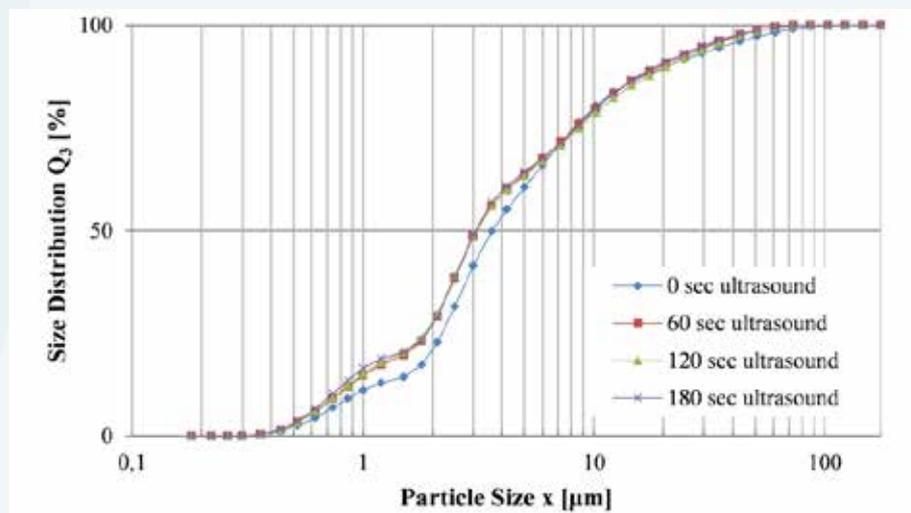


Abbildung 3: Partikelgrößenverteilungen bei verschiedenen Ultraschall-Beanspruchungszeiten

Es hat sich gezeigt, dass bei dem Strukturaufbau verschiedene Elemente eingebettet werden. Neben 85 Prozent CaO weisen die Coccolithen auch ca. 6,5 Prozent MgO und SiO<sub>2</sub> und Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> auf, die allerdings in geringen Mengen detektiert werden konnten. Diese biologisch erzeugten Coccolithen weisen durch das Vorhandensein dieser Zusatzelemente eine deutlich robustere Struktur auf als das synthetisch hergestellte CaCO<sub>3</sub>. Das Einbetten von verschiedenen Elementen steht in Abhängigkeit zum Wachstumsmedium und kann zu einer unterschiedlichen Komposition der Coccolithen führen. Mittels einer XRD-Analyse könnten auch die Kristallphasen der Coccolithen bestimmt werden. Aragonit und Calcit sind die zwei Modifikationen, die in der Struktur der Coccolithen definiert werden konnten (Abbildung 4).

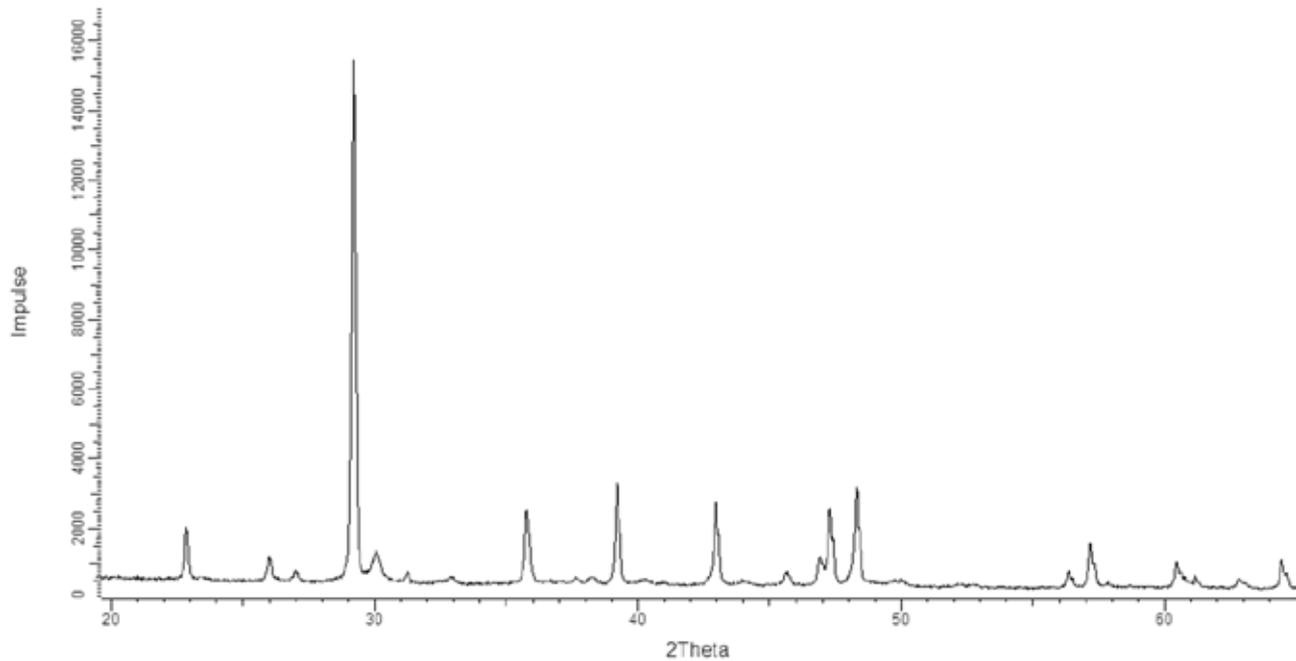


Abbildung 4: XRD Analyse von Coccolithen (XRD; Bragg-Brentano-Diffraktometer, D8 Advance von Bruker AXS).

Mittels FT-IR Analyse ist es möglich, bisherige Ergebnisse weiter zu verifizieren. Abbildung 5 zeigt charakteristische Reflexe für  $\text{CaCO}_3$  bei  $1394,02 \text{ cm}^{-1}$ ,  $871,45 \text{ cm}^{-1}$  und  $71,4 \text{ cm}^{-1}$ .

Die Reflexe bei  $712,4 \text{ cm}^{-1}$  und  $871,45 \text{ cm}^{-1}$  sind typisch für Calcite. Ein kleineres Signal bei  $2515,03 \text{ cm}^{-1}$  deutet auf C-O Bindungen hin. Die drei weiteren Signale zwischen  $2800 \text{ bis } 3000 \text{ cm}^{-1}$  sind typisch für C-H Ausdehnungen. Wie erwartet, sind Spuren von Kohlenwasserstoffe in der Probe vorhanden, aber der Anteil der Organik in der Probe ist relativ gering.

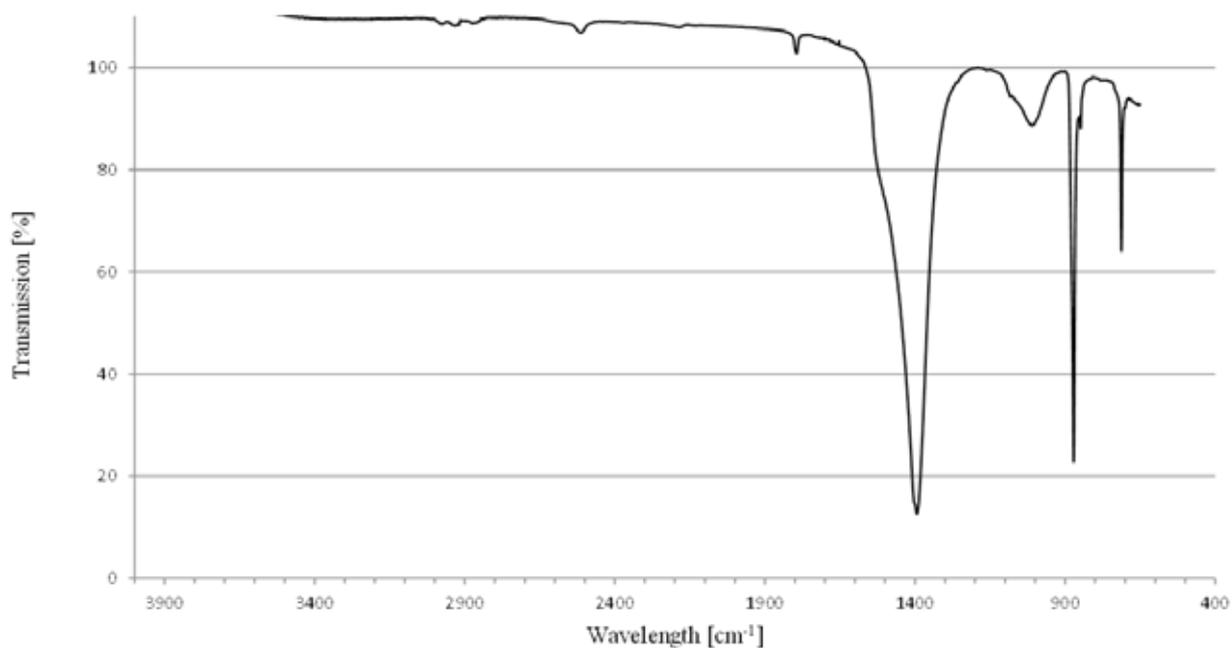


Abbildung 5: FT-IR Spektrum für Coccolithen (FT-IR-Spektrometer Nicolet 6700).

Um weitere Ergebnisse zu evaluieren ist eine Bildauswertungsmethode geplant, die direkt die Größe und geometrische Form der Partikel bestimmen. Zur Gewinnung intakter Partikel ist der Abtrennungsprozess zu modifizieren.

## 6. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Die Ergebnisse zeigen ein interessantes Produkt mit komplexer Struktur. Es ist zu erwarten, dass aufgrund der speziellen Struktur der Partikel in weiteren Versuchen sehr interessante Eigenschaften des Produktes zu finden sind. Um Coccolithen als Produkt in einem konkreten Anwendungsbezug einsetzen zu können, sind noch offene Fragen zu klären. Diese ersten Ergebnisse tragen dazu bei, Coccolithen als einen nachhaltigen Rohstoff am Markt platzieren zu können.

Dieses Projekt hat einen deutlichen Beitrag dazu geleistet, erste Ergebnisse zur Aufbereitung der Systeme zu untersuchen und einige Eigenschaften der Coccolithsysteme zu ermitteln.

Es wurden folgende Schritte durchgeführt:

- Erfolgreiche Kultivierung von Ehux Zellen in ESAW Medium
- Untersuchungen von definierten Parametern Aufbereitung der Partikel
- Charakterisierung von Coccolithen Eigenschaften

Künftige Untersuchungsziele zur Optimierung der Ergebnisse

- Separationsverfahren optimieren
- Untersuchungen zum Einfluss der Partikelstruktur
- Charakterisierung von einzelnen intakten Coccolithen

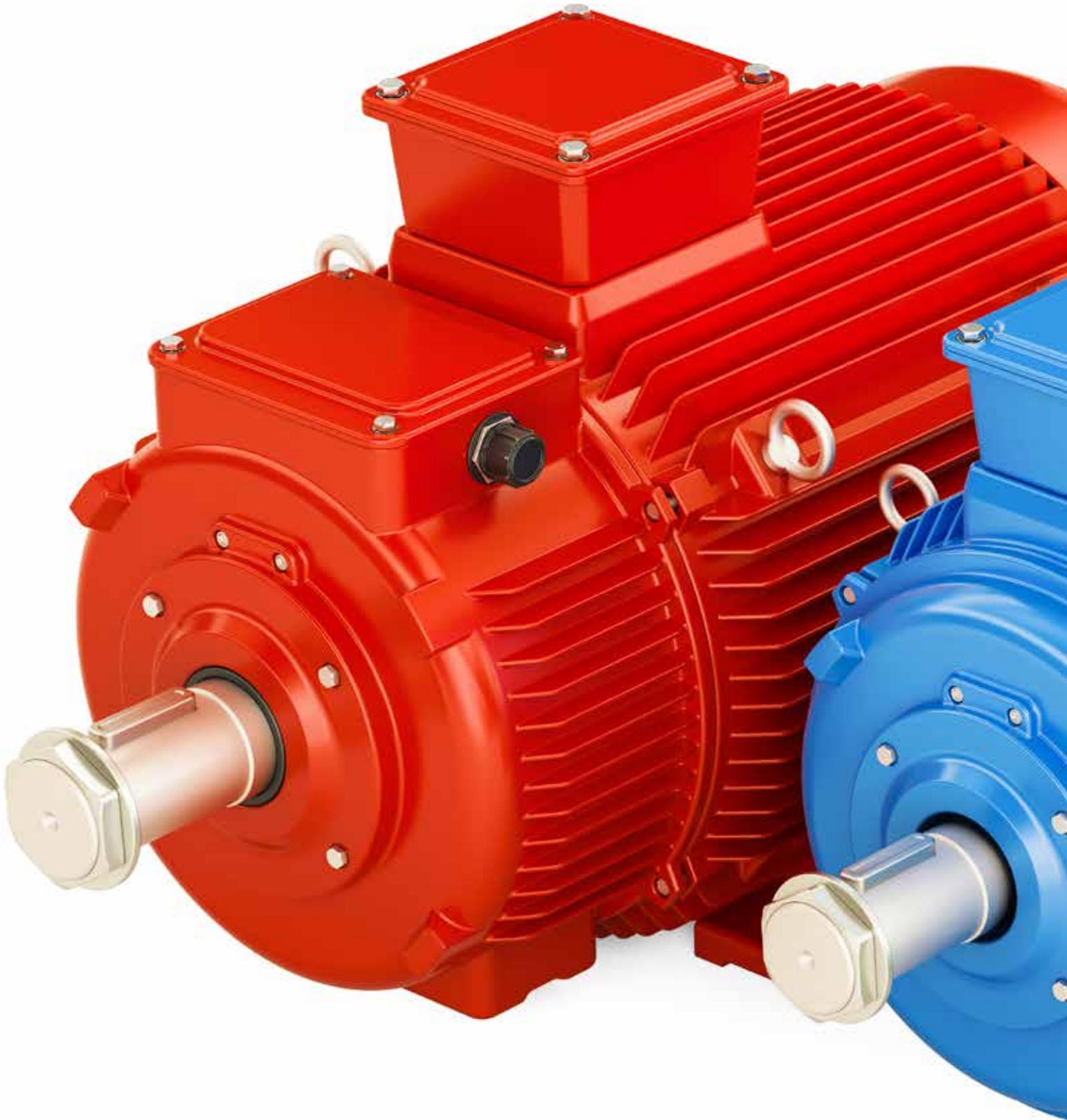
In Juni 2016 wurden die ersten Ergebnisse auf dem Symposium „Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovation“ an der Evangelischen Akademie in Tutzing vorgestellt. Weiterhin wurde auf dem „International Kongress of Particle Technology 2016“ (April 2016) der Stand des Projektes vorgestellt.

Gemeinsam mit der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Clemens Posten vom Karlsruher Institut of Technology (KIT) wurden die Ergebnisse in dem Journal „Engineering von Life Science“ veröffentlicht.

2017 hat die Arbeitsgruppe die Forschungsergebnisse in weiteren Beiträgen vorgestellt:

1. International Symposium „Relpowflo V“ in Skien, Norwegen (Juni 2017)
2. 8. Symposium „Produktgestaltung in der Partikeltechnologie“ in Karlsruhe (Juni 2017)
3. European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes „Euromat 2017“ in Thessaloniki, Griechenland (September 2017).

Die Promotion von Makrina Chairiopolou ist für Ende 2018 an der Universität Cadiz in Spanien geplant und mit der Universität Cadiz vereinbart.







# Aktive Schwingungsdämpfung von elektrischen Maschinen auf elastischen Stahlrahmenkonstruktionen

Prof. Dr. Ulrich Werner  
Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik  
Technische Hochschule Nürnberg

Elektromotoren sind zusammen mit den Lastmaschinen auf einem gemeinsamen Stahlrahmen montiert. Durch die elastischen Stahlrahmen kann sich das Schwingungsverhalten des Elektromotors gegenüber massiven Aufstellungen stark ändern. Im Rahmen der Vorlauforschung wird ein Versuchsprüfstand konzipiert und aufgebaut, an dem in nachfolgenden Forschungsprojekten die aktive Schwingungsdämpfung von elektrischen Maschinen auf einer elastischen Stahlrahmenkonstruktion erprobt werden kann. Der Prüfstand besteht aus einem elastischen Stahlrahmen, auf dem ein Asynchronmotor direkt verschraubt ist. Die Auslegung des Stahlrahmens wird mittels der Finiten-Element-Methode durchgeführt. Somit wird auch das Schwingungsverhalten des Systems (Motor auf Stahlrahmen) rechnerisch erfasst. Nach Aufbau des Prüfstandes werden Schwingungsmessungen durchgeführt und mit den Simulationsergebnissen verglichen. Für die Messung stehen im Labor entsprechende Messeinrichtungen zur Verfügung. Für nachfolgende Forschungsprojekte wird dieses mechanische System dann zu einem mechanischen System erweitert, um damit die aktive Schwingungsdämpfung zu erproben.

## Wesentliche Projektziele

### 1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2016
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik
Projektleitung	Prof. Dr. Ulrich Werner
Kontaktdaten	E-Mail: ulrich.werner@th-nuernberg.de

### 2. Ausgangslage

Die Energieeffizienz elektrischer Antriebssysteme [1]-[3] nimmt eine zentrale Rolle im Rahmen der Energiewende in Deutschland ein. Um ein Antriebssystem energieeffizient betreiben zu können, ist oftmals eine Variation der Drehzahl unumgänglich. Daher ist ein aktueller Trend hinsichtlich des Betriebs elektrischer Antriebe – weg vom Netzbetrieb hin zum Umrichterbetrieb – erkennbar. Dies zeigt sich auch bei industriellen Elektromotoren im oberen Leistungsbereich (> 1 MW), speziell für Anwendungen im Bereich von Pumpen, Gebläsen, Lüftern und Verdichtern. Heutzutage ist es ein industrieller Standard, dass der Elektromotor zusammen mit der jeweiligen Lastmaschine auf einen gemeinsamen Stahlrahmen montiert wird. Anschließend wird das gesamte Aggregat zum Endkunden versandt und dort entsprechend am Boden verankert (Bild 1).

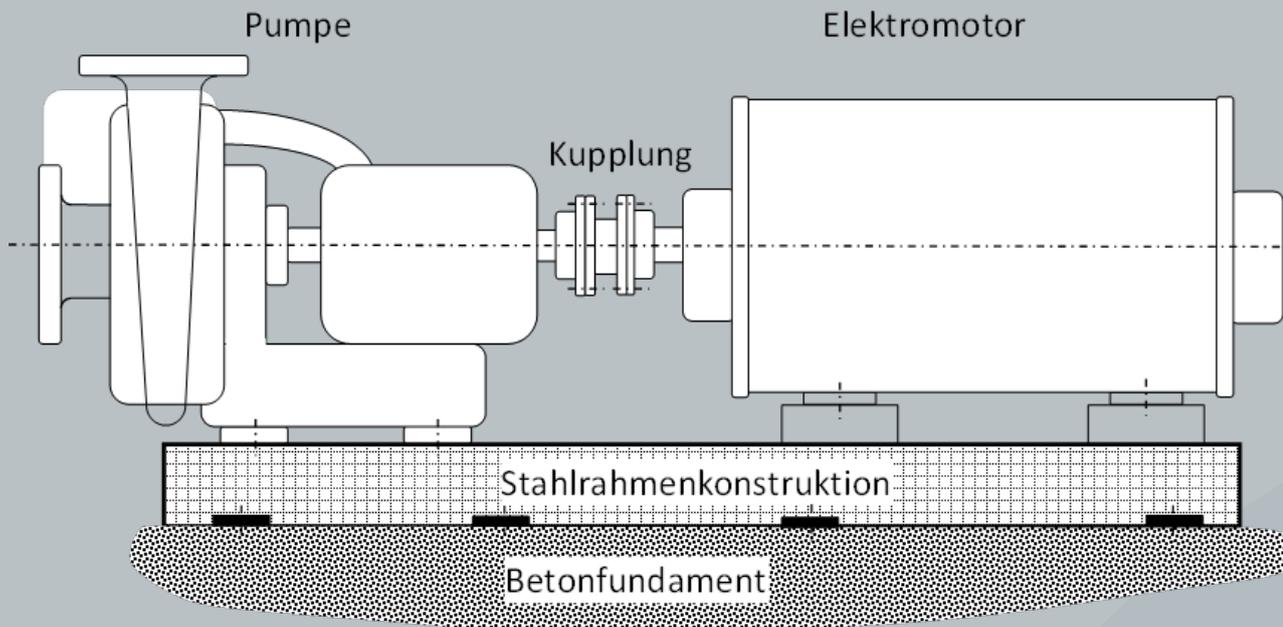


Bild 1: Beispiel: Elektromotor mit Pumpe auf elastischer Stahlrahmenkonstruktion

Die Stahlrahmenkonstruktionen sind aus anlagenspezifischen und aus wirtschaftlichen Gründen in der Regel elastisch ausgeführt. Die Folge ist, dass sich das Schwingungsverhalten des Elektromotors auf einem elastischen Stahlrahmen gegenüber einer massiven Aufstellung stark ändert [4]-[7]. Der aktuelle Stand der Technik ist, dass Elektromotoren für die industrielle Anwendung im oberen Leistungsbereich meist für einen Betrieb auf einem massiven Fundament ausgelegt werden, entsprechend DIN EN 60034-14 [8]. Die Auslegung für einen Betrieb auf einem elastischen Stahlrahmen ist nur bedingt sinnvoll, da jede Stahlrahmenkonstruktion unterschiedlich ist. Die Anpassung des Motors für einen Betrieb mit einem großen Drehzahlstellbereich auf einem elastischen Stahlrahmen erweist sich als technisch äußerst problematisch. Die Folge ist, dass Elektromotoren zwar seitens des Betreibers für einen bestimmten Drehzahlstellbereich spezifiziert werden und die Elektromotorenhersteller diese auch schwingungstechnisch für den spezifizierten Bereich auslegen, jedoch nur für ein massives Fundament. Wird der Motor nun auf einem elastischen Stahlrahmen betrieben, verändert sich das Schwingungsverhalten. Dadurch wird der spezifizierte Drehzahlstellbereich zwar für eine massive Aufstellung eingehalten, jedoch meist nicht für eine Aufstellung des Motors auf einer Stahlrahmenkonstruktion. Die Konsequenz ist, dass auf der Anlage Sperrbereiche im gewünschten Drehzahlstellbereich ausgewiesen werden müssen, die aufgrund von Resonanzerscheinungen nicht genutzt werden können, da ansonsten die zulässigen Schwingwerte nach DIN ISO 10816-3 [9] überschritten werden. Somit ist ein energieeffizienter Betrieb oftmals nur eingeschränkt möglich.

### 3. Ziele des Forschungsprojekts

Eine Abhilfe kann hier die aktive Schwingungsdämpfung leisten. Das angedachte Konzept basiert auf der Erweiterung des vorhandenen Systems (Motor auf Stahlrahmen) zu einem mechatronischen System. Hierzu werden Aktuatoren zwischen den Motorfüßen und den Stahlrahmen positioniert (Bild 2). Mit Hilfe von Sensoren werden die Bewegungen der Motorfüße erfasst und über eine entsprechende Regelung die Aktuatoren angesprochen. Somit kann aktiv in das Schwingungssystem eingegriffen werden, um einen größeren Drehzahlstellbereich nutz-

bar zu machen. Bei der Auslegung wird auch berücksichtigt, die Schwingungsübertragung ins Fundament möglichst zu minimieren.

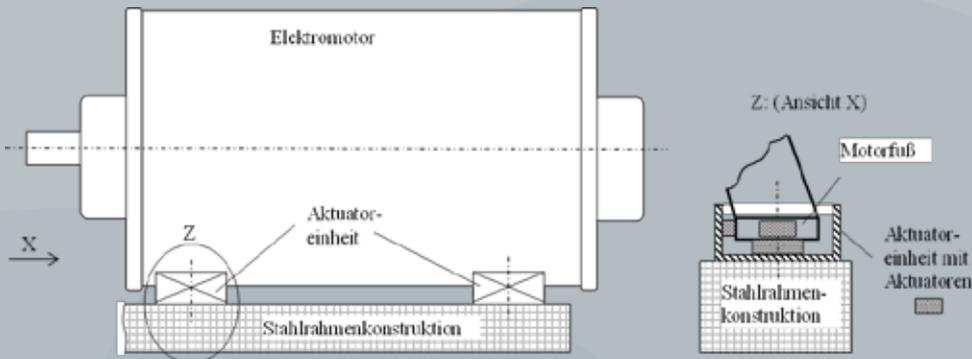


Bild 2: Elektromotor mit Aktuatoren auf elastischer Stahlrahmenkonstruktion

Ziel des Forschungsprojektes ist es, eine Möglichkeit aufzuzeigen, wie der gewünschte Drehzahlstellbereich des Motors komplett ausgenutzt werden kann, um damit, unabhängig vom Maschinenfundament, einen energieeffizienten Betrieb zu gewährleisten. Im Rahmen der Vorlaufforschung ist die Aufgabenstellung, einen Versuchsprüfstand zu konzipieren und aufzubauen, an dem in nachfolgenden Forschungsprojekten die aktive Schwingungsdämpfung erprobt werden kann. Hierfür sind die Aktuatoren, Sensoren und das Regelkonzept im Vorfeld mit zu berücksichtigen. Geplant ist, dass der Prüfstand aus einer elastischen Stahlrahmenkonstruktion besteht, auf der ein Asynchronmotor zunächst direkt verschraubt ist. Die Auslegung des Stahlrahmens ist mittels der Finiten-Element-Methode durchzuführen und somit das Schwingungsverhalten des Systems (Motor auf Stahlrahmen) rechnerisch zu bestimmen. Nach Aufbau des Prüfstandes werden Schwingungsmessungen durchgeführt und diese mit den Simulationsergebnissen verglichen. Für die Messung stehen im Labor entsprechende Messeinrichtungen und geeignete Prüflinge zur Verfügung. Für nachfolgende Forschungsprojekte wird dieses mechanische System dann zu einem mechatronischen System erweitert, um damit die aktive Schwingungsdämpfung zu erproben.

#### Ziele der Vorlaufforschung und der Folgeprojekte:

- Vorlaufforschung:
  - Aufbau eines Prüfstandes zur Erprobung aktiver Schwingungsdämpfung von Elektromotoren auf einer elastischen Stahlrahmenkonstruktion
- Folgeprojekte:
  - Erprobung der aktiven Schwingungsdämpfung unter Berücksichtigung verschiedener Aktuatorentypen und Regelverfahren
  - Technische und wirtschaftliche Optimierung des Konzeptes und Skalierung des Konzeptes auf Elektromotoren im oberen Leistungsbereich (> 1 MW)
- Daraus abgeleitet:
  - Steigerung der Energieeffizienz von umrichter gespeisten Antriebssystemen durch Erweiterung des technisch realisierbaren Drehzahlstellbereichs

- Technologischer Vorsprung durch aktive Schwingungsdämpfung → „Motor läuft auf jedem Fundament“
- Reduzierung der in den Stahlrahmen eingeleiteten Schwingungen → Minimierung von Umwelteinflüssen
- Sicherer Betrieb von industriellen Anlagen

#### 4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Im zeitnahen Vorfeld und während des Projektes wurden mehrere theoretische Untersuchungen bezüglich des Schwingungsverhaltens von Elektromotoren auf starren bzw. auf elastischen Fundamenten durchgeführt. Dadurch werden einerseits die typischen Anregungsmechanismen – Massensexzentrizität (Bild 3a), magnetische Exzentrizität (Bild 3b) und Wellenschlag (Bild 3c) – und andererseits das Systemverhalten – auch unter Berücksichtigung von Aktuatoren (Bild 4) – mathematisch beschrieben.

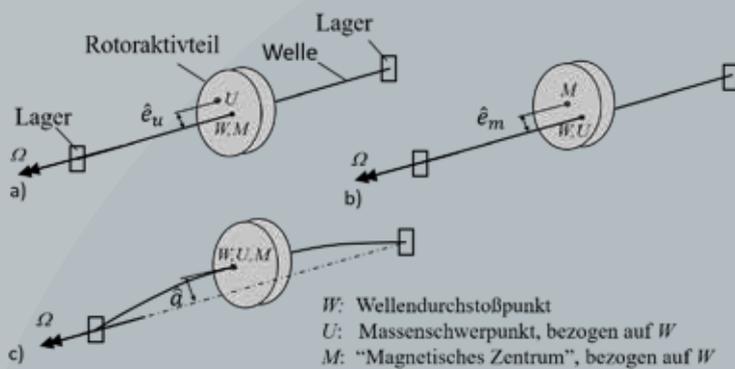


Bild 3: Typische Anregungsarten bei elektrischen Maschinen

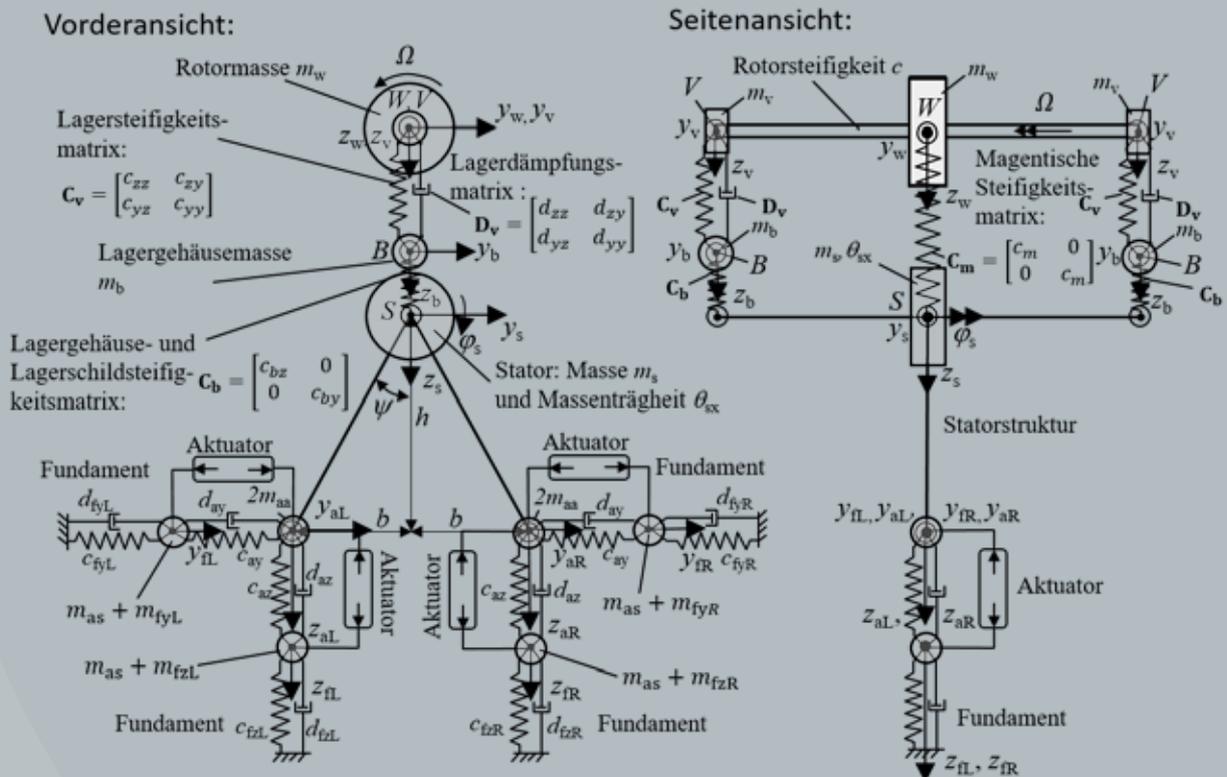


Bild 4: Vereinfachtes, ebenes Schwingungsmodell eines Elektromotors auf einem elastischen Fundament mit Aktuatoren zwischen den Motorfüßen und dem Fundament

Neben den theoretischen Untersuchungen wurde ein Prüfstand konzipiert, entwickelt und gebaut. Das grundsätzliche Vorgehen ist im Bild 5 beschrieben. Hierzu wurde von einem vorhandenen Motor 1LA7 163-2AA10 ( $P_N = 11 \text{ kW}$ ) der Siemens AG ein CAD-Modell mit dem Programm CREO angefertigt. Zur Durchführung wurde der Motor zerlegt und die Einzelteile (Lagerschild, Ständergehäuse, Statorpaket, Rotorwelle, etc.) entsprechend vermessen. Das CAD Modell wurde in einer Weise modelliert, dass dieses Modell anschließend in einem Finite-Element Programm (ANSYS) verwendet werden konnte. Zunächst wurden die Eigenfrequenzen des Motors auf starrem Fundament mittels rechnerischer Modalanalyse ermittelt. Im Anschluss wurde ein entsprechender Stahlrahmen modelliert und die Eigenfrequenzen des Motors auf diesen Stahlrahmen berechnet. Durch iteratives Vorgehen konnte das Stahlrahmenfundament so abgestimmt werden, dass in dem Drehzahlstellbereich des Motors (0 bis 4800 1/min) drei Eigenfrequenzen (Bild 6 - 8) auftreten. Nach der rechnerischen Auslegung konnte das Stahlrahmenfundament konstruiert und gefertigt werden. Für November / Dezember 2016 wurden der Aufbau des Prüfstandes und die Messung der Eigenfrequenzen mittels experimenteller Modalanalyse geplant.

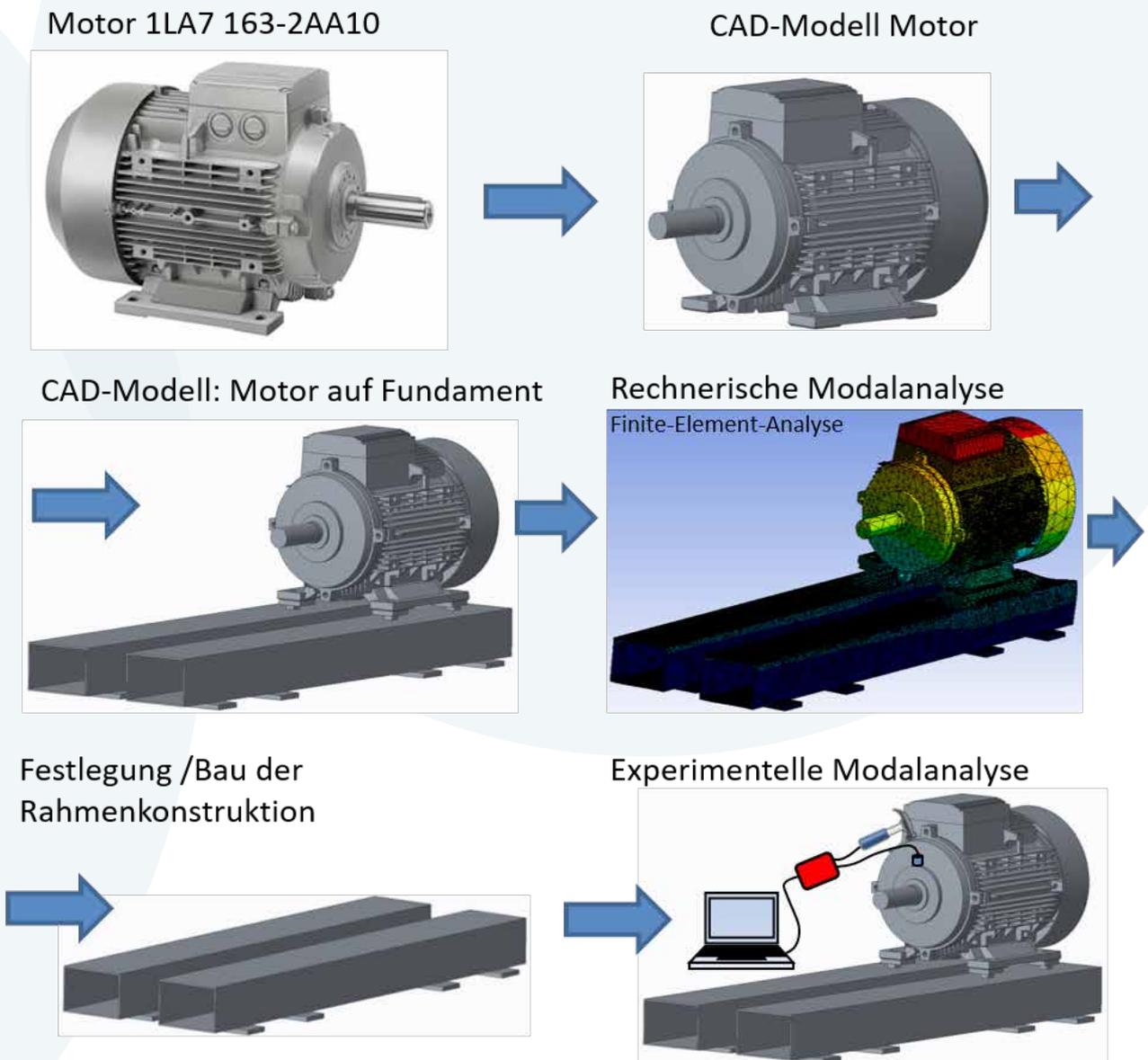


Bild 5: Vorgehen bei der Umsetzung des Vorlaufforschungsprojektes

Die berechneten Eigenschwingungsformen mit den Eigenfrequenzen sind in den Bildern 6 - 8 dargestellt. In der ersten Schwingungseigenform (Mode 1) führt der Motor eine Kippbewegung um die Rotorachse aus, gekoppelt mit einer horizontalen Translation (Querbewegung), bei einer Frequenz von 40,1 Hz (Bild 6).

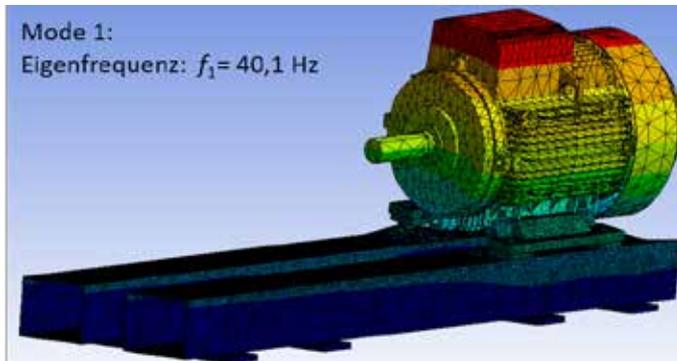


Bild 6: Erste Schwingungseigenform

In der zweiten Schwingungseigenform (Mode 2) führt der Motor eine Kippbewegung um die Querachse aus, gekoppelt mit einer axialen Translation, bei einer Frequenz von 49,8 Hz (Bild 7).

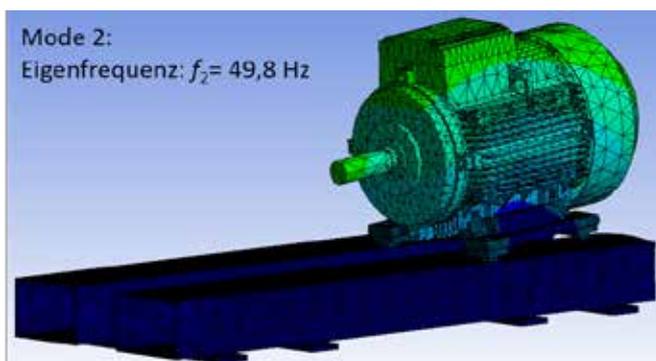


Bild 7: Zweite Schwingungseigenform

In der dritten Schwingungseigenform (Mode 3) führt der Motor eine reine Translation in vertikaler Richtung aus, bei einer Frequenz von 65,6 Hz (Bild 8).

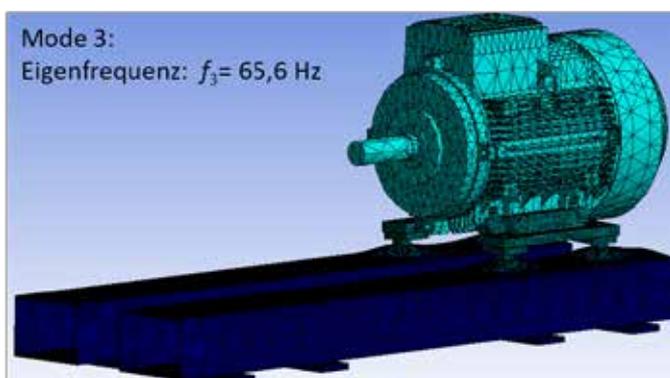


Bild 8: Dritte Schwingungseigenform

Aufgrund der Eigenfrequenzen treten nun Sperrbereiche im Drehzahlstellbereich (0 - 4800 1/min) auf, in denen ein stationärer Betrieb (hier für die Forderung  $\pm 10$  Prozent Abstand zu den Eigenfrequenzen) zu vermeiden ist (Bild 9). Im Nachfolgeprojekt gilt es durch die aktive Schwingungsdämpfung den gesamten Drehzahlstellbereich wieder für den stationären Betrieb nutzbar zu machen.

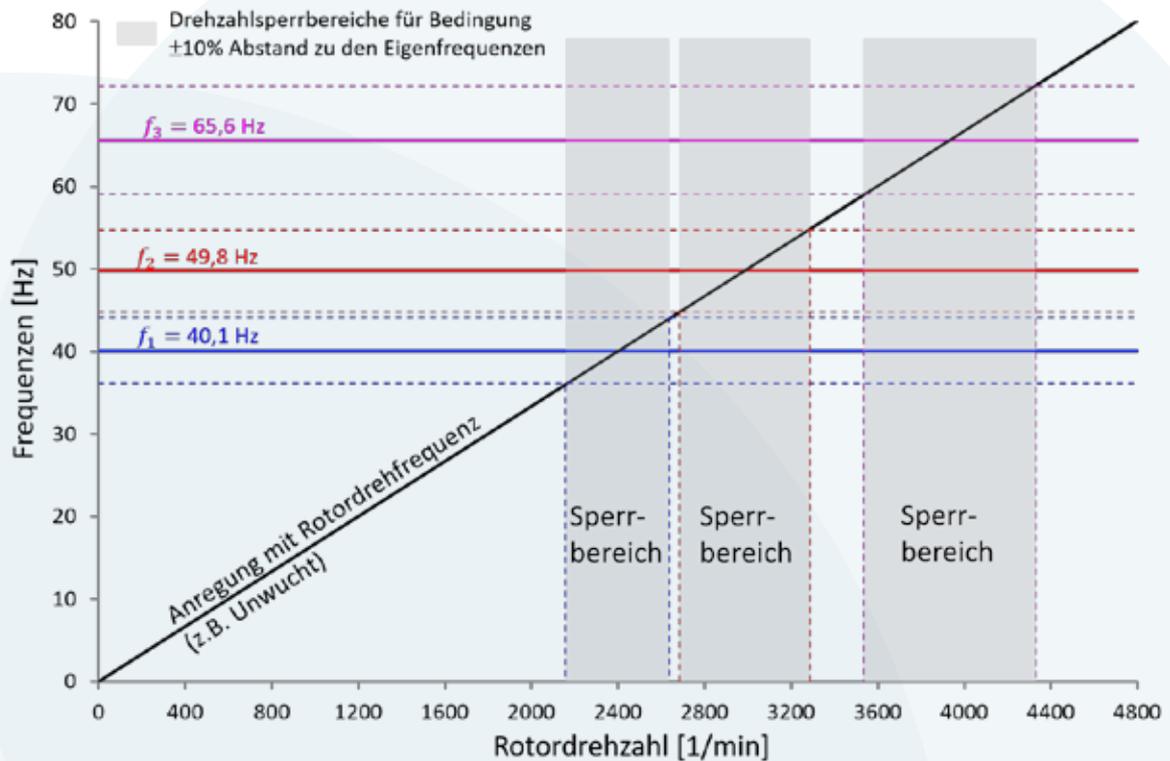


Bild 9: Campbell-Diagramm mit Drehzahlsperrbereichen

## 5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Durch dieses Vorlauforschungsprojekt konnte die Grundlage entwickelt werden, um in nachfolgenden Forschungsprojekten die aktive Schwingungsdämpfung elastisch aufgestellter Elektromotoren zu erproben. Dazu liefen Verhandlungen mit der Siemens AG bezüglich der Förderung eines Nachfolgeprojektes zur Erprobung der aktiven Schwingungsdämpfung unter Berücksichtigung verschiedener Aktuatorentypen und Regelverfahren. Diese Verhandlungen wurden erfolgreich abgeschlossen, sodass ein gemeinsames Forschungsprojekt mit der Siemens AG bis Ende September 2020 vertraglich vereinbart wurde. Im Rahmen und im zeitnahen Vorfeld des Forschungsvorhabens sind folgende wissenschaftlichen Veröffentlichungen bezüglich der theoretischen Untersuchungen erfolgt:

- U. Werner, Influence of electromagnetic field damping on forced vibrations of induction rotors caused by dynamic rotor eccentricity, ZAMM- Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik / Journal of Applied Mathematics and Mechanics, WILEY-VCH, DOI: 10.1002/zamm.201500285, 2016
- U. Werner, Stability analysis of induction rotors supported in sleeve bearings considering electromagnetic field damping and internal material damping of the rotor, 11th International Conference on Vibrations in Rotating Machinery, Manchester, UK, 13-15 September, ISBN 978-0-9572374-8-3, pp. 155-166, 2016

- U. Werner, Analysis of active vibration reduction for soft mounted electrical machines based on a multibody model, *International Journal of Applied Mechanics* (status accepted)
- U. Werner, Mathematical multibody model of a soft mounted induction motor regarding forced vibrations due to dynamic rotor eccentricities considering electromagnetic field damping, *Journal of Applied Mathematics and Physics* (status accepted)
- U. Werner, Influence of electromagnetic field damping on the vibration stability of soft mounted induction motors with sleeve bearings, based on a multibody model, *Konferenz SIRM Schwingungen in rotierenden Maschinen* (status accepted)

Auch bezüglich der praktischen Untersuchungen und den Nachfolgeprojekten sind weitere Publikationen geplant.

## 6. Literatur

- [1] A. Kremser, *Elektrische Maschinen und Antriebe*, Springer Vieweg, 2012
- [2] A. Binder, *Elektrische Maschinen und Antriebe*, Springer Berlin Heidelberg, 2012
- [3] M. Blesl, A. Kessler, *Energieeffizienz in der Industrie*, Springer Vieweg, 2013
- [4] R. Gasch, R. Nordmann, H. Pfützner, *Rotordynamik*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2002
- [5] R. Gasch, J. Maurer, W. Sarfeld, The influence of the elastic half space on stability and unbalance of a simple rotor-bearing foundation system, in *Proc. Conference Vibration in Rotating Machinery, C300/84, IMechE, Edinburg, 1984*
- [6] J. M. Vance, F. J. Zeidan, B. Murphy, *Machinery Vibration and Rotordynamics*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 2010
- [7] G. Genta, *Dynamics of Rotating Systems*, Springer Science & Business Media, 2005
- [8] DIN EN 60034-14, *Drehende elektrische Maschinen Teil 14: Mechanische Schwingungen von bestimmten Maschinen mit einer Achshöhe von 56 mm und höher – Messung, Bewertung und Grenzwerte der Schwingstärke*, 2007
- [9] DIN ISO 10816-3, *Mechanische Schwingungen - Bewertung der Schwingungen von Maschinen durch Messungen an nicht-rotierenden Teilen - Teil 3: Industrielle Maschinen mit einer Nennleistung über 15 kW und Nenndrehzahlen zwischen 120 min<sup>-1</sup> und 15000 min<sup>-1</sup> bei Messungen am Aufstellungsort*, 2009







Vorlauftforschung  
der TH Nürnberg  
2017

# Inhalt

## Vorlaufforschung der TH Nürnberg 2017

---

Nürnberger Mikro-Depot-Konzept in der KEP-Branche: 134  
Übertragbarkeit auf andere Städte und Integration von innovativen  
Same-Day-Delivery-Konzepten

**Prof. Dr.-Ing. Ralf Bogdanski, Marius Bayer, M. A., Markus Seidenkranz**

Fakultät Betriebswirtschaft, TH Nürnberg

---

IKON - Intelligente Betriebsführung durch Kommunikation 150  
von Produktion und Gebäudetechnik mit einem künstlichen  
neuronalen Netz

**Prof. Dr.-Ing. Arno Dentel, Kutralingam Kandasamy, M. Sc.**

Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik, TH Nürnberg

---

iKSM – integrierte Käfig-Stator-Maschine 162

**Prof. Dr. Armin Dietz, Philipp Löhdefink, M. Sc., Michael Gerstner, M. Sc.**

Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik, Institut ELSYS, TH Nürnberg

---

Strategien zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit bestehender 172  
Wärmenetze in ländlichen Regionen unter Berücksichtigung  
ökologischer Auswirkungen und spezifischer Rahmenbedingungen  
des jeweiligen Systems

**Prof. Dr. Birgit Eitel**

Fakultät Betriebswirtschaft, TH Nürnberg

---

Barrierefreiheit und demografischer Wandel – 178  
Anpassungsstrategien im städtischen Raum für die Mobilitäts-  
bedürfnisse und das Mobilitätsverhalten einer sich wandelnden  
Stadtgesellschaft

**Prof. Dr. Carola Gröhlich, Mauritius Scheutz, M.A., Ulrike Krämer, M.A.**

Fakultät Sozialwissenschaften, TH Nürnberg

**Prof. Dr.-Ing. Harald Kipke**

Fakultät Bauingenieurwesen, TH Nürnberg

---

Genesis VisionTest (GVT) 188

**Prof. Dr. Helmut Herold, Andreas Pazureck M.Sc.**

Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik, TH Nürnberg

---

FlexFilament – Variable Filamentbahnen für effizienten und schnellen 3D-Druck mit FDM 198

**Prof. Dr. Michael Koch, Dr. Jens Helbig, Robin Löffler, B. Eng.**

Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik, Institut OHM-CMP, TH Nürnberg

---

SoC-R – Evaluierung neuartiger „System-on-a-Chip“ Plattformen für die Echtzeitberechnung 208

**Prof. Dr. Flaviu Popp-Nowak**

Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik, TH Nürnberg

**Sebastian Wendel, M. Sc., Quoc Viet Bui, B. Eng.**

Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik, Institut ELSYS, TH Nürnberg

---

BIM EnOPT 220

Building Information Modeling für energetisch optimierte Gebäude

**Prof. Dr. Wolfram Stephan**

Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik, Institut für Energie und Gebäude, TH Nürnberg

---

ARES – Abfallverminderung durch Recycling epoxidharzbasierter Stoffe 230

**Prof. Dr. Gerd Wehnert, Dr.-Ing. Dominik Söthje, Herbert Schlachter, M. Eng., Christoph Fritze, B. Sc.**

Fakultät Angewandte Chemie, TH Nürnberg

---





Umweltfreundlich  
unterwegs  
in Nürnberg

in Zusammenarbeit mit





# Nürnberger Mikro-Depot-Konzept in der KEP-Branche: Übertragbarkeit auf andere Städte und Integration von innovativen Same-Day-Delivery-Konzepten

Prof. Dr.-Ing. Ralf Bogdanski  
Marius Bayer  
Markus Seidenkranz  
Fakultät Betriebswirtschaft  
Technische Hochschule Nürnberg

Das in Nürnberg erprobte Mikro-Depot-Logistikkonzept zielt auf die Übertragung auf andere Städte und auf die Ausweitung der Anwendungsfälle außerhalb der KEP-Branche ab. Das Ziel ist es dabei, universale Kenn- und Zielwerte herauszuarbeiten, die es ermöglichen, die konzeptionelle Methodik leichter auf andere Städte zu übertragen. So fokussiert das Projektteam beispielsweise darauf, Werte zu erforschen, die als Indikator dienen, ob sich ein bestimmtes Wohngebiet für die Zustellung via Lastenfahrrad eignet oder nicht. Das Mikro-Depot-Konzept stellt zusätzlich eine ideale Basis für innovative Geschäftsmodelle im Bereich der Same-Day-Delivery dar. Insbesondere dann, wenn logistische Quelle und Senke im gleichen Stadtgebiet liegen, ist die klassische Paketdienstleistung für Same-Day-Delivery ungeeignet. Dies haben Start-Ups erkannt und versuchen, Software-as-a-service Geschäftsmodelle, kombiniert mit lokalen Kurierdiensten, am Markt zu etablieren. Dabei benötigen sie zur Sendungskonso- lidierung ebenfalls innerstädtische Umschlagsflächen. Hier bestehen mögliche Synergien mit dem Mikro-Depot-Konzept der KEP-Branche unter der Voraussetzung kompatibler und kooperativer Logistikkonzepte und Geschäftsmodelle.

## Wesentliche Projektziele

### 1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2017
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Betriebswirtschaft / Kompetenzzentrum Logistik
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Ralf Bogdanski
Kontaktdaten	E-Mail: ralf.bogdanski@th-nuernberg.de

### 2. Ausgangslage

Bereits vor vielen Jahrhunderten haben sich große Städte in Deutschland und in Europa oftmals an den Kreuzungen wichtiger Handelsstraßen entwickelt, begünstigt durch topografische Vorzüge wie beispielsweise den direkten Zugang zu schiffbaren Flüssen. Schon im Mittelalter verfügten Freie Reichsstädte wie Nürnberg oder Frankfurt am Main über kommunale Selbstverwaltungen und Zünfte, die dem existenzbegründenden Wirtschaftsverkehr die notwendigen Rahmenbedingungen schufen. In der später einsetzenden Phase der Industrialisierung war es das aufstrebende Bürgertum, das verkehrstechnischen Basisinnovationen wie der Eisenbahn oder motorisierten Nutzfahrzeugen zum Durchbruch verhalf. Die so entstandenen innerstädtischen Verkehrswege und Strukturen dominieren die Stadtbilder bis heute.

Gewandelt hat sich indes der Charakter des Wirtschaftsverkehrs. Industrielle Wertschöpfung findet zumeist außerhalb der eigentlichen Stadtzentren statt, Kommunen versuchen den innerstädtischen Raum attraktiv zu gestalten für Wohnen, Tourismus, Dienstleistungen, Handel und Gewerbe. Die beeindruckenden Entwicklungen der Bevölkerungs- und Touristenzahlen bezeugen die Renaissance der urbanen Lebensformen. Damit einher

geht jedoch der stetig steigende Bedarf, die Versorgung und Entsorgung von städtischen Ballungszentren durch Lieferverkehre sicherzustellen.

Zu den notwendigen urbanen Lieferverkehren zählt die Kurier-, Express- und Paket-Branche (KEP), die analog zum straßengebundenen öffentlichen Personennahverkehr (Stadtbusse) regelmäßige tägliche Touren zur Versorgung von Handel, Industrie, Gewerbe und Privatpersonen im Stadtgebiet fahren; die dabei auftretenden Mengen- gerüste und logistischen Leistungen der beiden Verkehrssysteme sind durchaus vergleichbar<sup>1</sup>. Die KEP-Branche ist in einem stetigen Wachstum begriffen; im Jahr 2016 wurden in Deutschland erstmals mehr als drei Milliarden Sendungen befördert, der jährliche Sendungszuwachs liegt zwischen fünf und zehn Prozent, wobei Business-to-Consumer-Sendungen (B2C) zweistellig wachsen. Der Treiber für das überproportionale B2C-Wachstum ist das Wachstum des Online-Handels, in dieser Wachstumsprognose sind allerdings die Marktsegmente Food-Delivery und Same-Day-Delivery noch gar nicht enthalten. Diese Marktsegmente haben in angloamerikanischen Märkten bereits wesentlich höhere Marktanteile als in Deutschland. Das ebenso stabile Wachstum der Business-to-Business-Sendungen (B2B) hat einen wichtigen Treiber im stationären Einzelhandel; die starke Abhängigkeit von B2B-KEP-Anlieferungen (eine KEP-Lieferquote > 50 Prozent) steigt mit sinkender Verkaufsfläche auf bis zu 80 Prozent der Einzelhändler, aber auch der filialisierte Einzelhandel mit eigenen Liefernetzwerken gibt bis zu 40 Prozent Abhängigkeit an<sup>2</sup>. Die Marktpotentiale der KEP-Branche sind also groß und zunehmend auch für andere Marktteilnehmer interessant, hier sei beispielhaft auf den Markteintritt von Amazon in Lebensmittellieferungen verwiesen (Amazon-Fresh).

Circa dreiviertel der deutschen Bevölkerung leben aktuell in Städten mit steigender Tendenz, so dass der größte Teil der Abholungen und Zustellungen der KEP-Branche auf der sog. „Letzten Meile“ in städtischen Ballungsräumen stattfindet. Allein in den drei größten deutschen Städten Berlin, Hamburg und München wohnen gesamt ca. 6,7 Millionen Einwohner. Damit ist die Stadtlogistik der „Letzten Meile“ ein kritischer Erfolgsfaktor für die KEP-Dienste, was sowohl den Marktzugang als auch die Kostensituation betrifft. Allerdings treffen in deutschen Großstädten die steigende Nachfrage nach KEP-Dienstleistungen und die dadurch generierten KEP-Wirtschaftsverkehre auf ebenfalls zunehmende andere Wirtschaftsverkehre, motorisierte Individualverkehre und den öffentlichen Stadtbusverkehr. Zugleich sind die dafür im öffentlichen Raum zur Verfügung stehenden, meist historisch gewachsenen Verkehrsflächen begrenzt. Effizienzverluste für die Wirtschaftsverkehre durch sinkende Durchschnittsgeschwindigkeiten und negative Umweltwirkungen, insbesondere durch die Emission von Luftschadstoffen und Lärm, sind die Folge. Das aktuelle Weißbuch der Europäischen Kommission zum europäischen Verkehrsraum beinhaltet ambitionierte Ziele zur Reduzierung von Transportemissionen und sieht in dem innerstädtischen Wirtschaftsverkehr ein wichtiges Handlungsfeld.

Die aktuell in Deutschland geführten Diskussionen um Dieselfahrverbote unterstreichen die Notwendigkeit einer nachhaltigen Stadtlogistik zusätzlich; der Dieselmotor ist auch in der KEP-Stadtlogistik die derzeit absolut dominierende Antriebstechnologie.

Als nachhaltige Alternative zum KEP-Dieselfahrzeug in der Adresszustellung auf der Letzten Meile kristallisieren sich zwei Möglichkeiten heraus: Der Ersatz von Dieseltransportern in der überwiegend genutzten Fahrzeugklasse bis 3,5 t zGG mit ca. 1.000 kg Nutzlast und 12 m<sup>3</sup> Ladevolumen durch batterieelektrische Transporter (BEV), ohne Änderungen der etablierten logistischen KEP-Konzepte auf der „Letzten Meile“, sowie deren Subs-

titution durch Pedelec-Lastenfahräder mit einem innovativen logistischen Ansatz – dem Mikro-Depot-Konzept. Zweispurige Lastenfahräder haben eine Nutzlast von bis zu 200 kg und ein Ladevolumen von bis zu 2 m<sup>3</sup>, die arbeitstäglichen Tourenlängen betragen maximal 20 km; häufig sind aber bereits die Depots der KEP-Dienste mehr als 20 km Luftlinie von den Zustellgebieten entfernt. Dies erfordert eine Unterteilung der „Letzten Meile“ in eine „Vorletzte Meile“ (konsolidierte Sendungszustellung vom KEP-Depot mittels LKW in ein Mikro-Depot) und in eine „Allerletzte Meile“ mit Lastenfahrädern zum Kunden mittels zusätzlichem Sendungsumschlag im Mikro-Depot. Dies sorgt für einen logistischen Nachteilsausgleich zugunsten der Lastenfahräder, die hinsichtlich Ladevolumen und Nutzlast den motorisierten Transportern unterlegen sind. Mikro-Depots sind also an geeigneten Orten in den Zustellbezirken von KEP-Diensten abgestellte, mobile LKW-Wechselbrücken oder auch geeignete Immobilien, mit relativ geringen Anforderungen an die Nutzfläche. Mikro-Depots können kooperativ genutzt werden, wenn die Zustellung und Abholung von Sendungen in der Verantwortung des jeweiligen KEP-Dienstes bleibt und eine Vermischung von Sendungen im Mikro-Depot durch geeignete Maßnahmen ausgeschlossen ist.

Gerade die mobile Variante ist aus kommunaler Sicht nicht unproblematisch – diese erfordert eine Sondernutzung des öffentlichen Raumes in Nutzungskonkurrenz zu anderen Stakeholdern und ist aus städtebaulicher Sicht vielerorts nicht gern gesehen.

Die stationäre Variante kann wegen des relativ geringen Nutzflächenbedarfs zu einer städtebaulich nachhaltigen Umnutzung von leerstehenden gewerblichen Bestandsimmobilien, bestehenden Paketshops, geeigneten Parkhäusern und Tiefgaragen führen und hat das Potential, ein neues Marktsegment im Bereich der Logistikimmobilien zu definieren.

Der Einsatz von BEV (Battery Electric Vehicle) bei unverändertem logistischem Konzept erfüllt dabei nur die ökologischen Nachhaltigkeitsziele von Kommunen, KEP-Diensten und Handel vollständig. Für die Erreichung ökonomischer Ziele sind vollelektrische Zustellfahrzeuge entweder nicht relevant oder stellen eine Verschlechterung dar. Hinsichtlich der Erreichung der sozialen Ziele überwiegt insbesondere aus Sicht der Kommunen die Gesamtwirkung des Verkehrs, auch in stadträumlicher Sicht. Verkehrsfläche wird durch motorisierte Nutzfahrzeuge immer belegt, unabhängig von deren Antriebstechnologie. Städtische Verkehrsprobleme lassen sich nicht allein durch alternative Antriebe beheben und motorisierte Nutzfahrzeuge stellen im Gegensatz zu Lastenfahrädern potentielle Gefährdungen dar. Die Sicherheitsfrage entscheidet sich über das Fahrverhalten im Stadtverkehr, es gibt keine Unterscheidung zwischen verschiedenen Antriebsformen. Im Gegenteil: Gerade der nahezu geräuschlose elektrische Antrieb stellt eine neue Gefährdung für Fußgänger und Radfahrer dar. Das Mikro-Depot-Konzept mit dem Einsatz von Lastenfahrädern auf der „Allerletzten Meile“ im Stadtgebiet erfüllt hingegen alle ökologischen, ökonomischen und sozialen Nachhaltigkeitsziele von Kommunen, KEP-Diensten und Handel in sehr hohem Maße. Kritische ökonomische Erfolgsfaktoren sind das Angebot kostengünstiger, geeigneter Flächen oder Immobilien, die das Stadtbild nicht beeinträchtigen und die Frage, inwieweit eine Wirtschaftlichkeit des Mikro-Depot-Konzeptes durch den zusätzlichen Sendungsumschlag gegeben ist. Eine kooperative Nutzung der Mikro-Depots durch die KEP-Dienste erhöht die kommunale Akzeptanz.

Auf diesen Erkenntnissen aufbauend wurde in den folgenden Jahren untersucht, wie die BEV-Technologie und

das Mikro-Depot-Konzept für eine nachhaltige Stadtlogistik durch KEP-Dienste anwendbar sind. Wiederum veranlasst durch den Bundesverband Paket und Expresslogistik e. V. erfolgte eine umfangreiche Datenerhebung zum Mengengerüst der KEP-Branche in den drei größten deutschen Städten Berlin, Hamburg und München, eine Recherche zu marktverfügbaren BEV sowie darauf aufbauende Simulationen in der Szenario-Technik. Das Ergebnis war sehr eindeutig: Technisch ist der vollständige Einsatz von BEV bereits möglich, jedoch erst wirtschaftlich bei einem Preisniveau von mindestens 3,50 € bis 4,50 € pro Liter Dieseldieselkraftstoff, unter der Annahme einer neunjährigen Nutzungsdauer der Batterien und ohne Entsorgungskosten. Hinzu kommen weitere logistische Effizienzverluste gegenüber Dieselfahrzeugen und die hohen Einmalinvestitionen von bis zu 700.000 € pro Depot für Schnellladestationen, ohne Berücksichtigung von ggf. erforderlichen Hausanschlusserweiterungen oder Lademanagementsystemen zur temporären Begrenzung der Anschlussleistung. Zudem ist zu beachten, dass im Lebenszyklus eine positive Ökobilanz von BEV nur bei hundertprozentigem Betrieb mit Ökostrom entsteht, was zusätzliche Stromkosten verursachen kann. Unter diesen Voraussetzungen werden sich BEV am Markt bei den gegebenen Paketpreisen nicht schnell durchsetzen, lediglich Dieselfahrverbote (mit allen damit verbundenen negativen volkswirtschaftlichen Implikationen) und eine staatliche Subventionierung von Investitionen könnten für eine spürbare und zügige Einführung von BEV im urbanen Wirtschaftsverkehr sorgen<sup>3</sup>.

In dem Forschungsprojekt „Pilotprojekte zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg“ der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm hat das Projektteam eine Methodik entwickelt, um urbane Gebiete auf logistische und ökonomische Eignung für dieses innovative Konzept zu untersuchen. Mit dieser Methodik erfolgt eine Gebietsauswahl durch Sendungsstrukturanalyse unter Einbeziehung der Stadtgeographie mit Bestimmung der optimalen Mikro-Depot-Standorte. Das Projekt wird durch das Bayerische Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr gefördert unter Beteiligung der Projektpartner DPD Deutschland GmbH, General Logistics Systems Germany GmbH & Co. OHG, der Stadt Nürnberg, CNA e. V. und der IHK Nürnberg für Mittelfranken.

Unter konsequenter Anwendung dieser Methodik konnte im Zeitraum von April 2016 bis Oktober 2017 in dafür geeigneten Gebieten ein nahezu 1:1-Ersatz von Dieseltransportern durch zweispurige Pedelec-Lastenfahräder erreicht werden, bei sehr guter Wirtschaftlichkeit. In einem Feldversuch in Nürnberg wurden in zwei Mikro-Depot-Gebieten sieben Dieseltransporter durch acht Lastenfahräder ersetzt und die logistische Effizienz des Konzeptes sowie die errechnete Wirtschaftlichkeit unter praktischen Beweis gestellt. Dieser Feldversuch konnte bereits in einen dauerhaften operativen Zustellbetrieb überführt werden. Aufgrund des Erfolges erhielt das Projekt auch internationale Anerkennung: Der VCÖ-Mobilitätspreis Österreich des Jahres 2017 in der Kategorie „Internationales Vorbildprojekt“ ging an das „Pilotprojekt zur nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg“. Der VCÖ-Mobilitätspreis Österreich ist der landesweit größte Wettbewerb für nachhaltige Mobilität. Er wird im 26. Jahr verliehen vom VCÖ in Kooperation mit der ÖBB sowie dem österreichischen Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit) und dem Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (bmlfuw).

### 3. Ziele des Forschungsprojekts

Um die erarbeitete Methodik des Nürnberger Mikro-Depot-Projektes auch auf andere Städte und Marktsegmente auszuweiten, hat das Projektteam folgende erforderliche Voruntersuchungen durchgeführt:

#### 1. Die Übertragbarkeit des Nürnberger Mikro-Depot-Konzeptes auf andere Städte

Städtische Agglomerationsräume unterscheiden sich eklatant in ihrer Ausdehnung im Raum und spezifischen Lage zu anderen regionalen urbanen Räumen, in ihrer soziodemographischen Zusammensetzung und ihrer Lage zu naturräumlichen Gegebenheiten auf Basis ihrer historischen Gründungen. Dies bedeutet, dass ein speziell auf Nürnberg zugeschnittenes Logistikkonzept nicht eins zu eins auf andere Städte übertragen werden kann. Dennoch gibt es aus stadtgeographischer Perspektive Indikatoren und Kennwerte, die ausschlaggebend sind, ob und wo sich die innovative Zustellung durch das Lastenfahrrad bewähren kann. Die ökonomisch und ökologisch sinnvolle Zustellung kann beispielsweise anhand der Kriterien wie Einwohnerdichte, Haushalte pro km<sup>2</sup> oder der jeweiligen Höhenprofile der einzelnen Stadtteile abgeleitet werden.

Ziel ist es nun, universale Kenn- und Zielwerte herauszustellen, die es ermöglichen, die konzeptionelle Methodik leichter auf andere Städte zu übertragen. So zielte das Projektteam beispielsweise darauf ab, Werte zu erforschen, die als Indikator dienen, ob sich ein bestimmtes Wohngebiet für die Zustellung via Lastenfahrrad eignet oder nicht. Dabei ist es zudem förderlich, die Kennwerte anhand der gewonnenen Erkenntnisse in Nürnberg zu verifizieren und gegenüberzustellen. Des Weiteren hat das Team stadtspezifische Ausprägungsmöglichkeiten des eigentlichen Mikrodepots und die dafür erforderliche Logistikhardware untersucht, um auf Basis der Ergebnisse Antragstellungen für Drittmittel-Pilotprojekte ab Januar 2018 in Bayern in den Städten Fürth, Erlangen oder München unter Beteiligung von DPD und GLS zu tätigen. In Erlangen setzt das Team das Konzept ab September 2018 bis Dezember 2019 um. Zurzeit läuft ein Projektantrag zum Mikro-Depot-Konzept in Baden-Württemberg zusammen mit der TU Kaiserslautern und der Stadt Heidelberg, die geplante Laufzeit ist von Ende 2018 bis Mitte 2021.

#### 2. Mikro-Depot-Konzept für „Same Day Delivery“: Kooperation von KEP-Branche und Start-Ups

Wie bereits vor dem Pilotprojekt vermutet, bestätigten die bisherigen Forschungen, dass das Mikro-Depot-Konzept zusätzlich eine ideale Basis für innovative Geschäftsmodelle im Bereich der Same-Day-Delivery darstellt. Insbesondere dann, wenn logistische Quelle und Senke im gleichen Stadtgebiet liegen, ist die klassische Paketdienstleistung für Same-Day-Delivery ungeeignet. Dies haben Start-Ups wie z. B. tiramizoo erkannt und versuchen, Software-as-a-service Geschäftsmodelle, kombiniert mit lokalen Kurierdiensten, am Markt zu etablieren. Dabei werden zur Sendungskonsolidierung ebenfalls innerstädtische Umschlagsflächen benötigt. Hier bestehen mögliche Synergien mit dem Mikro-Depot-Konzept der KEP-Branche unter der Voraussetzung kompatibler und kooperativer Logistikkonzepte und Geschäftsmodelle. Eines der Ziele der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler war, im Rahmen der Vorlaufforschung darauf aufbauend Antragstellungen für Drittmittel-Pilotprojekte zu erarbeiten, um beginnend ab Juli 2017 in Bayern in den Städten Nürnberg, Fürth, Erlangen oder München unter Beteiligung von DPD und tiramizoo durchführen zu können.

#### 4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Zu 1. Die Übertragbarkeit des Nürnberger Mikro-Depot-Konzeptes auf andere Städte:

Wie in der Vorhabenbeschreibung bereits erwähnt, war es das Ziel, allgemeingültige Kennwerte abzuleiten, um die Übertragbarkeit des Mikro-Depot-Konzeptes auf andere deutsche Städte zu garantieren. Grundsätzlich ist es hierbei notwendig, einen zweistufigen Ansatz zu wählen, bei dem sowohl auf makroskopischer als auch mikroskopischer Ebene die städtischen Gebiete analysiert werden, da beide Maßstäbe allein betrachtet nicht zielführend wären. Die makroskopische Analyse bezog sich dabei sowohl auf die genauere Betrachtung der städtischen Gebiete als auch auf die Vereinbarkeit von der Einwohnerstruktur innerhalb der einzelnen Postleitzahlengebiete mit der Sendungsstruktur der jeweiligen KEP-Dienstleister. So betrachtete das Projektteam in der Analyse nicht nur die gegebenen Strukturen der städtischen Gesellschaft, sondern verschmolz darüber hinaus das Sendungsaufkommen des KEP-Dienstleisters mit den aus stadtgeographischer Sicht geeigneten Gebieten. Damit wurden die Sendungsdaten nach der Geokodierung in einem ersten Schritt innerhalb des städtischen Gebiets visualisiert und auf Ebene der Postleitzahlen zugeordnet und diese als Bezugsrahmen der Analyse gesetzt. Dabei war zu beachten, dass es nur teilweise ausreichend ist, diesen Bezugsrahmen auf der Ebene der Postleitzahlen umzusetzen, da kleinere Städte eine im Verhältnis geringere Anzahl an Postleitzahlengebiete pro Einwohnerzahl besitzen. Beispielhaft kann hier Nürnberg und Ingolstadt aufgeführt werden. Nürnberg hat ungefähr 500.000 Einwohner, die auf 30 Postleitzahlengebiete aufgeteilt sind, wohingegen Ingolstadt bei ungefähr 130.000 Einwohner nur 5 Postleitzahlengebiete umfasst. Doch betrachtet man nun die Fläche der beiden Städte, so fällt auf, dass sich Nürnberg auf einem Gebiet von 186 km<sup>2</sup> und Ingolstadt auf einem Gebiet von 133 km<sup>2</sup> erstrecken. Diese Diskrepanz zwischen Einwohnerdichte innerhalb der Postleitzahlengebiete macht die Vergleichbarkeit nahezu unmöglich, da die Postleitzahlengebiete so unterschiedlich groß sind. Daraus würde folgen, dass sich, die gleiche Anzahl von Sendungen pro Einwohner vorausgesetzt, eine viel geringe Anzahl an Stopps pro km<sup>2</sup> innerhalb des Bezugsrahmens Postleitzahl ergeben würde. Um diese Problematik zu beheben, müssen Mikrozellen geschaffen werden, die bestehende Postleitzahlen nochmals weiter untergliedern, um eine annähernde Vergleichbarkeit herzustellen. Dennoch darf nicht vergessen werden, dass auch nach der neuen Aufteilung in Mikrozellen, der Bezugsrahmen zu anderen Städten nicht automatisch gegeben ist. Bei entsprechender Ausprägung und Größe der Postleitzahlengebiete kann ein Postleitzahlengebiet auch als Mikrozone fungieren.

Methodisch ist dies die sinnvollste Art mit der Problematik umzugehen, wenngleich sich die Umsetzung im operativen Betrieb etwas schwieriger gestaltet, da auch auf Basis von Postleitzahlengebiete diese an Systempartner verteilt werden. Eine weitere Schwierigkeit dieser Konzeption ist, dass das Vorsortieren der Pakete im Depot nach Postleitzahlen viel leichter umzusetzen ist als auf der Basis neu generierter Mikrozellen. Bei den Mikrozellen müsste bei der Vorsortierung erst entschieden werden, ob sich das entsprechende Paket innerhalb der Mikrozone befindet oder eben nicht. Hingegen muss an dieser Stelle nochmal herausgestellt werden, dass das Potenzial bestimmter Gebiete und Regionen durch die Schaffung von Mikrozellen um ein Vielfaches gesteigert werden kann. Bei der Beibehaltung der bestehenden Postleitzahlen in kleineren Städten würden die Werte weit unter den ausgewiesenen Kennwerten für allgemeingültige Aussagen liegen. In Folge dessen würde die Analyse ergeben, dass dort die Etablierung eines Mikro-Depot-Konzeptes unrentabel wäre, wenngleich dies gar nicht stimmt, sondern nur der falsche Bezugsrahmen vorliegt.

Da die Postleitzahlen allesamt andere Ausmaße und eine ganz spezifische Einwohnerdichte besitzen, werden nun in der Folge diese Kriterien miteinander in Verbindung gebracht. Die wichtigste Größe, die Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung, ist die Anzahl der Stopps pro km<sup>2</sup>. Diese ist aus rein konzeptioneller Hinsicht eine wegweisende Kenngröße, da die Anzahl der Sendungen innerhalb eines Gebiets zwar auch einen Hinweis gibt, doch geht durch diese Größe die Kundenstruktur des beliefernden KEP-Dienstleisters nicht so eindeutig hervor. Bei der Untersuchung dieser Kenngröße wird das Verhältnis der B2B- (business-to-business) und B2C- (business-to-customer) Sendungen nicht so offensichtlich, da die Anzahl der Sendungen keinerlei Aufschluss auf die Anzahl der Kunden gibt. So können auch Gebiete eine hohe Anzahl von Sendungen erhalten, die in der Summe wenige Stopps aufweisen, diese aber mit einer Vielzahl an Sendungen beliefert werden. Ein Beispiel wäre ein Gewerbegebiet, in dem der Elektrogroßhändler neben dem Bekleidungsgeschäft und dem Autohändler täglich eine große Anzahl an Sendungen erhält, sodass bei der Betrachtung der Anzahl der Sendungen dieses Gebiet als vielversprechend gilt. Bei genauerer Analyse fällt aber auf, dass nur insgesamt sehr wenige Kunden beliefert werden. Die Gründe, warum diese Gebiete gerade nicht für das Lastenfahrrad geeignet sind, liegen auf der Hand. So haben gerade Sendungen für gewerbliche Zwecke in den meisten Fällen ein größeres Volumen und Gewicht, als Sendungen, die eine Privatperson an ihre Adresse liefern lässt. Zudem sind Wohngebiete auch für die konventionelle Belieferung eher ungeeignet, da die urbanen eng bebauten Gebiete für den Transporter eher suboptimal zu befahren sind. Für das Lastenfahrrad indes ist die städtische Bebauung kein Hindernis, ebenso wie die Parkplatzsuche, die gerade in Wohngebieten die Zusteller in Transportern vor eine Herausforderung stellt.

Bei der mikroskopischen Betrachtung analysierten die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die zuvor in der makroskopischen Analyse erarbeiteten Mikrozellstrukturen näher. Die makroskopische Betrachtung liefert ein Bild der Gesamtheit der Stadt und ihrer Postleitzahlen bzw. Mikrozellstrukturen. Dabei wird auch bewertet, ob Sendungen in der Mikrozelle eine regelmäßige Verteilung aufweisen, sodass keine Lücken bei der Abbildung von Straßenzügen entstehen. Diese Lücken würden die Berechnung beim mikroskopischen Ansatz verfälschen, können aber durch die Iteration mit einem Routenplanungsprogramm reduziert werden. Die Iterationen zwischen der Routenplanung und der mikroskopischen Betrachtung sind sehr zeitintensiv, deshalb sollte bereits im Schritt zuvor versucht werden, durch geeignete Korrekturwerte die Anzahl der Iterationsschritte zu reduzieren. Die Werte für die Korrektur kann die makroskopische Analyse in einer ausreichenden Genauigkeit liefern, sodass die Iterationen zwischen der mikroskopischen Betrachtung und Routenplanung nahezu vollständig vermieden werden können.

In der mikroskopischen Analyse führte das Projektteam über die Straßenzüge anhand ihres Sendungsaufkommens und dem gewählten Transportmittel eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durch. Elementar war in diesem Kontext die Tatsache, dass reale Sendungsdaten in einer Big-Data-Analyse auch hinsichtlich des Gewichts und der Volumina bewertet werden. Hierbei ergibt sich für jeden Straßenzug eine Kostenkurve, die es ermöglicht, das ökonomischste Verkehrsmittel zu erfassen. In einem anschließenden Schritt wurden die Kostenkurven der Straßenzüge zusammengefasst und entsprechend der Wirtschaftlichkeit auf den Transporter und das Lastenfahrrad verteilt. Dabei wurde der Begriff der logistischen Senke definiert. Straßenzüge, in denen das Sendungsaufkom-

men nicht ökonomisch mit dem Lastenfahrrad ausgeliefert werden kann, werden als logistische Senke definiert. Diese werden für eine Belieferung mit dem Lastenfahrrad ausgeschlossen. Das impliziert, dass im letzten Schritt der mikroskopischen Betrachtung das Gebiet in der Gesamtheit ökonomisch bewertet werden muss. Hierbei ergibt sich, ob das Lastenfahrrad oder der konventionelle Transporter ökonomischer sind.

Stellt man nun die Kennwerte der Städte Nürnberg und Ingolstadt in geeigneten Gebieten gegenüber, so stellt man folgendes fest: In dem in Nürnberg auf das Lastenfahrrad umgestellten Gebiet kann über eine Zeitreihenanalyse ermittelt werden, dass im Durchschnitt 131 Stopps pro km<sup>2</sup> pro Tag zu zählen sind. Dabei handelt es sich um ein Gebiet mit einer Einwohnerdichte von 20.778 Einwohnern pro km<sup>2</sup>. Diese eine Postleitzahl ist dabei nicht das gesamte Gebiet, das zusammenhängend vom Mikrodepotstandort aus bedient wird, sondern wurde nur als beispielhaftes Szenario näher ausgeführt. In Ingolstadt, das nur theoretisch untersucht wurde, liegen die durchschnittlichen Stopps pro km<sup>2</sup> pro Tag nur bei 32. Diese Zahl wirkt im Vergleich erschreckend niedrig und in Nürnberg würde ein solches Gebiet nicht einmal weiter untersucht werden, da das Potenzial als marginal einzustufen erscheint. In dem besagten Ingolstädter Gebiet liegt die Einwohnerdichte allerdings auch nur bei 4.647 Einwohnern pro km<sup>2</sup>.

Und dennoch ergibt die Analyse der Gebiete in Ingolstadt, dass das Mikro-Depot-Konzept erfolgreich wäre. Dies wirkt auf den ersten Blick vollkommen unverständlich und soll deswegen an dieser Stelle detaillierter erläutert werden. Die Komplexität der Gesamthematik führt zu diesen augenscheinlich diametral entgegengesetzten Aussagen, da immer das logistische Gesamtsystem für die Wirtschaftlichkeitsberechnung betrachtet wird. So ist es schon einmal entscheidend, wie weit der Ort, der für die Etablierung des Mikro-Depot-Konzeptes in Frage kommt, von dem Hauptdepot entfernt ist. Das Beispiel Ingolstadt steht dafür sinnbildlich, da in unserem Beispiel die Stadt Ingolstadt von dem untersuchten KEP-Dienstleister von Nürnberg aus beliefert wird. So ist die Basis der Berechnung eine vollkommen andere als in der Stadt Nürnberg selbst, wo auch das Hauptdepot seinen Sitz hat. So spielt bei der Betrachtung von Ingolstadt die Anzahl der Transporter, die eingesetzt werden müssen, eine viel größere Rolle als beispielsweise in Nürnberg. Auch wenn in Ingolstadt nicht so viele Sendungen pro km<sup>2</sup> auszuliefern sind, ist der Effekt, einen Transporter durch Lastenfahrräder zu ersetzen, ein viel größerer als in Städten, die nahe dem Hauptdepot gelegen sind.

Zudem ist ein weiterer entscheidender Faktor, wie hoch der Anteil der Sendungen, die mit dem Lastenfahrrad zugestellt werden können (Analyse basierend auf Gewicht, Volumen, Häufigkeit etc.), im Verhältnis zu der gesamten Sendungsanzahl ist. So kann ein Gebiet mit wenig Sendungen, die aber allesamt mit dem Lastenfahrrad ausgeliefert werden können, ökonomisch wertvoller sein, als ein Gebiet, das augenscheinlich eine viel größere Anzahl an Sendungen oder Stopps pro km<sup>2</sup> aufweist. Dies ist auch ein entscheidender Faktor, warum es schwierig ist, wenn nicht gar unmöglich, einen Kennwert auszuweisen, der ein Gebiet als wirtschaftlich rentabel ausweist.

Die Bezugsgrößen erschweren durch die unterschiedlichen räumlichen Ausprägungen von Postleitzahlengebieten und die Lage der Postleitzahlengebiete zueinander die Bewertung über universelle Kennzahlen erheblich. So stelle man sich vor, dass zwei aneinandergrenzende Postleitzahlengebiete an genau diesem Übergang von Postleitzahlgebiet zu Postleitzahlgebiet eine hohe Anzahl an Stopps pro km<sup>2</sup> aufweist. Zudem liegen beide Wohngebiete aber in weitläufigen Postleitzahlgebieten, die ansonsten eine eher geringe Anzahl an Stopps pro km<sup>2</sup> aufweisen. In der Betrachtung des Postleitzahlgebiets für sich selbst oder bei dem Versuch, Kennwerte abzu-

lesen, lassen sich in beiden Gebieten eine relativ niedrige Zahl an Stopps pro km<sup>2</sup> vorfinden. Dennoch bietet es sich vielleicht an, gerade diesen Übergangsbereich der Postleitzahlengebiete mit dem Lastenfahrrad auf Basis des Mikro-Depot-Konzeptes zu bedienen.

Universelle Kennwerte auszuweisen, hätte einen großen Vorteil bezüglich der Zeitintensivität für die Analyse zur Ausweisung weiterer Gebiete. Da aber, wie oben beschrieben, so viele Faktoren für die erfolgreiche Untersuchung entscheidend sind und alle Städte und städtischen Strukturen so unterschiedlich sind, ist es sehr schwierig, einheitliche Kenngrößen auszuweisen. Weitere Forschung ist bezüglich dieser Problematik zwingend notwendig.

Zu 2. Mikro-Depot-Konzept für „Same Day Delivery“: Kooperation von KEP-Branche und Start-Ups:

Weil die horizontale Kooperation unter KEP-Dienstleistungsunternehmen aus strategischen Gründen schwierig umzusetzen ist, hat das Projektteam das gesamte Handlungsfeld der möglichen Mehrwertdienstleistungen mit dem Mikrodepot-Konzept über die KEP-Branche hinaus betrachtet.

Neben dem Same-day-delivery Anbieter tiramizoo, soll der Pharmagroßhändler Sanacorp in den praktischen Betrieb der Mikrodepot-Konzeption eingebunden werden.

Das Ziel ist, im Beispiel Nürnberg konzeptionelle Ideen und Analysen durchzuführen, die die Nutzung der Mikrodepots von DPD durch Sanacorp und anders herum überprüfen und deren Mehrwert ermitteln. Hierzu hat das Projektteam bereits Analysen und Experteninterviews durchgeführt, die ergaben, dass die Nutzung der DPD-Depots durch Sanacorp nicht Gegenstand der Forschung werden kann, da die Pharmaindustrie nach den sog. GDP-Vorgaben (Good Delivery Practice) handeln muss. Dies beinhaltet beispielsweise, dass die Medikamente nie die Kühlkette verlassen dürfen und diese immer in bestimmten Temperaturbereichen zu lagern sind. Dies hätte weitere Auswirkungen auf die bestehenden Mikrodepots von DPD, was aufgrund dieser Auflagen nicht umgesetzt werden kann. Die Nutzung der Sanacorp-Depots von der KEP-Branche ist aber weiterhin Gegenstand der Forschung.



Das Mikro-Depot-Konzept in Nürnberg

## 5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Im Ergebnis des Vorlaufforschungsprojektes hat das Projektteam zwei Forschungsprojekte ausformuliert, Projektpartner akquiriert und Fördermittel beantragt:

- Projekt „MikroLog“ in Berlin: Wirkpotenziale, Anwendungsmöglichkeiten und Rahmenbedingungen für die Nutzung von Lastenrädern und Mikro-Depots in der urbanen Logistik. Zur Entscheidung vorgelegt beim Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) „Förderung von nicht investiven Maßnahmen zur Umsetzung des Nationalen Radverkehrsplans“, Koordinator: LNC LogisticNetwork Consultants GmbH

Durch Initiative und Moderation von DIN e. V. und LNC GmbH wurden die wichtigsten deutschen KEP-Dienstleister zusammen mit der Stadt Berlin „an einen Tisch gebracht“, um machbare Alternativen zum heutigen Vorgehen bei der Sendungsverteilung zu identifizieren. Im Rahmen dieser Initiative haben sich die KEP-Dienstleister erstmalig zu einem gemeinsamen Vorgehen bekannt, was für sich genommen schon einen beachtlichen Erfolg darstellt. Dieses gemeinsame Vorgehen soll in einem ersten Schritt im Projekt KoMoDo in Berlin praktisch umgesetzt werden. Es liegt hier also erstmalig eine seitens der Städte und Forschungseinrichtungen lange geforderte Zusammenarbeit mit erheblichem Nutzenpotenzial vor. Nunmehr ist es die Aufgabe, durch gute Moderation, fachliche Analyse und mit einer abgestimmten Außendarstellung diesen Ansatz zu einem Erfolg für alle Beteiligten zu machen und somit eine Übertragbarkeit des Pilotprojekts zu gewährleisten. Auf diese Weise wird dieses

vielversprechende Kooperationskonzept nachhaltig gelebt und weiterentwickelt. Hier setzt das Vorhaben MikroLog mit den Projektpartnern LNC GmbH, DIN e. V., TH Nürnberg und InfraMobility GmbH an. Das Ziel ist, durch das Vorhaben eine hohe Öffentlichkeitswirksamkeit, v.a. in der Fachöffentlichkeit, sowie eine Professionalisierung der Lastenradbranche sowie eine Stärkung und Verstetigung des Lastenradeinsatzes zu fördern.

Das Vorhaben „KoMoDo – Kooperative Mikro-Depots für den nachhaltigen Einsatz von Lastenrädern in Berlin“ (in Beantragung) stellt einen wichtigen Bezug zum Vorhaben MikroLog dar. Innerhalb des Vorhabens „KoMoDo“ ist das Ziel, für zentrale urbane Bereiche den nachhaltigen Einsatz von Lastenrädern für die Feinverteilung zu erproben. Die dazu notwendigen Mikro-Depots sollen in Berlin aufgebaut und für die kooperative Nutzung der KEP-Branche zur Verfügung gestellt werden. Dabei sind die Mikro-Depots möglichst nah an den Empfängern zu platzieren, um effiziente lokale Verteiltouren mit Lastenrädern zu ermöglichen. Das Pilotvorhaben soll öffentlichkeitswirksam in Berlin umgesetzt werden.

Das hier dargestellte Begleitprojekt „MikroLog“ fokussiert darauf, die wichtigen Fragestellungen für den nachhaltigen Einsatz von Mikro-Depots und Lastenrädern beantworten zu können. Das erste Mal suchen die größten Paketdienstleister gemeinsam nach Lösungsansätzen für eine stadtverträgliche Sendungsverteilung. Die Chance, aus diesem Gemeinschaftsvorhaben Erkenntnisse zu gewinnen und diese in weiteren Pilotanwendungen umzusetzen, wird vergeben, wenn keine umfassende System- und Wirkungsanalyse stattfindet, die Grundlage für das weitere Ausrollen des Konzeptes ist. „MikroLog“ ist aber nicht exklusiv fokussiert auf „KoMoDo“, sondern betrachtet alle derzeit laufenden und vergleichbaren Versuchsanwendungen sowie abgeschlossene Projekte, deren Ergebnisse bereits vorliegen. Bei den laufenden Vorhaben sind insbesondere drei Projekte in Nürnberg zu nennen. Das „Pilotprojekt zur Nachhaltigen Stadtlogistik durch KEP-Dienste mit dem Mikro-Depot-Konzept auf dem Gebiet der Stadt Nürnberg“ sowie „LEV@KEP“, mit dem Ziel der Entwicklung und des Tests eines optimalen Pedelec-Lastenfahrrades für den professionellen Logistikeinsatz mit dem Mikro-Depot-Konzept. Zudem „VALUE@SERVICE“ mit dem Ziel der Ausweitung des Mikro-Depot-Konzeptes über die KEP-Branche hinaus, wie z. B. Apothekenbelieferungen und Same-Day-Delivery. Die Erkenntnisse und das Know-how aus diesen drei Projekten werden in das beantragte Vorhaben einfließen.

- Projekt „VALUE@SERVICE“ in Nürnberg: „Nachhaltige logistische Mehrwertdienste für den stationären Einzelhandel und für Apotheken durch kooperative Ressourcennutzung in logistischen Netzwerken“. Fördermittel bereits bewilligt durch die Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr, Projektbeginn im Juli 2017

Um die Nachhaltigkeitspotentiale des Mikro-Depot-Konzeptes noch stärker auszuschöpfen, wurden nun sowohl mit dem Projektpartner DPD als auch mit den Unternehmen tiramizoo und Sanacorp auf dem Mikro-Depot-Konzept aufbauende, innovative und nachhaltige Logistikprozesse mit kooperativer Ressourcennutzung diskutiert. Alle drei Unternehmen stehen aufgrund ihres Markterfolges repräsentativ für ihre jeweilige Branche:

DPD als führender Paketdienstleister (KEP-Dienst); DPD betreibt ein eigenes logistisches Netzwerk in der KEP-Branche und kooperiert bereits mit tiramizoo.

tiramizoo als 4PL-Logistikunternehmen im Bereich Same-Day-Delivery; tiramizoo bietet dem Onlinehandel und dem stationären Einzelhandel und seinen Kunden flächendeckend taggleiche Lieferungen innerhalb eines bestimmten Gebietes an, oder Lieferungen innerhalb eines vom Kunden ausgewählten Zeitfensters am nächsten Tag.

Sanacorp als Großhändler für Pharmaerzeugnisse; Sanacorp versorgt mit einem eigenen flächendeckenden Same-Day-Logistiknetzwerk Apotheken mit Pharmaprodukten.

Derzeit sind alle drei Unternehmen mit ihren eigenen bzw. beauftragten logistischen Netzwerken unabhängig voneinander Bestandteil des konventionellen urbanen Wirtschaftsverkehrs mit allen bekannten negativen Implikationen dieselmotorisierter Verkehre. Alle drei Unternehmen benötigen für ihr Geschäftsmodell einen auch in Zukunft restriktionsfreien verkehrlichen Zugang zu ihren Kunden im urbanen Raum und sind darum sehr interessiert an ökologisch, ökonomisch und verkehrlich nachhaltigen Logistikkonzepten, insbesondere auf der „Letzten Meile“, aber auch im gesamten Netzwerk. Um eine nachhaltige kooperative Ressourcennutzung in den logistischen Netzwerken der drei Branchen zu ermöglichen, müssen Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den logistischen Anforderungen und Sendungsstrukturen erforscht werden.

Im Ergebnis abgestimmter kooperativer Nutzungskonzepte können die Unternehmen vorhandene mobile und stationäre Netzwerkressourcen effizienter nutzen, Pharmasendungen unter Beachtung der GDP-Vorgaben mit Lastenfahrradkurieren zu Apotheken und zu Patienten liefern und den stationären Einzelhandel mit nachhaltiger Same-Day-Delivery stärken und attraktiver machen. Zudem können sie insgesamt die wirtschaftlichen Vorteile des Mikro-Depot-Konzeptes infolge Fixkostendegression verbessern und die nachhaltige und emissionsfreie Zustellung via Lastenräder ausbauen.

Die konzeptionellen Ansätze des KEP-Mikrodepot-Konzeptes bei DPD und der Same-Day-Delivery von tiramizoo und Sanacorp lassen sich bei kooperativer Nutzung von Netzwerkstrukturen und die dadurch entstehenden Synergieeffekte in nachhaltiger und verkehrsreduzierender Art und Weise verknüpfen und zusätzlich zu einer neuartigen Auftragsabwicklung der Next-Day-Delivery vom stationären Einzelhandel zu überregionalen B2C-Kunden verbinden. Das Projekt lässt sich grob in folgende Handlungsfelder einteilen:

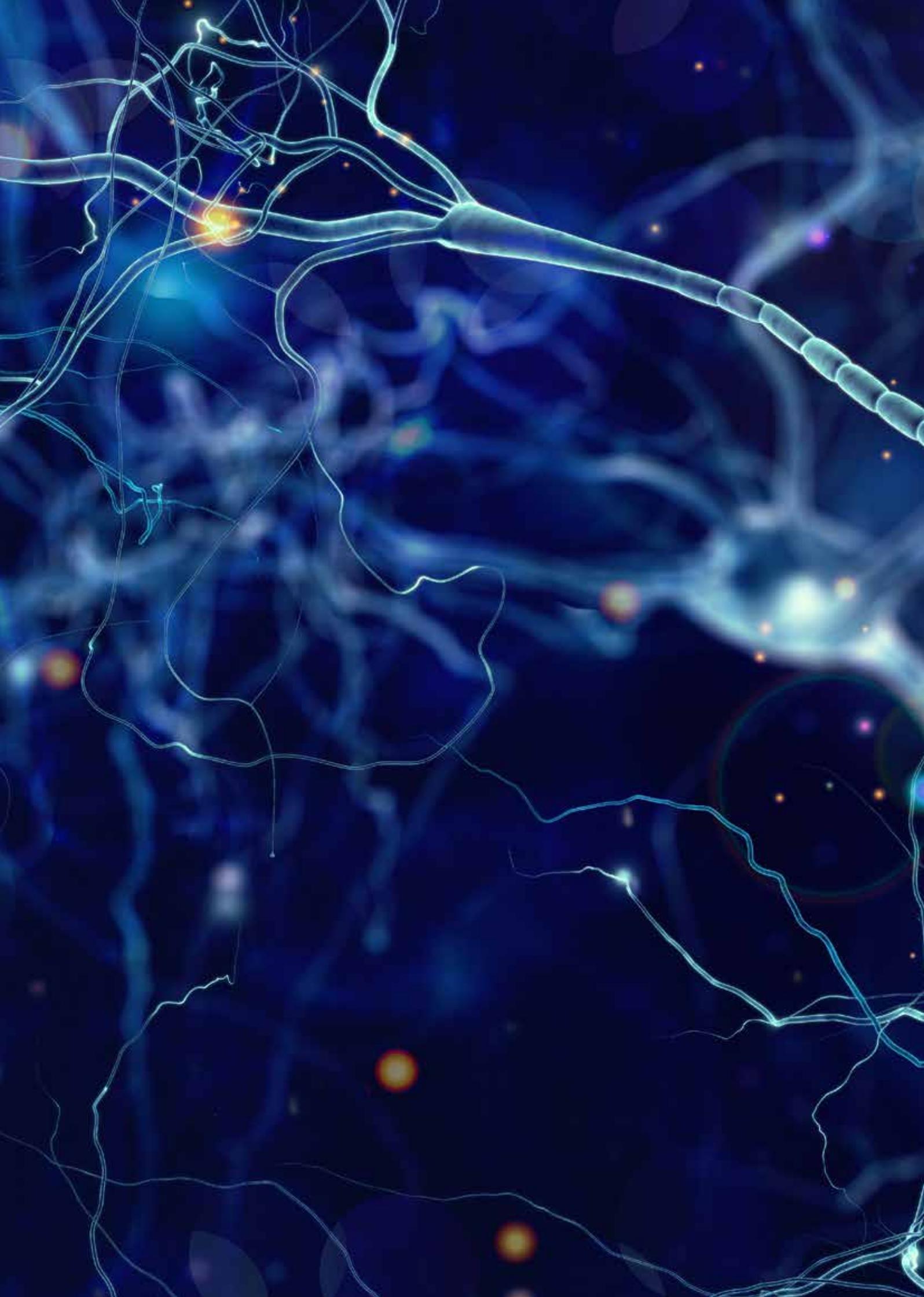
Handlungsfeld 1: Same-Day-Delivery für Einzelhandel und Apotheken mit dem Mikro-Depot-Konzept

Handlungsfeld 2: Next-Day-Delivery vom Einzelhandel zu überregionalen Kunden unter Nutzung des Mikro-Depot-Konzeptes

Handlungsfeld 3: Retourenabwicklung mit dem Mikro-Depot-Konzept

Das Projekt „VALUE@SERVICE“ hat eine Projektlaufzeit von Juli 2017 bis Dezember 2019.

- 
- <sup>1</sup> Vgl. BOGDANSKI, R.: Innovationen auf der Letzten Meile – Bewertung der Chancen für eine Nachhaltige Stadtlogistik von morgen, Eigenverlag des BIEK e.V. Berlin 2017
  - <sup>2</sup> Vgl. BOGDANSKI, R.: Nachhaltige Stadtlogistik durch KEP-Dienste – Studie über die Möglichkeiten und notwendigen Rahmenbedingungen am Beispiel der Städte Nürnberg und Frankfurt am Main, Eigenverlag des BIEK e.V., Berlin 2015
  - <sup>3</sup> Vgl. BOGDANSKI, R.: Innovationen auf der Letzten Meile – Bewertung der Chancen für eine Nachhaltige Stadtlogistik von morgen, Eigenverlag des BIEK e.V. Berlin 2017







IKON - Intelligente Betriebsführung  
durch Kommunikation von Produktion  
und Gebäudetechnik mit einem  
künstlichen neuronalen Netz

IKON - Intelligent Communication and Operation of Buildings  
by utilizing Artificial Neural Networks

Prof. Dr.-Ing. Arno Dentel  
Kutralingam Kandasamy, M. Sc.  
Fakultät Maschinenbau & Versorgungstechnik  
Technische Hochschule Nürnberg

## Essential project goals

Modelling the thermal behavior of a building is quite challenging not only because of the complications in energy transfer but also because of the uncertainties such as weather, occupancy and so on. The aim of this project is to build an Artificial Neural Network (ANN) model that is able to predict the thermal load of a building based on its historical data. This would lead to incorporate such ANN models into the control process of buildings and building systems where the energy consumption could be optimized.

### 1. Project details

Funding	30.000 Euro
Duration	June – December 2017
Faculty / Institute / Competence center	Institute for Energy and Building / Energy Campus Nürnberg (EnCN)
Project Management	Prof. Dr.-Ing. Arno Dentel
Contact details	E-Mail: arno.dentel@th-nuernberg.de

### 2. Background and goal of the research

As the modern control and operation strategies for buildings and building components develop, it is inevitable to be able predict the energy demand of the future. Almost every modern day control and optimization strategies rely on such prediction data. More in particular, predicting the thermal load of a building plays a vital role towards making buildings energy efficient as they contribute to about 40% of global energy consumption.

There are various methods to predict the thermal load of a building. Classical modelling approaches use equations describing the physical behavior of a system to predict the output. Modern day data-driven approaches take advantage of the historical data from similar situations and use them with regression models to find appropriate relationship between the input and output.

#### *Classical approach:*

To model a building or a component using classical modelling approach all the internal details such as construction properties should be available. The energy transfer within the building as well as with the environment is modelled with the help of thermal resistances and capacitances. An example of such resistance-capacitance model of a building is shown below in Figure 1.

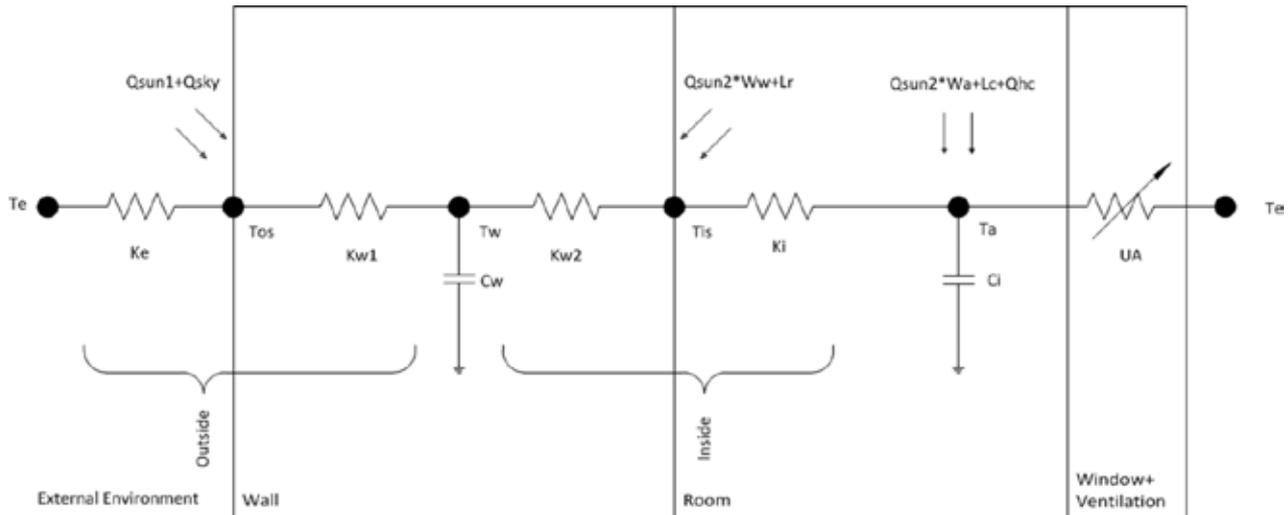


Figure 1 Classical modelling approach: RC model of a building

The complexity of such models depend on the chosen precision levels. Every constant or parameter associated with the model need to be calculated based on technical data. The higher the number of parameters are, the higher the source of error is [1].

#### Data-driven approach:

In contrast to classical modelling approach, data-driven approach creates a model describing the thermal behavior of a building based on available historical. Hence statistical and machine learning methods require collecting such historical data. These methods derive relationship between the thermal load of the building, and influential parameters such as weather information and room thermal conditions [2].

Machine learning approaches are a subset of such data-driven methods. They are used to devise complex models as well as prediction algorithms. Among the various methods available under the concept of machine learning, Artificial Neural Networks (ANNs) are one kind and they are inspired by the behavior of biological neural networks and how human brain processes information.

The goal of this research is to develop a model that can predict the thermal load of a building within acceptable limits based on data developed by a simulation of a real building. This would give a hands-on experience in learning about how ANN could be applied to forecast load of an actual building. Thus ultimately helping to develop control strategies of the building system and its components to improve energy efficiency.

### 3. Introduction to Artificial Neural Networks

As the name stands, artificial neurons are computational model inspired by natural neurons in human brain. Natural neurons receive signals through synapses located on the dendrites or membrane of the neuron. When the signals received are strong enough (surpass a certain threshold), the neuron is activated and emits a signal through the axon. This signal might be sent to another synapse, and might activate other neurons [3].

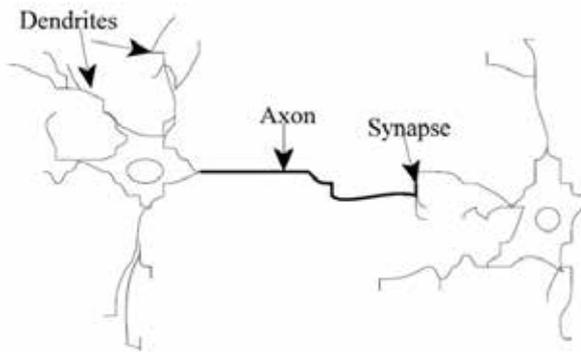


Figure 2 Natural neurons [3]

Artificial Neural Networks (ANNs) are composed of simple elements or neurons operating in parallel similar to the biological network. Each neuron receives an input signal multiplied by a weight and then activated by an activation function. The ANNs can be trained with particular set of inputs such that they adjust the weights between the connections so that they can perform a certain task [4].

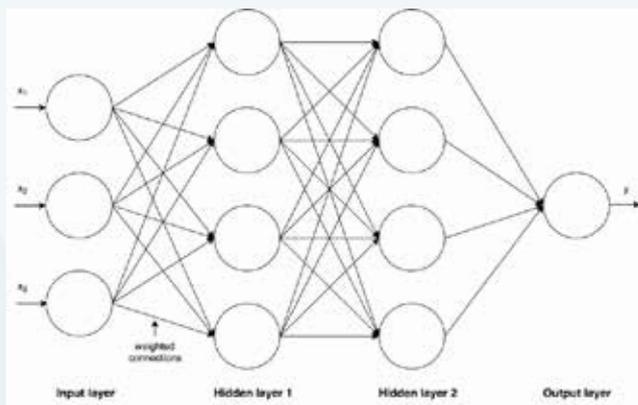


Figure 3 Artificial Neural Network

In general, ANNs can be visualized as shown in Figure 3. They usually consist of one input and output layers and a number of hidden layers. The input layer takes all the inputs directly and multiplies a weight to it before forwarding it to the subsequent hidden layers. The main function of the hidden layer is to use the training algorithm to find a relationship between inputs and outputs by changing the weights and biases. Every layer has specified number of neurons and each neuron has weighted inputs coming into it and an activation function that fires the neuron hence connecting it to subsequent layer of the network. Most commonly three activation functions are widely preferred. Inputs to these functions are the weighted sum of the network inputs, possibly with or without biases depending on the application.

If  $x_1, x_2, \dots, x_n$  are inputs the weighted sum would be,  $v = w_1x_1 + w_2x_2 + \dots + w_nx_n$  And if output of a neuron is called  $y$  then,  $y = f(v)$

Here  $f$  is the activation function. Commonly used activation functions are,

Linear function	$f(v) = a + v$ where $a$ is a bias
Step function	$f(v) = \begin{cases} 1 & \text{if } v \geq a \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$
Sigmoid function	$f(v) = \frac{1}{1+e^{-v}}$

Table 1 Commonly used activation functions

#### 4. Application of ANN to predict thermal load

One of the important requirements to be able to use ANN is to have sufficient amount of data to train and test the network for the application area. This is challenging if measured historical data are the only choice but the aim of this project is to test the abilities and accuracy of ANN in the field of buildings and building components. Taking advantage of simulation tools that has the ability to simulate actual buildings and its components with the original construction properties reduces the problem of data collection to a larger extent. TRNSYS [5] is such a software used extensively to simulate transient systems. A simple room model according to VDI 6007 [6] standard is built on TRNSYS and simulated to record data.

Building model:

The room geometry is shown in Figure 4 and it is in accordance with the standard VDI 6007. The VDI room model emulates the thermal behavior of the building components with sufficient precision by considering convective and radiative heat exchanges (both internal and external) and by taking into account actual wall structure.

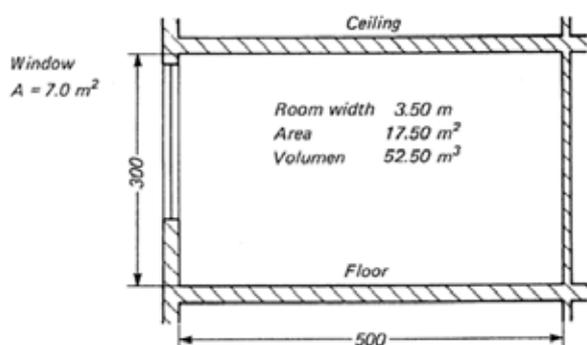


Figure 4 VDI room geometry [6]

Weather data:

This model on TRNSYS accepts weather data according Test Reference Year (TRY) standard [7]. Versatile weather data for various locations across Germany is used to simulate the building under various conditions. The model is equipped with an ideal heating or cooling meaning that it would always achieve the defined set-point thermal conditions of the room. The simulation environment in TRNSYS is visualized as shown in Figure 5.

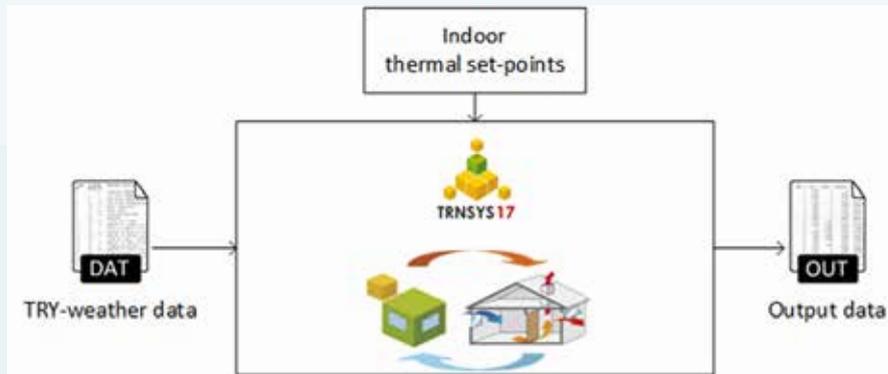


Figure 5 TRNSYS simulation environment

Next step is building the network that accepts certain number of inputs and predict the thermal load of the aforementioned model. Among the various types of neural network architecture available, feed-forward neural network (FNN) is considered suitable to predict the hourly thermal load based on historical data.

The network model is created on MATLAB environment. Feed-forward neural network is simple and one-directional. The output of one layer is forwarded to the layer next to it and has no influence on the current layer or the ones before. This type of neural network is generally used to find relationship between inputs and outputs. The representation shown in Figure 3 is a feed-forward network and the overview of the network created on MATLAB is shown below.

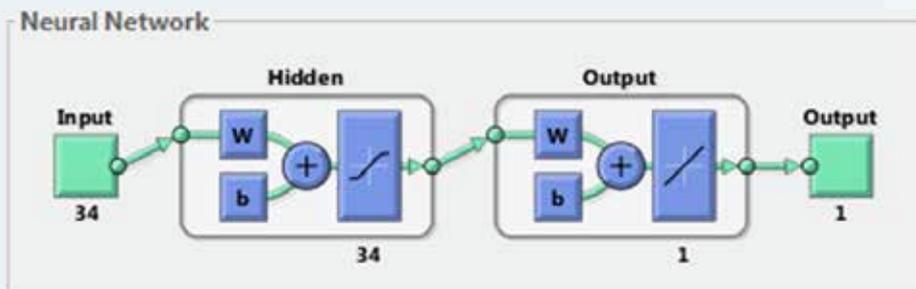


Figure 6 MATLAB overview of feed-forward neural network

The table below summarizes the list of parameters in the training data. The weather and building thermal data correspond to the previous hour, same hour previous day and same hour previous week. This way the network has the opportunity to learn the trend of how the energy transfer happens.

Time data	Weather data	Building thermal data
Day of the year	Ambient temperature	Room operating temperature
Day of the week	Global radiation on the horizontal surface	Temperature of the building surfaces
Hour of the day		Thermal load

Table 2 Training data

The network is trained with Levenberg-Marquardt backpropagation algorithm where the neuron and bias values are updated according to Levenberg-Marquardt optimization. It is the fastest and highly recommended backpropagation algorithm from MATLAB [4]. The training data is fed to the network in the form of a matrix. This matrix is then separated into three categories to train, test and validate the network within the training phase. Testing and validation in this aspect means the iterative procedure when the configured network tries to find a relationship between input and output by using the specified training algorithm. The random sampling of training data is done in such a way that,

- 70 % is used for training
- 15 % is used for testing
- 15 % is used for validation

The performance function by default is the mean squared error function.

## 5. Results and discussion

The simulation of VDI room model in TRNSYS is done with various weather data from TRY. The resulting output data for 5 years (5 different weather data from TRY) are used for the training the network. To validate the network, output for a different weather data is generated.

The selection of number of neurons is tricky for each application and they also depend on the data used for training. Based on a parametric study, different number of neurons are tested and Figure 7 shows the prediction for 24 hours obtained for different number of neurons (from 10 to 33) As mentioned above, predictions are compared with the simulated thermal load of the building for the corresponding date and time.

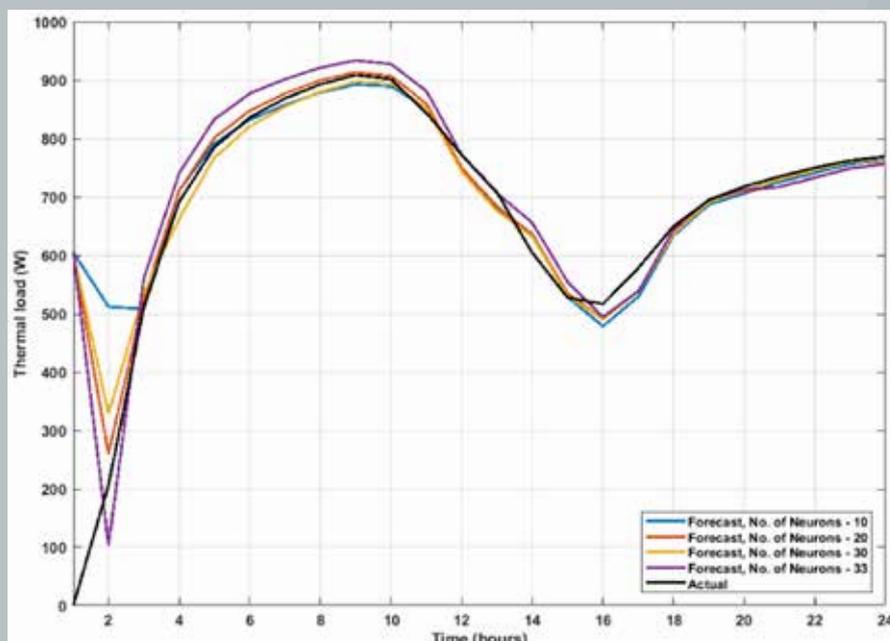


Figure 7 Prediction of thermal load for 24 hours (different number of neurons)

To compare the accuracy of the prediction, Root-mean-square error (RMSE) is calculated for the same and the results are,

Number of neurons	Prediction horizon	RMSE
10	24	4.86
20	24	0.21
30	24	3.74
33	24	7.84

Table 3 Root-mean-square error

It is evident that using 20 neurons yields good results. Using the same network configuration, a random day in summer is chosen and the prediction is done. The result is shown in Figure 8 and as seen, the cooling load is shown as negative value in the figure.

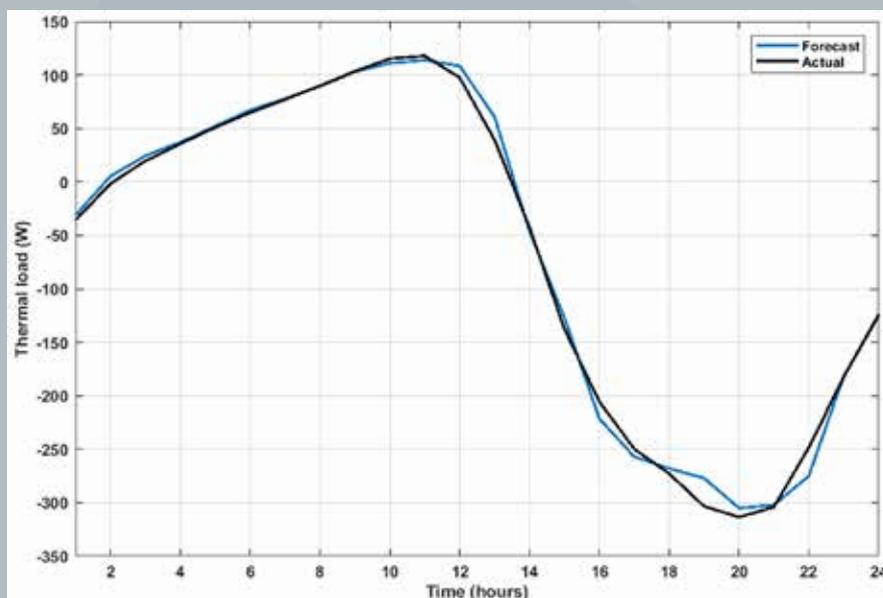


Figure 8 Prediction of thermal load for a summer day (with 20 neurons)

## 6. Exploitation

With the knowledge gained during this project, it is intended to make bigger projects possibly with industrial collaborations. A project proposal application is successfully submitted (Projekträger Jülich). The title of the proposal application is “KMU+ - Development of a modular and cost-effective energy management solution for small and medium-sized enterprises in the course of holistic digital transformation”. Alongside THN, the planned project partners are,

- BROCHIER Consulting + Innovation GmbH
- TREvisto AG
- Best Practice KMU
- Fraunhofer Institut für integrierte Schaltungen

Apart from the project proposal, two abstracts have been submitted on the title “Comparison of different modeling approaches to predict thermal load of a building” and waiting for further notifications. The conferences are,

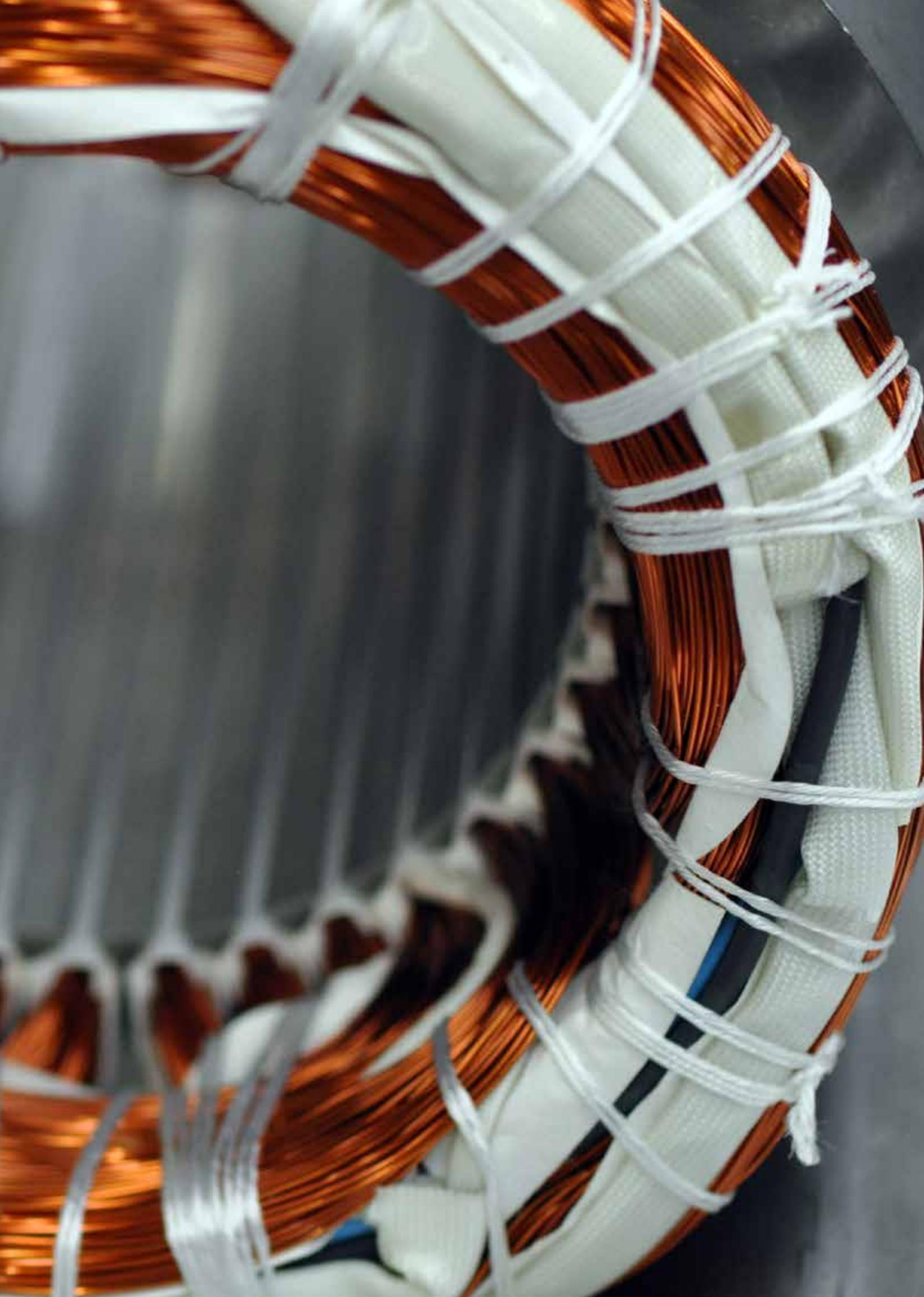
- iSEnEC – Integration of Sustainable EnergyConference (July 2018)
- BAUSIM 2018 (September 2018)

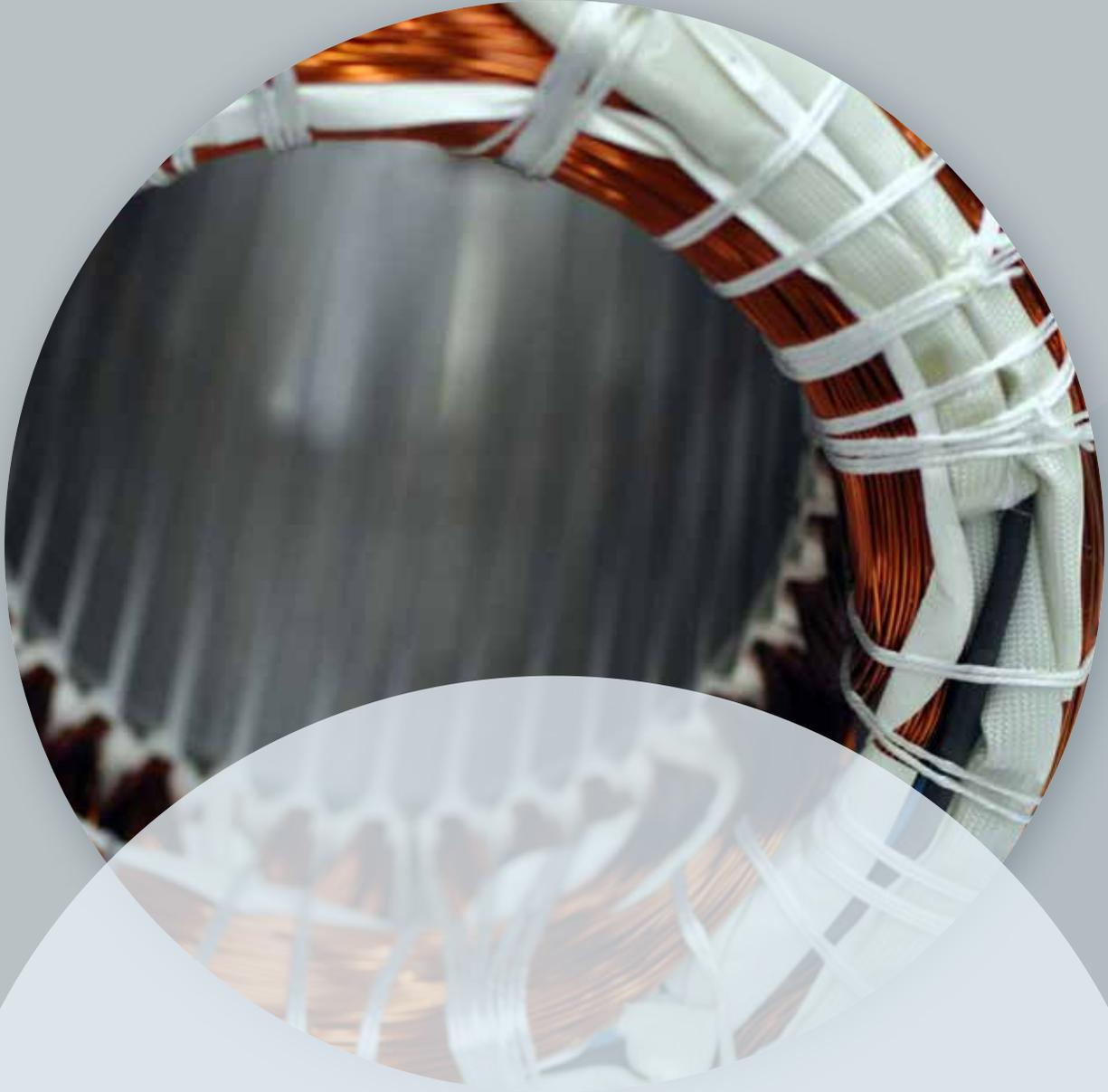
## 7. Literature

- [1] F. Amara, A. Kodjo , C. Alben , D. Yves and K. Sousso, „Comparison and Simulation of Building Thermal Models for Effective Energy Management,“ Smart Grid and Renewable Energy, pp. 95-112, 2015.
- [2] D. Geysen, D. S. Oscar, J. Christian , B. Jens and V. Dirk , „Operational thermal load forecasting in district heating networks using machine learning and expert advice,“ Cornell University Library, 2017.
- [3] C. Gershenson, „Artificial Neural Networks for Beginners,“ Cornell University Library, 2003.
- [4] MATLAB, Neural Network Toolbox - User guide, and References, The Mathworks Inc., 2003.
- [5] TRNSYS, Reference manual, The Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, 2009.
- [6] VDI 6007 Blatt-1:2015-06, Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden - Raummodell, 2015-06, Beuth Verlag GmbH.
- [7] DWD, Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse, Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD), 2017.









# iKSM – integrierte Käfig-Stator-Maschine

Prof. Dr. Armin Dietz

Philipp Löhdefink, M. Sc.

Michael Gerstner, M. Sc.

Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik

Institut ELSYS

Technische Hochschule Nürnberg

## Wesentliche Projektziele

Im Zuge des Trends, in elektrische Antriebssysteme immer kompakter und zunehmend mehr Elektronik zu integrieren, entsteht ein hoher Bedarf an innovativen Systemkonzepten. Die betrachtete Käfig-Stator-Maschine besteht aus einem sehr einfachen und kostengünstigen Maschinenkonzept und verlagert die Komplexität in die Ansteuerungselektronik sowie in die Regelungssoftware. Grundlegende Eigenschaften elektrischer Maschinen wie die Polpaarzahl oder die Strangzahl wurden bislang über den Aufbau der Wicklung endgültig festgelegt. Mit der Käfig-Stator-Maschine sind sie über die Software und Elektronik im laufenden Betrieb veränderbar. Ziel des Projekts sind daher Untersuchungen und Vorarbeiten an dieser bisher wenig erforschten Technologie in Form von Modellbildung, Simulation und Aufbau eines Prototypsystems.

### 1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2017
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Institut ELSYS / Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik
Projektleitung	Prof. Dr. Armin Dietz
Kontaktdaten	E-Mail: armin.dietz@th-nuernberg.de

### 2. Ausgangslage

In aktuellen elektrischen Maschinen sind als Leiter Spulen mit mehreren Windungen eingebaut. Die Spulen werden zu einem Strang verschaltet, über den Umfang der Maschine sind mehrere Stränge verteilt. Das Betriebskennfeld der Maschine wird durch das so festgelegte Wicklungssystem definiert.

Die Polpaarzahl des Luftspaltfeldes (Statorfeld) ist hierbei nicht veränderbar und kann daher nicht als Freiheitsgrad genutzt werden. Eine Erweiterung des Betriebskennfeldes würde erreicht, wenn die Polpaarzahl oder die Strangzahl der Maschine auf elektronischem Wege einstellbar wäre. Wie in Abb. 2 dargestellt, ist die wesentliche Idee einer Käfig-Stator-Maschine, die Spulen einer Maschine durch massive Einzelleiter (Nutenleiter) zu ersetzen, wobei diese direkt an die Leistungselektronik angebunden sind. Diese Idee kann als Weiterentwicklung der Antriebstopologie verstanden werden. Die erste Entwicklungsstufe bilden die üblichen dreiphasigen Netzmaschinen mit verteilten Wicklungen, wie in Abb. 2 links gezeigt. Als Weiterentwicklung entstanden daraufhin elektronisch kommutierte Motoren mit Zahnspulenausführung, wie in Abb. 2 mittig zu sehen ist. Abb. 2 rechts zeigt die massiven Einzelleiter.

Bei der Ansteuerung der Nutzenleiter ist die Richtung und die Amplitude des Stroms im Rahmen des leistungselektronischen Arbeitsbereichs quasi frei wählbar. Die einstellbaren Nutzenströme erlauben es, eine nahezu belie-

bige Statorfeldverteilung einzustellen. Ein praktisches Beispiel ist die Polpaarzahl der Käfig-Stator-Maschine, wie in Abb. 1 illustriert, die frei einstellbar und während des Betriebes änderbar ist. Vor allem für Asynchronmaschinen ist dies sehr interessant, da ein Käfigläufer jede Polpaarzahl annehmen kann.

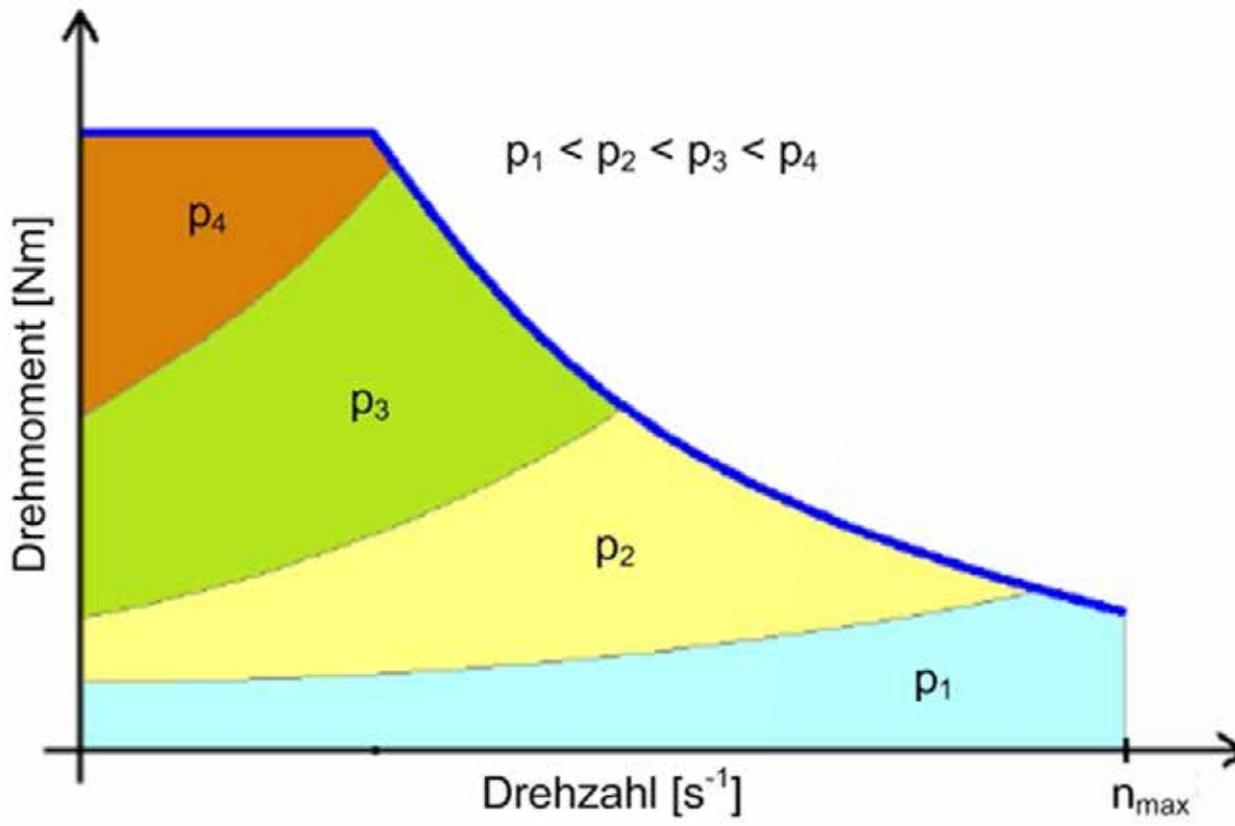


Abbildung 1: Drehzahl-/ Drehmomentkennlinie in Abhängigkeit der Polpaarzahl [1]

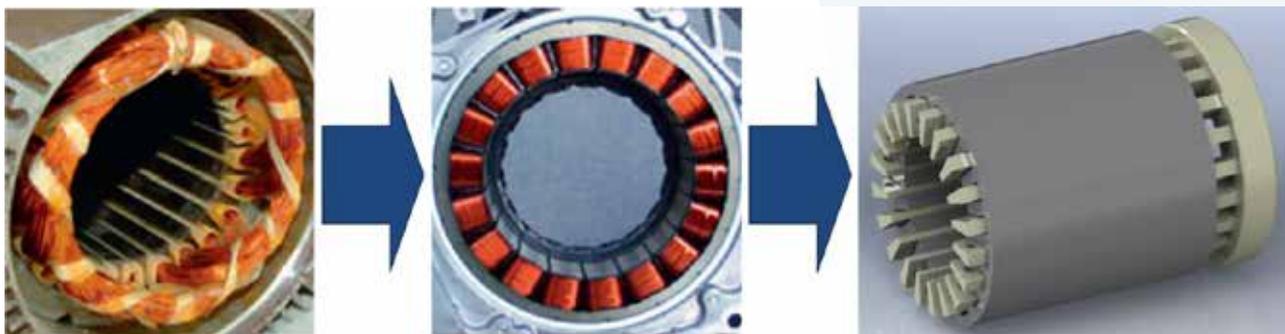


Abbildung 2: Weiterentwicklung der Motorwicklungen (abstrahiert nach [2])

### 3. Ziele des Forschungsprojekts

Das vorgestellte Vorhaben zielt darauf ab, diese neue Art elektrischer Maschinen zu untersuchen sowie einen Prototyp bestehend aus n-strängiger Maschine und n-phasigem Umrichter (hier  $n = 12$ ) zu entwickeln und zu erproben (Abbildung 3). Es ist zu erwarten, dass Stromverdrängungseffekte in den Nutenleitern und der Kontaktierung der Leistungselektronik besonderen Forschungsbedarf erfordern. Die n-strängige Maschine ist eine neue sensorische und regelungstechnische Herausforderung, wie beispielsweise die Erweiterung des zur Regelung benötigten Raumzeigerbegriffs von typischen, dreiphasigen Systemen auf beliebige, n-phasige Raumzeigergrößen zeigt. Dessen ungeachtet sind diese Multiphasen-Ausführungen mit Nutenleitern inzwischen in den Bereich des Möglichen gerückt, da die Mikroprozessoren zur Ansteuerung immer leistungsfähiger werden und hochkanalige Peripherie liefern (viele PWM- und ADC-Kanäle). Zudem ist die Leistungselektronik im niedrigeren Spannungsbereich (unter 100 V) durch hochvolumige Märkte (Consumer- und Automotivebereich) technologisch sehr weit fortgeschritten (geringe Durchlasswiderstände) und dennoch kostengünstig verfügbar. Die Veröffentlichungen von Prof. Dr. Dieter Gerling zeigen, dass in dem Themenfeld der Multiphasen-Systeme viele neue Möglichkeiten, aber auch noch ein erheblicher Forschungsbedarf steckt, zu dem das Institut ELSYS innovative Beiträge leisten möchte.

Im Rahmen der Vorlaufforschung fokussiert dieses Projekt darauf, erste Untersuchungen zu diesem innovativen Maschinenkonzept in Form von Modellbildung, Simulation und Prototypenbau durchzuführen. Dabei zielt das Forschungsteam um Prof. Dr. Armin Dietz darauf ab, sowohl einen Ansatz für die Beschreibung der Maschine über die Grundgleichungen elektrischer Maschinen als auch einen Entwurf für eine mögliche erste Elektronik zu erstellen. Am Beispiel des Prototyps ist beabsichtigt, die Theorie im Anschluss zu verifizieren.

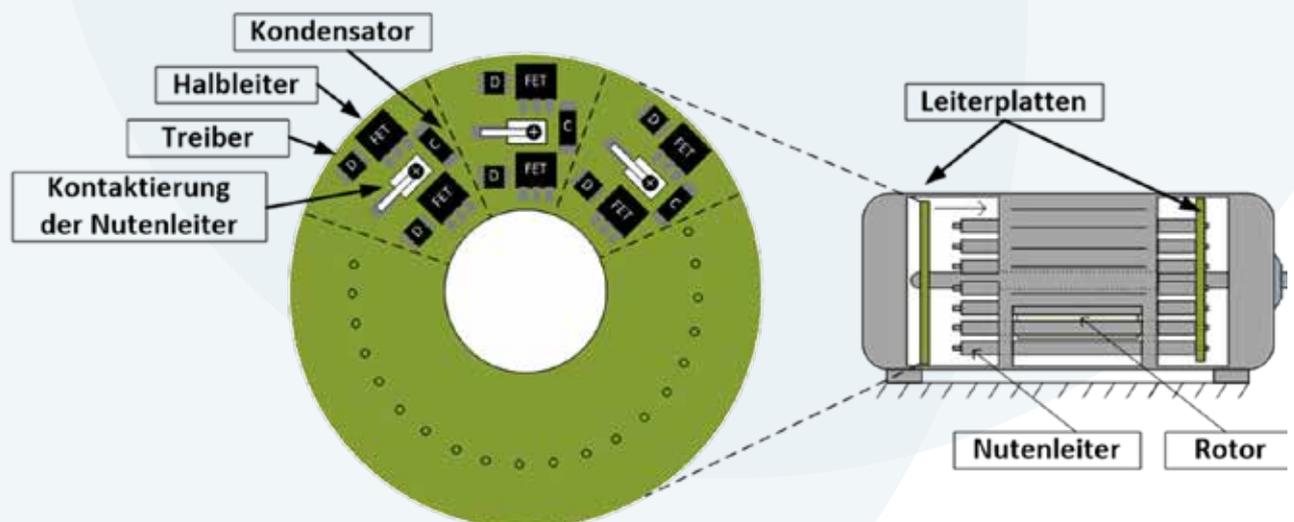


Abbildung 3: Schematischer Aufbau der Maschinen-Umrichter Kombination

### 4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Zur quasi-stationären Modellierung der Käfig-Stator-Maschine erstellen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in diesem Projekt einen allgemeinen Ansatz über eine Fourier-Reihenentwicklung der elektromagneti-

schen Luftspaltfelder. Da die wesentlichen Vorgänge der elektromagnetischen Energiewandlung über die Interaktion der Felder im Luftspalt ablaufen, ist es für ein erstes Modell zulässig, nur diesen Bereich der Maschine zu modellieren. Damit entsteht ein übersichtliches, schnell berechenbares Modell, das geeignet ist, um generelle Aussagen zum Betriebsverhalten zu treffen. Im Rahmen der Feinauslegung oder zur detaillierten Untersuchung bestimmter Effekte ist aktuell eine zusätzliche Berechnung über Finite-Elemente-Methoden (FEM) unabdingbar. Im Rahmen des in diesem Projekt erstellten Modells wird der Luftspalt als „glatt“ angenommen. Das bedeutet, dass die errechneten Induktivitäten nur Mittelwerte ohne direkte Berücksichtigung von Nutzungseinflüssen darstellen. Die Nutzungseinflüsse sind als Mittelwert über den Carter-Faktor im Modell berücksichtigt. Das Eisen wird im Magnetkreis als ideal angenommen, sodass die relative Permeabilität gegen unendlich strebt. Das bedeutet, dass die Induktivitäten rein rotorpositionsabhängig sind und keinerlei Einflüsse wie Reluktanzeffekte, Stromverdrängung, Läuferquerströme oder Eisenverluste berücksichtigt werden. Das Luftspaltfeld wird weiterhin als rein radial angenommen und die Krümmung der Umfangskoordinate wird vernachlässigt, da die Luftspaltbreite klein gegenüber dem Bohrungsdurchmesser der Maschine ist. Nut- und Stirnstreuung schätzen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nach klassischen Formeln [3] ab und berücksichtigen sie in der Berechnung als Zusatzinduktivitäten.

Grundsätzlich gilt für Drehfeldmaschinen die allgemeine Spannungsgleichung für gekoppelte Kreise [4]:

(1)

(2)

Die Gleichungen (1) und (2) stellen den Bezug zwischen den elementaren Größen der elektrischen Spannung  $u(t)$ , der magnetischen Flussverkettung  $\psi(t)$  und der elektrischen Stromstärke  $i(t)$  her. Die Matrizen  $R$  und  $L$  beinhalten die Parameter der Widerstände und Induktivitäten, die zur Lösung der Spannungsgleichung bekannt sein müssen.  $R$  und  $L(\vartheta_m)$  haben folgende Form:

(3)

Aufgrund der anfangs eingeführten Vereinfachungen kann über den Zusammenhang  $\omega_m = d\vartheta_m/dt$  die Gleichung (2) weiter umgeformt werden:

(4)

Damit ist das zugrundeliegende Gleichungssystem bekannt. Die Größen der Matrizen ergeben sich aus der Anzahl der betrachteten gekoppelten Kreise. Im Falle der Käfig-Stator-Maschine ist jeder Nutenleiter ein eigener Kreis und bei Verwendung eines Kurzschlusskäfigrotors kann jede Leiterschleife im Rotor durch einen weiteren Kreis beschrieben werden. Bei dem ausgeführten Prototyp (siehe Abb. 5) führt dies zu 12 Kreisen im Stator und 23 Kreisen im Rotor, was insgesamt 35 Gleichungen ergibt. Über die Geometrie der verwendeten Nutenleiter können die elektrischen Widerstände mit der spezifischen Leitfähigkeit von Kupfer abgeschätzt werden. Die

Selbst- und Gegeninduktivitäten sind über die Strombelagsverteilung und die daraus entstehenden Flussverketungen abzuleiten.

Im Rahmen der Vorlaufforschung hat das Forschungsteam das Modell in Matlab / Simulink implementiert und parametrisiert. Ein Simulationsergebnis ist in Abb. 4 gezeigt. Hier ist der Einschwingvorgang der Statorströme bei stromlosem Rotor zu beobachten (unter symmetrischer sinusförmiger Spannungsversorgung).

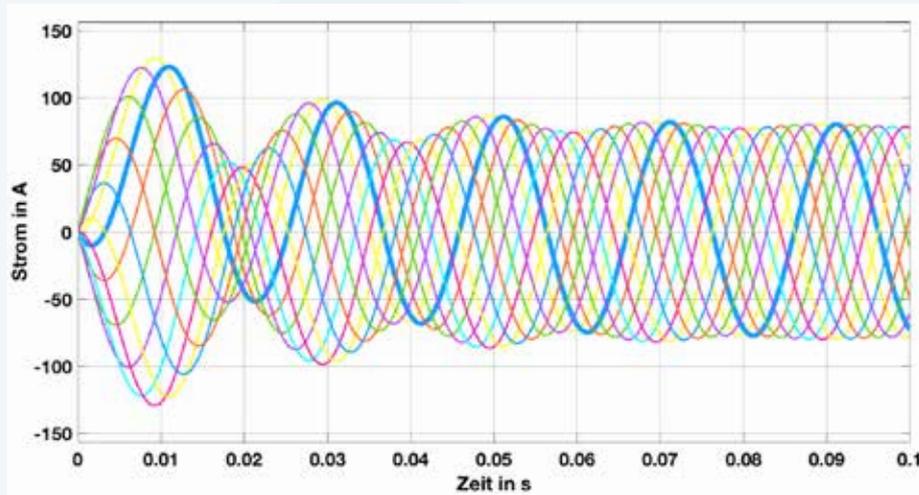


Abbildung 4: Einschwingvorgang der Ströme im Modell bei symmetrischer sinusförmiger Speisung (Phase 1 hervorgehoben)

Parallel zur Modellbildung der Maschine hat das Team leistungselektronische Konzepte zur Ansteuerung schematisch untersucht und teils in einem Prototyp umgesetzt (siehe Abb. 5). Die Anzahl der Freiheitsgrade zur Anordnung der Leistungselektronik lässt eine Vielzahl von Implementierungsvarianten zu, die sich in der Art der Anordnung, Anzahl der Halbleiter und Häufigkeit der Ansteuerung unterscheiden. Für den ersten Prototyp haben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ein Design mit zu Vollbrücken verschalteten Power-MOSFETs entworfen. Dabei hat das Forschungsteam jeden Nutzenleiter beidseitig mit einer Halbbrücke verschaltet, die zentral über einen Mikrocontroller angesteuert wurde.

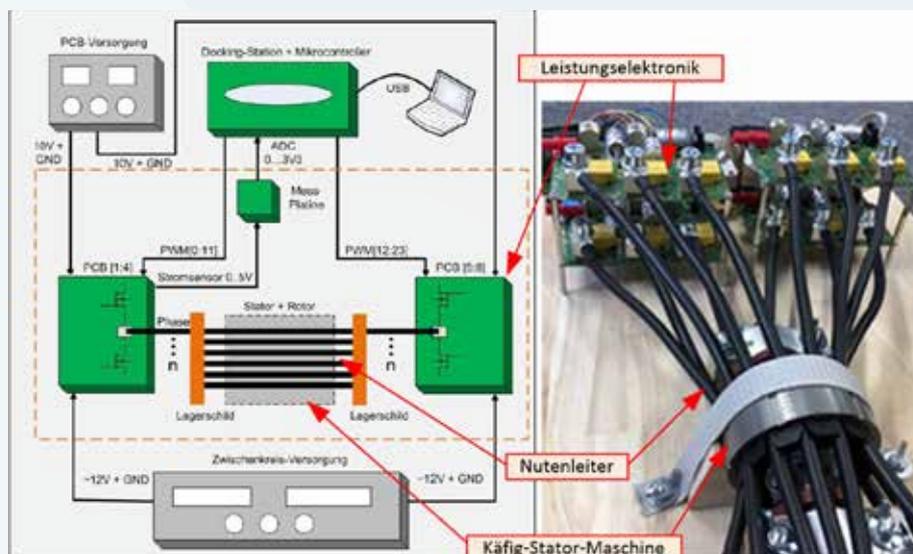


Abbildung 5: Erster Prototyp der Käfig-Stator-Maschine mit Leistungselektronik (links: schematisch, rechts: ausgeführter Prototyp)

Aufgrund der geringen Widerstände ( $\sim 100 \mu\Omega$ ) und Induktivitäten ( $\sim 1 \mu H$ ) der Nutenleiter werden hohe Anforderungen an die Leistungsschalter sowie Treiberstufen gestellt, denn um die hohen Stromanstiege zu kontrollieren, sind Taktfrequenzen im Bereich von mehr als 100 kHz nötig. Durch die hohen Stromanstiege:  $di(t)/dt$  entstehen hohe Bauteilbelastungen, die beispielsweise im Zwischenkreis bei den Kondensatoren betrachtet und gesondert behandelt werden mussten. Hingegen stellt die elektrische Zeitkonstante ( $\sim 1 \dots 10 \text{ ms}$ ), die vergleichbar mit anderen Maschinentypen ist, erwartungsgemäß eine handhabbare Hürde dar.

## 5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Die Vorlaufforschung hat der TH Nürnberg den Einstieg in die Technologie der hochintegrierten Antriebssysteme am Beispiel der Käfig-Stator-Maschine ermöglicht. In der Vergangenheit wurden die elektrischen Maschinen und die Frequenzumrichter in der Regel vollständig getrennt voneinander betrachtet, was in der Folge zu nicht optimal ausgenutzten technologischen Konzepten führt. Getrieben durch Trends wie die Elektromobilität ist die Betrachtung eines eng verzahnten und flexiblen Systems aus Frequenzumrichter und elektrischer Maschine ein wichtiges Zukunftsthema. Hiermit wird einerseits eine Systemwirkungsgraderhöhung erreicht und zum anderen das Know-how in die Software verlagert. Das ermöglicht beispielsweise durch IP-Blöcke einen besserer Know-how-Schutz zu realisieren und das bisher durch die Wicklung fest vorgegebene Maschinenverhalten per Software und Elektronik jederzeit und beinahe beliebig zu verändern. Weiterhin führt die Möglichkeit zur softwarebasierten Strukturumschaltung auch zu einem verbesserten Fehlverhalten, sollte ein Teil der Elektronik oder der Maschine ausfallen. Vor allem in Anwendungen wie in der Luftfahrt oder der Energiesparte sind redundante Systeme unumgänglich.

Über die Vorarbeiten der Vorlaufforschung konnten die Möglichkeiten und Herausforderungen dieser neuartigen Systemtechnologie erarbeitet werden. Beispielsweise wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

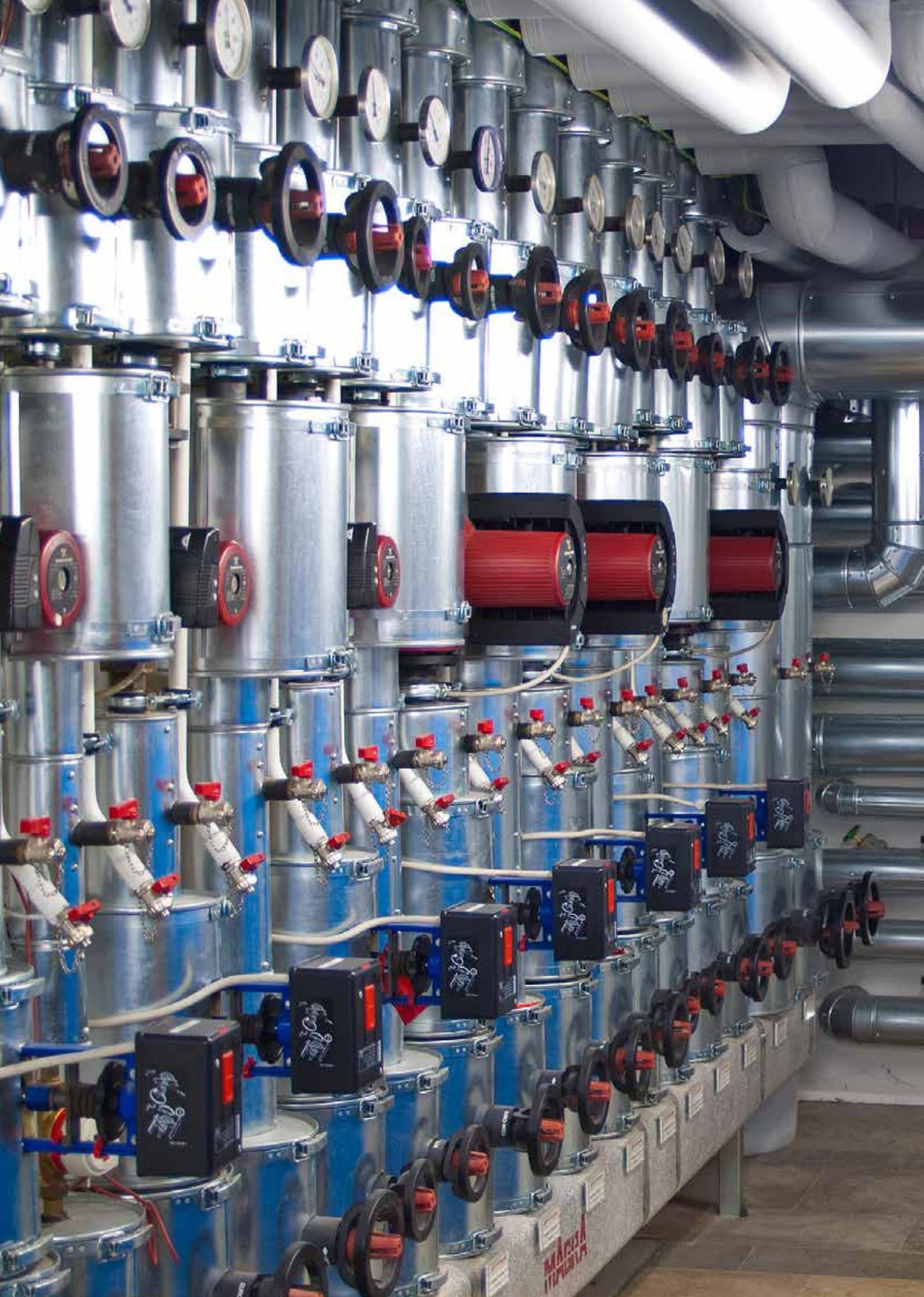
- Über die Berechnung der Induktivitäten und der in Abschnitt 4 dargestellten Modellbildung konnte ein Modellierungsansatz für diese neuartige Maschine gefunden werden. Somit ist an der TH Nürnberg nun ein analytisches Werkzeug vorhanden, das den Zugang zu tiefergehenden Fragestellungen in Verbindung mit der Käfig-Stator-Maschine ermöglicht.
- Die schnellen Stromanstiege sind eine große Herausforderung für eine kompakte Leistungselektronik. Die erste Elektronik im Rahmen der Vorlaufforschung ist ein Funktionsmuster zur Überprüfung der generellen Machbarkeit – um in Folgeprojekten zu einem kompakten Aufbau zu gelangen, muss besonderes Augenmerk darauf gelegt werden, die Stromanstiege zu kontrollieren.
- Um in Folgeprojekten einen höheren Integrationsgrad zu erreichen, wird auch die Aufbau- und Verbindungstechnik zwischen den Nutenleitern und den Halbleitern ein Forschungsschwerpunkt sein (evtl. direkte Kontaktierung der Halbleiter auf den Enden der Nutenleiter). Dazu bietet sich beispielsweise die Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl FAPS der Universität Erlangen-Nürnberg an.
- Für die Topologie der Leistungselektronik stehen für die Käfig-Stator-Maschine kein Standardkonzept, sondern mehrere vielversprechende Ansätze zur Verfügung. Hierzu sind ebenfalls weiterführende Untersuchungen erforderlich.

Zur detaillierten Untersuchung der dargestellten Ansätze gilt es, die Fragestellungen in Forschungsanträge zu überführen. Für den Bereich Luftfahrt wurde gemeinsam mit dem Lehrstuhl FAPS der Universität Erlangen-Nürnberg eine Antragsskizze im Luftfahrtforschungsprogramm des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie zum Thema der Käfig-Stator-Maschine als zuverlässiger Haupttriebwerksantrieb gestellt. Das Vorhaben wurde vom Fördergeber zwar als innovativ betrachtet, musste aber zugunsten von Themen, denen eine höhere Priorisierung für das ökoeffiziente Fliegen zugesprochen wurde, abgelehnt werden.

Weiterhin wurde aus der Vorlauforschung ein Förderantrag beim Bayerischen Staatsministerium für Bildung und Kultus, Wissenschaft und Kunst generiert, in dem integrierte Systeme aus Maschine und Umrichter, wie die Käfig-Stator-Maschine, als neuer Forschungsschwerpunkt an der TH Nürnberg thematisiert wird. Dieses Projekt mit dem Titel „praeMA – Prädiktiv geregelte Multiphasen-Antriebe für Industrie und E-Mobilität“ wurde mittlerweile genehmigt. Ferner arbeitet ein Forschungsteam am Institut ELSYS einen weiteren Forschungsantrag zum Thema der Käfig-Stator-Maschine in Verbindung mit neuen Konzepten für den Aufbau der Leistungselektronik und intelligenten Ansteuerkonzepten aus. Außerdem sind im Zeitraum der Vorlauforschung zwei Bachelorarbeiten an der TH Nürnberg aus der Thematik entstanden.

## 6. Literatur

- [1] A. Baumgard, F. Bachheibl, A. Patzak, D. Gerling: „48V traction: Innovative drive topology and battery“, International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (2016)
- [2] D. Gerling, G. Dajaku: „Frisch gewickelt – Effizienz- und Kostenoptimierung elektrischer Antriebe“, in: CADFEM GmbH (Hrsg.): infoplanner, Ausgabe 02/2011
- [3] P. Vaske und J. Riggert: „Elektrische Maschinen und Umformer, Teil 2: Berechnung elektrischer Maschinen“, B. G. Teubner Verlag Stuttgart, 7. Aufl. (1967)
- [4] G. Müller und B. Ponick: „Theorie elektrischer Maschinen“, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, 6. Aufl. (2009)







Strategien zur Verbesserung  
der Wirtschaftlichkeit bestehender  
Wärmenetze in ländlichen Regionen  
unter Berücksichtigung ökologischer  
Auswirkungen und spezifischer  
Rahmenbedingungen  
des jeweiligen Systems

Prof. Dr. Birgit Eitel  
Fakultät Betriebswirtschaft  
Technische Hochschule Nürnberg

## Wesentliche Projektziele

Das Ziel ist es, den Entscheidungsprozess für zentrale Wärmeversorgung in ländlichen Gebieten zu unterstützen. Im Fokus stehen dabei Netze im Leistungsbereich von 0,5 MW bis 20 MW thermischer Leistung und einer Leitungslänge von 500 Metern bis ca. 20 Kilometern. Durch den internationalen Austausch sollen Synergien erreicht werden, die ein effizienteres Vorgehen als bei nationalen Aktivitäten ermöglichen.

### 1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	12 Monate
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Betriebswirtschaft
Projektleitung	Prof. Dr. Birgit Eitel
Kontaktdaten	E-Mail: birgit.eitel@th-nuernberg.de

### 2. Ausgangslage

Etwa 50 Prozent der Endenergie in Europa wird für den Wärmebedarf verwendet. Derzeit basiert dieser Wärmebedarf hauptsächlich auf fossilen Brennstoffen und dezentralen Systemen. Um die ehrgeizigen Klima- und Energieziele wie die Reduktion der Treibhausgasemissionen um 20 Prozent gegenüber dem Jahr 1990, die Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien um 20 Prozent und die Steigerung der Energieeffizienz um jeweils 20 Prozent bis zum Jahr 2020 zu erreichen, kann Fernwärme eine wichtige Schlüsselrolle spielen. Die CO<sub>2</sub>-Reduktion ist direkt mit Energieeinsparung und Energieeffizienz gekoppelt.

Das vorangegangene Forschungsprojekt TriMa der TH Nürnberg fokussiert auf der Erforschung von großen zentralen Wärmeversorgungsnetzen in Städten. Aufbauend auf dieser Projektanalyse hat das Forschungsteam im vorliegenden Projekt den Fokus auf kleinere zentrale Wärmenetze gelegt. Die Projektidee entstand im Austausch mit Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus mehreren europäischen Ländern (Österreich, Italien, Slowenien, Polen) und formierte sich schließlich zu nachfolgendem Projekt:

Im Austausch mit folgenden Partnern und Ländern entstand ein Antrag im Programm Interreg Central Europe:

- KAPE (Nationale Energieagentur), Nationaler Fernwärmeverband; Polen
- Klimahausagentur, Provinz Bozen; Italien

- Lokale Energieagentur, Land Salzburg; Österreich
- Lokale Energieagentur, Fernwärmeverband; Slowenien
- Regionale Energieagentur, TH Nürnberg; Deutschland



### 3. Ziele des Forschungsprojekts

Das Ziel ist es, den Entscheidungsprozess für zentrale Wärmeversorgung in ländlichen Gebieten zu unterstützen. Im Fokus stehen dabei Netze im Leistungsbereich von 0,5 MW bis 20 MW thermischer Leistung und einer Leitungslänge von 500 Metern bis ca. 20 Kilometern. Somit werden größere Netze nicht betrachtet, die aufgrund der Eigentümerstruktur in vielen Fragen über eigene Fachkompetenz verfügen, die gerade bei kleinen und mittleren Akteuren nicht vorhanden ist. Durch den internationalen Austausch sollen Synergien erreicht werden, die ein effizienteres Vorgehen als bei nationalen Aktivitäten ermöglichen. Das Projektteam will das erreichen, indem es eine effiziente und zielgerichtete Datensammlung der wichtigsten Entscheidungskriterien entwickelt. Aufbauend darauf entwickelt das Team ein Tool für Entscheider und ein Tool für technische Prozesse.

### 4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Innerhalb des Projektgebietes sind Unterschiede und Entwicklungsungleichgewichte bei der Fernwärme zu beobachten. In einigen Ländern spielt sie bereits eine große Rolle bei der Wärmeversorgung, wenn auch in Verbindung mit einem geringen Anteil an erneuerbaren Energiequellen. Länder wie Deutschland und Italien haben dagegen einen relativ hohen Anteil an erneuerbaren Energien, aber nur einen relativ geringen Anteil an Fernwärme. Die Idee des Projekts ist es, diese Ungleichgewichte als Ausgangspunkt zu nutzen, um einen Lerneffekt zu erzeugen, indem sie sich gegenseitig ergänzen. Damit lassen sich umweltverträgliche Lösungen für einzelne Bereiche finden, basierend auf dem Know-how aller beteiligten Projektländer.

Das Projektteam möchte dieses Ziel erreichen, indem es Strategien sowie leicht zugängliche und umfassende Werkzeuge entwickelt und zur Verfügung stellt. Diese Instrumente und Strategien werden als Projekte für Stadtwerke, Energieversorger, Energieagenturen und kommunale Einrichtungen dienen, indem sie diese dabei unterstützen, die Effizienz und Wettbewerbsfähigkeit ihrer Fernwärmesysteme zu verbessern und ihren Anteil an erneuerbaren Energien zu erhöhen.

Diese Instrumente werden die relevanten Akteure dabei unterstützen und ermutigen, die Effizienz und wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit der Fernwärmenetze zu verbessern und gleichzeitig ihren Anteil an KWK, Abfall und erneuerbaren Energiequellen (Einsatz von Solarthermie und Wärmepumpen) zu erhöhen und schließlich ihren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck zu verringern.

Die Projektpartner werden daher rund 300 Fernwärmenetze im Projektgebiet analysieren, um die wesentlichen Erfolgsfaktoren der Rentabilitätssteigerung sowie der technischen Effizienz zu ermitteln, einen hohen Anteil erneuerbarer Energien zu realisieren und ihre Attraktivität für private und öffentliche Kunden zu erhöhen. Darüber hinaus werden politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen in den jeweiligen Ländern analysiert, um Best-Practice-Lösungen zu ermitteln.

## 5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Durch den Ausbau einer auf Erneuerbarer Energien basierender Nutzung von Fernwärmesystemen ist eine deutliche Steigerung des Einsatzes von Erneuerbaren Energien im Wärmebereich möglich. Dieser liegt in Deutschland derzeit erst bei ca. zwölf Prozent und ist damit auch deutlich niedriger als im Strombereich. Gerade mit dem Aufbau von zentralen Wärmeversorgungsanlagen ist hier eine schnellere Steigerung zu erreichen.

Die Projektpartner sind als langfristiges Team vorgesehen, die eine Nachhaltigkeit der Ergebnisse sicherstellen und die Forschungsergebnisse weiterverwenden.

Zudem werden die Ergebnisse sowohl in Vorlesungen an der TH Nürnberg als auch in wissenschaftlichen Publikationen verbreitet.



Abbildung 1: Wärmenetze in ländlichen Regionen: Heizhaus zur Erzeugung erneuerbarer Fernwärme  
(Foto: Alexander Schrammek)







# Barrierefreiheit und demografischer Wandel – Anpassungsstrategien im städtischen Raum für die Mobilitätsbedürfnisse und das Mobilitätsverhalten einer sich wandelnden Stadtgesellschaft

Prof. Dr. Carola Gröhlich  
Mauritius Scheutz, M.A.  
Ulrike Krämer, M.A.  
Fakultät Sozialwissenschaften  
Technische Hochschule Nürnberg

Prof. Dr.-Ing. Harald Kipke  
Fakultät Bauingenieurwesen  
Technische Hochschule Nürnberg

## Wesentliche Projektziele

Das Projekt zielte darauf ab, Möglichkeiten und Hindernisse der Mobilität im städtischen Raum zu erfassen. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler untersuchten am Beispiel eines Nürnberger Stadtteils, wie, wo und aus welchen Gründen Menschen in ihrer Stadt unterwegs sind und welche Faktoren ihre Mobilität fördern und / oder hemmen. Von besonderem Interesse waren hierbei unterschiedlichste Arten von Barrieren, die über das Verständnis von rein baulich-räumlichen Hindernissen hinausgehen und in der vorliegenden Untersuchung um mental-räumliche bzw. sozial-räumliche Komponenten erweitert wurden. Aus der Perspektive der Nutzerinnen und Nutzer des Sozialraums konnte das Projektteam vielfältige Arten von Barrieren aufschlüsseln, die die Selbstständigkeit und Lebensqualität der Bewohnerinnen und Bewohner beeinträchtigen, Teilhabechancen vermindern und in-folgedessen den Möglichkeitsraum Nürnberg auf unterschiedliche Weise einschränken.

### 1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Februar bis Dezember 2017
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Sozialwissenschaften
Projektleitung	Prof. Dr. Carola Gröhlich
Kontaktdaten	E-Mail: carola.groehlich@th-nuernberg.de

### 2. Ausgangslage

Die veränderte – ausdifferenzierte und individualisierte – Gesellschaftsstruktur der Postmoderne und die demografische Entwicklung stellen Städte vor neue Herausforderungen. Aufgrund des sozialen Wandels haben sich die Möglichkeiten individueller Lebensgestaltung ausdifferenziert und die damit einhergehenden Handlungsspielräume insgesamt erweitert. Im Rahmen der Destandardisierung der Normalbiografie lösen sich lineare, vorhersagbare Lebensverläufe auf und Haushalts- und Lebensformen pluralisieren sich. Ebenso verändert sich die gesellschaftliche Struktur in einer alternden Gesellschaft: Die verbesserte Gesundheitsversorgung führt zu einer höheren Lebenserwartung und ermöglicht eine längere Teilhabe am gesellschaftlichen Leben. Dementsprechend steigt der Anteil älterer Personen. Zudem entwickelt sich der Bevölkerungssaldo regional unterschiedlich: In manchen Teilräumen nimmt die Bevölkerungsdichte zu, während sie in anderen abnimmt. Sowohl Wachstums- als auch Schrumpfungsprozesse stellen Städte in Zukunft vor große Herausforderungen.

In einem reziproken Zusammenhang mit diesen gesellschaftlichen Veränderungen steht Mobilität: (Gesteigerte) Mobilität kann einerseits als Motor dieser Entwicklungen gesehen werden, andererseits aber auch als Produkt der pluralisierten Gesellschaft. Der Mobilität gilt besonderes Interesse, da sie in heutigen (Stadt-) Gesellschaften

zentral für die Teilhabe am gesellschaftlichen Leben ist. Der Begriff „Mobilität“ geht im sozialwissenschaftlichen Verständnis über den Verkehr hinaus. Er beschreibt in einer umfassenderen Perspektive einen Möglichkeitsraum, der Individuen mit der Fähigkeit und Freiheit ausstattet, unterschiedlichste Optionen zu nutzen, um ihre Lebensqualität zu erhalten oder zu steigern. Mobilität stellt entsprechend Handlungsspielräume her und besitzt verschiedene Facetten: Geistige, soziale, berufliche und biografische sowie räumliche Mobilität. Die Einschränkungen dieser Möglichkeitsräume, d. h. die Barrieren, die eine selbstbestimmte Mobilität verändern, einschränken oder verhindern, stehen im Zentrum dieser Forschung an der TH Nürnberg.

In der öffentlichen Debatte besteht weitestgehend Konsens darüber, dass, im Zuge einer Teilhabe aller Menschen am gesellschaftlichen Leben, Barrieren für bestimmte Personengruppen abgebaut werden müssen. Für den Freistaat Bayern schlägt sich dieses ambitionierte Anliegen im Programm „Bayern barrierefrei 2023“ nieder, das die Barrierefreiheit in drei prioritären Handlungsfeldern – Mobilität, Bildung und öffentlich zugängliche staatliche Gebäude – verfolgt (BStMI 2015). Auch Städte und Gemeinden werden bei ihren Vorhaben der Barrierereduzierung unterstützt. Ziel dieses Programms ist die Gestaltung des öffentlichen Raums in der Form, dass allen Bürgerinnen und Bürgern unabhängig vom Lebensalter oder körperlichen Beeinträchtigungen eine selbstbestimmte Teilhabe am öffentlichen Leben ermöglicht wird. Ziel dieses und ähnlicher Programme kann es nicht sein, Patentrezepte für die Gestaltung von Einzelmaßnahmen oder zur Umsetzung von Standardlösungen zu präsentieren. Letztlich ist es erforderlich, passgenaue Mittel und Wege für jede einzelne Gemeinde zu entwickeln, die kleinräumige und angepasste Lösungen zum Abbau von spezifischen Barrieren in den jeweiligen konkreten Sozialräumen zur Verfügung stellen.

### 3. Ziele des Forschungsprojekts

Bislang fehlen noch tiefergehende Analysen der Potenziale für die Gestaltung von Mobilität in einer sich strukturell verändernden Gesellschaft. Diese Vorlaufforschung dient dazu, das komplexe Feld der Wechselwirkungen zwischen den gesellschaftlichen Entwicklungen und den veränderten Mobilitätsbedürfnissen darzustellen, um Fragestellungen und Hypothesen für künftige Forschungsvorhaben abzuleiten.

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler untersuchten beispielhaft anhand eines Nürnberger Sozialraums

- Die Qualität und Attraktivität von Sozialräumen im Hinblick auf Mobilitätsverhalten und -bedürfnisse der Nutzerinnen und Nutzer
- Die Raumwirksamkeit, das Nutzungsverhalten und die Akzeptanz der städtischen Infrastruktur sowie
- Die Barrierefreiheit bzw. deren Einschränkungen im baulichen, technischen und sozialräumlichen Sinn

Das Forschungsinteresse bezieht sich auf die Einschränkung von Mobilität durch Barrieren unter der Berücksichtigung einer sich strukturell verändernden Gesellschaft – ohne den Fokus der Veränderung primär auf ältere Menschen zu richten. Neben der Identifizierung von Barrieren bzw. Hindernissen ist von Interesse, wie sich die Mobilität der Nutzerinnen und Nutzer bestimmter Sozialräume gestaltet, welche Unterschiede sich zwischen verschiedenen Nutzergruppen ergeben und welche Auswirkungen unterschiedlichste Arten von Barrieren auf den Möglichkeitsraum der Stadt haben.

#### 4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Obwohl die Mobilität in der Moderne stark zugenommen hat, gestaltet sich das Ausmaß der Mobilität für jede Person unterschiedlich. Um herauszufinden, wie sich die Mobilität gestaltet, ist es sinnvoll zu untersuchen, welche Faktoren die Mobilität und somit die Möglichkeitsräume der Bewohnerinnen und Bewohner Nürnbergs einschränken. Entsprechend sollte ein umfassendes Verständnis von sozialräumlicher Mobilität gewonnen und unterschiedlichste Barrieren erfasst werden, die soziale Teilhabe erschweren oder verhindern können. Dafür ist es sinnvoll, das Verständnis von Barrierefreiheit über rein physische Hindernisse hinaus zu erweitern. Barrierefreiheit umfasst somit nicht nur den Abbau baulicher Hindernisse, sondern auch mentaler und sozialer Barrieren und ermöglicht Zugänglichkeit, Erreichbarkeit und soziale Teilhabe (BMVBS 2011). In einem solchermaßen erweiterten Verständnis beschreibt der Begriff „Barrierefreiheit“ alle Möglichkeiten einer selbstständigen Lebensführung.



Abb. 1: Die Nürnberger Weststadt

Da es sich hier um ein exploratives Forschungsprojekt handelt, das erste Erkenntnisse hinsichtlich des sozialraumbezogenen Mobilitätsverhaltens der Nürnbergerinnen und Nürnberger liefern soll, hat das Forschungsteam ein qualitatives Forschungsdesign gewählt. Anhand des gewonnenen Datenmaterials können die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler somit Erkenntnisse über fördernde und hemmende Aspekte von Mobilität, mögliche Veränderungen des Mobilitätsverhaltens sowie Erkenntnisse über Barrieren gewinnen. Gründe für den Einsatz eines qualitativ-interpretativen Untersuchungsdesigns sind, dass es sich bei Mobilität und Mobilitätshemmnissen um Phänomene handelt, die stark durch individuelle Entscheidungen, Lebensläufe, Einstellungen und Schicksale geprägt sind. Bei einer quantitativen Befragung hätten diese nicht in einem umfassenden Maße Berücksichtigung gefunden.

Die Datengrundlage der Untersuchung bilden Gruppendiskussionen und Einzelinterviews mit Bewohnerinnen und Bewohnern der Nürnberger Weststadt, die im Juli und August 2017 geführt wurden. Die Entscheidung für die Nürnberger Weststadt, genauer den Bereich vom Plärrer bis zur Stadtgrenze zwischen Frankenschnellweg und Pegnitz (Stadtteile: Himpfelshof, Gostenhof, Bärenschanze, Eberhardshof und Muggenhof) ist Resultat der stadtplanerischen Relevanz dieses Quartiers und der guten Zugänglichkeit zu Befragungspersonen aufgrund bestehender Kontakte zu Akteurinnen und Akteuren im Quartier. Unterstützt wurde die Entscheidung durch die innenstadtnahe Lage, die Ausstattung und Struktur sowie die demografische Heterogenität dieses Sozialraums. Die Schilderungen der Befragten zur Mobilität beziehen sich weitestgehend auf die Alltags- und Freizeitmobilität, die ein fester Bestandteil der individuellen Lebensentwürfe ist. Es zeigt sich, dass Mobilität ein Thema ist, über

das die Betroffenen kaum oder gar nicht reflektieren, weil sie die Gegebenheiten als selbstverständlich hinnehmen. Durch die Verpflichtung, als Erwachsener (täglich bzw. regelmäßig) einer Erwerbstätigkeit nachzugehen, ist (räumlich-zeitliche) Mobilität unabdingbar Teil des Alltags. Auch informationelle Mobilität ist ein unausweichlicher Teil der Arbeitswelt. Aber auch als Rentnerinnen und Rentner ist man weiterhin mobil, wenn auch nicht (mehr) durch das Arbeitsleben geregelt und in einem kleineren Radius. Während die Alltagsmobilität bei jüngeren Personen stark durch die Erwerbstätigkeit strukturiert wird, planen ältere Menschen ihre Alltagsmobilität gezielter. Der Aktionsradius der befragten (auch der jüngeren) Erwachsenen und Senioren scheint sich nicht stark zu unterscheiden, auch wenn die Senioren angeben, dass ihr Radius mit dem Alter kleiner wird. Beide Gruppen bewegen sich im Alltag vornehmlich innerhalb ihres Stadtteils und verlassen diesen nur im Rahmen ihrer Freizeit, wobei dann der Weg auch meist ganz aus der Stadt herausführt. Als Grund für den stadtteilorientierten Aktionsradius nennen die Befragten das gute Angebot von Geschäften und anderen Einrichtungen und Orten. Was die Alltagsmobilität angeht, scheint die Nürnberger Weststadt die Nachfrage ihrer Bewohnerinnen und Bewohner durch ihre Mobilitätsangebote eindeutig zu befriedigen. Im Bereich der Freizeitmobilität scheint es aus der Sicht der Befragten sogar ein leichtes Überangebot von Möglichkeiten zu geben, die nicht genutzt werden – entweder, weil kein Interesse besteht, oder weil die Übersicht über das Veranstaltungsangebot unzureichend kommuniziert wird, also ein Informationsdefizit besteht. Es hat den Anschein, dass die Anonymität der Stadt eine gewisse Barrierewirkung auf die soziale Teilhabe insbesondere von älteren Menschen hat, die durch eine verstärkte mediale Informationsgestaltung (z. B. durch das Internet) zusätzlich verstärkt wird.

Die Befragten nennen vielfältige Barrieren, die ihre Mobilität einschränken. Neben den klassischen baulich-räumlichen Barrieren, die vor allem physisch benachteiligte Menschen hemmen, sind es hauptsächlich sozial-räumliche Barrieren, die sie in ihrer Mobilität bzw. ihrem Möglichkeitsraum begrenzen. Aspekte und Barrieren unterschiedlicher Formen, die auf Nutzerkonflikte und das Sicherheitsempfinden abzielen, schränken den Möglichkeitsraum wirkungsvoll und nachhaltig ein. Der Grund hierfür dürfte in den vielfältigen und zum Teil durchaus gegensätzlichen Ansprüchen von Nutzerinnen und Nutzern an den öffentlichen Raum liegen, was sich deutlich am Beispiel des Jannitzer Platzes zeigt. Dort verändert sich die Nutzerstruktur durch den Zuzug von neuen, wohlhabenderen Bewohnerinnen und Bewohnern, die andere Ansprüche an den öffentlichen Raum stellen als die Alteingesessenen. Dadurch kommt es zu Konflikten mit unabsichtlichen oder auch absichtlichen Ausgrenzungen.

#### **Baulich-räumliche Barrieren** in der Nürnberger Weststadt (Beispiele):

- Städtebauliche Strukturen und Nutzungen: Die bauliche Struktur der Gehwege in der Fürther Straße provoziert Konflikte durch die parallele Nutzung von Fußgängern und Radfahrern (z. B. unterschiedliche Nutzungsgeschwindigkeiten, nicht eindeutig strukturierte Wegführung). Außerdem wird der Fußweg durch eine zusätzliche, kommerzielle Nutzung (z. B. Straßencafés) verengt, was das Konfliktpotential nochmals erhöht.
- Bauliche Ausführung von Gebäuden und Anlagen: Der Zustand des Fahrbahnbelags mancher Straßen und Gehwege in der Weststadt sowie das Kopfsteinpflaster stellen für die Nutzerinnen und Nutzer Barrieren dar. Gleiches gilt für fehlende Aufzüge oder Treppen sowie mangelnde Gehwegabsenkungen.

- Ausstattung und Gestaltung von öffentlichen Räumen: Bemängelt werden eine unzureichende Beleuchtung im öffentlichen Raum und die unzureichende Ausstattung Nürnbergs mit Bäumen, die im Sommer bei Hitze Schatten spenden.
- Temporäre Barrieren: Baustellen (insbesondere im Bereich Maximilianstraße), parkende Autos (insbesondere für Fahrradfahrerinnen und -fahrer) und abgelegter Müll im öffentlichen Raum schränken die Nutzungsmöglichkeiten im Sozialraum ein.

#### **Sozial-räumliche Barrieren** in der Nürnberger Weststadt (Beispiele):

- Soziale Nutzungen: Die als einseitig und rücksichtslos beschriebene Nutzung von Plätzen und Parkanlagen durch bestimmte Nutzergruppen führt zu einem subjektiven Unsicherheitsgefühl bei anderen Nutzergruppen, die daher diese Räume vermeiden (z. B. am Jamnitzer Platz).
- Sicherheit: Mangelnde Beleuchtung führt zum Gefühl der Unsicherheit (z. B. in Muggenhof). Die Diversität sowie das Verhalten von Fahrgästen schafft für andere Nutzergruppen ein vermindertes Sicherheitsgefühl im ÖPNV (z. B. in der U-Bahn).
- Information und Kommunikation: Es wird eine unzureichende Annoncierung von Angeboten der Freizeitgestaltung (z. B. kulturelle oder gastronomische Veranstaltungen) im Stadtteil bzw. ein sozialer Ausschluss einiger Nutzergruppen durch „neue Technologien“ (z. B. Ankündigungen von Veranstaltungen ausschließlich im Internet bzw. in sozialen Netzwerken) genannt.
- Finanzielle Ressourcen: Die Preise des öffentlichen Nahverkehrs in Nürnberg werden als zu hoch wahrgenommen.

Es wird deutlich, dass in der Nürnberger Weststadt eine Vielzahl unterschiedlicher Barrieren im öffentlichen Raum existieren, die sukzessive abgebaut werden müssten, um allen Bewohnerinnen und Bewohnern Möglichkeitsräume verfügbar zu machen und diese zu erhalten. Im Zuge der Auswertung des erhobenen Datenmaterials wurde deutlich, dass vor allem zwei Arten von sozialräumlichen Barrieren die Mobilität der Befragten beeinflussen: soziale Nutzungen bzw. Nutzerkonflikte und das Sicherheitsempfinden. Diese Aspekte beeinflussen die Mobilität maßgeblich. Das subjektive Sicherheitsempfinden kann als Barriere den Möglichkeitsraum von Personen in zweierlei Hinsicht einschränken: Einerseits werden Plätze, die Unsicherheit erzeugen, gemieden und veröden dadurch weiterhin, andererseits bedeutet die Verringerung des Aktionsradius auch eine Einschränkung der Lebensqualität.

## **5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten**

Die Veröffentlichung der detaillierten Ergebnisse des Projekts ist für das Jahr 2018 geplant. Die Möglichkeit für interdisziplinär angelegte Folgeprojekte wird derzeit gemeinsam mit der Stadt Nürnberg beraten. Zudem ist geplant, eng mit dem Quartiersbüro der Nürnberger Weststadt zu kooperieren. Eine Rolle spielt dabei u. a. die Einbindung von Projekten zur Erarbeitung eines nachhaltigen Konzepts zur (Um-) Gestaltung des Jamnitzer Platzes, die vertiefte und ggf. priorisierte Analyse von Barrieren und Barrierearten in der Nürnberger Weststadt sowie eine Übertragung des Untersuchungsansatzes auf weitere Stadtteile Nürnbergs.

Weitere Projektergebnisse:

- Beteiligung am KinderUni-Horttag 2017 mit dem Beitrag „Was ist auf der Straße los?“ (22. November 2017 in der Kulturwerkstatt auf AEG, Corinna Röder)
- Bachelorarbeit zur Mobilität in der Großstadt mit dem Blick auf die Zielgruppe der Kinder: „Die Bedeutung von verkehrsbezogenem Projektunterricht im Grundschulalter in Anbetracht der gesellschaftlichen Entwicklungen“ (Wintersemester 2017/18, Corinna Röder).
- Studentische Projektarbeit „Aktuelle Aspekte zur Barrierefreiheit in Deutschland“ (Sommersemester 2017, Karin Modes)
- Studentische Projekte im Rahmen des Bachelorstudiums Soziale Arbeit im Querschnitt „Stadtraum Gesellschaft“ (Analyse von Nürnberger Plätzen, z. B. Jamnitzer Platz)

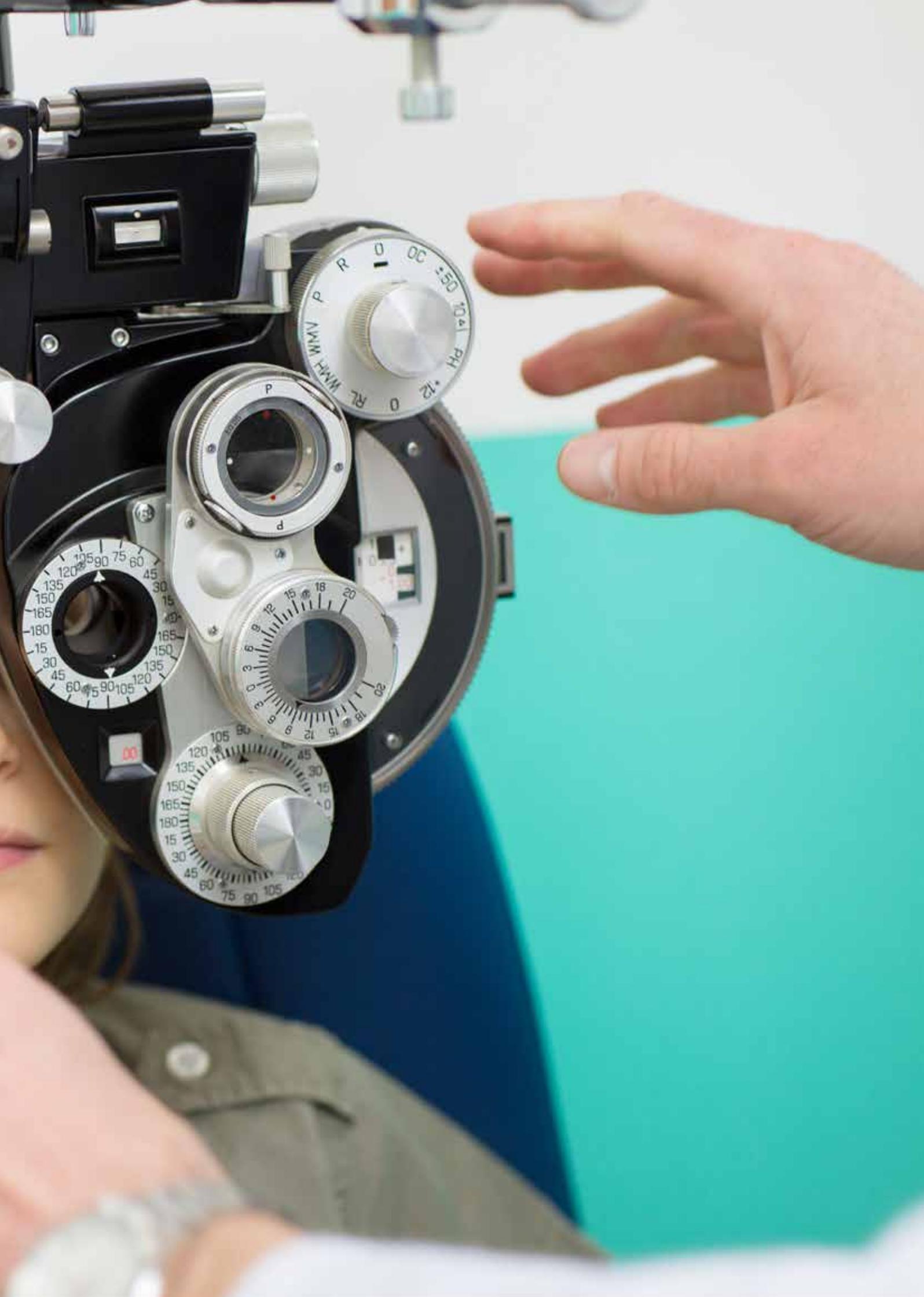
## 6. Literatur

Bayerisches Staatsministerium des Innern, für Bau und Verkehr (BStMI) (2015): Bayern Barrierefrei. Ein Leitfaden. Die barrierefreie Gemeinde. [www.stmi.bayern.de/assets/stmi/sug/die\\_barrierefreie\\_gemeinde\\_barrierefrei.pdf](http://www.stmi.bayern.de/assets/stmi/sug/die_barrierefreie_gemeinde_barrierefrei.pdf) (abgerufen am 04.12.2017).

Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) (2011): ExWoSt-Sondergutachten. „Barrierefreie Stadtquartiere“. Endbericht. [www.bipberlin.de/pdf/110829\\_Endbericht\\_BSQ\\_komprimiert.pdf](http://www.bipberlin.de/pdf/110829_Endbericht_BSQ_komprimiert.pdf) (abgerufen am 04.12.2017).









# Genesis VisionTest (GVT)

Prof. Dr. Helmut Herold  
Andreas Pazureck, M. Sc.

Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik  
Technische Hochschule Nürnberg

## Wesentliche Projektziele

Als Vorbereitung auf ein flächendeckendes Sehscreening für Kleinkinder (1 - 6 Jahre) hat das Projektteam im Forschungsprojekt Genesis VisionTest Objective Preferential Looking Test einen objektiven Sehtest erstellt. Dieser Sehtest verwendet gestreifte Muster auf einer monochromen grauen Fläche, um eine unbewusste Reaktion und Augenbewegung bei Betrachterinnen und Betrachtern hervorzurufen, sofern diese das gestreifte Muster auflösen können. Um Interesse zu wecken, setzt das Team einen Film ein, der mit den Testmustern unterbrochen wird und zeichnet mit einem Eye-Tracker die Blickreaktion auf. Um diese Komponenten zusammenzuführen, wurde ein Softwareprototyp entwickelt, der die Daten vereinheitlicht und zusammenführt.

### 1. Projektdaten

Fördersumme	28.347,50 Euro
Laufzeit	September bis Dezember 2017
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik / CIG / Genesis
Projektleitung	Prof. Dr. Helmut Herold
Kontaktdaten	E-Mail: <a href="mailto:helmut.herold@th-nuernberg.de">helmut.herold@th-nuernberg.de</a>

### 2. Ausgangslage

Ca. 60 Prozent der Sehschwächen bei Kindern werden bei den Regeluntersuchungen nicht erkannt. Bleiben diese im Kindesalter unbehandelt, sind sie später nur noch teilweise korrigierbar. Falls es auch mit Sehhilfen nicht möglich ist, eine Sehschärfe (Visus) von 1,0 zu realisieren, spricht man von einer Amblyopie. Davon sind ca. sieben bis zehn Prozent der deutschen Bevölkerung betroffen.

Das Forschungsprojekt Genesis VisionTest (GVT) entstand in Zusammenarbeit mit dem Bildungsinstitut für Blinde und Sehbehinderte, Frühförderung SEHEN. Das Ziel des Forschungsprojekts ist es, Spätfolgen durch schlechte Sehleistung im Kindesalter zu minimieren, indem die Minderung der Sehkraft möglichst früh erkannt wird. In dieser Phase kann eine geeignete Therapie die Amblyopie minimieren oder sogar gänzlich verhindern, sodass im Erwachsenenalter die volle Sehschärfe ohne Sehhilfe erreicht werden kann. In Genesis VisionTest sollen Kinder, wie auch in der Konzeptzeichnung in Abbildung 1 dargestellt, unauffällig auf ihre erreichte Sehschärfe geprüft werden, indem sie Spiele oder Filme mit versteckten Sehtests konsumieren, während der Eye-Tracker ihre Blickpositionen aufzeichnet und auswertet. Mit einer Kamera können die Blickdaten einer Person zugeordnet werden, ohne dass weitere Daten, wie beispielsweise der Name, benötigt werden.

Um die Sehschärfe zu bestimmen, stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Der Goldstandard in Deutschland ist der Landolt-Test (s. Abb. 2, Landoltringe). Dieser Test ist ein sogenannter subjektiver Sehtest;

bei dem eine Patientin oder ein Patient der Ärztin oder dem Arzt eine aktive Rückmeldung zukommen lässt. Die Ärztin oder der Arzt verlässt sich dabei auf die korrekte Auskunft der Patientin oder des Patienten.

Bei Kindern bis ca. zwei Jahren ist keine Kommunikation möglich, da weder die sprachliche noch die kognitive Entwicklung soweit fortgeschritten sind, dass es möglich ist, aktiv mit ihnen zu arbeiten. Bis zu einem Alter von ca. vier Jahren ist die Kommunikation kaum möglich, da die Kinder die Komplexität der Aufgabe und auch den Sinn der Durchführung nicht verstehen können. Da Kinder in diesem Alter versuchen, ihrer Umgebung zu gefallen, manipulieren sie die Testergebnisse, wenn sie können. Dadurch kann der Test nicht immer korrekt durchgeführt werden. Vor diesem Hintergrund ist ein aussagekräftiger subjektiver Sehtest, mit aktiver Teilnahme des Probanden, erst wirklich sinnvoll mit Kindern möglich, die älter als vier Jahre sind.

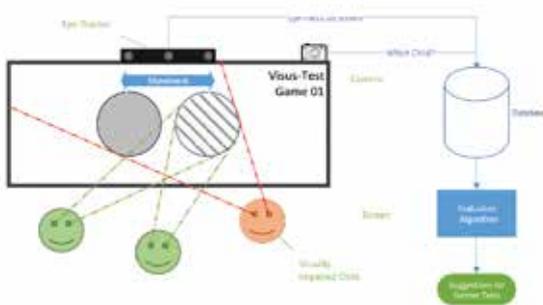


Abb. 1: Das Gesamtkonzept „Genesis VisionTest“ umfasst spielerische Sehtests, bei denen Kinder im Alter von 2 - 6 Jahren unauffällig getestet werden sollen.

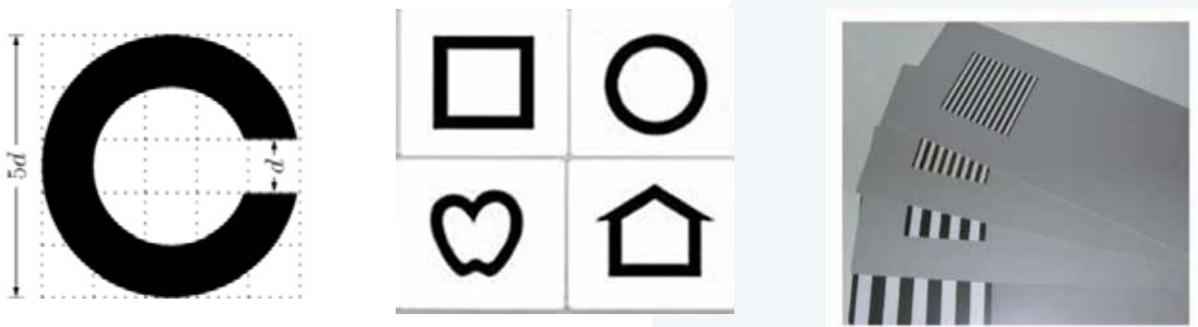


Abb. 2: Es gibt verschiedene Arten von Sehtests. Der Landolttest (links) ist der Goldstandard und wird in Deutschland großflächig eingesetzt. Hier muss erkannt werden, auf welcher Seite der Kreis geöffnet ist. LEA-Symbole (Mitte) arbeiten mit Ähnlichkeiten. Zum Beispiel muss ein Apfel und ein Kreis unterschieden werden, oder ein Haus und ein Rechteck. Der Teller- Visual-Acuity-Test (rechts) arbeitet mit gestreiften Mustern auf einer monochromen grauen Fläche. Landolt- und LEA-Tests sind subjektive Sehtests, der Teller-Visual-Acuity-Test ist ein objektiver Sehtest.

In Alter von null bis vier Jahren werden in der Regel objektive Sehtests durchgeführt, bei denen keine aktive Mitarbeit des Probanden erforderlich ist. Der für diesen Kontext am weitesten verbreitete Sehtest ist der Teller-Visual-Acuity-Test. Die Teller-Visual-Acuity-Cards (siehe Abb. 2 rechts) bestehen aus einer Karte mit einer grauen Referenzfläche, auf die ein gestreiftes Muster gedruckt ist. Angewendet wird der sogenannte Auflösungsstimulus, er ist nahe an der Definition der Sehschärfe (Visus). Ein Visus von 1,0 liegt vor, wenn die Probandin oder der Proband zwei Punkte unterscheiden kann, die noch eine Winkelminute ( $1' = 1/60^\circ$ ) voneinander entfernt sind (siehe Abb. 3). Daher ist es möglich, aus dem Abstand zwischen dem Proband oder der Probandin und den Streifen auf der Teller-Visual-Acuity-Card die Sehschärfe zu berechnen.

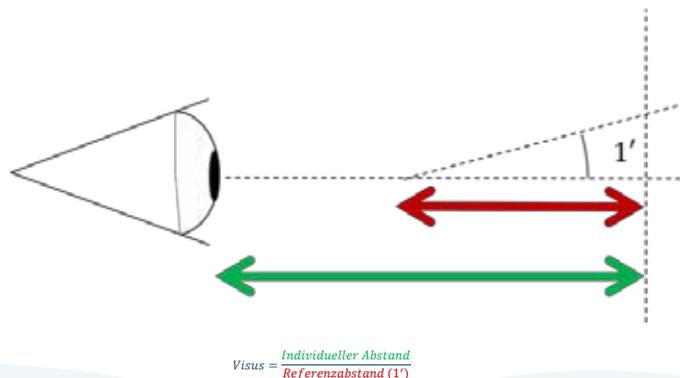


Abb. 3: Eine Person hat einen Visus von 1,0, wenn er zwei Punkte im Abstand von einer Winkelminute noch getrennt wahrnehmen kann.

### 3. Ziele des Forschungsprojekts

Das Ziel des Forschungsprojekts Genesis VisionTest ist es, bei einem verdachtslosen, flächendeckenden Screening in Kindergärten und Kinderkrippen abweichende Sehschärfen zu ermitteln, um so die Amblyopieausbildung zu verhindern. In die Spiele der Kinder sind geeignete Sehtests direkt integriert, alternativ können die Tests in Spielpausen durchgeführt werden. Im Fokus der Untersuchungen steht die Frage, ob es möglich ist, solche Sehtests passiv und dadurch objektiv zu gestalten, das heißt ohne aktives Zutun des untersuchten Kindes. Das Gesamtkonzept wurde bisher in einer Masterarbeit und einer Bachelorarbeit erstellt.

Bei den Voruntersuchungen des objektiven Sehtests ist das Ziel, zu ermitteln, ob es möglich ist, die bewusste Ausrichtung der Augen (unbewusste Steuerung der Okkulomotorik) bei Erwachsenen mit einer spontanen Reaktion zu überlagern, sodass objektiv die Sehschärfe ermittelt werden kann. Bislang gibt es keinen absolut objektiven Sehtest, der die Sehbahn vom Auge zum Visuellen Cortex und die korrekte Einstellung durch die Motorik abdeckt.

Es ist geplant, den Preferential Looking-Test gemäß Teller zu digitalisieren und den menschlichen Beobachter durch den Computer zu ersetzen. Dieser nutzt den Auflösungsstimulus (ein Gittermuster), um die Sehschärfe zu bestimmen. Die Tests haben eine einheitlich graue Referenz-Fläche, von der die gestreifte Fläche unterschieden werden muss. Bei genügend engen Streifen, bzw. bei ausreichender Distanz kann das Gehirn das Muster nicht mehr auflösen und es lässt sich nicht mehr von dem einheitlichen Grauton unterscheiden (vgl. Abbildung 4).

Um einen möglichst breiten Einsatz zu gewährleisten, untersucht das Projektteam, ob es möglich ist, den Test über alle Altersstufen zu objektivieren. D. h. er soll bei Kleinkindern sowie bei Erwachsenen einsetzbar werden, ohne dass diese aktiv am Testverfahren beteiligt sind. Bei Säuglingen gibt es schon automatisierte objektive Ansätze, die zu guten Ergebnissen führen. Bisher wurden die Teller-PL-Tests auch als subjektiver Test zur automatisierten Ermittlung der Sehschärfe bei Kindern eingesetzt. Einen objektiven Sehtest für alle Altersstufen gibt es bislang jedoch in dieser Form noch nicht. Daher ermittelt das Team in diesen Voruntersuchungen, ob es grundsätzlich möglich ist, das aktive Sehen mit einer automatischen Reaktion zu überlagern.

Im Testablauf erregt ein Film die Aufmerksamkeit der Untersuchten. Zwischen den Szenen werden die Teller-Muster angezeigt. Mit einem Eye-Tracker ermitteln die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Blickrichtung der Probandinnen und Probanden. Wie auch in Abb. 4 dargestellt, werden gestreifte Muster im fovealen

Bereich<sup>1</sup> des Blickfelds der Testerson platziert, bzw. durchqueren diesen Bereich. Während des Durchlaufs des Films wird die Streifendicke des Musters sukzessive erhöht, bis eine unterbewusste Reaktion erfolgt.

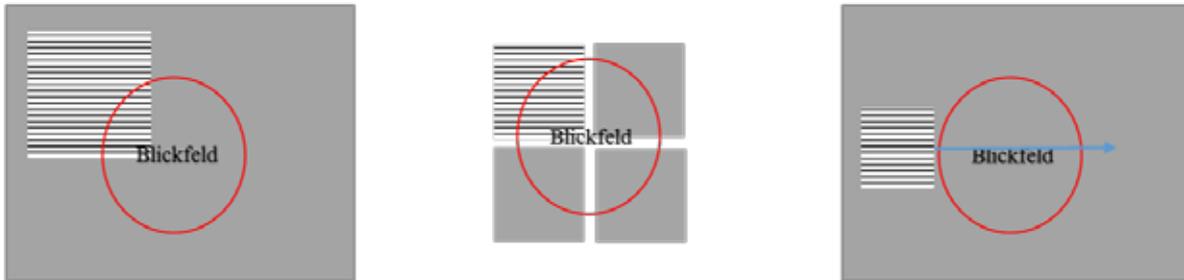


Abb. 4: Drei mögliche Verfahren zur Bestimmung der Sehschärfe sollen untersucht werden. Die Muster werden im fovealen Blickfeld (roter Kreis) platziert, wobei der Beobachtete unbewusst angeregt wird, auf dieses Muster zu sehen.

#### 4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Ein wesentlicher Teil des Projektes war der Umzug auf ein neues Framework und die Implementierung der geplanten modularen Softwarearchitektur. Das bisherige GUI Framework Qt lief auf Basis von C++, das führte häufig dazu, dass bei Störungen das ganze Programm abstürzte. Da im Test das Gerät autark für eine Woche laufen soll, wurde ein Framework benötigt, das eine größere Fehlertoleranz aufweist. Eine weitere Anforderung ist, dass die Anbindung von C++ Bibliotheken gewährleistet werden kann. Daher wurde das Framework .NET von Microsoft verwendet, das für beide Anforderungen geeignet ist.

Das Projektteam setzte die geplante Softwarearchitektur um, die modulare Struktur von Genesis VisionTest ist auf Abb. 5 zu sehen. Diese Struktur ist in mehrere Komponenten unterteilt, das erleichtert spätere Änderungen und Erweiterungen. GVT Base ist eine gemeinsam genutzte Bibliothek, die von der Kernanwendung und den Plug-ins genutzt werden kann. GVT Core ist die Kernanwendung, an die die Plug-ins angegliedert werden können. Die Views werden sowohl von der Kernanwendung zu Debug-Zwecken verwendet, als auch von den Programmen zur Verwaltung des Systems. Um eine einheitliche Darstellung der Komponenten zu ermöglichen, wurden die Views ausgelagert.

Im Kernsystem arbeitet der Scheduler, der die Rechnerressourcen und den Ablauf der Sehtests verwaltet. Das Ziel ist, dass es auch zu einem späteren Zeitpunkt möglich ist, Spiele anzubinden, um auch subjektive Sehtests umsetzen zu können. Der Recorder zeichnet die Rohdaten auf. Falls aktuell keine Daten aufgezeichnet werden, startet der Scheduler den Evaluator, der die aufgezeichneten Rohdaten abarbeitet, die Endergebnisse erstellt und dadurch auch wieder Speicher freigibt, der durch die unkomprimierten Rohdaten belegt wurde.

Die eigentliche Aufzeichnung und Auswertung läuft in den angebotenen Plug-ins ab. Die aufgezeichneten Daten werden abhängig von der Anwendung (Spiel, Film etc.) entsprechend verarbeitet. Wiederverwendbare Algorithmen, wie zum Beispiel die Visusberechnung, werden in der GVT Base Bibliothek abgelegt. Ein bereits realisiertes Plug-in ist der Eye-Tracker, der unter anderem über die Schnittstellen IPlugin und IRecord verfügt. IPlugin wird dabei genutzt, um die Klassen in den geladenen dlls zu erkennen, die die eigentlichen Plugins ausmachen. IRecord identifiziert den Eye-Tracker als Aufzeichnungsgerät und wird somit an den Recorder übergeben. Für die ersten Untersuchungen werden noch keine Spieleplug-ins realisiert. Dies läuft als Teil der Kernanwendung.

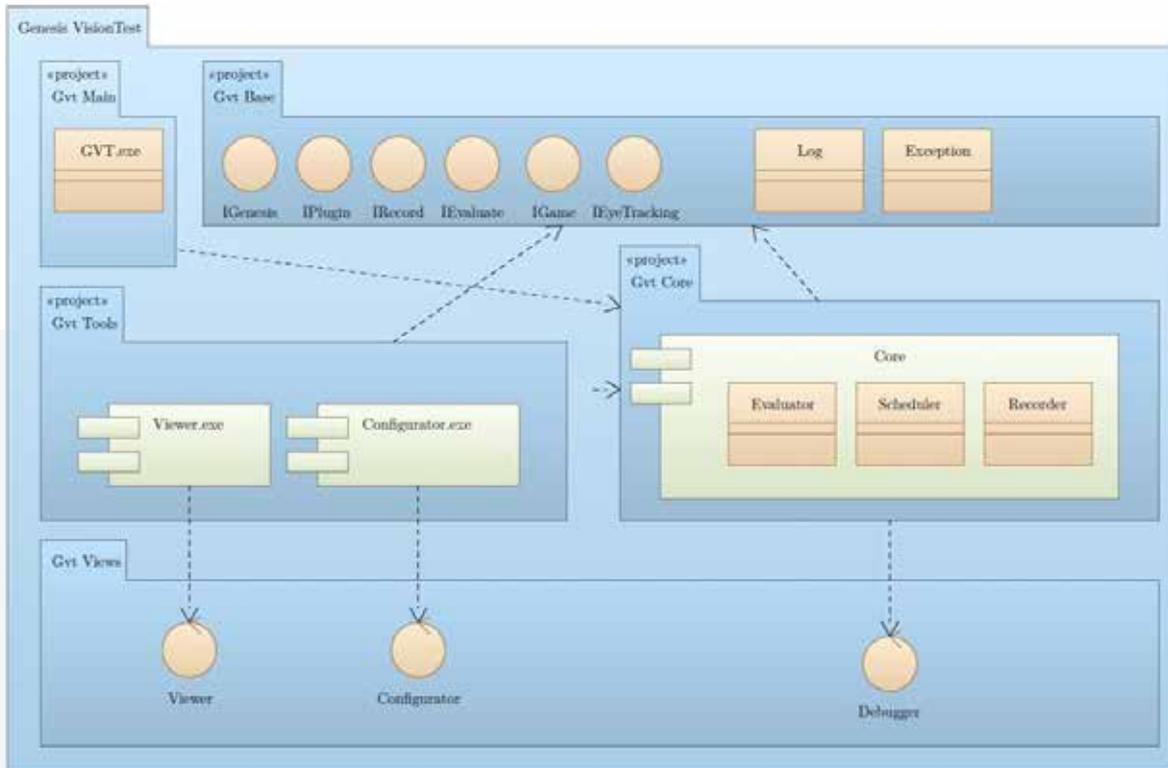


Abb 5: Die Modulare Struktur von Genesis VisionTest soll spätere Änderungen und Erweiterungen erleichtern. Daher ist die Software in mehrere Komponenten unterteilt. GVT Base ist eine gemeinsam genutzte Bibliothek, die durch die Kernanwendung und die Plug-ins eingesetzt werden kann. In GVT Core ist die Kernanwendung, an die die Plug-ins angegliedert werden können. Die Views realisieren eine einheitliche Darstellung der Komponenten und werden sowohl von der Kernanwendung zu Debug-Zwecken verwendet, als auch von den Programmen zur Verwaltung des Systems.

Um eine möglichst große Bandbreite an Stimuli zu erhalten, wurde ein Generator geschrieben, um die Preferential-Looking-Muster zu erstellen und zu testen. In Abb. 6 sind die Einstellmöglichkeiten aufgelistet. Die Größe und die Art sowie die Ausrichtung der beiden verfügbaren Grundmuster können zur Durchführung des Tests verändert werden. Die zwei Grundmuster sind auf Abb. 4 zu sehen: Vier Felder oder ein Muster auf einer schwarz-weiß karierten Oberfläche. In der Ausgangsbasis waren die Muster als eigene Klassen in der Software eingestellt.

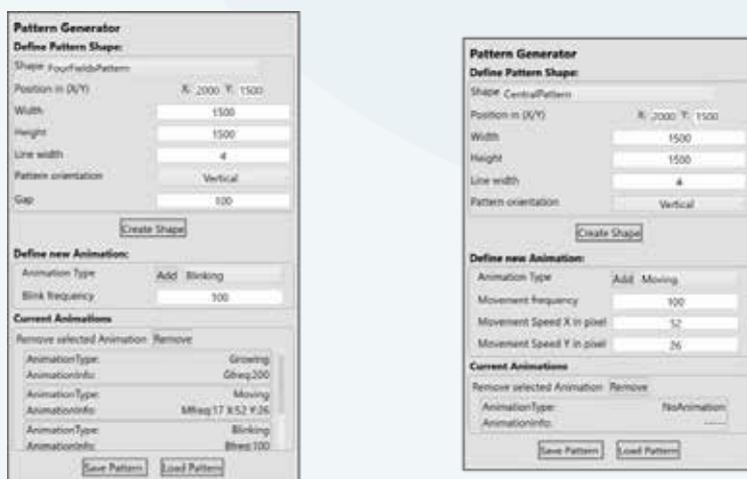


Abb. 6: Beispiele für die Benutzeroberfläche. a) Vier Felder Muster mit drei Animationen. Unter ‚Current Animations‘ ist die Liste mit den Einträgen zu jeder Animation zu finden. b) Zentrales Muster ohne Animation. Bei der Animationsdefinition sind die extra Felder für die bewegte Animation zu sehen.

Weitere Forschungsergebnisse zeigten, dass es günstiger ist, das Aussehen und das Verhalten der Muster besser zu trennen, weil sich neue Verhaltensmuster ergeben haben. Ein Verhalten ist das sukzessive Anwachsen der Liniendicke während eines Testdurchlaufs. Das heißt, das Muster beginnt bei einer Linienbreite von 1 Pixel und erhöht sich so lange schrittweise, bis der Nutzer auf den Stimulus reagiert. Weil es bei einer Translation des Musters über den Bildschirm zu Artefakten an den Rändern kommt, die die Ermittlung des Auflösungsvisus unterminieren, hat das Forschungsteam auch ein Blinkverhalten für die Muster eingebaut. Dadurch ergab sich eine neue Softwarearchitektur für die Mustererstellung, die die Form des Musters festlegen und definieren, wie diese zur Darstellungszeit animiert werden sollten. Jedem Muster wurde dabei ein Animationsverhalten zugeordnet. Dieses Verhalten ändert die Eigenschaften des Musters und beeinflusst somit die Darstellung (Position, Sichtbarkeit, Liniendicke) über den Darstellungszeitraum. Es ist auch möglich, beliebige andere Eigenschaften zu animieren. Die Implementierungen sind in den Klassendiagrammen auf Abb. 7 zu sehen. Ein gemeinsames Interface unterstützt, dass die Muster beliebig ausgetauscht werden. Es ist somit möglich, auch mehrere Animationen parallel zuzuweisen. So kann zum Beispiel ein blinkendes fahrendes Muster oder ein blinkendes dicker werdendes Muster generiert werden.

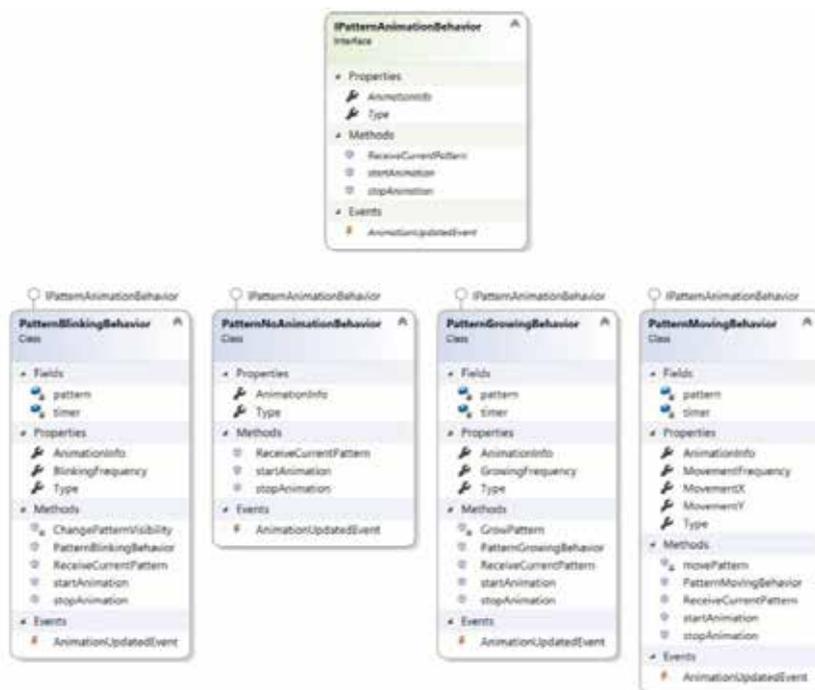


Abb. 7: Klassendiagramm des Animationsverhalten Interfaces und der Klassen die es Implementieren.

Darüberhinaus hat das Forschungsteam den eigentlichen Filmplayer entwickelt. Auf dem Hauptbildschirm wird dem Probanden oder der Probandin der Testfilm präsentiert. Ein zweiter Monitor dient sowohl zur Überwachung für die Versuche, als auch zur Konfiguration des Films. Das Überwachungsfenster ist auf Abb. 8 zu sehen. In diesem Fenster sieht die Untersucherin oder der Untersucher eine kleine Vorschau. Sie zeigt, was die Probandin oder der Proband sieht. Im unteren Teil kann die Untersucherin oder der Untersucher das Video starten und pausieren. Der Slider darüber zeigt an, wann und über welchen Zeitraum ein Testmuster angezeigt wird, relativ zur Länge des Gesamtvideos; Ebenso sieht die Untersucherin oder der Untersucher die aktuelle Position des Videos. Es ist möglich, mit dem Slider vor- und zurückzuspulen. In dem Teil oben rechts ist es möglich, neue

Muster hinzuzufügen werden. Hier wird auch die Startzeit und Dauer festgelegt. Diese ist nicht Bestandteil des abgespeicherten Musters, sondern gehört zum Film. So wäre es generell möglich, einen Mustersatz an den entsprechenden Stellen im Film auszutauschen. Geplant ist, dass es möglich ist, die Muster auch hier anpassen zu können, sodass der Pattern Generator und der Film Player zusammenwachsen.

## 5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Das Projekt Genesis VisionTest – Objective Preferential Looking Test läuft noch bis Ende des Jahres 2017. Durch eine verzögerte Einstellung des wissenschaftlichen Mitarbeiters konnte das Projekt erst Anfang September 2016 begonnen werden. Bisher ist im Rahmen des Projektes eine Bachelorarbeit entstanden, die sich mit der Generierung der Testmuster befasste.

Bis Ende Dezember 2017 wurden diese Projektarbeiten beendet. Die Versuche mit erwachsenen Probanden und Kindern wurden Anfang 2018 durchgeführt und es ist geplant, diese Ergebnisse zu veröffentlichen.

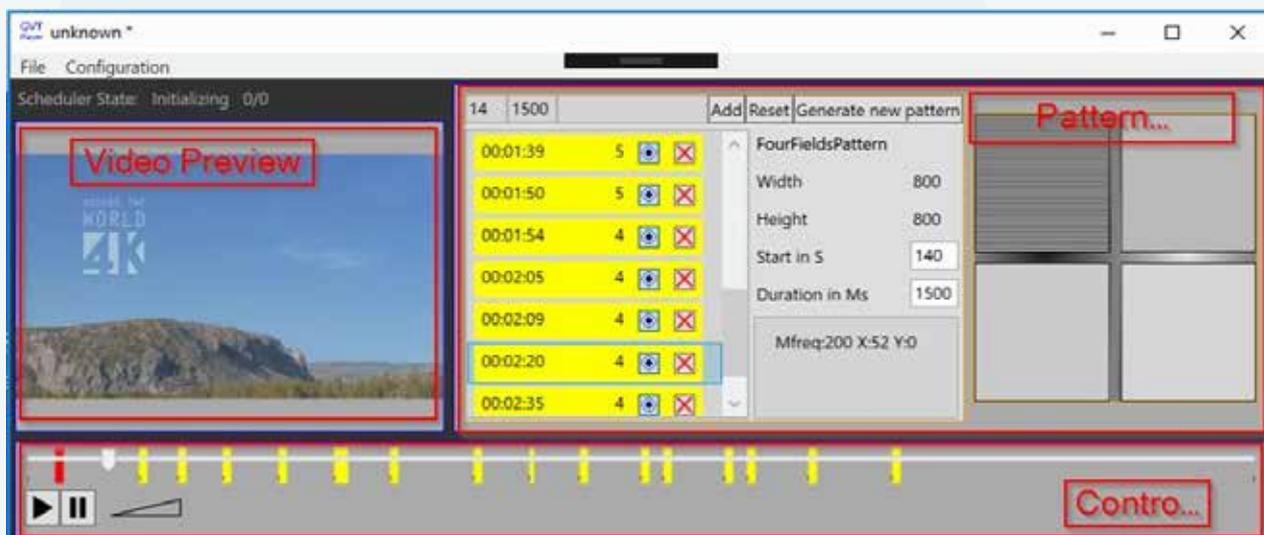
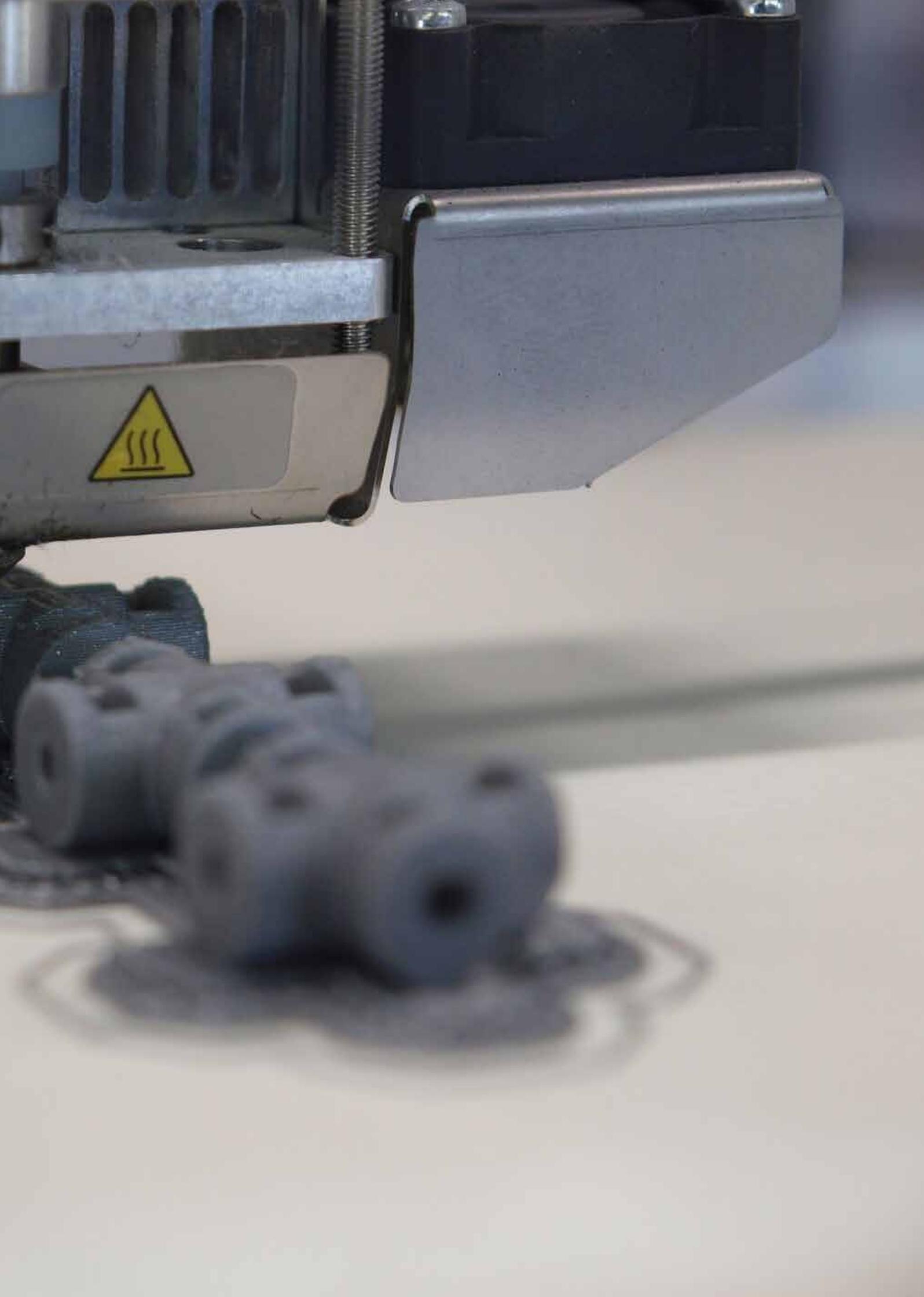
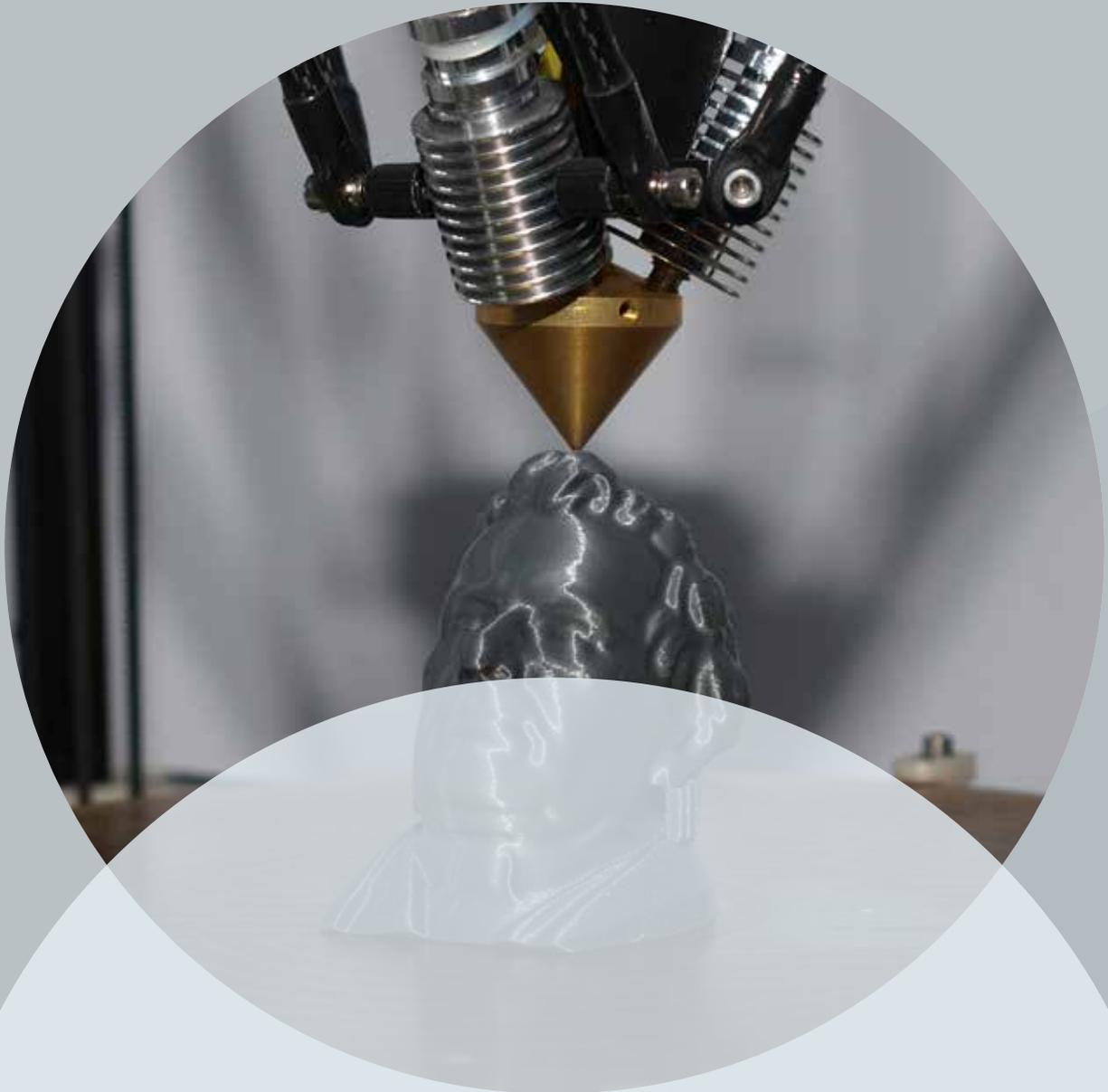


Abb. 8: GenesisFilmPlayer-Benutzeroberfläche ohne geladene Muster und ohne geladenes Video mit eingerahmten Bereichen

<sup>1</sup> Der foveale Bereich ist der Bereich des schärfsten Sehens und liegt im Zentrum des Blickfelds.







# FlexFilament – Variable Filamentbahnen für effizienten und schnellen 3D-Druck mit FDM

Prof. Dr.-Ing. Michael Koch  
Dr. Jens Helbig  
Robin Löffler, B. Eng.  
Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik  
Institut OHM-CMP  
Technische Hochschule Nürnberg

## Wesentliche Projektziele

Im Forschungsvorhaben „FlexFilament“ hat das Forschungsteam einen neuen Ansatz entwickelt, die bei dem weit verbreiteten 3D-Druck-Verfahren der Schmelzschichtung eine Applikation von unterschiedlich breiten Schichten mit einer Druckdüse ermöglicht. Für die Erprobung des Verfahrens hat das Team eine bestehende 3D-Druck-Anlage umgebaut und mit einem neu entwickelten Druckkopf ausgerüstet. Mit dem Nachweis der generellen Tauglichkeit des Forschungsansatzes in mehreren Versuchsteilen definiert das Forschungsteam weitere Schritte für eine nachhaltige Erschließung der Thematik.

### 1. Projektdaten

Fördersumme	29.130 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2017
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik / Institut OHM-CMP
Projektleitung	Prof. Dr.-Ing. Michael Koch
Kontaktdaten	E-Mail: michael.koch@th-nuernberg.de

### 2. Ausgangslage

Additive Manufacturing (AM) ist bereits heute ein großer Markt mit immer noch beeindruckenden Wachstumsraten. Bauteile können heute über eine Vielzahl von Additive-Manufacturing-Verfahren hergestellt werden. Die Technologie der „Schmelzschichtung“ (engl.: Fused Deposition Modeling FDM bzw. Fused Filament Fabrication FFF) ist seit den 1980er Jahren eine der wichtigsten Technologien in diesem Bereich und hat nach dem Auslaufen des Patentschutzes eine sehr große Marktdurchdringung sowohl im industriellen als auch im privaten Bereich erfahren [1]. Die FDM-Technik birgt nach Ansicht von Experten ein großes Potential für eine Weiterentwicklung der additiven Fertigung, besonders hinsichtlich der Maschinentechnologie und industrienaher Werkstoffe für die additive Fertigung.

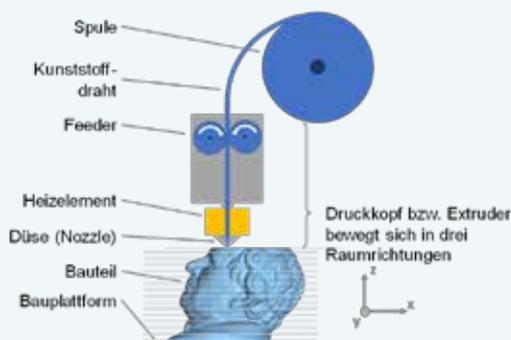


Bild 1: Prinzipieller Aufbau des FDM-Verfahrens (Schmelzschichtung) mit einem Feeder und Düse

Beim FDM-Verfahren wird das Werkstück schichtweise aus einem thermoplastischen Kunststoff aufgebaut. Der Kunststoff wird im Extruder erhitzt und als Kunststoffaden (Filament) in Schichten auf das Werkstück aufgetragen (siehe Bild 1). Der Vorschub des Filaments kann ein- und ausgeschaltet werden, das ermöglicht es, einen Filamentfaden auch partiell aufzutragen. Mit dem Filament werden die einzelnen Werkstückschichten in X- und Y-Richtung schichtweise aufgebaut, dabei verbinden sich die neuen Filamentbahnen mit den bereits vorhandenen durch Diffusion. Das Material erstarrt nach dem Auftrag durch Abkühlung unter die Glasübergangstemperatur sofort.

Die Auflösung, d. h. die darstellbaren Details am Werkstück, lässt sich durch die Wahl des Düsendurchmessers festlegen. Eine feine Düse im Bereich von 0,1 mm bis 0,4 mm Düsenbohrung lässt hohe Auflösungen zu. Mit Düsenbohrungen von 0,5 mm bis hin zu 1 mm sind Details nicht mehr darstellbar. Von dem Durchmesser der Düsenbohrung ist indirekt auch die Schichtdicke des Aufbauprozesses abhängig: Große Düsendurchmesser sind an eine größere Schichtdicke gekoppelt, kleinere Durchmesser ermöglichen nur dünnere Schichten. Dieser Zusammenhang ist mit dem Durchsatz an Kunststoff durch eine Düse zu erklären, der bei kleinen Düsendurchmessern aufgrund der Materialeigenschaften des Werkstoffs nicht beliebig gesteigert werden kann. Bei großen Düsendurchmessern ist die Dosiergenauigkeit des Kunststoffmaterials oft nicht genau genug, um dünne Schichten mit gleichbleibender (sehr großer) Breite aufzubauen.

Das Problem bei dieser Art des Werkstück-Aufbaus ist der bislang nicht gelöste Widerspruch zwischen Auflösung und Druckgeschwindigkeit: Eine feine Düse ermöglicht eine hohe Auflösung, allerdings nimmt die Druckzeit exponentiell zu. Bei großen Düsendurchmessern sind zwar kurze Fertigungszeiten möglich, die Details gehen allerdings verloren (siehe Bild 2).



Bild 2: Unterschiedliche Details und Fertigungszeiten durch kleine und große Düsendurchmesser

### 3. Ziele des Forschungsprojekts

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens hat das Team ein Konzept entwickelt und umgesetzt, das den beschriebenen Widerspruch zwischen Düsendurchmesser und Fertigungszeit aufheben kann.

Bei dem oben dargestellten Verfahren der Schmelzschichtung basiert der Prozess auf dem Einsatz eines kreisrunden Druckdüsenauslasses. Eine Änderung des kreisrunden Düsendurchmessers während des Druckvorgangs ist technisch bei einer Düsenöffnung von wenigen zehntel Millimetern nur schwer möglich.

Durch eine Änderung der Geometrie des Düsenausgangs von dem bereits erwähnten runden Querschnitt zu

einem rechteckigen Querschnitt kann aber in eine Druckrichtung eine breite Kunststoffschicht aufgebracht und in die dazu 90 Grad gedrehte Richtung eine schmale Druckschicht aufgebracht werden. Wird diese angepasste Druckdüse mit einem drehbaren Druckkopf kombiniert, dessen Winkelstellung während des Druckvorgangs angesteuert werden kann, so ist es möglich, die Schichtbreite an die speziellen Anforderungen des Druckteils anzupassen und die Druckzeit somit stark zu verkürzen (siehe Bild 3).

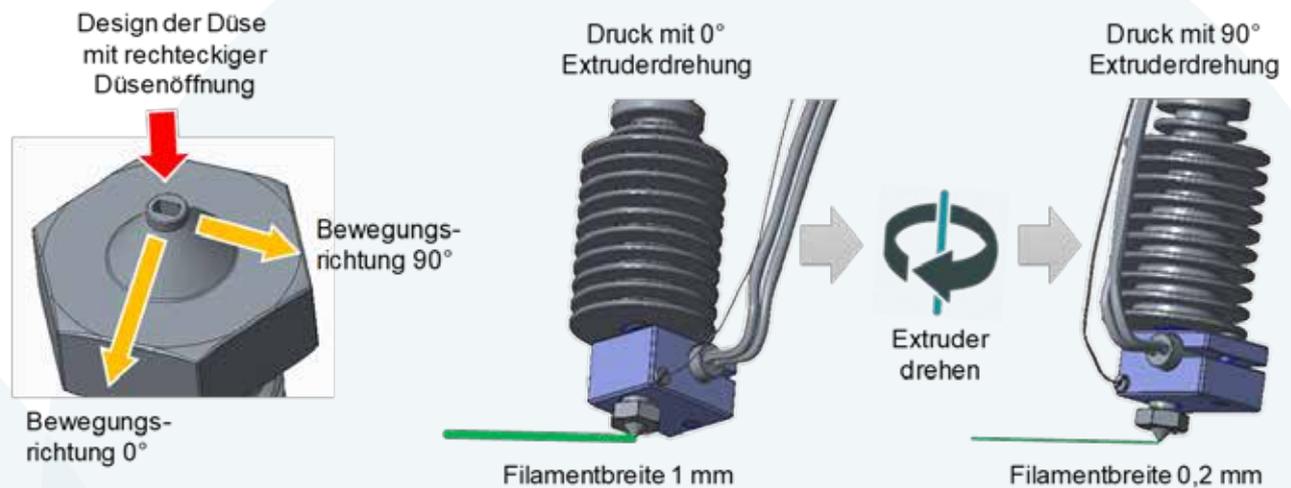


Bild 3: Variabel breite Filamentbahnen durch Drehen des Extruders mit rechteckiger Düsenöffnung zwischen 0° und 90°

#### 4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens gingen die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler schrittweise vor mit dem Ziel, einen drehbaren Extruder mit einer rechteckigen Düsenöffnung zu konstruieren, aufzubauen und erste Versuche durchzuführen. Zunächst hat das Forschungsteam eine konventionelle Druckdüse eines FDM-Druckers modifiziert und anschließend in den drehbaren Extruder eingesetzt.

##### Herstellung einer Druckdüse mit langlochförmiger Öffnung

Die hier benötigte, rechteckige bzw. langlochförmige Düsengeometrie (angestrebte Breite ca. 0,4 mm, Länge ca. 0,8 mm) ist nicht trivial herzustellen. Erste Versuche, eine Druckdüse mit einer Bohrung von 0,4 mm mit Hilfe eines Fräasers (ebenfalls Durchmesser 0,4 mm) zu erweitern, scheiterten mehrfach. Um teure und langwierige Fertigungsverfahren wie z. B. das Erodieren zu umgehen, griff das Team auf einen Diamantschneiddraht (Durchmesser 0,35 mm) zurück, mit dem die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler die Bohrung erfolgreich aufsägen konnten. Ausgehend von einer konventionellen Druckdüse mit einer Bohrung von 0,4 mm und einem Diamantdraht von 0,35 mm Durchmesser konnten sie letztendlich eine langlochförmige Öffnung von 0,44 mm x 0,87 mm erzeugen und unter einem Auflichtmikroskop digital vermessen (Bild 4).



Bild 4: a) Ursprüngliche Düsengeometrie mit Bohrung 0,4 mm; b) und c) modifizierte Nozzle mit langlochförmiger Öffnung

### Grundaufbau eines 3D-Druckers mit drehbarem Druckkopf

Der grundlegende Aufbau des beschriebenen Systems erfolgte auf der mechanischen Grundlage eines kommerziellen, kartesischen Portal-3D-Druckers. Dieser verfügt über eine ausreichende Präzision und Stabilität und ermöglicht gleichzeitig größere Veränderungen an der Materialzuführung und am Druckkopf. Den originalen Druckkopf hat das Forschungsteam durch eine selbst konstruierte, drehbare Variante ersetzt, während die Materialzuführung auf einen Bowden-Extruder umgerüstet wurde.

Bei der Konstruktion und Detaillierung des drehbaren Extruders kamen verschiedene Erfahrungswerte zur Gestaltung für die additive Fertigung zum Tragen, da der Prototyp des Extruders selbst auch aus additiv gefertigten Kunststoffbauteilen hergestellt werden sollte. Für Verschraubungen in der Baugruppe war so beispielsweise auf nachträglich einzusetzende Muttern zu achten, da der Kunststoff selbst kein Gewinde darstellen kann. Des Weiteren hat das Team thermisch beanspruchte Zonen aus geeignetem Material (z. B. ABS bis ca. 100 °C) oder mit einer entsprechenden Kühlung (siehe Lüfter in Bild 5) ausgerüstet.

Die Drehung des Druckkopfes wird über eine Hebelkinematik realisiert, die das Horn eines Servomotors mit dem Verbindungsring des Druckkopfes verbindet. Der Druckkopf selbst ist gegen radiale Belastungen mit einem spielarmen Kugellager und gegen axiale Verschiebungen mit einer Verschraubung im Verbindungsring gesichert. So lässt sich eine steife und trotzdem drehbewegliche Konstruktion ausführen, die für eine gute Druckgenauigkeit erforderlich ist. Für die Genauigkeit des Druckbildes ist es sehr wichtig, dass die Drehachse des Extruders exakt in der Düsenmitte sitzt. Da sich auch kleine Abweichungen auf dem Radius durch eine Drehung des Extruders schnell annähernd verdoppeln, muss hier auf einen möglichst guten Rundlauf geachtet werden.

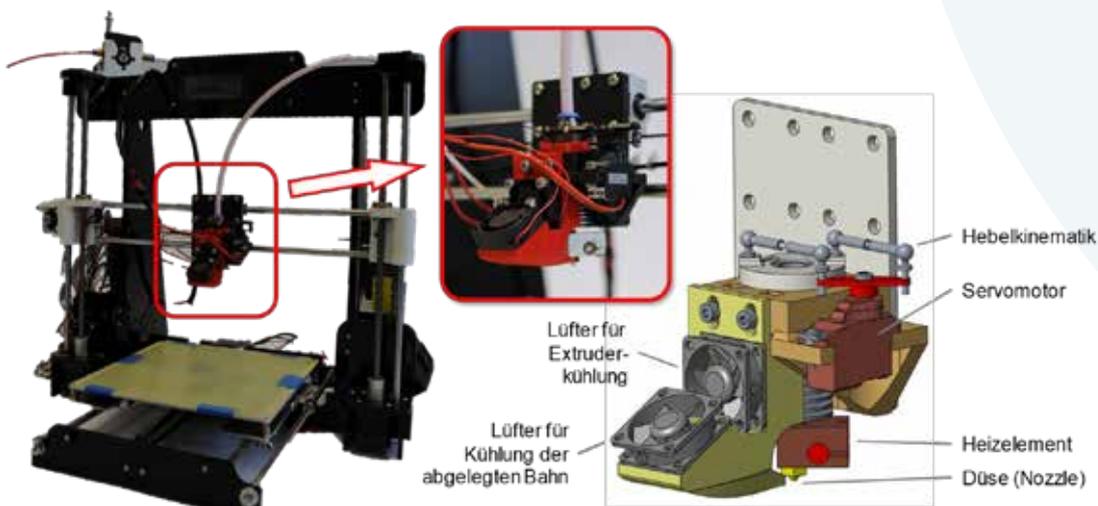


Bild 5: Drehbarer Druckkopf (links: eingebaut im 3D-Drucker; Mitte: Detailaufnahme; rechts: CAD-Modell)

## **Ansteuerung des drehbaren Druckkopfes**

Die gesamte Ansteuerung der Maschine erfolgt über einen Mikroprozessor (ATmega 2560). Mit Hilfe des Mikroprozessors wird das Maschinenprogramm, das den 3D-Drucker steuert, verarbeitet. Über ein Erweiterungsboard (Ramps 1.4) werden die notwendigen Schnittstellen für alle Schrittmotoren (Bewegungsachsen und Materialzuführung), Endschalter der drei Bewegungsachsen (x-, y- und z-Achse), die Heizelemente (Hotend und Druckbett) und Thermistoren (Typ PT100 zur Temperaturüberwachung von Hotend und Druckbett) realisiert. Über diese Schnittstellen werden die Bewegungen und anderen Aktionen des 3D-Druckers gesteuert. Weiterhin bietet das Erweiterungsboard Schnittstellen für mehrere Servomotoren. Einer dieser Servomotoren haben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in diesem Projekt verwendet, um über Maschinenbefehle die Winkelposition des Druckkopfes während des Druckvorganges exakt anzusteuern.

Während die Generierung des Maschinencodes für normale AM-Anlagen und 3D-Drucker normalerweise vollautomatisch durch eine sogenannte „Slicing-Software“ erfolgt, ist eine automatische Codeerzeugung hier (noch) nicht möglich. Daher musste das Projektteam das Steuerungsprogramm für die Versuche von Hand programmieren. Konkret wurden Teile vom automatisch erzeugtem Code durch zusätzliche Befehle für die Drehung des Extruders ergänzt. Dabei hat das Team aus Gründen der Handhabbarkeit des Programmcodes in den folgenden Versuchen nur die Extrempositionen des Extruders bei 0 Grad und 90 Grad zur Fahrtrichtung angefahren.

## **Versuchsteile und Auswertung**

Um die Tauglichkeit des Systems zu zeigen, hat das Team grundlegende Versuche zu unterschiedlichen Probedruckteilen durchgeführt und dabei eine Platte und einen Kasten gedruckt.

Bei dem Probedruckteil „Platte“ haben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zunächst eine einheitliche Grundfläche aus mehreren massiven Schichtlagen mit einem neutralen Material (weißer Kunststoff) gelegt, um die Effekte eines möglicherweise nicht optimal ausgerichteten Druckbettes aus den Messungen auszuschließen. Auf diese Grundfläche hat das Forschungsteam (nach einem Materialwechsel zu rotem Kunststoff) sechs parallel verlaufende Linien gedruckt. Die unterschiedlich breiten Filamentbahnen werden durch eine unterschiedliche Drehausrichtung des Druckkopfes erzeugt. Bei den breiten Bahnen ist der Druckkopf so gedreht, dass die lange Seite der Düsenöffnung (0,87 mm) die Breite der Filamentbahn bestimmt und bei den dünnen Bahnen die kurze Seite der Düsenöffnung (0,44 mm). Durch mehrere, aufeinander gedruckte Linien ist es möglich, eine konstante Druckschichthöhe zu gewährleisten, wodurch ein reproduzierbares Ergebnis erzielt werden kann. Als Ergebnis entsteht das in Bild 6 gezeigte Probedruckteil. Unter Bild 6a ist eine abwechselnde Linienbreite zu sehen, die oben (1) mit einer schmalen Linie beginnt. Danach ist eine dicke Linie zu sehen (zweite von oben), im Anschluss wieder eine dünne (dritte von oben) usw. Bei (6) endet der Probedruck mit einer dicken Linie. Das vergrößerte Bild 6b zeigt die unterschiedlichen Linienbreiten deutlich erkennbar.

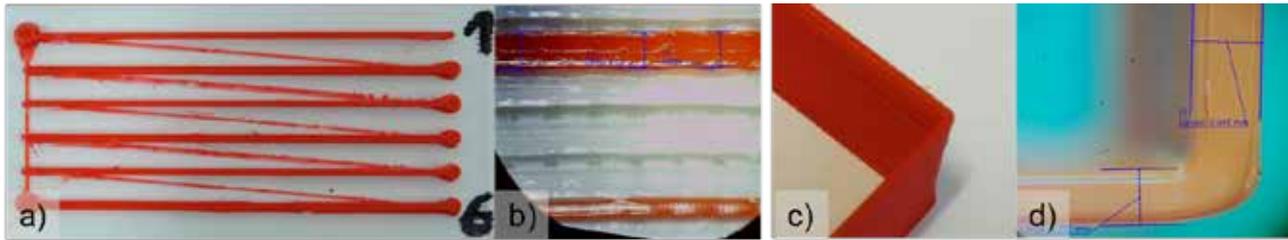


Bild 6: a) Probdruckteil „Platte“; b) Ansicht „Platte“ unter Mikroskop; c) Probdruckteil „Kasten“; d) Ansicht „Kasten“ unter Mikroskop

Das Probdruckteil „Kasten“ besteht aus einem quadratischen Kasten ohne Boden mit 30 mm Kantenlänge. Für den Druck wurde der Druckkopf nicht gedreht, daher wurden die rechte und linke Wand mit einer dicken Filamentbahn gedruckt, die obere und untere Wand mit einer dünnen Filamentbahn. In diesem Beispiel hat das Projektteam den Materialdurchfluss durch die Düse optimiert, was zu anderen Wandstärken sowohl bei dünner als auch bei dicker Filamentbahn führt. Ein Effekt, der hier gut sichtbar wird, ist das „Verschmieren“ des Materials beim Druck mit der schmalen Düsenseite: Während die gedruckte Filamentbahn mit der breiten Düsenseite (Öffnung 0,87 mm) einen Materialauftrag von 0,95 mm Breite erzeugte (Bild 6d), wurde durch die schmale Düsenseite (Öffnung 0,44 mm) eine 0,77 mm breite Filamentbahn aufgetragen. Das sind fast 75 Prozent mehr als eigentlich gewünscht. Zu erklären ist dieser Effekt damit, dass durch die relativ große Schichthöhe von 0,2 mm insgesamt viel Material extrudiert wird, das durch den Auftrag mit der schmalen Düsenseite nicht genau genug aufgetragen werden kann bzw. durch die Düse auf die Seite gedrückt wird [3]. Ein linearer Zusammenhang zwischen Druckdüsengeometrie und tatsächlich entstandenen Linienbreiten kann also nicht automatisch angenommen werden.

## 5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Im Rahmen des im Vorangegangenen beschriebenen Forschungsvorhabens konnte erfolgreich der Grundstock für eine weitergehende Bearbeitung des Themengebietes „3D-Druck mit variablen Filamentbahnen“ erarbeitet werden.

Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zeigten, dass beim FDM-Verfahren eine Druckdüse mit einem rechteckigen Querschnitt signifikant unterschiedlich breite Filamentbahnen beim Aufbau eines Werkstücks erzeugen kann. Weiterhin haben sie ein einfaches Design entwickelt und umgesetzt, bei dem der gesamte Druckkopf um bis zu 90 Grad gedreht wird.

Die mit dieser Anlage erzeugten Probeteile weisen ein hohes Potential für eine erfolgreiche Weiterentwicklung der Thematik auf.

Als Punkte für weitere Optimierungen und Weiterentwicklungen kommen in Betracht:

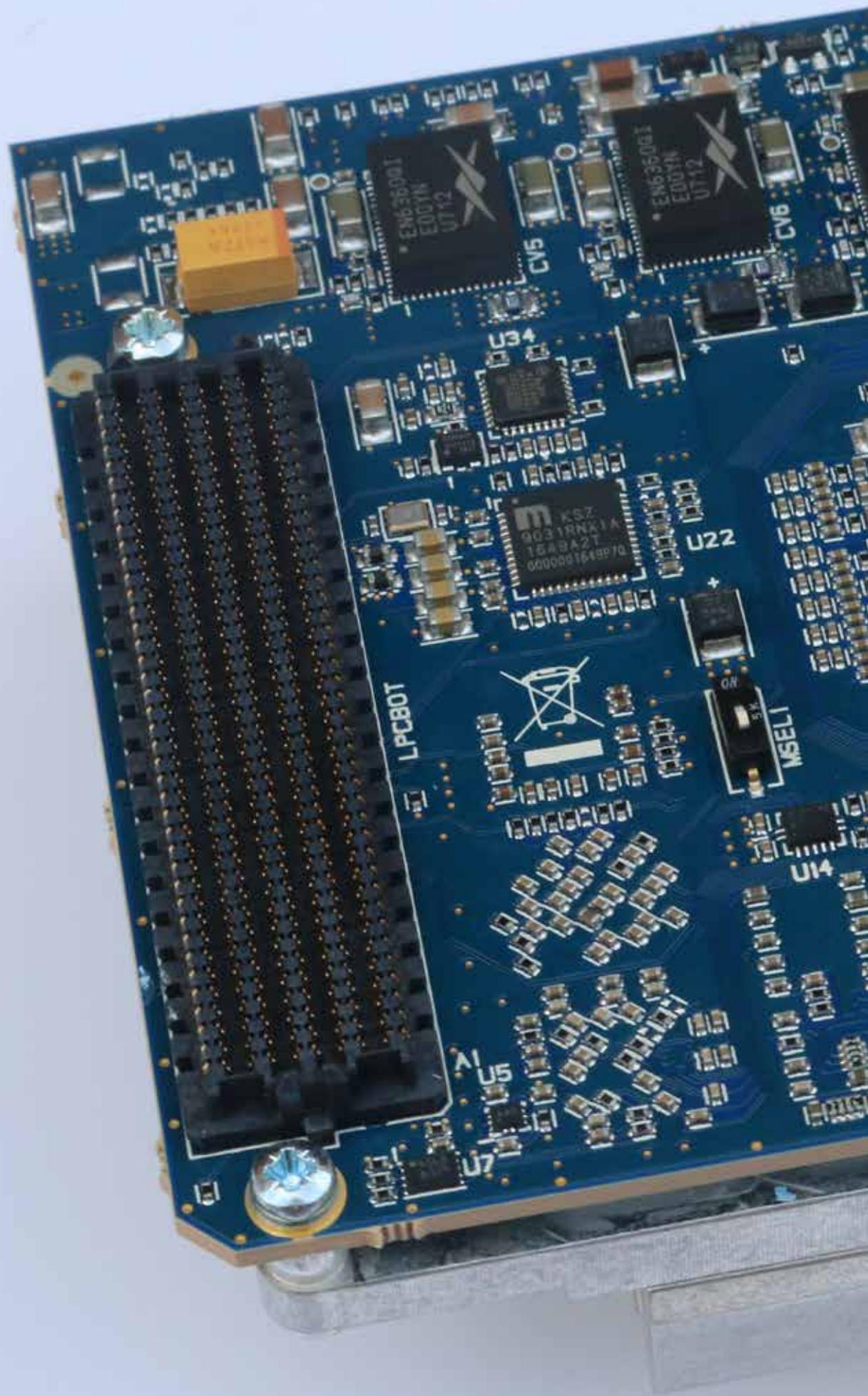
- Verbesserung der Druckdüsenöffnung: die Qualität der rechteckigen Öffnung in der Druckdüse muss weiter verbessert werden. Dies kann durch andere Fertigungsverfahren oder eine genauere Führung des Diamantschneiddrahtes realisiert werden.
- Der Durchfluss des Kunststoffes durch die Düse und die Applikation des Kunststoffes müssen untersucht werden. Dazu kommen fluiddynamische Simulationen für den Austritt des Werkstoffs aus der Düse und der Ausbildung der Filamentbahn in Betracht.

- Die Breite der Filamentbahn stellte sich in den hier durchgeführten Untersuchungen als nichtlinearer Zusammenhang aus Düsenöffnung, Schichtdicke, Verfahrensgeschwindigkeit des Druckkopfes usw. dar. Die Einflussgrößen müssen weiter untersucht werden und es sollte ein mathematischer Zusammenhang abgeleitet werden. Weiterhin muss auch die Zwischenschichthaftung nach Sun et. al. [2] in die Parameteroptimierung mit einbezogen werden.
- Letztlich muss die „Slicer-Software“, die das zu druckende Bauteil in Schichten zerlegt und dafür einen Maschinencode erzeugt, modifiziert werden. Diese Programmlösung muss beispielsweise einen Algorithmus enthalten, der die logische Verwendung der zur Verfügung stehenden Schichtbreiten auf die komplexen Druckgeometrien umsetzt. Zum Beispiel sind breite Schichten für großflächige Druckaufgaben sinnvoll, wohingegen die schmalen Druckschichtbreiten für feine Randgeometrien verwendet werden können. Deshalb muss auch die richtige Winkelposition des Druckkopfs zur gewünschten Verfahrriichtung gewährleistet werden. Besonders bei kreisförmigen Druckgeometrien wäre der Servomotor andauernd in Bewegung.

Anhand der oben beschriebenen möglichen Arbeitsfelder wird klar, dass die Thematik „3D-Druck mit variablen Filamentbahnen“ eine nichttriviale Aufgabenstellung ist, die entsprechend hohes Potential für die Zukunft mitbringt um die notwendigen Arbeitspakete bis hin zu einer vollumfänglichen Lösung zu tragen.

## 6. Literatur

- [1] Gebhardt, Andreas (2016) „Additive Fertigungsverfahren“, 5. Auflage, 735 Seiten, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, München, ISBN: 978-3-446-44401-0
- [2] Q. Sun, G.M. Rizvi, C.T. Bellehumeur, P. Gu, (2008) “Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments”, Rapid Prototyping Journal, Vol. 14 Issue: 2, pp.72-80, <https://doi.org/10.1108/13552540810862028>
- [3] Brian N. Turner, Scott A Gold, (2015) “A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness”, Rapid Prototyping Journal, Vol. 21 Issue: 3, pp.250-261, <https://doi.org/10.1108/RPJ-02-2013-0017>



EN635091  
EDDYN  
U712

EN635091  
EDDYN  
U712

KSZ  
9031RNK1A  
1648A21  
0000001648P70

LPCBOT



MSL1

U4

U5

U7

E1



10070165

MPC801

T.M. 120612  
94V-0 840228

U15

U36

A1

R005

CV2

U18

U42

U28

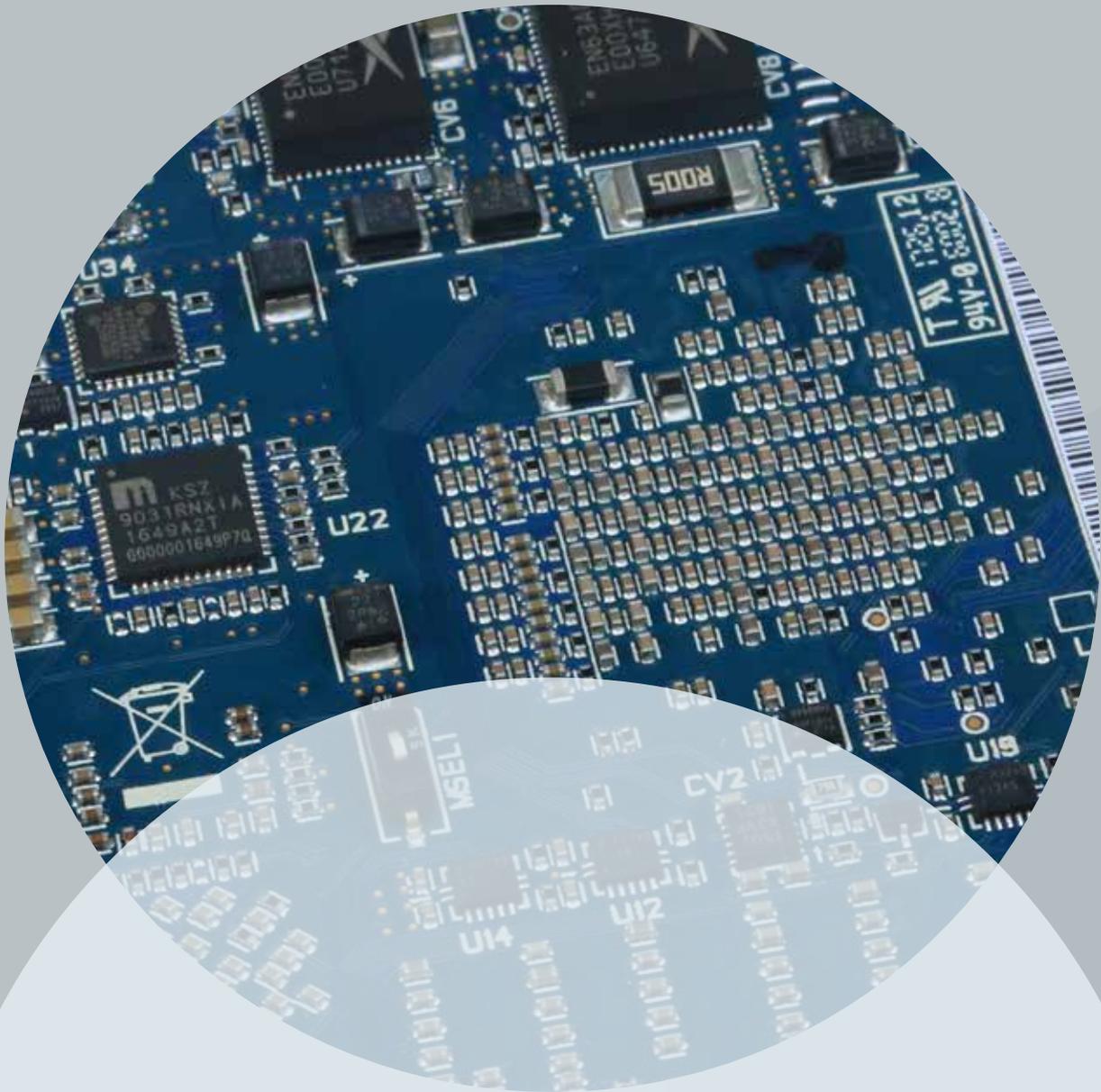
U27

U12

LTPFX  
47  
83

CV8

ENG 341061  
EDD01M  
U647



# SoC-R – Evaluierung neuartiger „System-on-a-Chip“ Plattformen für die Echtzeitberechnung

Prof. Dr. Flaviu Popp-Nowak

Sebastian Wendel, M. Sc.

Quoc Viet Bui, B. Eng.

Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik

Institut ELSYS

Technische Hochschule Nürnberg

## Wesentliche Projektziele

SoC FPGAs vereinen Prozessor und FPGA Architekturen in einem Chip, wodurch die Vorteile von Prozessor und FPGA optimal genutzt werden können. Das Ziel dieses Vorlaufforschungsprojekts ist, SoC FPGA Plattformen im Bereich der Regelung für leistungselektronische Systeme und elektrische Antriebe auf ihre Echtzeitfähigkeit zu untersuchen. Insbesondere neuartigere Regelungsverfahren, wie die modellprädiktive Regelung, erfordern einen sehr hohen Rechenaufwand, der bei der realen Implementierung eine enorme Herausforderung darstellt. Durch dieses Forschungsvorhaben sollen ein besseres Verständnis und neue Erkenntnisse mit der automatischen Codegenerierung, dem Rapid Control Prototyping (RCP), der Berechnungen mit Fließkommazahlen auf programmierbarer Logik, sowie der Timing- und Ressourcenoptimierungen für Echtzeitberechnungen mit SoC FPGAs gewonnen werden.

### 1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2017
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik / Institut ELSYS
Projektleitung	Prof. Dr. Flaviu Popp-Nowak
Kontaktdaten	E-Mail: flaviu.popp-nowak@th-nuernberg.de

### 2. Ausgangslage

Die Kombination von einem Prozessor und einem Field Programmable Gate Array (FPGA) auf einem Chip machen SoC FPGAs zu einer starken Rechenplattform. Im Vergleich zu einzeln verbauten Mikroprozessoren und FPGAs bieten SoC FPGAs eine wesentlich höhere Integrationsdichte, einen geringeren Leistungsverbrauch, geringeren Platzbedarf auf Leiterplatten und eine hohe Bandbreite bei der Schnittstelle zwischen Prozessor und FPGA. Vor diesem Hintergrund kommen SoC FPGAs zunehmend mehr zum Einsatz. Daher ist es für Forschungs- und Entwicklungsinstitutionen unerlässlich, sich mit solchen SoC FPGA Rechenplattformen zu beschäftigen.

Das Projekt-Forschungsteam hat bereits sehr viele Erfahrungen im Bereich der Digitaltechnik und des Embedded Systems. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler haben bereits mit Parallelrechnern, Mikrocontrollern und FPGAs gearbeitet und beherrschen verschiedene Programmier- und Hardwarebeschreibungssprachen. Das Forschungsteam beschäftigt sich seit längerem mit SoC FPGAs und neuerdings mit dem HDL Coder

von MathWorks zur automatischen Generierung von VHDL-Code. Da das Institut für leistungselektronische Systeme (ELSYS) bereits erste Erfahrungen mit dem HDL Coder hat und SoC FPGAs am Institut bereits Anwendung finden, soll die Vorlaufforschung SoC-R – Evaluierung neuartiger „System-on-a-Chip“ Plattformen für die Echtzeitberechnung in Zusammenarbeit mit dem Institut ELSYS erfolgen.



Abb.1: Zedboard Zynq-7000 ARM/FPGA SoC Development Board

Das Institut ELSYS beschäftigt sich derzeit verstärkt mit neuartigen Regelungsverfahren, wie das modellprädiktive Regelungsverfahren (MPC). Solche Regelverfahren konnten bereits auf einem Mikrocontroller von Texas Instruments (TI) implementiert werden. Dabei konnte das Forschungsteam feststellen, dass die komplexen MPC-Algorithmen nicht schnell genug berechnet werden konnten. Daher war ein Umstieg auf eine stärkere Rechenplattform notwendig, wobei die Auswahl auf das Zedboard Zynq-7000 ARM/FPGA SoC Development Board fiel (siehe Abb. 1), das im Folgenden nur noch als Zedboard bezeichnet wird. Das Zedboard konnte durch sein gutes Preis-Leistungs-Verhältnis sowie seine hardwaretechnische Flexibilität überzeugen. Da das Institut ELSYS noch recht wenig Erfahrung mit FPGAs hatte, hat das Institut ELSYS Interesse, in Zusammenarbeit mit dem Projekt-Forschungsteam mehr über SoC FPGAs in Erfahrung zu bringen.

### 3. Ziele des Forschungsprojekts

Im Rahmen dieses Vorlaufforschungsprojekts soll die Echtzeitfähigkeit von SoC FPGAs mit neuartigen Regelungsverfahren, insbesondere der MPC, evaluiert werden. Hierfür werden im speziellen ein Xilinx Zynq-7000 All Programmable SoC und ein Intel Arria 10 FPGA betrachtet. Das Forschungsteam zielt darauf ab, die Regelung dabei auf dem FPGA zu implementieren. Über den Prozessor soll es möglich sein, Sollwerte vorzugeben, Istwerte auszulesen und Parameter zu setzen. Somit sind zeitkritische Aufgaben im Wesentlichen vom FPGA zu bearbeiten, und der Prozessor ist für Aufgaben zuständig, die nicht zwingend in Echtzeit laufen müssen. Um eine adäquate Evaluation der Echtzeitfähigkeit der SoC FPGAs durchzuführen, wird ein weitgehend laufzeitop-

timiertes Design angestrebt. Um dieses zu implementieren, ist die Erfüllung einiger grundlegender Anforderungen erforderlich:

- Aufbau eines laufzeitoptimierten und zur automatischen Codegenerierung geeigneten Simulink-Modells
- Gutes Verständnis über die Einstellmöglichkeiten und Funktionsweise des HDL Coders
- Gutes Verständnis über den Aufbau und den Anforderungen des Systems

Ein wesentlicher Teil dieses Forschungsvorhabens wird darin bestehen, fundiertes Wissen über diese grundlegenden Anforderungen aufzubauen, bevor die Echtzeitfähigkeit der SoC FPGAs evaluiert werden kann.



Abb. 2: Achilles Instant-Development Kit Arria 10 SoC SoM

Wie in Kapitel 2 erwähnt, arbeitet das Institut ELSYS bereits mit dem Zedboard, das einen Xilinx Zynq-7000 All Programmable SoC besitzt, der im Folgenden nur noch als Zynq-7020 bezeichnet wird. Eine weitere interessante Rechenplattform ist das Intel Arria 10 FPGA, das auf dem Achilles Instant-Development Kit Arria 10 SoC System-on-Module (SoM) (siehe Abb. 2) von REFLEX CES verbaut ist (im Folgenden als Arria 10 bezeichnet). Beim Arria 10 sind vor allem die Fließkomma-Recheneinheiten von großem Interesse.

Ein weiterer Aspekt ist zu zeigen, dass ein Wechsel der Rechenplattform keine große Herausforderung darstellt.

#### 4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Durch die automatische Codegenerierung erfolgt die Entwicklung und Verifizierung von neuartigen Regelalgorithmen schneller und effizienter. Dafür ist die Regelung in Simulink zu implementieren. Durch den Einsatz des HDL Coders von MathWorks kann der synthetisierbare VHDL-Code der Regelung automatisch generiert werden. Mit dem generierten VHDL-Code ist es dann möglich, das SoC FPGA zu programmieren. Dieser Workflow ist in Abb. 3 dargestellt.

Das Zynq-7020 und das Arria 10 verfügen über einen dual-core ARM Prozessor, der über eine AXI-Schnittstelle mit dem FPGA kommunizieren kann. Eine AXI-Schnittstelle kann mit Hilfe des HDL Workflow Advisor einfach implementiert werden. Eine andere Möglichkeit ist es, den Intellectual Property (IP) Core ohne AXI-Schnittstelle zu generieren und die AXI-Schnittstelle mit Hilfe von Xilinx Vivado oder Altera Quartus zu erstellen. Eine Trennung der AXI-Schnittstelle von den Rechenalgorithmen erleichtert die Generierung des Codes und erlaubt eine flexible Gestaltung der Hardware in den Entwicklungstools der FPGA-Hersteller. So entstehen mehr Möglichkeiten, eine selbstgeschriebene Hardware zu integrieren.



Abb. 3: Workflow zur automatischen Generierung von HDL-Code aus MATLAB/Simulink

Beim Erstellen eines Simulink-Modells, aus dem anschließend automatisiert der VHDL codegeneriert werden soll, ist zu beachten, dass das Modell über folgende Eigenschaften verfügt:

- Zeitdiskreter Aufbau
- Definierte Taktfrequenz
- Definierte Schnittstellen
- Verwendung von Festkommazahlen

Es ist auch zu beachten, dass nicht alle von MATLAB und Simulink zur Verfügung gestellten Funktionen und Funktionsblöcke vom HDL-Coder unterstützt werden. Die Verwendung ist abhängig von der MATLAB/Simulink Version und die Neuerungen in jeder Version sind rasant. Die aktuellen Untersuchungen verwenden die Version 2016a.

Als Einstieg implementierte das Projektteam zunächst einfachere Module, wie z. B. ein PWM Modul, einfache arithmetische Operationen und ein IIR Filter in Simulink. Für diese Modelle hat das Team mit Hilfe des HDL-Coders den VHDL Code automatisch generiert und synthetisiert, wobei das Team folgende Ergebnisse für beide Plattformen bereits erreichen konnten:

- Erfolgreiche Kommunikation zwischen dem ARM Prozessor und dem FPGA über die AXI Schnittstelle
- Erfolgreiche Ein- und Ausgabe von Signalen an den Hardware Pins
- Erfolgreiche Implementierung eines IP Cores mit Fließkommazahl (bisher nur für Arria 10)

Die native Modellierung in Simulink verwendet Fließkommazahlen und bietet dadurch eine nahezu unbegrenzte Dynamik der Signale. Diese Eigenschaft bleibt erhalten, wenn aus Simulink-Modellen ein Code für fließkommafähige Plattformen generiert wird, z. B. für Signalprozessoren. Die FPGAs haben traditionell keine direkte Un-

terstützung für Operationen mit Fließkommazahlen geboten. Mit dem Erscheinen der Familie Arria10 von Intel sind zum ersten Mal Tausende von Gleitkommaeinheiten in einem Chip verfügbar, die über eine Gesamtrechenleistung im Teraflopbereich verfügen. Die für FPGA typische flexible Strukturierung der Gleitkommaeinheiten und die native Nebenläufigkeit der Implementierung sichern für die neue Technologie die aktuell höchste Rechenleistung pro Watt.

Seit langem werden Fließkommazahlen-Bibliotheken für FPGAs angeboten, die auch im HDL-Coder unterstützt werden. Die Ergebnisse sind aber ressourcenintensiv und die Unterstützung in den Synthesetools der FPGA-Hersteller ungleich. So gibt es vom HDL-Coder für die Codegenerierung mit Fließkommazahlen in Xilinx Vivado keine Unterstützung (s. [1]). Für Intel Arria10 erfolgt die Implementierung in VHDL mit Fließkommazahlen über die Bibliothek „ALTERA\_FP\_FUNCTIONS“ (s. [2]), aber mit dem HDL Workflow Advisor werden lediglich Implementierungen mit Festkommaeinheiten und Hilfslogik erzeugt. Eine gründliche Untersuchung des Problems hat gezeigt, dass ein korrektes Funktionsmapping zur Fließkommahardware möglich ist, wenn bestimmte Optionen durch MATLAB-Skripten gesetzt werden. Das Projektteam erwartet, dass neuere Softwareversionen diese Probleme beheben.

Der Ansatz verspricht eine schnellere Entwicklung neuer Algorithmen in MATLAB/Simulink mit direkter Umsetzung in einer Hardware mit kleinen Abmessungen (z. B. Arria 10 SoC SoM mit 86 x 95 mm) und sehr hoher Rechenleistung. Die Erkenntnisse, die man in dieser Umgebung gewinnt, können danach herunter getrimmt werden, um preissensible Lösungen für die Industrie abzuleiten.

Das Projektteam hat im Rahmen der Untersuchung zahlreiche Hindernisse überwunden, die den Einstieg in diese neue Technologie erschweren. Die Komplexität des Übergangs von Simulink über HDL-Coder bis zur FPGA-Synthese wird von der Entwicklungsumgebung nicht immer optimal unterstützt und nicht selten wird für eine Anwendung FPGA-Erfahrung vorausgesetzt. Nachdem nun ein geprüfter Workflow für die Berechnung mit Fließkommazahlen zur Verfügung steht, wird der Einstieg für weitere Forschungsgruppen erleichtert.

Nachdem ein grundlegendes Verständnis von Simulink, dem HDL-Coder, der Berechnung mit Fließkommazahlen und den Synthesetools aufgebaut wurde, wird nachfolgend am Beispiel der MPC Regelung die Integration der HDL generierten IP Cores sowie deren Implementierung gezeigt.

Die nachfolgende Herangehensweise beschreibt den Workflow, der am Institut ELSYS im Rahmen von SoC-R zur Regelung von elektrischen Maschinen mit SoCs entwickelt wurde. Der Workflow wurde mit dem Zynq-7020 erprobt. Die Erfahrung am Institut hat gezeigt, dass die Implementierung von MPC Algorithmen auf herkömmlichen Mikrocontrollern sehr ressourcenintensiv und zumeist in der Berechnungsfrequenz limitiert ist. Daher ist eine FPGA Implementierung der parallelisierbaren Algorithmen naheliegend.

Durch die Integrität von Prozessor und FPGA wurden alle zeitkritischen Aufgaben wie die AD-Wandlung, das Auslesen des Inkrementalgebers, die Generierung von InterLock-Zeiten für die Leistungsschalter sowie die Stromregelung zunächst in Simulink erstellt, erprobt und optimiert. Anschließend wurden für die genannten Subsysteme

der HDL-Coder genutzt, um einen IP Core mit synthetisierbaren VHDL-Code zu erzeugen. Diese IP Cores wurden in Xilinx Vivado, neben manuell geschriebenen IP Cores und vom Hersteller zur Verfügung gestellten IP Cores, integriert, synthetisiert und implementiert. Dadurch konnte das Projektteam einen sogenannten „Bitstream“ zur Programmierung des FPGAs erzeugen. Die Parametrierung der IP Cores erfolgt über die AXI-Schnittstelle durch den ARM Prozessor. Dieser ermöglicht langsamere Berechnungen zur Laufzeit z. B. zur adaptiven Nachführung von Regelungsparametern. Der ARM Prozessor wird durch die SDK, einer ähnlichen Entwicklungsumgebung wie Eclipse, programmiert. Die gesamte experimentelle Implementierung der Algorithmen erfolgte zunächst auf dem genannten Evaluierungsboard „Zedboard“.

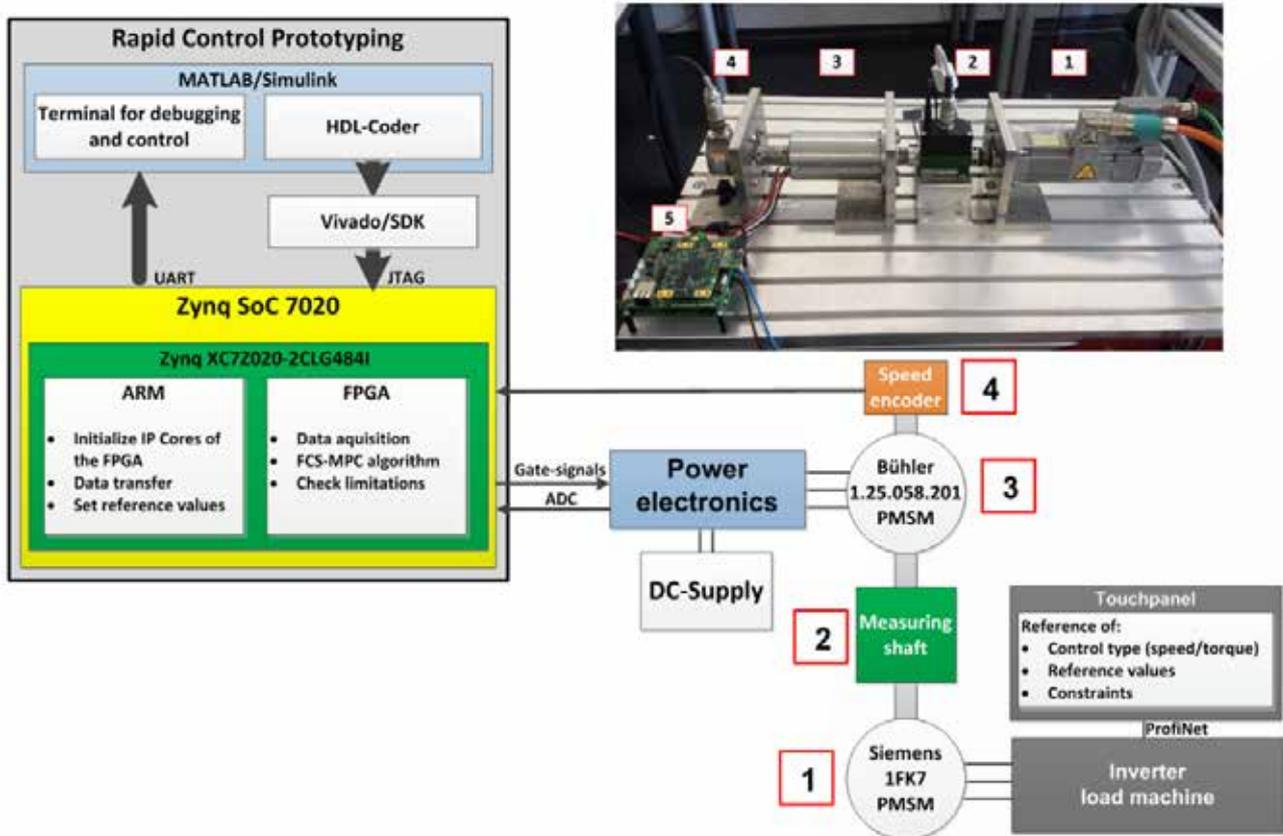


Abb. 4: Rapid Control Prototyping Workflow mit anschließender Implementierung

Das Projektteam hat im Rahmen der Vorlauftforschung SoC-R eine eigene Hardware entwickelt. Das hat sich kostensparend ausgewirkt und die Hardware für die Regelung von leistungselektronischen Systemen optimiert. Das umfasste die Anbindung von schnellen und parallelen ADC Bausteinen, einer Echtzeitkommunikationsschnittstelle sowie einer entkoppelten Spannungsversorgung. Der gesamte Workflow von Simulink zur realen Anwendung sowie die Aufteilung der Aufgaben auf dem SoC sind in Abb. 4 zusammengefasst.



Abb. 5: Eigenentwicklung eines SoC-Systems für die Regelung von elektrischen Antrieben im Rahmen der Vorlaufforschung

Ergänzend zeigt Abb. 4 eine reale experimentelle Messung am Prüfstand des Instituts ELSYS. Hierbei wird die im Rahmen des Vorlaufforschungsprojekts SoC-R eigenentwickelte Hardware verwendet. Abb. 5 zeigt die Berechnungseinheit im Detail. Sie besteht aus einer kostengünstigen SoC Platine von Trez Electronics (links) sowie der selbst entwickelten Trägerplatine (rechts). Die Trägerplatine ist auf die Regelung von leistungselektronischen Systemen optimiert. Durch das gezeigte aufsteckbare Konzept ist es möglich, ein einheitliches SoC sowie den Programmier-Workflow in Kombination mit verschiedenen Trägerplatinen zu nutzen. Die Trägerplatinen können hierbei auf spezielle Anwendungen (z. B. Regelung, Bildverarbeitung, Kommunikation) zugeschnitten sein. Dadurch bietet die in der Vorlaufforschung entstandene Plattform mit Workflow eine universelle Anwendbarkeit, auch für verwandte Themenfelder an der Hochschule.

## 5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Im Laufe der Vorlaufforschung konnte das Projektteam ein tiefgreifendes Verständnis über die automatische Codegenerierung mit dem HDL-Coder aufbauen. Aus den gewonnenen Erkenntnissen lassen sich die Bedienbarkeit, die Laufzeiten sowie der Leistungs- und Ressourcenverbrauch weiter optimieren. Dabei gibt es noch einige Aspekte, die genauer untersucht werden können:

- Ausnutzung von Pipelinestufen
- Ausnutzung von FPU's
- Kommunikation von IP Cores mit unterschiedlichen Betriebsfrequenzen
- Gegenüberstellung von automatisch generiertem und per Hand geschriebenem Code

Zusätzlich wurde in der Vorlaufforschung im Institut ELSYS eine feldorientierte Regelung (FOC) für eine Asynchronmaschine modelliert, die ebenfalls auf einem SoC FPGA implementiert werden kann. Mit der MPC und der FOC sollen die SoC FPGAs in Hinsicht auf Laufzeit- und Ressourcenoptimierung weiter untersucht werden, um weiteres Potenzial nutzbar zu machen.

Aus dieser Vorlaufforschung konnte der Antragsteller ein fachwissenschaftliches Wahlpflichtfach an der Technischen Hochschule Nürnberg Georg Simon Ohm zum Thema SoC FPGAs einführen. Ein weiteres Ziel ist, basierend auf dieser Vorlaufforschung, weitere Forschungsprojekte zu generieren.

So wurde das Forschungsvorhaben „Modellbasierte und intelligente Kleinantriebstechnik“ (MIKA) in Kooperation mit der Afag GmbH und der Kübrich Ingenieurgesellschaft mbH & Co. KG des Fördergebers VDI/VDE mit 232.247 Euro als förderungsfähig befunden. Das Ziel ist, in diesem Vorhaben eine flexible Hardware sowie intelligente Regelalgorithmen für den universellen Betrieb von rotatorischen und translatorischen Kleinantrieben auf Basis eines SoC FPGAs zu entwickeln.

Der Antrag für das Forschungsprojekt „Variophasenmaschine“ befindet sich in Bearbeitung. Bei dieser neuartigen elektrischen Maschine sind massive Leiterstäbe in den Nuten des Stators verlegt. Aufgrund der sehr geringen Induktivität sind besonders hohe Schaltfrequenzen erforderlich, um den entstehenden Rippel-Strom gering zu halten. Ein möglicher Lösungsansatz für die Ansteuerung der Vielzahl an Halbleitern und hohen erforderlichen Schaltfrequenzen wäre die Verwendung von einem in dieser Vorlaufforschung untersuchten SoC FPGAs.

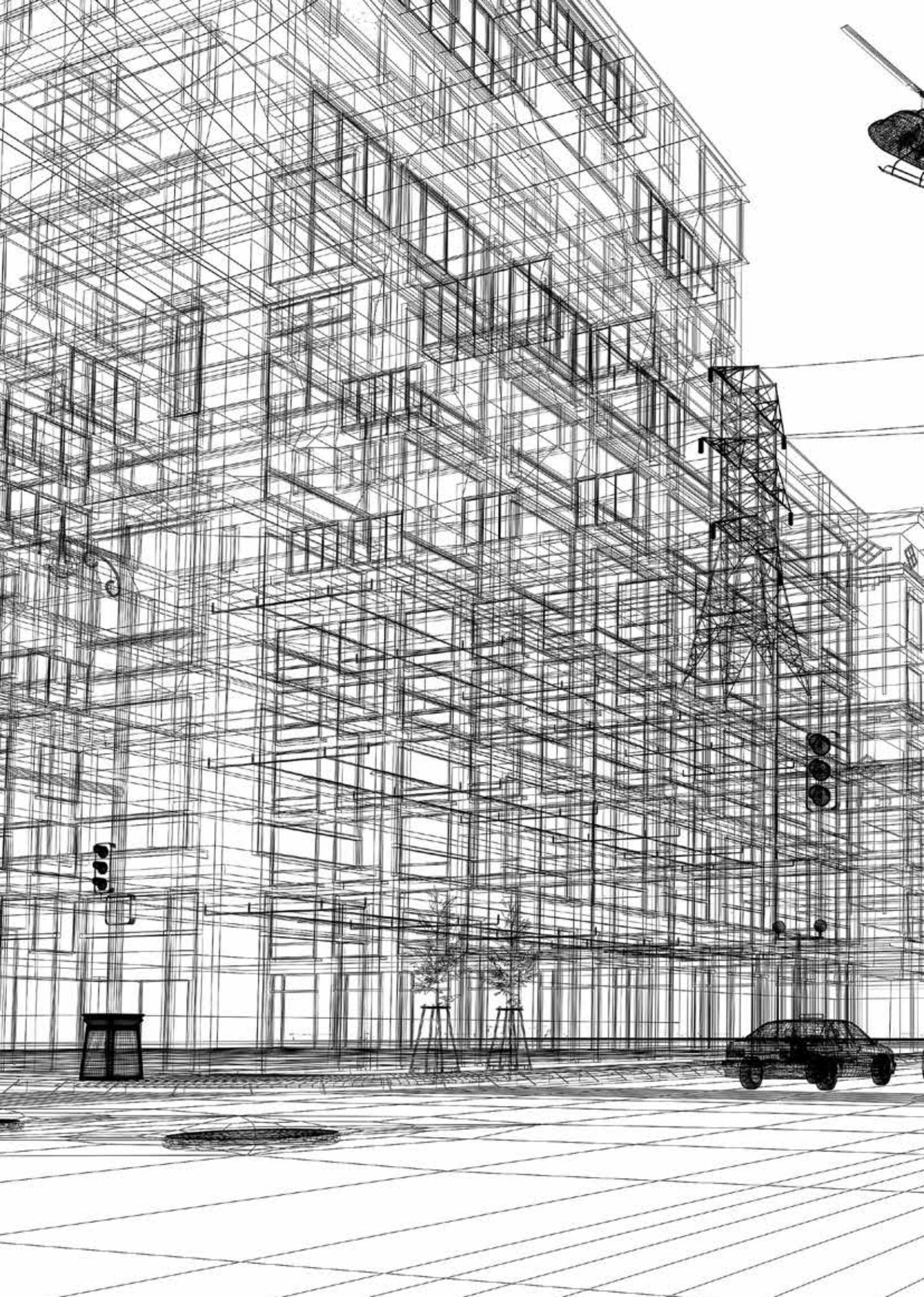
Seit November 2017 beteiligt sich eine Kooperation aus der Technischen Hochschule Nürnberg, der Technischen Universität München sowie der Universidad de Santiago de Chile an der Entwicklung einer gemeinschaftlichen Berechnungsplattform für leistungselektronische Systeme auf Basis des Zynq-Ultrascale SoCs. Die Zusammenarbeit unter Leitung der Technischen Hochschule Nürnberg hat bereits begonnen. Im internationalen Kooperationsprojekt „Ultra-Zohm“ wird eine universelle Berechnungsplattform für leistungselektronische Systeme entstehen. Hierdurch können neuartige und intelligente Regelalgorithmen schon frühzeitig implementiert und erprobt werden. Diese Erprobung dient als „Enabler“ für Industriekooperationen und öffentliche Forschungsaktivitäten. Seit Dezember 2017 hat das Forschungsteam bereits erste Leiterplatten und Software erprobt. Ein erster vollständig erprobter Prototyp wird Ende 2018 erwartet.

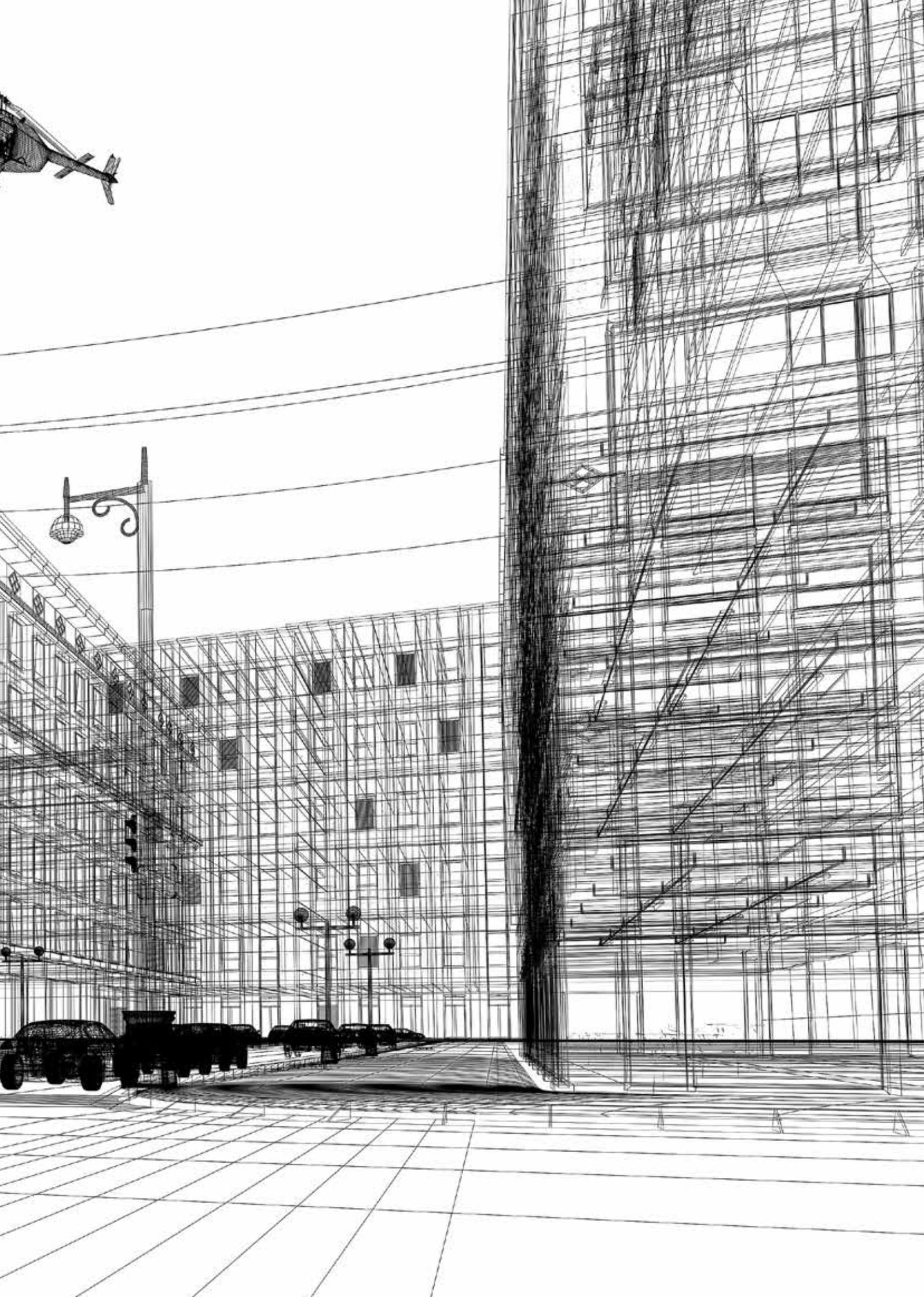
Die gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse wurden durch wissenschaftliche Veröffentlichungen und auf internationalen Konferenzen [3] [4] vorgestellt. Weitere Publikationen sind geplant.

## 6. Literatur

- [1] MathWorks, HDL Coder Support for FPGA Floating-Point Library Mapping, 24. November 2017.  
<https://www.mathworks.com/help/hdlcoder/ug/hdl-coder-support-for-fpga-floating-point-library-mapping.html>
- [2] MathWorks, Generate HDL Code for FPGA Floating-Point Target Libraries, 24. November 2017.  
<https://www.mathworks.com/help/hdlcoder/ug/map-to-an-fpga-floating-point-library.html>
- [3] S. Wendel, A. Dietz, R. Kennel, “FPGA Based Finite-Set Model Predictive Current Control for Small PMSM Drives With Efficient Resource Streaming” 4th Symposium on Predictive Control of Electrical Drives and Power Electronics, 2017.
- [4] S. Wendel, A. Dietz, R. Kennel, “Area-Efficient FPGA Implementation of Finite Control Set Model Predictive Current Control” Southern Power Electronics Conference, 2017.









# BIM EnOPT

## Building Information Modeling für energetisch optimierte Gebäude

Prof. Dr. Wolfram Stephan  
Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik  
Institut für Energie und Gebäude  
Technische Hochschule Nürnberg

## Wesentliche Projektziele

Building Information Modeling (BIM) wird als eine kooperative Arbeitsmethodik bezeichnet, „mit der auf der Grundlage digitaler Modelle eines Bauwerks die für seinen Lebenszyklus relevanten Daten konsistent erfasst, verwaltet und in einer transparenten Kommunikation zwischen den Beteiligten ausgetauscht oder für die weitere Bearbeitung übergeben werden“. Im Projekt werden insbesondere **Planungstools unter Integration von Building Information Modeling** mit offenen Schnittstellen erprobt und die **Grundlagen zur Vereinheitlichung von Datenmodellen** für Planung und Betrieb von Gebäuden inklusive Monitoring des Gebäudeenergieverbrauchs erfasst.

Anhand von Mustergebäuden (Wohnung, Büro) können die BIM gestützten Prozesse zur energetischen Optimierung demonstriert und weiterentwickelt werden. Das Forschungsteam um Prof. Dr. Wolfram Stephan fokussiert darauf, daraus neue Forschungsprojekte zu entwickeln.

### 1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2017
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Maschinenbau und Versorgungstechnik / Institut für Energie und Gebäude
Projektleitung	Prof. Dr. Wolfram Stephan
Kontaktdaten	E-Mail: wolfram.stephan@th-nuernberg.de

### 2. Ausgangslage

Die Digitalisierung hat in der letzten Dekade eine Vielzahl von Branchen grundlegend verändert. Diese Herausforderung wird oftmals mit Industrie 4.0 umschrieben. Auch in der Baubranche ist eine Digitalisierung des Planens, Bauens und Betriebens von Bauwerken erforderlich, um auch in dieser Branche zu einer Erhöhung der Wertschöpfung, Arbeitsproduktivität und Qualität zu kommen.

Diese Digitalisierung des Planens, Bauens und Betriebens von Bauwerken wird heutzutage unter dem Begriff Building Information Modeling (BIM) zusammengefasst. Nach der Definition des Stufenplans Digitales Planen und Bauen, der die Einführung moderner IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken definiert, wird Building Information Modeling als eine kooperative Arbeitsmethodik bezeichnet, „**mit der auf der Grundlage digitaler Modelle eines Bauwerks die für seinen Lebenszyklus relevanten Daten konsistent erfasst, verwaltet und in einer transparenten Kommunikation zwischen den Beteiligten ausgetauscht oder für die weitere Bearbeitung übergeben werden**“.

Ende 2015 wurden mit dem Stufenplan für Deutschland die Ziele der Bundesregierung formuliert, Building Information Modeling (BIM) in Deutschland bis 2020 stufenweise einzuführen. Auch in 2016 von der Bundesregierung neu gestarteten Forschungsinitiativen wird das Thema Building Information Modeling in den Mittelpunkt für zukünftige Forschungsaufgaben gestellt:

*„Fragen der Digitalisierung, speziell der Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien, spielen bei der Umsetzung der Wärmewende eine zentrale Rolle. Hier sind unter anderem neue Planungsinstrumente mit offenen Schnittstellen, das Thema **Building Information Modeling (BIM)** sowie geeignete Tools zur Informationsverbreitung und Vernetzung aller Akteure am Bau für den gesamten Lebenszyklus (Erstellung, Inbetriebnahme, Gebäudebetrieb, sowie Rückbau mit Weiter-/Wiederverwertung) gefragt.“*

Kernpunkte von BIM sind demnach:

- Einheitliches digitales Daten- und Prozessmodell des Gebäudes über alle Lebenszyklusphasen
- BIM-Datenmodelle und -Datenaustauschformate auf der Basis von IFC-Modellen

Die BIM-Methode kann vielfältig eingesetzt werden (siehe Abbildung 1):

- Unterstützung einer integralen Planung aller Gewerke (Objekt-, Tragwerks-, TGA-Planung etc.), d. h. Einsatz zur Koordination der Objekt- und Fachplanung
- Unterstützung der Fachplanung (Technische Gebäudeausrüstung, Tragwerksplanung, Brandschutz, Mengen- und Kostenermittlung etc.)
- Unterstützung der Projektsteuerung (Termin- und Kostenkontrolle)
- Unterstützung der Betriebs- und Nutzungsphase (CAFM, Energiemanagement etc.)

Für weite Teile der Bauindustrie ist das Arbeiten mit BIM-basierten Methoden neu und stellt insbesondere mittelständische Unternehmen vor eine große Herausforderung.

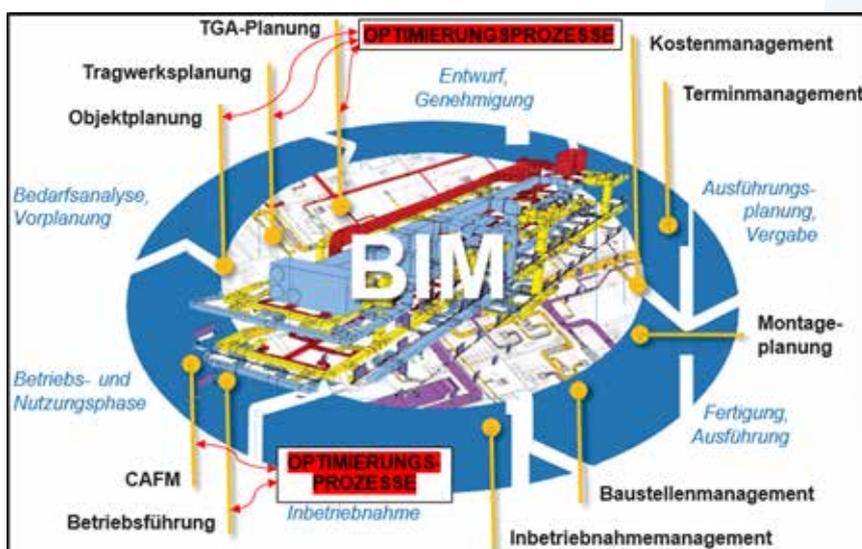


Abbildung 1: Lebenszyklusorientierter Einsatz von BIM bei Planung, Errichtung und Betrieb [nach van Treek [8]]

### 3. Ziele des Forschungsprojekts

Das Forschungsprojekt zielt darauf ab, in kooperativen Forschungsprojekten Building Information Modeling für energetisch optimierte Gebäude weiterzuentwickeln und zu erproben.

Das Forschungsteam adressiert zwei Schwerpunkte:

1. Forschungsbedarf besteht in der Erstellung und Erprobung von **Planungstools unter Integration von Building Information Modeling (BIM)** mit offenen Schnittstellen. Angestrebt wird der Einsatz der BIM-Methode in **Leuchtturmprojekten** zur Verbesserung und Optimierung der Arbeitsprozesse und Werkzeuge.
2. Ein weiterer Forschungsbedarf besteht in einer Verbesserung der Durchgängigkeit von Planung, Errichtung und Betrieb / Nutzung. Das umfasst die **Vereinheitlichung von Datenmodellen für die Planung und den Betrieb von Gebäuden inklusive Monitoring des Gebäudeenergieverbrauchs**.

Bei Bauvorhaben werden die angestrebten Ziele (Kosten, Termine, Energiebedarf, Raumkomfort etc.) oftmals nicht erreicht. Während die Definition der Datenmodelle (IFC-Standards) bereits weit fortgeschritten ist, fehlt es an erprobten Schnittstellen und BIM-basierten Planungstools. Insbesondere die Anbindung an Simulationsverfahren wie TRNSYS, EnergyPlus, IDA ICE oder DYMOLA erlaubt in allen Lebenszyklusphasen eine Vorhersage, Beurteilung und Optimierung von Energiebedarf, Umweltbelastung und Raumkomfort.

Die einheitliche und dauerhafte Nutzung von Gebäudedaten ist insbesondere in der Betriebs- und Nutzungsphase nicht gewährleistet. Es mangelt an einheitlichen Datenstrukturen für CAFM Systeme und an einem einheitlichen Kennzeichnungssystem für Daten aus der Gebäudeautomation oder den Energieerfassungssystemen.

### 4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Im Rahmen der Forschungsarbeiten hat das Team um Prof. Dr. Wolfram Stephan beispielhaft **praxisnahe Modelle** entwickelt. Für diese „BIM-Modelle“ ist der Einsatz

- in der energetisch optimalen und integralen TGA Planung [15] sowie
- in der Gebäude- und Anlagensimulation [25]

erprobt worden und diese Modelle stehen für Demonstrationsprojekte in Lehre und Forschung zur Verfügung.

#### Modellierung von Gebäuden

Die Modellierung erfolgte auf der Basis von Autodesk Revit [1], bei der Erstellung der Gebäudemodelle (siehe Abbildung 2) zeigte sich, dass entscheidend für die Anwendbarkeit der Modelle die Einstellungen in den Zeichnungsvorlagen sind [9].

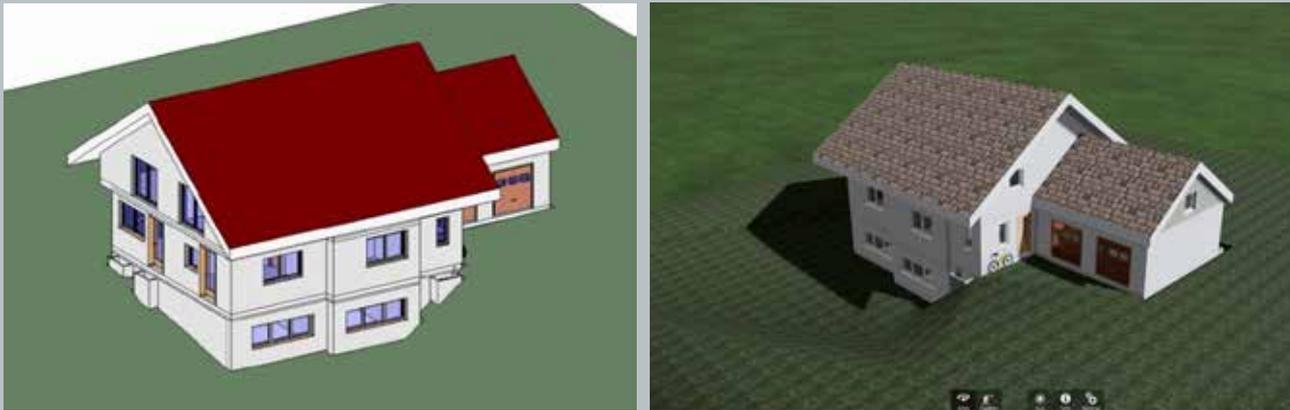


Abbildung 2: BIM-gerechte Gebäude- und Anlagenmodelle, erstellt mit Autodesk Revit und Autodesk Revit Live

## Revit LIVE

Revit Live [2] ist ein Cloud-Service von Autodesk, der es ermöglicht, ein in Revit erstelltes Modell in eine immersive virtuelle Umgebung zu verwandeln. Um einen guten Effekt für die Visualisierung zu erzeugen, ist es notwendig, das Modell mit Texturen zu mappen, d.h. die Bauteile werden mit Oberflächeneigenschaften ausgestattet.

Revit Live bietet eine direkte Schnittstelle zur Virtual Reality (VR). Mit nur einem Button kann das Live Modell an eine VR-Brille übergeben werden und ermöglicht somit einen immersiven Einblick in das Modell.

- Damit erschließen sich neue Einsatzgebiete für die Begutachtung von Planungsmodellen und
- Für die Einbindung von digitalen Planungsmodellen in die reale Welt (Augmented Reality) [22]

Alle Modelle sind mit Revit nachbearbeitet worden und können auch in Virtual und Augmented Reality (AR) Umgebungen verwendet werden.

## Weitere Vorstudien zum Einsatz von BIM

### 1. Gebäudemodelle (Revit) und TGA-Planung (Solar-Computer, Planca nova)

Über die in Revit integrierte Schnittstelle GBIS von Solar-Computer (SC) [19] kann das Gebäudemodell über eine gbXML-Datei an Solar-Computer übergeben werden. Die Austauschdatei realisiert mit einer bidirektionalen Kommunikationsschnittstelle den Datenaustausch zwischen Revit und Solar-Computer.

Die auf Grundlage der Berechnung resultierenden Änderungen werden durch diese Schnittstelle in Revit übernommen, wodurch ein stets aktuelles Gebäudemodell vorhanden ist. Für diese TGA-Planungen liegen Beispiele für die Planung von Heizungs- und Klimaanlage vor (siehe Abbildung 2).

Erkenntnisse:

- Berechnungsmodelle (Planca, SC etc.) können derzeit herstellereigenspezifische Modelle und Attribute nicht direkt nutzen. Hier gilt es, BIM Model View Definitionen (MVD) zu entwickeln, die es neben der zeichnerischen Darstellung erlauben, auch Berechnungsinformationen direkt mit zu übertragen.
- Der Stand der Technik sind derzeit überwiegend „nativ BIM“ (auch bekannt als „Closed BIM“) Lösungen.
- Ein Großteil der Hersteller von TGA-Komponenten bieten Grafik Modelle auf der Basis der VDI 3805 und im IFC Format an [20].

Geschlossene BIM Modellierungsumgebungen (Closed BIM) werden derzeit in der Praxis eingesetzt. Für offene BIM Modellierungsumgebungen (Open BIM) müssen die von „Building Smart“ [21] entwickelten Interoperabilitätsansätze noch erprobt und geschult werden.

## 2. Koordinations- und Optimierungsaufgaben

Die von unterschiedlichen Gewerken erstellten Modelle werden in einem BIM Koordinationsprozess zur Massen- und Kostenermittlung sowie zur Optimierung der Planung (zum Beispiel Kollisionsprüfung) eingesetzt.

Die Kollisionsprüfungen im Projekt erfolgten mit Autodesk Navisworks (siehe Abbildung 3) oder mit „Solibri Model Checker“ (SMC) [17].

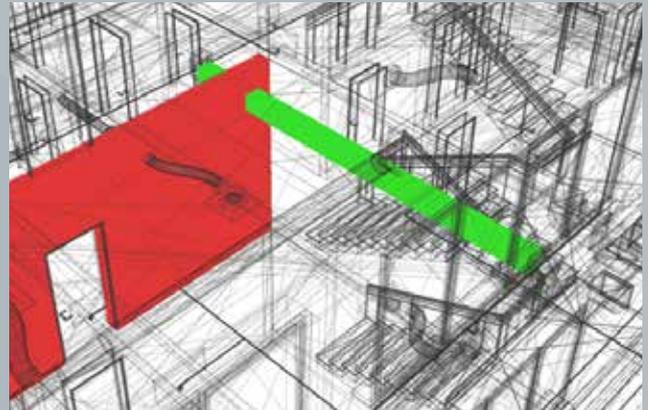


Abbildung 3: TGA-Planung im BIM Gebäudemodell (Abbildung links) und Kollisionsprüfung mit Navisworks (Abbildung rechts)

## 3. BIM Modelle in der Thermisch Energetischen Gebäudesimulation

Die Übernahme der exakten Gebäude- und Anlagengrößen in die Modelle für eine Thermisch Energetische Gebäudesimulation erfordert einen großen Arbeitsaufwand. Eine händische Datenübernahme ist mit einer hohen Fehlerrate verbunden. Standardisierte Schnittstellen (MVD: Model View Definition [21]) werden derzeit eingeführt [23].

Erfahrungen bestehen im Einsatz von TRNSYS [24] und EnergyPlus [26]. Die erstellten Modelle sollen daher in TRNSYS (eveBIM-TRNSYS) [25] erprobt werden. Erste Ergebnisse lagen Ende 2017 vor.

## 5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Zum Thema Building Information Modeling findet derzeit ein intensiver Erfahrungsaustausch statt. Zahlreiche Seminare, Vortragsreihen, Schulungen und Tagungen sind auf dem Markt im Angebot.

Eine Plattform zum offenen Erfahrungsaustausch bietet die jährlich stattfindende Autodesk University (AU Germany 2017 in Darmstadt [12]).

Wichtige Erkenntnisse aus dieser Tagung sind:

- Die Entwicklungen in sämtlichen BIM-Bereichen laufen auf Hochtouren, nahezu wöchentlich erscheinen Neuerungen

- Autodesk arbeitet mit einer stetig wachsenden Anzahl von Partnern zusammen, die ihre eigenen Produkte über Revit-plugins integrieren. Die Anwendungsbreite von Softwareentwicklungen über alle Lebenszyklusphasen von Gebäuden wächst.
- Vieles funktioniert bereits sehr gut in der Theorie und bei der Produktpräsentation, für die Anwendung in der Praxis besteht in der Regel Optimierungspotenzial
- Revit-User-Groups diskutieren im Rahmen dieser jährlich stattfindenden Tagung ihre im Vorfeld abgegebene Wishlist mit Hinweisen auf Bugs sowie Wünschen und Anregungen. Diese werden gemeinsam mit den verantwortlichen Autodesk-Managern (USA) vor Ort priorisiert und an die Entwicklungsabteilungen weitergeleitet.

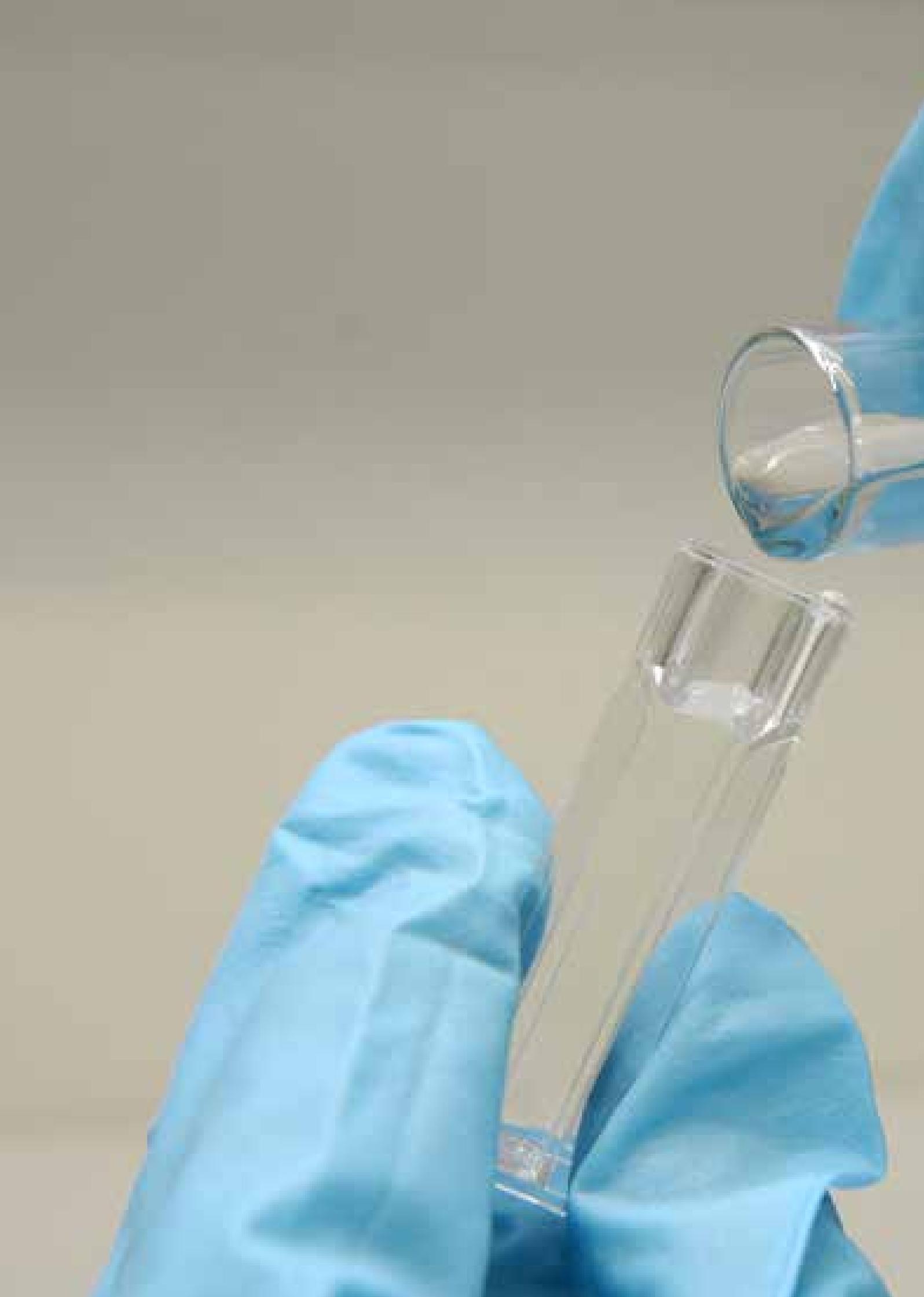
Die Digitalisierung im Bauwesen ist Teil der Digitalisierung der Gesellschaft und der Industrie. Einen ersten Ansatz für ein Forschungsprojekt bietet das Zentrum Digitalisierung Bayern (ZD.B). Im Rahmen der Ausschreibung „Digitalisierung im Energiebereich“ [13] wurden zahlreiche Gespräche mit Planerinnen und Planern und Betreiberinnen und Betreibern geführt, um digitale Gebäude- und Anlagenmodelle auch zur Gestaltung der Energiewende einzusetzen.

Auch im Gebäudebetrieb werden verstärkt Digitale Modelle benötigt. Diesen Aspekt beleuchtete im Juli 2017 die GEFMA Tagung „Digitalisierung im FM“ [14]. Zukünftig adressiert werden sollen die Schnittstellen zwischen Planung und Betrieb sowie der Einsatz der Modelle in einer Augmented Reality.

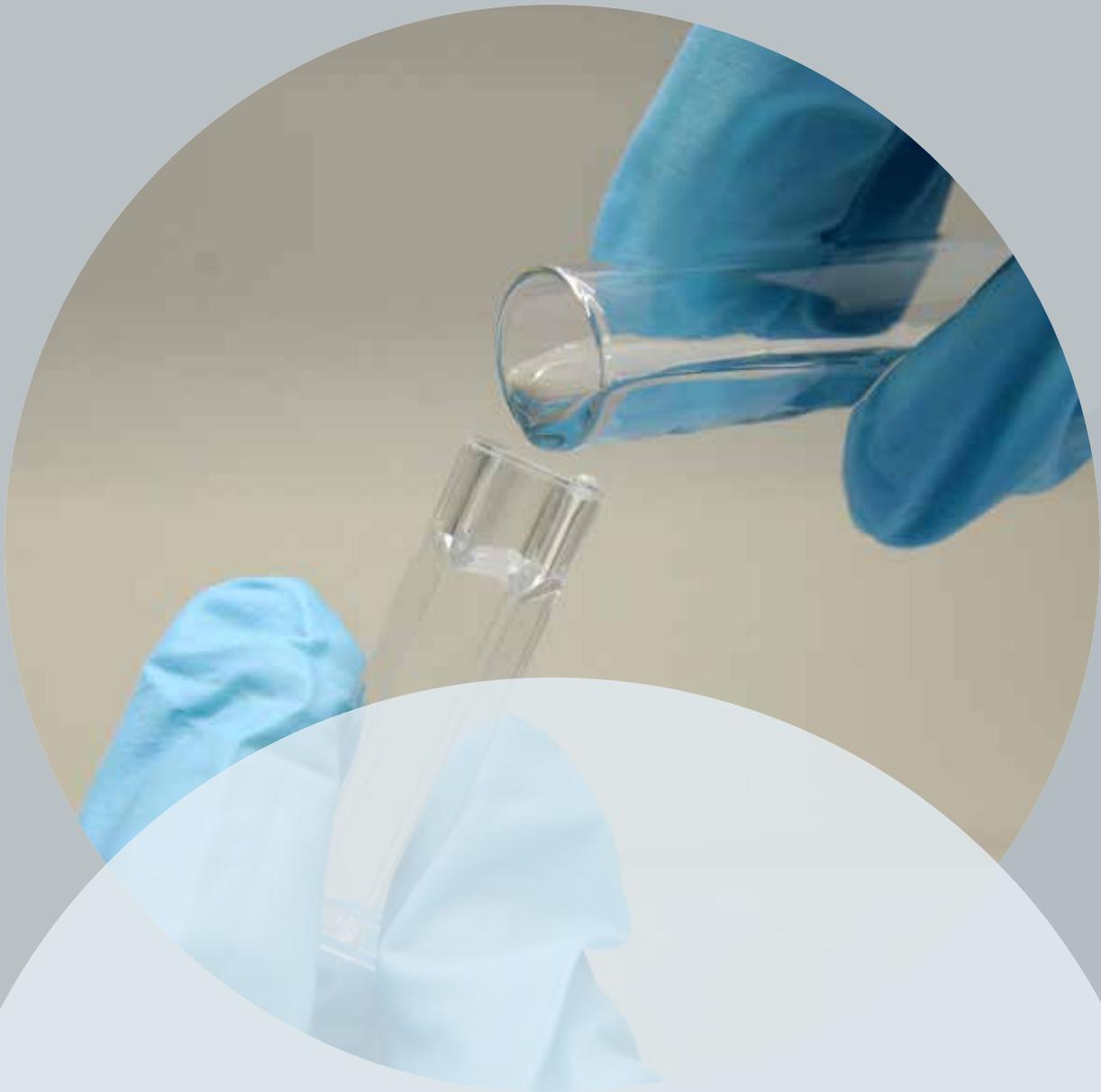
Des Weiteren sollen die gesammelten Erkenntnisse und die erstellten Modelle im Rahmen von Projektausschreibungen des BMVBS eingebracht werden.

## 6. Literatur

- [1] Autodesk Revit, Software für Building Information Modeling (BIM), <https://www.autodesk.de/products/revit-family/overview>, Autodesk Inc.
- [2] Autodesk Revit Live, Software für immersive Visualisierungen von Revit-Modellen, <https://www.autodesk.de/products/revit-live/overview>, Autodesk Inc.
- [3] Building Information Modeling - Datenmanagement, VDI 2552 Blatt 5, 2017
- [4] Pilling, BIM - Das digitale Miteinander, 1st ed. Berlin, Wien, Zürich, 2016
- [5] M. Egger, K. Hausknecht, T. Liebich and J. Przybylo, "BIM-Leitfaden für Deutschland: Information und Ratgeber" Endbericht, im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumentwicklung (BBR), Aktenzeichen 10. 08.17.7-12.08, <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Digitales/bim-leitfaden-deu.html>, Juli 2016
- [6] H. Dipl.-Ing. Bramann and I. May, Stufenplan Digitales Planen und Bauen: Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken, 2015
- [7] B. Essig, BIM und TGA: Engineering und Dokumentation der Technischen Gebäudeausrüstung, 2nd ed. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag, 2017
- [8] C. van Treeck et al., Gebäude.Technik.Digital: Building Information Modeling. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016
- [9] Autodesk Revit 2017: Knowledge Network, <http://help.autodesk.com/view/RVT/2017/DEU/?guid=GUID-D8835F8E-1330-4DBC-8A55-AF5941056C58>, Autodesk Inc.
- [10] BMWI, BMBF: Förderinitiative „Solares Bauen/Energieeffiziente Stadt“ im Rahmen des 6. Energieforschungsprogramms vom 1. April 2016, S. 2
- [11] BMVi, Stufenplan Digitales Planen und Bauen, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVi), Berlin, 2015
- [12] Autodesk University, AU Germany 2017, <https://www.rayseven.com/r7/runtime/autodesk/au2017/review.php>, darmstadtium, 17.+18.10.2017
- [13] Irlbeck, M.: Projektausschreibung innerhalb der Themenplattform „Digitalisierung im Energiebereich“; <http://www.zentrum-digitalisierung.bayern/> 11.04.2017
- [14] GEFMA 924 Datenmodell und digitaler Ordnungsrahmen für das FM, Vortrag Dipl.-Ing. (FH) Ulrich Glauche, GEFMA Tag, Digitalisierung im FM, München, 27.07.2017
- [15] Eichfeld, C: BIM-Modelle und -Prozesse für Wohn- und Bürogebäude, interner Bericht Institut für Energie und Gebäude, 20.11.2017
- [16] Autodesk Navisworks, Software zur Projektprüfung, <https://www.autodesk.de/products/navisworks/overview>, Autodesk Inc.
- [17] Solibri Model Checker, Software für erweiterte Kollisionsermittlung, Fehlererkennung, Prüfung auf Barrierefreiheit, Modellvergleiche und vollständige Auswertungen, <https://www.solibri.com/products/solibri-model-checker/>
- [18] Planca Nova, Software für die technische Gebäudeausrüstung, <http://mep.trimble.de/planca-nova>
- [19] Solar-Computer-Software, modulares System aus Gewerk-übergreifenden Programmen und Modulen, <http://www.solar-computer.de>
- [20] Weinzierl, R.: Einführung von BIM in der TGA Planung, HLH Nr.11, S 57ff, 2017
- [21] Building SMART: Model View Definition Summary – "Welcome to buildingSMART-Tech.org", <http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/ifc-view-definition>, 2017
- [22] Augmented Reality im Bau und Betrieb von Gebäuden, Vortrag M.Sc. Architektur Caner Dolas (RWTH Aachen), AU Germany 2017, 18.10.2017
- [23] Wimmer.R. et.al.: Realizing openBIM – Development of a BIM Model View Definition for Advanced Building Energy Simulation", Gesundheitsingenieur, S. 276ff, Nov.2017
- [24] TRNSYS, modular aufgebautes, dynamisches Gebäude- und Anlagen-Simulationsprogramm, [http://trnsys.de/docs/trnsys/trnsys\\_leistungen\\_de.htm](http://trnsys.de/docs/trnsys/trnsys_leistungen_de.htm)
- [25] eveBIM-TRNSYS, Software zum Betrachten eines 3D BIM Modells und zur Erforschung seiner Eigenschaften, <http://editions.cstb.fr/Products/eveBIM-Viewer-EN.html>
- [26] EnergyPlus, Simulationsprogramm für den Energiebedarf von Heizung, Kühlung, Lüftung, Beleuchtung und Anschluss- und Prozessleistungen sowie Wasserverbrauch in Gebäuden, <https://energyplus.net/>







# ARES – Abfallverminderung durch Recycling epoxidharzbasierter Stoffe

Prof. Dr. Gerd Wehnert  
Dr.-Ing. Dominik Söthje  
Herbert Schlachter, M. Eng.  
Christoph Fritze, B. Sc.  
Fakultät Angewandte Chemie  
Technische Hochschule Nürnberg

Faserverbundkunststoffe finden aufgrund ihrer exzellenten Eigenschaften bereits jetzt vielfältigen Einsatz. Für die Zukunft wird ein weiterer starker Zuwachs erwartet. Ursachen sind die steigenden Produktionszahlen in der Luftfahrt, in der Automobilindustrie in Kombination mit der geforderten Senkung des CO<sub>2</sub>-Flottenausstoßes bis 2020 sowie der Aufschwung beim Einsatz von Windkraftanlagen.

## Wesentliche Projektziele

Bei den mit Carbonfasern verstärkten hochpreisigen Kompositen weisen etwa 72 Prozent eine Matrix aus Epoxidharzen auf. Diese lassen sich als dreidimensional vernetzte Kunststoffe nicht mehr aufschmelzen bzw. lösen und so keinem, den Thermoplasten analogen, Recycling unterwerfen. Eine Lösung bietet jedoch das chemische Recycling: Hier werden die Vernetzungsstellen chemisch mittels eines speziellen Reagenzes gespalten und so das Netzwerk in kleinere, dann lösliche Moleküle zerlegt. Anschließend können die Fasern von der Matrix separiert werden. Das Lösungsmittel wird verdampft und das Polymer und die Fasern werden getrennt voneinander einem neuen Verwendungszweck zugeführt. Bei Epoxidharzen ist es bis jetzt allerdings noch nicht gelungen, dieses Prinzip technisch anwendbar zu gestalten. Ziel des Projekts ist es, ein Reaktionssystem zu finden, mit dem Epoxidharznetzwerke bereits bei geringem Energieaufwand einfach und schnell nahezu vollständig zersetzt werden können.

## 1. Projektdaten

Fördersumme	30.000 Euro
Laufzeit	Januar bis Dezember 2017
Fakultät / Institut / Kompetenzzentrum	Fakultät Angewandte Chemie
Projektleitung	Prof. Dr. Gerd Wehnert
Kontaktdaten	E-Mail: gerd.wehnert@th-nuernberg.de

## 2. Ausgangslage

Faserverbundkunststoffe (FVK) bilden eine synergetische Kombination der Eigenschaften ihrer Einzelkomponenten: den verstärkenden, kraftaufnehmenden Fasern und der polymeren, formgebenden Matrix, die auch als Schutz vor äußeren Einflüssen dient. Besonders herausragend sind die hohe Festigkeit und Steifigkeit bei vergleichsweise geringer Dichte, was Faserverbundkunststoffe für den Leichtbau geradezu prädestiniert. FVK werden aufgrund ihrer exzellenten Eigenschaften vor allem zur Herstellung von Windkraftanlagen, in der Luftfahrt und im Automobilbau, aber auch in der Elektronik, Sport- und Freizeitindustrie sowie dem Bootsbau eingesetzt. Hier seien beispielsweise der BMW i3 und i8 (vgl. Abbildung 1) mit einer Struktur aus carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) wie auch der Airbus A350 mit einem FVK-Anteil von über 50 Ma-Prozent genannt [1]-[7]. Abbildung 2 zeigt die Aufteilung der weltweiten CFK-Produktion nach Anwendungsindustrien [5].



Abbildung 1: Automobil mit Karosserie aus epoxidharzbasier-ten CFK-Bau-  
teilen [8].

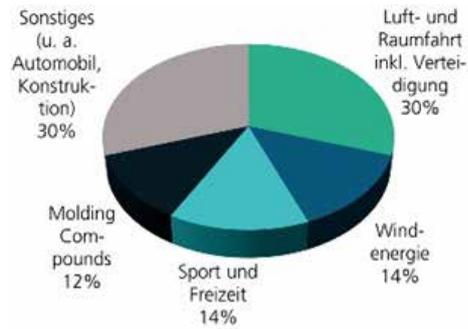


Abbildung 2: Europäische GFK-Produktion 2013 aufgeschlüsselt nach  
Anwendungsindustrien (eigene Darstellung nach [5]).

Da FVK meist starken Belastungen unterworfen sind und Thermoplaste unter Last zum Kriechen neigen, werden in etwa 77 Prozent der ca. 7 Mio. Tonnen global produzierten Komposite Duromere eingesetzt. 23 Prozent der duromeren Matrices aller Komposite (GFK, CFK, etc.) sind Epoxidharze. Bei den mit Carbonfasern verstärkten hochpreisigen Kompositen weisen sogar 72 Prozent eine Matrix aus Epoxidharz auf [9], [10].

Das jährliche Marktvolumen der mit Epoxidharzmatrices ausgestatteten CFK beträgt laut Composites-Marktbericht 2015 der „Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe“ (AVK) etwa 5,9 Mrd. US\$. Der Gesamtumsatz an Epoxidharzen liegt jährlich bei etwa 9,2 Mrd. US\$ [11].

Für die Zukunft wird ein weiterer starker Zuwachs erwartet. Ursachen sind die steigenden Produktionszahlen in der Luftfahrt, in der Automobilindustrie in Kombination mit der geforderten Senkung des CO<sub>2</sub>-Flottenausstoßes bis 2020 auf 95 g·km<sup>-1</sup>, wodurch immer leichtere Bauteile zum Einsatz kommen müssen, sowie der wachsende Markt für Windkraftanlagen [5], [12], [13]. Abbildung 3 zeigt sowohl die globale CFK Produktion der Jahre 2008 bis 2013 als auch den geschätzten Bedarf für die Jahre 2014 bis 2020 [5].

Durch den stetig wachsenden Einsatz von Faserverbundkunststoffen erhöhen sich auch die Ansprüche an deren Nachhaltigkeit, da die Zahl der End-of-Life Teile, also der Bauteile, die am Ende ihres Lebenszyklus entsorgt werden müssen, ansteigt. So liefern vor allem Luftfahrtgesellschaften, aber auch die Automobil- und Windkraftanlagenhersteller solches Material [14]. Ebenso fallen in der Elektronikindustrie jährlich 20 bis 50 Mio. Tonnen Abfall an – darunter auch ein Großteil epoxidharzbasierter Leiterplatten [15].

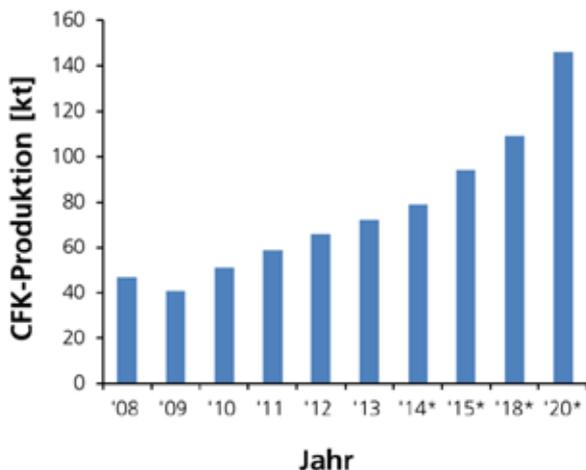


Abbildung 3: Globale CFK-Produktion in Tonnen (\*geschätzt; eigene Darstellung nach [5]).

Nach aktuellem Stand der Technik können gerade die duromerbasierten, im speziellen die mit Aminen gehärteten epoxidharzbasierten Bauteile nur sehr energie- und / oder zeitaufwendig und somit kostenintensiv recycelt werden.

Daher ist das bisher am häufigsten zum Einsatz kommende Verfahren zur (stofflichen) Verwertung duromerer Werkstoffe das Zerkleinern und die anschließende Verwendung als Füllmaterial [16], [17]. Ein Downcycling ist aber nur dann zu verhindern, wenn aus den Recyclingfasern und der polymeren Matrix wieder hochwertige Produkte hergestellt werden können [18]. 1 kg 10 mm langer matrixfreier Carbonkurzfasern besitzt einen Marktwert von ca. 150 €. Dies entspricht – auf die Gesamtproduktion an amingehärteten epoxidharzbasierten CFK gerechnet – einem Marktwert von etwa 3,5 Mrd. € pro Jahr, das alleine die recycelten Fasern aufweisen. Aufgrund dessen ist allen voran das Recycling carbonfaserverstärkter Duromere von wirtschaftlich großem Interesse.

Die in der Vergangenheit gängige Praxis, Verbundkunststoffe auf einer oberirdischen Deponie preiswert, einfach und ohne Vorbehandlung zu entsorgen, ist aufgrund der zum 1. Juni 2005 in Kraft getretenen Änderung zur Siedlungsabfallentsorgung und der Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV) vom 2. Mai 2013 zumindest in Deutschland nicht länger möglich [19] - [24]. Die gängigste Vorbehandlung solcher Materialien, die Verbrennung, wird aufgrund der im § 5 der 17. BImSchV (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen) vom 2. Mai 2013 definierten Auflagen besonders erschwert: Eine Abfallverbrennungsanlage ist so zu errichten und zu betreiben, dass in der Schlacke und in der Rostasche ein Gehalt an organisch gebundenem Gesamtkohlenstoff von drei Prozent oder ein Glühverlust von weniger als fünf Prozent des Trockengewichtes eingehalten wird [25]. Diese Grenzwerte werden oftmals nicht eingehalten, so dass nach aktuellem Stand meist nur die Ablagerung in einer Untertagedeponie bleibt [24].

Aufgrund begrenzter Kapazitäten und der eventuellen Einführung einer Deponiesteuer – wie in einigen Ländern bereits erfolgt – stellt die Untertagedeponierung keine langfristig akzeptable Lösung dar [26], [27].

Wegen der beschränkten Möglichkeit zur Deponierung und den bisher nur unzureichenden Recyclinglösungen muss der Industrie und der Forschung daran gelegen sein, für duromerbasierte Faserverbundkunststoffe bereits jetzt entsprechende effiziente Recycling- und Wiederverwertungskonzepte zu entwickeln und zu evaluieren. Schlussendlich sollte der Standard-Hierarchie für den Umgang mit Abfallstoffen, entsprechend der Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG Artikel 4 der Europäischen Gemeinschaft vom 19. November 2008, gefolgt werden (vgl. Abbildung 4) [28].



Abbildung 4: Hierarchie für den Umgang mit Abfallstoffen nach der Abfallrahmenrichtlinie 2008/98/EG der Europäischen Gemeinschaft (eigene Darstellung nach [28]).

Grundsätzlich lassen sich Duromere als dreidimensional vernetzte Kunststoffe nicht mehr aufschmelzen bzw. lösen und so keinem den Thermoplasten analogen Recyclingverfahren unterziehen: Bei thermoplastischen FVK kann die Polymermatrix beispielsweise durch den Einsatz eines geeigneten Solvens gelöst und anschließend die Fasern von der Matrix separiert werden. Das Lösungsmittel kann verdampft und das Polymer und die Fasern getrennt voneinander einem neuen Verwendungszweck zugeführt werden. Bei Duromeren ist dieser Weg aufgrund der Vernetzung nicht möglich; eine Alternative bietet jedoch das chemische Recycling: Hier werden die Vernetzungsstellen chemisch mittels eines speziellen Reagenzes gespalten und so das Duromer in kleinere, dann lösliche Moleküle (sog. Oligomere) zerlegt. Ist der Vorgang der chemischen Spaltung abgeschlossen, kann wie bei Thermoplasten verfahren werden. Folgende Abbildung 5 zeigt das Recyclingvermögen von Thermoplasten im Vergleich zu Duromeren.

Bei Epoxidharzen ist es – im Gegensatz zu anderen Duromeren, bspw. den recht selten verwendeten Polycyanuraten – noch nicht gelungen, dieses Prinzip technisch anwendbar zu gestalten.

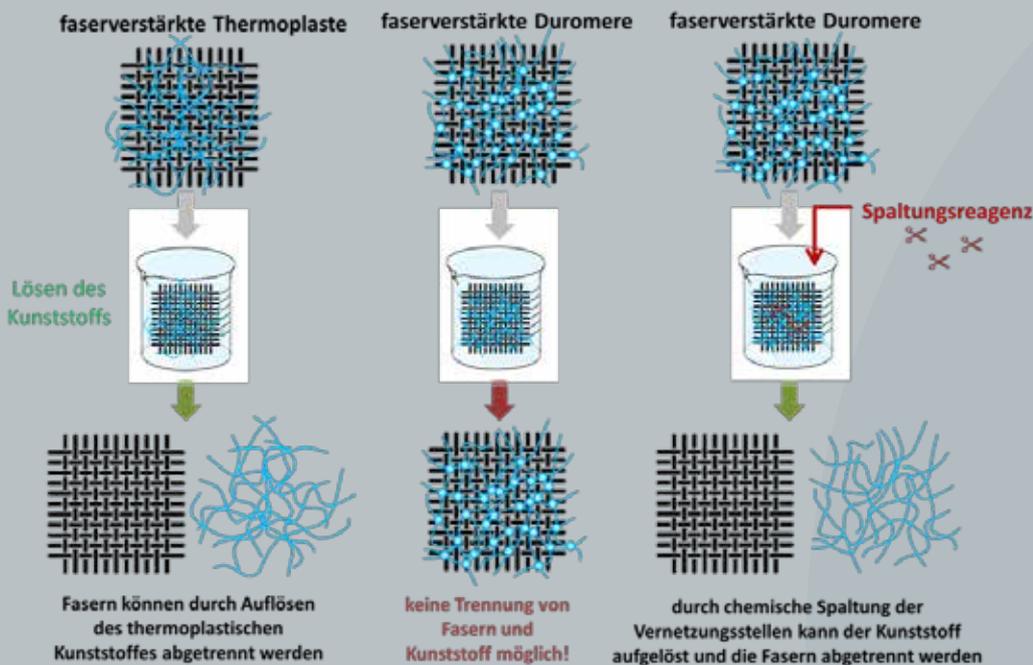


Abbildung 5: Während Thermoplaste direkt gelöst und so von den Fasern getrennt werden können, müssen Duromere zunächst chemisch zersetzt werden, um aus dem unlöslichen Polymernetzwerk lösliche, kleinere oligomere Bestandteile zu generieren. Diese sind dann analog den Thermoplasten löslich und können so von den Fasern separiert zurückgewonnen werden.

### 3. Ziele des Forschungsprojekts

Auch nach vielen Fortschritten und der Entwicklung neuer Prozesse im Bereich des Recyclings von Kompositen haben bis heute nur wenige Methoden die Industriereife erreicht. Die Gründe hierfür sind zahlreich, im Vordergrund stehen jedoch immer die Wirtschaftlichkeit und die Frage, für welche Verwendungen die wiedergewonnenen Rohstoffe einsetzbar sind. Dieses Vorlaufforschungsprojekt fokussiert darauf, ein Recyclingreagenz zu finden, das die Solvolyse amingehärteter Epoxidharzmatrizes von CFK ermöglicht, ohne die Faser zu schädigen. Somit wäre die direkte Wiederverwertung der oftmals sehr kostbaren Fasern als Kurzschnittfasern möglich. Es ist das Ziel, bis zum Ende der Gesamtentwicklung einen, wie in Abbildung 6 dargestellten, analogen Recyclingkreislauf zu entwickeln:

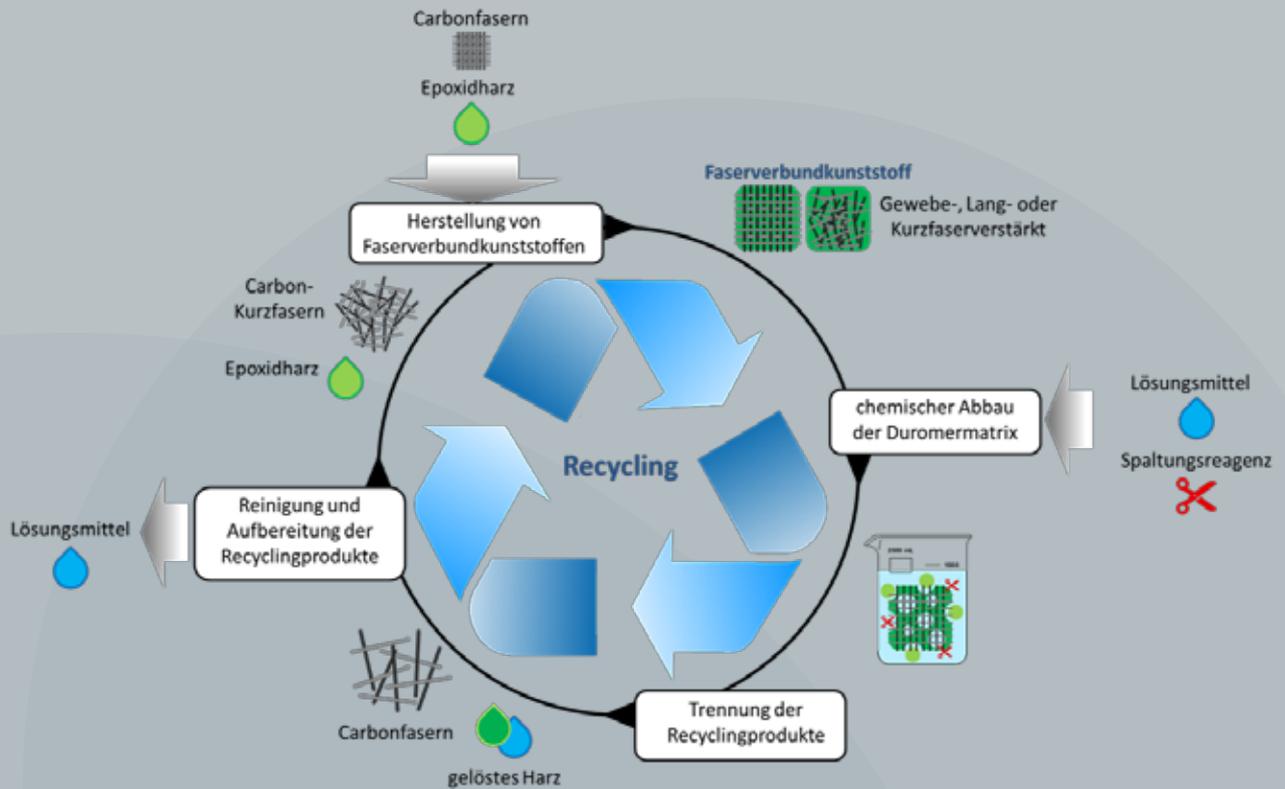


Abbildung 6: Schematische Darstellung eines idealen Recyclingkreislaufes für CFK-basierte Faserverbundkunststoffe.

Das Ziel des Vorhabens ist es, ein Reaktionssystem zu finden, mit dem Epoxidharznetzwerke bereits bei geringem Energieaufwand einfach und schnell (nahezu) vollständig zersetzt werden können.

Dies soll durch einen neuen Ansatz verwirklicht werden, bei dem eine Lewis-Säure als Katalysator dient. Das Kohlenstoffatom der C-N-Bindung in Epoxidharznetzwerken wird in der Folge der Zugabe der Lewis-Säure partiell positiv geladen, das erleichtert einen Angriff durch ein Nukleophil. Als Nukleophil für die Substitutionsreaktion dient das Lösungsmittel. Einen ähnlichen Ansatz verfolgte bereits die Arbeitsgruppe um Yuqi Wang et al., jedoch kann mit der von ihm vorgestellten Methode lediglich im Autoklaven gearbeitet werden, wodurch das Verfahren bisher nicht wirtschaftlich ist [29].

#### 4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Für das Recycling duromerbasierter (epoxidharzbasierter) FVK ist der Schritt der chemischen Spaltung am Wichtigsten und daher zentrales Augenmerk im Vorlaufforschungsprojekt ARES. Nach ausführlicher Literaturrecherche zum aktuellen Stand der Technik und Wissenschaft und einem darauffolgenden Vergleich der unterschiedlichen Möglichkeiten zum Recycling von Faserverbundkunststoffen, fokussierte sich das Forschungsteam aufgrund der Wirtschaftlichkeit auf eine Solvolyse bei niedriger Temperatur und niedrigem Druck. Sie zielten darauf ab, die milden Reaktionsbedingungen durch den Einsatz von Lewis-Säuren als Reaktionsbeschleuniger zu erreichen. Als Reaktionsgemisch zur Spaltung amingehärteter Epoxidharznetzwerke zog das Team in den durchgeführten Arbeiten eine Vielzahl an verschiedenen Lösungsmitteln und Lewis-Säuren als Katalysatoren in Betracht. Ausgangslage hierfür war die Publikation von Wang et al., nach der Epoxidharznetzwerke im Autoklaven durch Essigsäure und Zugabe einer Lewis-Säure gespalten werden können. Als möglicher Reaktionsmechanismus wurde das in Abbildung 7 dargestellte Reaktionsschema postuliert.

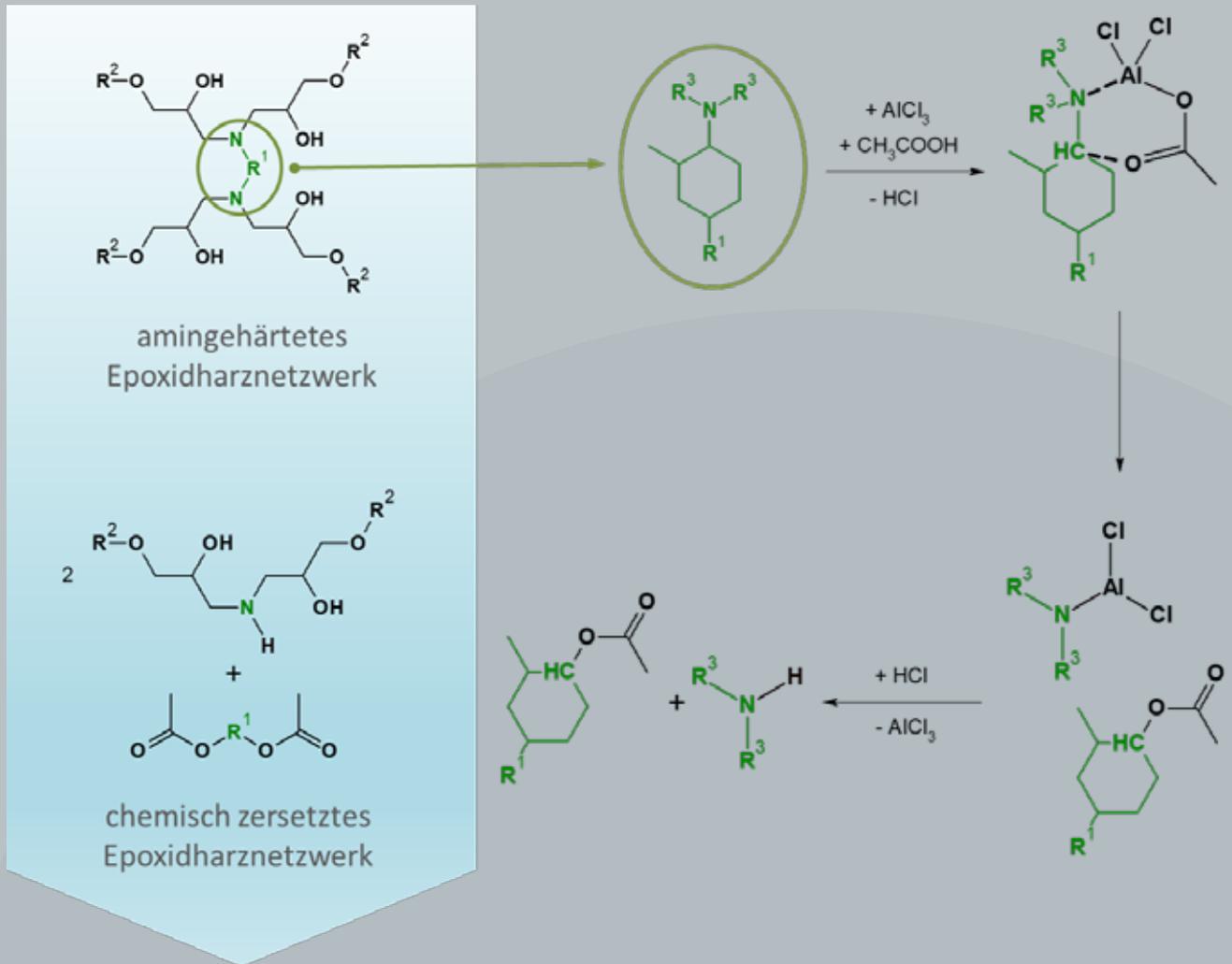


Abbildung 7: Von Wang et al. postulierter Reaktionsmechanismus zum Abbau von mit Aminen gehärteten Epoxidharznetzwerken mittels Essigsäure und der Lewisäure AlCl<sub>3</sub> als Katalysator (eigene Darstellung nach [29]). Die Reaktion erfolgt im Autoklav.

Als Epoxidharzmodellnetzwerke kam bei den im Lehrgebiet Makromolekulare Chemie durchgeführten Versuchen mit Isophorondiamin oder 2-Methyl-1,5-diaminopentan gehärtetes DGEBA (Diglycidylether von Bisphenol A) zum Einsatz.



Abbildung 8: Probekörper der Epoxidharze mit Maßen von ca. 10 x 10 x 6 mm gehärtet mit Isophorondiamin (links) und 2-Methyl-1,5-diaminopentan (rechts).

Zunächst stellte das Forschungsteam das in der Literatur beschriebene Recyclingverfahren unter Verwendung von Aluminiumchlorid und Essigsäure in einem Autoklav (vgl. Abbildung 9) nach. Der sechste Versuch führte zum erhofften Ergebnis, dem vollständigen Abbau eines unlöslichen, mit Isophorondiamin gehärteten Epoxidharznetzwerkes zu löslichen oligomeren Bestandteilen. Mittels Gelpermeationschromatographie konnten die Wissenschaftler um Prof. Dr. Gerd Wehnert die Molekulargewichtsverteilung der erhaltenen Abbauprodukte bestimmen (vgl. Abbildung 10).



Abbildung 9: Versuchsaufbau mit Autoklav und Kontrolleinheit zur Nachstellung der Versuche von Wang et al.

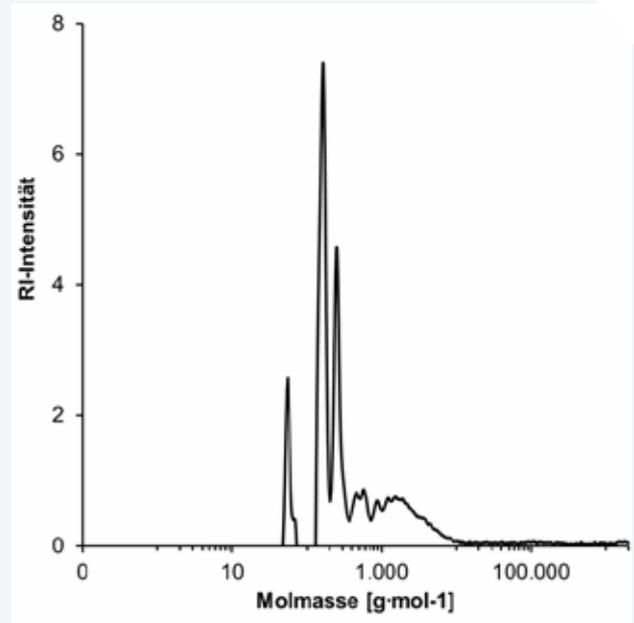


Abbildung 10: Molekulargewichtsverteilung des Produktgemisches nach der vollständigen Zersetzung eines mit Isophorondiamin gehärteten Epoxidharzes mit  $\text{AlCl}_3$  und Essigsäure im Autoklav.

Es folgten Experimente zur Optimierung des Recyclinggemisches, um die Zersetzung bei Normalbedingung ohne Einsatz eines Autoklavs wirtschaftlich durchführen zu können. Zum Einsatz kamen mehrere vielversprechende Lösungsmittel und Lewis-Säuren.

Da einige ausgesuchte Lösungsmittel durch Zugabe von Lewis-Säuren zur Vergelung neigen, führte das Team in einem ersten Schritt Vorversuche durch. Abbildung 11 zeigt ein Lösungsmittel, welches durch Zugabe der entsprechenden Lewis-Säure polymerisiert. Abbildung 12 zeigt ein Lösungsmittel, das auch nach Zugabe einer Lewis-Säure nicht vergelt.



Abbildung 11: Polymerisiertes Lösungsmittel kurz nach Zugabe der Lewis-Säure.



Abbildung 12: Nicht vergeltes Lösungsmittel mit Lewis-Säure (schwarz).

Als Resultat konnte das Forschungsteam mit einem der ausgewählten Systeme einen Zersetzungsgrad von bis zu 40 % unter Normalbedingungen ohne Verwendung eines Autoklavs erreichen. Eine Vorbehandlung des Probekörpers in Essigsäure, was ein Aufquellen bewirkt, führt zur Verbesserung der chemischen Zersetzung.

Es kann festgehalten werden, dass das Forschungsteam in diesem Projekt einen vielversprechenden Ansatz zur Verwertung von Epoxidharz-Kompositen entwickelte, der aber durch die Variation von Temperatur, Lösungsmitteln und Katalysatorkonzentration zunächst noch weiter optimiert werden muss.

## 5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Im ersten Schritt untersuchten die Wissenschaftler unterschiedliche Reagenzien zur Spaltung zuvor hergestellter Epoxidharzmodellnetzwerke und bewerteten sie hinsichtlich ihrer Eignung für die großtechnische Anwendung. Das Team um Prof. Dr. Gerd Wehnert entwickelte im Rahmen der Vorlaufforschung einen vielversprechenden Ansatz, der aber noch weiter zu optimieren ist.

In weiteren Schritten ist geplant, den vielversprechendsten Weg auf epoxidharzbasierte Faserverbundkunststoffe zu übertragen: Hierzu wird die Matrix eines epoxidharzbasierten CFK-Bauteils chemisch zersetzt und anschließend von den Fasern, durch Lösen der kleineren oligomeren Moleküle, gewaschen. Im Anschluss daran werden aus den löslichen Oligomeren nach Verdampfen des Lösungsmittels und einer umfangreichen Analytik zur chemischen Struktur neue Duomere, bspw. Polyurethane, synthetisiert und im Hinblick auf ihre Eigenschaften charakterisiert. Die von der Matrix separierten Verstärkungsfasern werden nach Abdampfen des Lösungsmittels mit Kunststoffgranulat zu kurzfaserverstärkten thermoplastischen Prüfkörpern verarbeitet. Diese werden mittels unterschiedlicher mechanischer Prüfmethode charakterisiert und, mit Probekörpern hergestellt, mit Recyclingfasern sowie mit neuen Kurzfasern verglichen.

Der geplante Fortgang der Arbeiten ist in folgender Abbildung 13 dargestellt:

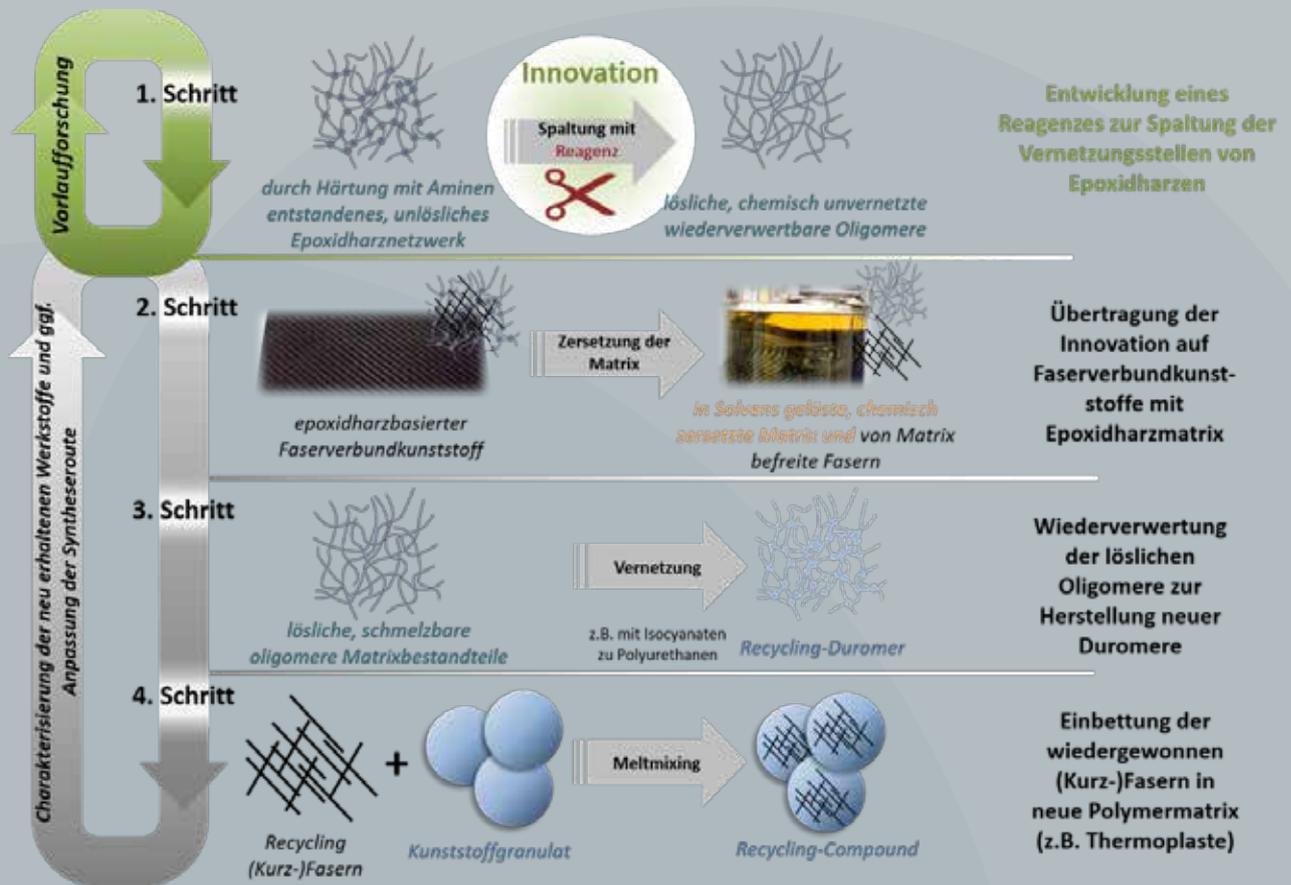


Abbildung 13: Schritte des Gesamtvorhabens zur Entwicklung eines Recyclingverfahrens für epoxidharzbasierte FVK.

Neben anschließenden Entwicklungskooperationen und Auftragsforschung wird angestrebt, die Ergebnisse – nach erfolgter Optimierung der Prozessführung – in Form einer Veröffentlichung in einer entsprechenden branchenrelevanten Zeitschrift zu platzieren, um dadurch die Expertise des Labors für Makromolekulare Chemie der TH Nürnberg bekannter zu machen.

## 6. Literatur

- [1] SCHLOTT, S.: BMW-Werk Landshut startet Carbonproduktion, ATZproduktion, 5 (Nr. 2), 2012, S. 84-87.
- [2] DIRSCHMID, F.: Die CFK-Karosserie des BMW i8 und deren Auslegung, In: Tecklenburg, G.: Karosseriebautage Hamburg – 13. ATZ-Fachtagung, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2014, S. 217-231.
- [3] COMPOSITES EUROPE: BMW i3 beflügelt Verbundwerkstoff-Industrie, 2014, <http://www.composites-europe.com/Pressemitteilung/BMW-i3-befluegelt-Verbundwerkstoff-Industrie/n60/>, abgerufen am 12.02.2017.
- [4] MARSH, G.: Wing worker for the world, Reinforced Plastics, 54 (Nr. 3), 2010, S. 24-28.
- [5] WITTEN, E.; KRAUS, T.; KÜHNEL, M.: Composites-Marktbericht 2014. Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen, 2014, [http://www.avk-tv.de/files/20141023\\_20141008\\_marktbericht\\_gfkcfk.pdf](http://www.avk-tv.de/files/20141023_20141008_marktbericht_gfkcfk.pdf), abgerufen am 01.02.2017.
- [6] HENNING, F.; MOELLER, E.: Handbuch Leichtbau – Methoden, Werkstoffe, Fertigung, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2011, S. 309-336; S. 341-392.
- [7] MICHAELI, W.; WEGENER, M.: Einführung in die Technologie der Faserverbundkunststoffe, Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1989, S. 1-2.
- [8] EIGENE AUFNAHME: BMWi8, 2015.
- [9] EICKENBUSCH, H.; KRAUSS, O.: Werkstoffinnovationen für nachhaltige Mobilität und Energieversorgung, Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 2014, S. 66.
- [10] MAZUMDAR, S.: Opportunities for thermoset resins in the composites industry, 2008, [http://www.trfa.org/erc/docretrieval/uploadedfiles/Technical%20Papers/2008%20Meeting/Mazumdar-Lucintel\\_ppt-Composites\\_industry.pdf](http://www.trfa.org/erc/docretrieval/uploadedfiles/Technical%20Papers/2008%20Meeting/Mazumdar-Lucintel_ppt-Composites_industry.pdf), abgerufen am 01.10.2017.
- [11] MARKETSSANDMARKETS.COM: Presse Mitteilung 2016, Report Code: CH 1218.
- [12] GUILLOT, J. D.: CO2-Emissionen von Neuwagen sollen 2020 auf 95 g/km CO2 sinken, 2014, <http://www.europarl.europa.eu/news/de/news-room/content/20140222STO36702/html/CO2-Emissionen-von-Neuwagen-sollen-bis-2020-auf-95-gkm-CO2-sinken>, abgerufen am 11.12.2016.
- [13] GUILLOT, J. D.: Begrenzung der CO2-Emissionen von PKW, 2014, <http://www.europarl.europa.eu/news/de/news-room/content/20140221pr36626/html/Begrenzung-der-CO2-Emissionen-von-Pkw>, abgerufen am 11.12.2016.
- [14] HARTBRICH, I.: Recycling-Carbon stützt neue Technologien, 2012, <http://www.ingenieur.de/Themen/Werkstoffe/Recycling-Carbon-stuetzt-neue-Technologien>, abgerufen am 12.12.2016.
- [15] GUO, J.; GUO, J.; XU, Z.: Recycling of non-metallic fractions from waste printed circuit boards: A review, Journal of Hazardous Materials, 168 (Nr. 2), 2009, S. 567-590.
- [16] ASMATULU, E.; TWOMEY, J.; OVERCASH, M.: Recycling of fiber-reinforced composites and direct structural composite recycling concept, Journal of Composite Materials, 48 (Nr. 5), 2014, S. 593-608.
- [17] HAUTMANN, D.: Die Entsorgung von Windkraftanlagen bereitet Probleme, 2004, <http://www.welt.de/print-welt/article290038/Die-Entsorgung-von-Windkraftanlagen-bereitet-Probleme.html>, abgerufen am 12.12.2014.
- [18] KARL, D.; OTTO, C.: CFK Recycling in Forschung und Praxis, 2012, <http://www.automobil-industrie.vogel.de/leichtbau-technologie/kunststoff/articles/380963/>, abgerufen am 01.10.2017.
- [19] PICKERING, S. J.: Recycling technologies for thermoset composite materials – current status, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 37 (Nr. 8), 2006, S. 1206-1215.
- [20] HARBERS, F.: GfK-Recycling: Das „European Composite Recycling Concept“, 2003, <http://plasticker.de/news/showartikel.php?id=10>, abgerufen am 12.12.2016.
- [21] CORREIA, J. R.; ALMEIDA, N. M.; FIGUEIRA, J. R.: Recycling of FRP composites: reusing fine GFRP waste in concrete mixtures, Journal of Cleaner Production, 19 (Nr. 15), 2011, S. 1745-1753.
- [22] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT: Siedlungsab-fallentsorgung 2005: Stand – Handlungsbedarf – Perspektiven, 2005, [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-im-port/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bericht\\_siedlungsabfallentsorgung\\_2005.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-im-port/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bericht_siedlungsabfallentsorgung_2005.pdf), abgerufen am 03.02.2015.
- [23] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ: Verordnung über Deponien und Langzeit-lager (Deponieverordnung - DepV), 2013, [http://www.gesetze-im-inter-net.de/bundesrecht/depv\\_2009/gesamt.pdf](http://www.gesetze-im-inter-net.de/bundesrecht/depv_2009/gesamt.pdf), abgerufen am 03.02.2017.
- [24] FEIGEL UMWELT SERVICE GMBH (HR. FEIGEL): Entsorgung von Verbundwerkstoffen, Telefongespräch, Söthje, D. (Adressat).
- [25] BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ: Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen - 17. BImSchV), 2013, [http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimsv\\_17\\_2013/gesamt.pdf](http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimsv_17_2013/gesamt.pdf), abgerufen am 01.10.2017.
- [26] DIEWITZ, M.-M.: Branche kompakt - Recycling- und Entsorgungswirtschaft - Niederlande, 2014, <http://www.gtai.de/GTAI/Navigation/DE/Trade/maerkte,did=1085026.html>, abgerufen am 03.02.2017.
- [27] RIBEIRO, M. C. S.; MEIRA-CASTRO, A. C.; SILVA, F. G.; SANTOS, J.; MEIXEDO, J. P.; FIÚZA, A.; DINIS, M. L.; ALVIM, M. R.: Re-use assessment of thermoset composite wastes as aggregate and filler replacement for concrete-polymer composite materials: A case study regarding GFRP pultrusion wastes, Re-sources, Conservation and Recycling, Im Druck, online verfügbar seit 2013 auf [https://www.google.de/search?q=Re-use+assessment+of+thermoset+composite+wastes+as+aggregate+and+filler+re-+placement+for+concrete-poly-mer+composite+materials:+A+case+study+regarding+GFRP+pultrusion+waste&ie=utf-8&oe=utf-8&gws\\_rd=cr&ie=kKcCVb7C](https://www.google.de/search?q=Re-use+assessment+of+thermoset+composite+wastes+as+aggregate+and+filler+re-+placement+for+concrete-poly-mer+composite+materials:+A+case+study+regarding+GFRP+pultrusion+waste&ie=utf-8&oe=utf-8&gws_rd=cr&ie=kKcCVb7C) MobQyP1roCQBQ, abgerufen am 13.02.2017.

- [28] EUROPÄISCHEN GEMEINSCHAFT: Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien, 2008, [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-im-port/files/pdfs/allgemein/application/pdf/richtlinie\\_2008\\_98\\_eg.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-im-port/files/pdfs/allgemein/application/pdf/richtlinie_2008_98_eg.pdf), abgerufen am 09.12.2016.
- [29] WANG, Y.; CUI, X.; GE, H.; YANG, Y.; WANG, Y.; ZHANG, C; LI, L.; DENG, T.; QIN, Z.; HOU, X.: Chemical Re-cycling of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Resin Composites via Selective Cleavage of the Carbon-Nitrogen Bond, *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 3, 2015, S. 3332-3337.



---

# Impressum

## **Herausgeber:**

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

## **Redaktion:**

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

## Bildnachweis

© Oliver Kussinger: Titel / Rücktitel, 2 / 3, 6 / 7, 127 / 128

© Melanie Scheller: 5

© Syuji Honda / Fotolia: 10 / 11, 12

© Sophie Gredinger: 22 / 23, 24

© Astrid Bergmeister: 32 / 33, 34, 68 / 69, 70

© nmann77 / Fotolia: 46 / 47, 48

© Lucas Brisco: 56 / 57, 58

© Johannes Ziegler: 73

© Med Photo Studio - stock.adobe.com: 78 / 79, 80

© Photobank / Fotolia: 92 / 93, 94

© Frank Schöttke / Fotolia: 106 / 107, 108

© alexlrx / Fotolia: 116 / 117, 118

© Jens Wegener: 132 / 133, 134, 144

© whitehouse - stock.adobe.com: 148 / 149, 150

© Stihl024 - stock.adobe.com: 160 / 161, 162

© cybercomputers.de - stock.adobe.com: 170 / 171, 172

© Alexander Schrammek: 175

© Kacso Sandor / Fotolia: 176 / 177, 178

© Massimo Di Soccio 2017 / Fotolia: 186 / 187, 188

© Michael Koch: 196 / 197, 198

© Flaviu Popp-Nowak: 206 / 207, 208

© LaCozza - stock.adobe.com: 218 / 219, 220

© Petra Simon: 228 / 229, 230, 242, 244 / 245







ISSN 1867-4585