



**Wissenschaftliche Beiträge
TH Wildau
2017**

IMPRESSUM

HERAUSGEBER

Der Präsident der Technischen Hochschule Wildau

Prof. Dr. László Ungvári
Hochschulring 1
15745 Wildau

www.th-wildau.de

REDAKTIONSKOLLEGIUM DER TH WILDAU

Prof. Dr. sc. hum Marcus Frohme
Prof. Dr.-Ing. Ute Geißler
Prof. Dr. rer. pol. Sandra Haas
Prof. Dr.-Ing. Michael Hendrix
Prof. Dr. rer. nat. Michael Herzog
Prof. Dr.-Ing. Stefan Kubica
Prof. Dr. rer. pol. Christian Lendewig
Prof. Dr. rer. pol. Dana Mietzner
Prof. Dr. rer. nat. Heike Pospisil
Prof. Dr.-Ing. Jörg Reiff-Stephan

REDAKTION

Markus Vossel, Marianne Polkau
Telefon + 49 (0) 3375 / 508 - 673
markus.vossel@th-wildau.de

GESAMTHERSTELLUNG

STÜRMER & DRÄNGER – Visuelle Kommunikation GmbH

Richard-Sorge-Straße 24
10249 Berlin

Telefon (030) 48 62 47 64
kontakt@stuermer-draenger.de
www.stuermer-draenger.de

Titelfoto: Shutterstock

ISSN 0949-8214

21. Jahrgang
Nachdruck einzelner Artikel und Beiträge bei Quellenangabe frei.



Hier finden Sie die Artikel des
21. Jahrgangs zum kostenlosen Download.
www.th-wildau.de/forschung/wissbeitraege.html

WISSENSCHAFTLICHE BEITRÄGE 2017

INHALTSVERZEICHNIS

Wissenschaftliche Beiträge 2017

ANGEWANDTE BIEWISSENSCHAFTEN

- 7 LC-MS/MS als Methode zur Detektion und Quantifizierung der Inhaltsstoffe in Kaffee
*Vanessa Gering, Liane Kober, Oliver Brödel, Richard Koskei, Beatrice Mugendi und Marcus Frohme**
- 13 Die Flavin-abhängige Fruktose Dehydrogenase und Cytochrom c: Elektronentransfer und Sensorstrategien
*Christoph Wettstein, Kenji Kano, Daniel Schäfer, Ulla Wollenberger, Fred Lisdat**

INFORMATIK/TELEMATIK

- 23 Das Projekt SecAware4job: Auf spielerischem Weg zu erhöhtem Informationssicherheitsbewusstsein für den Berufseinstieg
Margit Scholl, Frauke Fuhrmann, Denis Edich, Peter Ehrlich, Benjamin Leiner, Robin Scholl, Peter Koppatz*
- 31 Szenenanalyse und Unterscheidung der Skelette mehrerer Menschen in digitalen Bildern mit Graphentheorie durch eine k-kürzeste-disjunkte-Wege-Suche
Egbert Gedat, Pascal Fechner, Richard Fiebelkorn, Ralf Vandenhouten*
- 37 Gott denken – für einen Naturwissenschaftler denkbar?
*Bernhard Eylert**
- 45 Exploring the Adoption of E-Government Tools with WISE Work Index
Esther Ruiz Ben, Margit Scholl, Peter Ehrlich*

OPTISCHE TECHNOLOGIEN/PHOTONIK

- 55 Chip-integrierte photonische Bauelemente
Patrick Steglich, Claus Villringer, Silvio Pulwer, Birgit Dietzel, Viachaslau Ksianzou und Sigurd Schrader*

PRODUKTION UND MATERIAL

- 61 Grundlagenuntersuchung zur Genauigkeit und zum Konvergenzverhalten von ausgewählten finiten Elementen der Strukturmechanik bezogen auf ein einfaches validierbares FE-Modell mit linear elastischem Materialverhalten
Norbert Miersch, Robert Roßmann, Christian Holz*
- 71 Thin film condensation in a Tesla Turbine
Roberto Lisker, Udo Hellwig, Franz Xaver Wildenauer*
- 77 Virtuelle Steuerung eines verteilten Energiemanagements
*Jörg Reiff-Stephan**

MANAGEMENT UND RECHT

- 83 Agile Methoden als Moderatoren zur Steuerung der sozialen Beschleunigung
Bertil Haack, Markus Müller-Trabucchi*
- 89 Formative E-Assessments als Unterstützung zum strukturierten Selbststudium: Ergebnisse eines Lehrexperiments im Studiengang Europäisches Management (BA)
Sandra Haas, Xenia Valeska Jeremias, Christian Rabe*
- 101 Strategische Vorausschau bei der Multiwatt® GmbH
Dana Mietzner, Frank Hartmann, Marcus Fahrenkrug und Kerstin Fahrenkrug*

VORWORT

PROF. DR. LÁSZLÓ UNGVÁRI

Auch im Wintersemester 2016/17 bleibt die Technische Hochschule Wildau mit 3.786 Studierenden die größte Fachhochschule im Land Brandenburg. Der Anteil der Studierenden aus dem Ausland lag im Wintersemester 2016/17 bei 24,88 %. Auf der Exmatrikulationsfeier 2016 konnten 825 Absolventinnen und Absolventen konnten ihre Abschlusszeugnisse entgegennehmen. Von ihnen erhielten 42 Studierende einen Doppelabschluss sowohl der TH Wildau als auch von internationalen Universitäten bzw. Hochschulen. 20 Absolventinnen und Absolventen waren besonders erfolgreich und schlossen mit einer Gesamtnote von besser als 1,3 und dem Gesamtprädikat „Mit Auszeichnung bestanden“ ab. Seit der Gründung der Hochschule konnten insgesamt 11.431 Absolventinnen und Absolventen ihren Bachelor-, Master oder Diplom-Abschluss feiern.

Im Januar 2017 feierten die Technische Hochschule Wildau und das Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik IHP in Frankfurt (Oder) das zehnjährige Bestehen des gemeinsamen Joint Lab, welches sich seit seiner Gründung im Jahre 2006 als gemeinsame Forschungs-, Ausbildungs- und Weiterbildungsplattform etabliert hat. Das Joint Lab der TH Wildau und des IHP hat seit Jahren einen regen Studierendenaustausch und bisher 15 erfolgreiche Abschlussarbeiten (Diplom, Bachelor oder Master) ermöglicht. Arbeitsschwerpunkte im Joint Lab sind unter anderem die Entwicklung anwendungsspezifischer Si-photonischer Bauelemente und die Erforschung neuer Materialien und Oberflächen wie zum Beispiel Graphen. Das erfolgreiche Bestehen des Joint Lab erhöht zum einen die Attraktivität und Qualität von Lehre und Studium, zum anderen entstehen neue innovative Lösungen mit internationaler Strahlkraft.

Im Herbst 2016 wurde zwischen der TH Wildau und der BTU Cottbus-Senftenberg eine strategische Partnerschaft beschlossen, um gemeinsame Aktivitäten in den Bereichen Ausbildung,

Forschung und Wissens- und Technologietransfer für die Wirkungsregion der beiden Hochschulen voranzutreiben. Die beiden Hochschulen erkennen an, dass durch eine gemeinsame Arbeit die Chancen der Region besser genutzt und Herausforderungen besser bewältigt werden können. Mit ihren Kompetenzen in der Grundlagen- sowie der angewandten Forschung werden die Hochschulen einen Beitrag zur Entwicklung der Region leisten. Im Zentrum der gemeinsamen Transferarbeit steht der systematische Austausch mit wichtigen regionalen Akteuren aus Wirtschaft, Forschung, Politik und Gesellschaft.

Die TH Wildau hat sich als Kompetenzzentrum für wichtige Wissenschaftsdisziplinen etabliert und wird als Netzwerkpartner in internationalen, bundesweiten und regionalen Forschungsverbänden für den Wissens- und Technologietransfer geschätzt. Wildauer Know-how und Erfahrung in der angewandten Forschung und Entwicklung werden sowohl von international tätigen Großunternehmen wie auch von innovativen kleinen und mittleren Unternehmen nachgefragt. Durch erfolgreich beantragte Projekte und direkte Industrienaufträge konnte die TH Wildau 2016 insgesamt über 10,5 Mio. Euro einwerben.

Ein Teil der wissenschaftlichen Arbeit einer Hochschule besteht in der Veröffentlichung der Ergebnisse der Forschungs- und Entwicklungsprojekte. Die Kolleginnen und Kollegen publizieren bereits seit Jahren in international renommierten Journalen. Die Wissenschaftlichen Beiträge der TH Wildau haben sich als wichtiges Medium für die Präsentation der wissenschaftlichen Arbeit etabliert.

Ich danke den Kolleginnen und Kollegen für das rege Interesse an den Wissenschaftlichen Beiträgen, und ich bedanke mich herzlich bei dem Redaktionskollegium für die Begutachtung der eingegangenen Artikel sowie für die Betreuung der Publikation.



Zum Schluss wünsche ich Ihnen eine anregende Lektüre der Wissenschaftlichen Beiträge 2017. Die Artikel sind auch als PDF über das Internet abrufbar, besuchen Sie dazu die Internetseite

<http://www.th-wildau.de/aktuelles/presse-und-medien/hochschulmedien-und-publikationen/wissenschaftliche-beitraege.html>

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'L. Ungvári'.

Prof. Dr. László Ungvári

Präsident der TH Wildau

LC-MS/MS als Methode zur Detektion und Quantifizierung der Inhaltsstoffe in Kaffee

Vanessa Gering, Liane Kober, Oliver Brödel, Richard Koskei, Beatrice Mugendi und Marcus Frohme*

Zusammenfassung

Kaffee ist das wohl populärste Heißgetränk weltweit. Zwei botanische Arten sind für den Weltmarkt von Bedeutung und unterscheiden sich bezüglich ihres Anbaugesbietes und der Inhaltsstoffe. Kaffee enthält über 850 bisher identifizierte Aromastoffe, welche den Geschmack bilden. Außerdem haben die Prozessierung der geernteten Kirsche bis zur Bohne, das Röstprofil und das Aufbrühen einen großen Einfluss darauf. In dieser Arbeit wurde die Auswirkung der Prozessierungsmethode auf ausgewählte Inhaltsstoffe mit Hilfe der Flüssig-Chromatographie-Tandem-Massenspektroskopie (LC-MS/MS) untersucht. Dafür wurden drei Prozessierungsmethoden, die unterschiedlich viel Wasser für das Ablösen des Fruchtfleisches von den Kaffeekirschen benötigen, und zwei Kultursorten miteinander verglichen. Die Ergebnisse zeigten einen geringfügig höheren Gehalt der zwei wichtigsten Inhaltsstoffe Koffein und Chlorogensäure in den Bohnen, bei deren Prozessierung im Eco-Pulper-Verfahren weniger Wasser eingesetzt wurde. Bis auf einen verringerten Gehalt an Saccharose wurde für weitere wichtige Inhaltsstoffe (Acrylamid, Niacin, Zitronensäure und Vanillin) kein signifikanter Unterschied bei höherem Wassereinsatz gefunden. Insofern man die untersuchten Inhaltsstoffe als Qualitätsmarker betrachtet, ist im Vergleich zu den anderen Prozessierungsmethoden das Eco-Pulper-Verfahren die beste Wahl, insbesondere da es als wassersparende Methode einen entscheidenden Beitrag zur Nachhaltigkeit des Kaffeeanbaus leistet.

Abstract

Coffee is the most popular soft drink in the world. Two botanical species of coffee are important for the world market and differ not only in their area of cultivation but also their components. Coffee contains more than 850 aromatic compounds which constitute its taste and flavour. Also, the method selected for the processing from the harvested cherry to the bean, the roasting profile, and the method of brewing are relevant. In this work, liquid chromatography tandem-mass-spectroscopy (LC-MS/MS) is used to investigate how the processing method influences selected aromatic compounds. Thus, three different processing methods differing in the amount of water needed for separating the coffee beans from the cherries, and two cultivars were compared. The results showed slightly higher concentrations of the caffeine and chlorogenic acid components in coffee processed with less water (the eco-pulper method). Apart from a reduced sucrose concentration, we found no significant difference in other important compounds (acrylamide, niacin, citric acid and vanillin) when plenty of water was used. Taking the investigated compounds as quality markers, the eco-pulper method is the best choice among the processing methods, especially since it conserves water, which could therefore significantly contribute to a sustainable cultivation of coffee.

1. Einleitung

„Ob Filterkaffee am Morgen, Espresso in der Mittagspause oder ein Latte Macchiato mit Freunden: Kaffee ist beliebt wie nie zuvor!“ (Moldvaer 2014). Kaffee ist nach Mineralwasser und Fruchtsäften das am häufigsten konsumierte Getränk in Deutschland. Nicht nur wegen seiner anregenden und konzentrationsfördernden Wirkung lieben die Deutschen ihren Kaffee,

sondern auch zahlreiche Aromastoffe und vielfältige Variationen machen Kaffee bei mehr als 2/3 der deutschen Bevölkerung zum festen Bestandteil des täglichen Lebens. Im Durchschnitt konsumiert jeder Deutsche etwa 4,8 kg Kaffee im Jahr, das entspricht circa 2–3 Tassen täglich.

Kaffee wird aus gerösteten, gemahlene Kaffeebohnen hergestellt. Obwohl es über 100 verschiedene botanische Arten der Gattung *Coffea* gibt, zählen

Sorten der beiden Arten *C. arabica* (Arabica) und *C. canephora* (Robusta) zu den beliebtesten weltweit. Sie unterscheiden sich nicht nur durch ihr Anbaugesbiet, sondern auch in den Inhaltsstoffen. Kaffee enthält über 850 bisher bekannte Aromastoffe, welche maßgeblich den Geschmack beeinflussen, und fast jährlich werden weitere identifiziert (Kienreich & Schwarz 2008). Jeder einzelne Schritt, vom Anbau über die Ernte bis zum Aufbrühen,

* korrespondierender Autor

kann einen entscheidenden Einfluss auf das Aroma haben. Nach der Ernte werden verschiedene Prozessierungsmethoden eingesetzt, die sich auf die spätere Aromaentwicklung des Kaffees auswirken. Die am häufigsten verwendete Methode ist das sogenannte Wet-Pulper-Verfahren („to pulp“, engl. für „einstampfen; entfleischen“). Daneben gibt es auch noch das Hand-Pulper- und das Eco-Pulper-Verfahren. Alle drei Methoden unterscheiden sich in der Bauart des Pulpers und in der Menge des verwendeten Wassers (Koskei 2015) – siehe unten. Der Einfluss der Prozessierungsmethoden auf ausgesuchte Inhaltsstoffe im Kaffee wurde mit dieser Arbeit untersucht. Hierzu wurde die LC-MS/MS (liquid chromatography tandem mass spectrometry) verwendet, die vielfach in der Lebensmittelanalytik für den sensitiven und quantitativen Nachweis von Inhaltsstoffen eingesetzt wird. Mit dieser Methode werden zwei Analyseverfahren verbunden.

Zunächst werden die verschiedenen Inhaltsstoffe in der Probe anhand der molekularen Eigenschaften, insbesondere der Polarität, in einer chromatographischen Säule aufgetrennt (LC). Je nach Stärke der Wechselwirkungen mit der unpolaren stationären Phase verlassen die Inhaltsstoffe die Säule in der polaren mobilen Phase zu unterschiedlichen Zeitpunkten und können über einen UV-Detektor nachgewiesen werden. Mit Hilfe von Standardsubstanzen können diese Zeitpunkte im Vorhinein bestimmt werden. Die Sensitivität dieses Detektionsverfahrens wird durch die nachgeschaltete Analyse im Tandem-Massenspektrometer (MS/MS) noch deutlich verbessert. Die aufgetrennten Substanzen werden über eine angelegte Hochspannung und einen Stickstoffgasstrom ionisiert (ESI, electrospray ionisation) und ihre Masse im Hochvakuum des Massenanalysators für die Quantifizierung selektiert. Die Selektion erfolgt über vier parallele Stabelektroden, die durch die angelegte Gleich- und Wechselspannung Ionen mit einem bestimmten Masse-Ladungs-Verhältnis (m/z) passieren lassen, während andere Ionen aussortiert werden (Quadrupol). Im Tandem-Massenspektrometer werden zwei dieser Quadrupole mit einer zwischengeschalteten Kollisionszelle ver-

bunden, die die im ersten Quadrupol selektierten Ionen über die Kollision mit Gas-Molekülen fragmentiert (Triple-Quadrupol). Damit kann nicht nur die Masse der gesuchten Substanz selektiert werden, sondern auch spezifisch gebildete Fragmente, was eine sehr sensitive Quantifizierung ermöglicht. Diese Methode zeichnet sich durch ihre große Selektivität, Sensitivität und Genauigkeit aus (Agilent Technologies 2001).

Die Prozessierungsmethoden stellen nur einen Schritt auf dem langen Weg der Kaffeeproduktion dar, können aber durch die Reduktion des Wasserverbrauchs durch neuere Methoden wie das Eco-Pulper-Verfahren einen entscheidenden Beitrag zur Nachhaltigkeit des Kaffeeanbaus beitragen. Aus diesem Grund wird unterschiedlich prozessierter Kaffee anhand wichtiger Inhaltsstoffe (Koffein, Chlorogensäure, Saccharose, Niacin, Vanillin, Acrylamid) mittels LC-MS/MS analysiert, so dass Aussagen über eventuelle Auswirkungen auf Qualität und Aroma getroffen werden können.

2. Material und Methoden

Die grünen (ungerösteten) Kaffeebohnen wurden von der Dedan Kimathi University of Technology (Nyeri, Kenia) in zwei Sorten bereitgestellt: Ruiru 11 und SL28. Ruiru 11 stammte von der Hill Farm, Nyeri (0° 25' 0" S / 36° 57' 0" E); SL28 von der Plantage der Dedan Kimathi University of Technology, Nyeri (0° 24' 0,5" S / 36° 57'48,6" E).

Bei den Kaffeeproben wurde außerdem zwischen den unterschiedlichen Prozessierungsmethoden zur Entfernung des Fruchtfleisches – dem Pulping – unterschieden. Der Wassereinsatz ist je nach Methode unterschiedlich: Durchschnittlich 40 Liter pro Kilogramm Kaffeebohnen werden beim Wet-Pulper-Verfahren eingesetzt. Das Eco-Pulper-Verfahren kann demgegenüber 80–90 % einsparen und erscheint deswegen ökologisch vorteilhaft (Roa et al. 1996).

Die Wet-Pulper-Aufbereitung ist eine kontinuierliche Prozessierungsmethode, bei der viel Wasser während des Pulpings, der Reinigungsschritte und des Transports der Kirschen verwendet wird. Der Pulper ist eine Maschine,

die das Fruchtfleisch von den Kaffeebohnen durch „spezielle“ Walzen entfernt; die Prozessierungsmethode wird im Handel häufig als „fully washed“ bezeichnet.

Das Hand-Pulper-Verfahren ist eine manuelle Methode, bei der mit einem kleineren Pulper das Fruchtfleisch entfernt wird. Dies benötigt während der Aufbereitungs- und Waschschriffe im Vergleich zur „Fully Washed“ Methode bereits deutlich weniger Wasser. Bei der Eco-Pulper-Methode wird eine spezielle Maschine zum Entfernen des Fruchtfleisches verwendet, wobei fast kein Wasser benötigt wird. Lediglich im letzten Arbeitsschritt wird eine geringe Menge eingesetzt, wodurch sie zur Methode mit dem geringsten Wasserverbrauch wird.

2.1 Optimierung der Methoden mit Standards

Bevor die Kaffeeproben mit der LC-MS/MS (LCMS-8040, Shimadzu) gemessen werden konnten, musste das Gerät auf die jeweilige zu untersuchende Substanz kalibriert werden.

Dafür wurde für jede Substanz eine eigene Methode entwickelt, wobei für die Erstellung der Kalibriergeraden Standardchemikalien unterschiedlicher Konzentrationen (5–20 ng/μl) eingesetzt wurden. Der zu untersuchende Massenbereich musste eingestellt und das Zeitprogramm für die Flüssigchromatografie, die Fließgeschwindigkeit der mobilen Phasen und das Anfangsverhältnis des Lösungsmittelgemischs mussten optimiert werden (Tab. 1). Diese Parameter beeinflussen, ebenso wie die Wahl der mobilen Phasen, das spätere Ergebnis.

Nachdem eine gute chromatografische Trennung für die Substanzen erreicht wurde, wurde eine Geräte-interne Optimierung durchgeführt, wobei die Massen der Moleküle und die spezifischen Fragmente am MS bestimmt wurden. Von diesen Fragmenten konnte dann das häufigste zur Erstellung der Kalibration und spezifischen Quantifizierung der Substanz in Kaffeeproben genutzt werden. Dafür wurde dieses Fragment ausgewählt und die Fläche unter dem Massenpeak bestimmt. Diese Fläche wurde dann gegen die Konzentration aufgetragen. Dies wurde mit verschiedenen Konzentrationen

Tab. 1: Überblick über die ausgewählten Parameter und Lösungsmittel für die einzelnen Substanzen und deren Methoden. (In allen Fällen war das Injektionsvolumen 1 µl und die Säulentemperatur 40 °C.)

	Koffein	Chlorogen-säure	Acrylamid	Vanillin	Zitronen-säure	Saccharose	Niacin
Säule	EC 125/4 NUCLEODUR 100-5 C18 ec					Luna 3µm NH2 100 Å 150x2.0 mm KJO-4282, 3 µm, 2 mm ID	
Mobile Phase(n)	A: H2O + 0,1 % Formic Acid (FA) B: Acetonitril	A: H2O + 0,1 % FA B: Acetonitril	A: H2O + 0,1 % FA B: Acetonitril	A: H2O + 0,1 % FA B: Acetonitril + 0,1 % FA	A: H2O + 0,1 % FA B: Methanol	A: H2O + 0,1 % FA B: Acetonitril	A: H2O + 0,1 % FA + 1mM Ammonium- umacetat
HPLC Zeit- programm	5 % B (0 min) → 100 % B (5 min) → 100 % B (7 min) → 5 % B (7.50 min) → 5 % B (10 min)	5 % B (0 min) → 100 % B (5 min) → 100 % B (7 min) → 5 % B (7.50 min) → 5 % B (12 min)	Isokratisch, 10 min	5 % B (0 min) → 90 % B (10 min) → 5 % B (12 min)	10 % B (0 min) → 30 % B (10 min) → 10 % B (11 min) → 10 % B (15 min)	Isokratisch, 5 min	Isokratisch, 15 min
Fließge- schwindig- keit [ml/min]	0,4	0,3	0,5	0,8	0,5	A: 0,1 B: 0,3	0,45
Konzentri- on für Scan	5 ng/µl	10 ng/µl	10 ng/µl	10 ng/µl	20 ng/µl	10ng/µl	10ng/µl
Peak erscheint nach x min y sek	5 min 10 sek	6 min 15 sek	4 min	5 min 20 sek	3 min 12 sek	1 min 58 sek	7 min 50 sek

wiederholt, so dass eine Kalibriergera-
de erstellt werden konnte.

2.2 Probenvorbereitung

50 g grüne Kaffeebohnen wurden bei
245 °C für 12 min geröstet (Gene Café
CBR-101 Röster) und auf Sieben für 24 h
zum Ausgasen gelagert.

10–15 g geröstete Kaffeebohnen wur-
den mit einer Kaffeemühle (Clatronic
KSW3306-WH) fein gemahlen und 6
g Kaffeepulver in ein vorher befeuch-
tetes Filterpapier gegeben. Leitungswasser (Härtegrad „hart“) wurde im
Wasserkocher zum Sieden gebracht,
150 ml wurden abgenommen und bei
einer Temperatur von ca. 90 °C in das
Becherglas mit dem Kaffee gegeben
und für 6,5 min aufgebriht, bevor
der Kaffeefilter entfernt und der fertige
Kaffee abgekühlt wurde.

2.3 Messung der Proben an der LC-MS/MS

Vor der Messung wurden mit einem
Spritzenfilter (Porendurchmesser 0,22
µm) partikuläre Bestandteile entfernt.
Anschließend wurden die Proben (zur
Dreifachbestimmung) jeweils 1 : 100
verdünnt, damit die Konzentrationen

der einzelnen Analyte im messbaren
Bereich lagen.

Die Messung der Proben wurde an-
schließend im Multiple-Reaction-Mo-
nitoring-(MRM)-Modus durchgeführt.
Hierbei wurden die gewünschten
Analyt-Ionen selektiert und anschlie-
ßend detektiert.

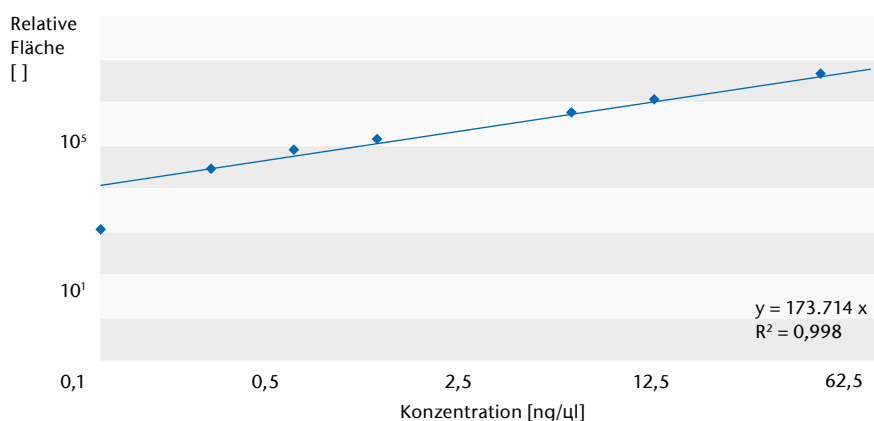


Abb. 1) Kalibrationsgerade zur Quantifizierung von Chlorogensäure. Eingesetzte Konzentration gegen relative Fläche (dimensionslos) unter den gemessenen Peaks; beide Achsen sind logarithmiert.

3. Ergebnisse

Vorderspäteren Konzentrationsbestimmung musste zunächst eine Kalibrationsgerade für jede Substanz erstellt werden. In Abb. 1 ist exemplarisch die Kalibrationsgerade für Chlorogensäure dargestellt. Der lineare Messbereich lag – wie bei den meisten Substanzen – zwischen 0,25 und 50 ng/µL (bzw. 100 ng/µl). Das Bestimmtheitsmaß R^2 war für alle Substanzen nahe 1 und bestätigt den direkten Zusammenhang zwischen Konzentration und Messwerten.

Das Ergebnis der gemessenen Probe wurde im MRM-Massenspektrum abgebildet, dabei lief für jede Substanz ein definiertes Zeitprogramm, und nach einem bestimmten Zeitpunkt erschien ein scharfer Peak; je nach Substanz waren es auch mehrere, die unterschiedliche Fragmente repräsentieren.

3.1 Gehalt verschiedener Substanzen in unterschiedlich prozessierten Kaffeebohnen

Für die Messungen wurde zwischen den Prozessierungsmethoden (Wet, Hand und Eco Pulper) und den Kultursorten (Ruiru 11 und SL28) unterschieden. Koffein und Chlorogensäure zeigen geringe Konzentrationsunterschiede bei den Prozessierungsmethoden (Abb. 2). Durchschnittlich die geringsten Konzentrationen wurden in den Wet-Pulper prozessierten Kaffeebohnen gemessen. Die größten Konzentrationen wurden in Kaffee gemessen, welcher nach dem Eco-Pulper-Verfahren aufbereitet worden war. Diese Tendenz ist für beide Kultursorten erkennbar. In Bezug auf den Kof-

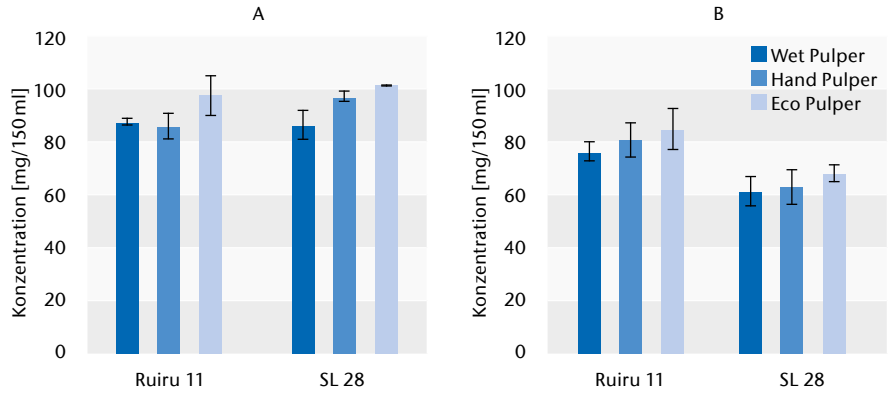


Abb. 2) Koffein- (A) und Chlorogensäurekonzentrationen (B) in Bohnen aus unterschiedlichen Prozessierungsmethoden (Wet, Hand und Eco Pulper) und von unterschiedlichen Kultursorten (Ruiru 11 und SL28).

feingehalt gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen beiden Kultursorten, wohingegen geringfügig weniger Chlorogensäure in Bohnen der Kultursorte SL28 nachweisbar war.

Bei den gemittelten Saccharosekonzentrationen sind Unterschiede zwischen den Prozessierungsmethoden erkennbar (Abb. 3), allerdings ist die Saccharosekonzentration durchschnittlich am höchsten bei Kaffeebohnen, welche mit dem Wet Pulper aufbereitet wurden. Geringere Konzentrationen wurden in Kaffee gefunden, welcher mit dem Hand-Pulper-Verfahren prozessiert worden war, gefolgt vom Eco-Pulper-Verfahren. Diese Tendenz ist für beide Kultursorten erkennbar; die Konzentration der Saccharose war bei Kaffeebohnen der Kultursorte SL28 geringfügig niedriger.

Bezüglich des Gehalts an Niacin und Zitronensäure zeigen Bohnen aus unterschiedlichen Prozessierungsverfahren oder von verschiedenen Kultursorten keine signifikanten Unterschiede (Abb. 4).

Die Acrylamid- und Vanillinkonzentrationen lagen unterhalb der Nachweisgrenze und konnten in keiner Probe nachgewiesen werden.

4. Diskussion

Koffein und Chlorogensäure

Es gibt erkennbare, wenn auch geringe Unterschiede im Koffein- und Chlorogensäuregehalt, wenn die Kaffeebohnen bzw. Bohnen unterschiedlich prozessiert wurden. Je mehr Wasser bei der Aufbereitung eingesetzt wurde, desto niedriger ist später der Gehalt der Substanz im fertigen Kaffeegetränk. Koffein und Chlorogensäure sind polare, gut wasserlösliche Substanzen. Wenn bei der Aufbereitung der grünen Kaffeebohnen viel Wasser eingesetzt wird, kann offenbar ein Teil dieser Substanzen ausgeschwemmt werden.

Beide Kultursorten wurden in Nyeri, Kenia in der Saison 2013/2014 geerntet, jedoch von unterschiedlichen Farmen. Ruiru 11 stammt von der Hill Farm, während SL 28 nur wenige Kilometer entfernt auf der Plantage der Dedan Kimathi University of Technology kultiviert wurde. Es gibt jedoch keine Informationen, ob dieselben Maschinen bei der Aufbereitung verwendet wurden oder ob das verwendete Wasser aus unterschiedlichen Quellen stammte. Auch zu anderen Einflussfaktoren wie Trocknung der Bohnen oder Lagerzeiten gibt es keine präzisen Angaben. Alle Faktoren können Auswirkungen auf die Inhaltsstoffe haben. Insofern kann nicht mit Sicherheit festgestellt werden, ob es hier tatsächlich Unterschiede zwischen den beiden Kultursorten gibt.

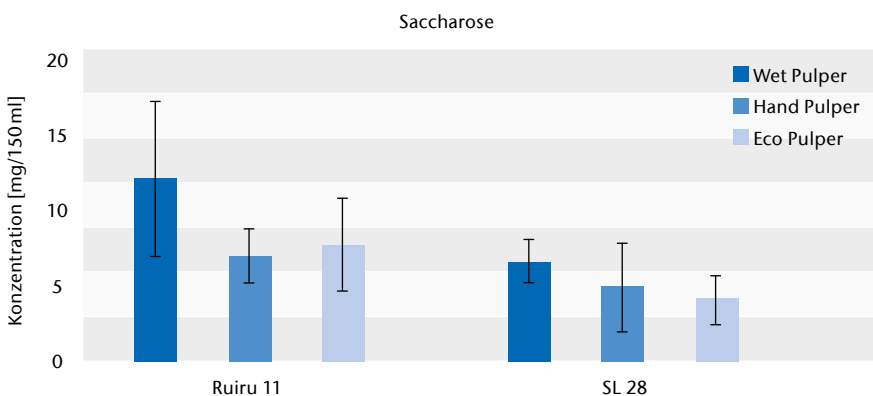


Abb. 3) Saccharosekonzentrationen in Bohnen aus unterschiedlichen Prozessierungsmethoden (Wet, Hand und Eco Pulper) und von unterschiedlichen Kultursorten (Ruiru 11 und SL28).

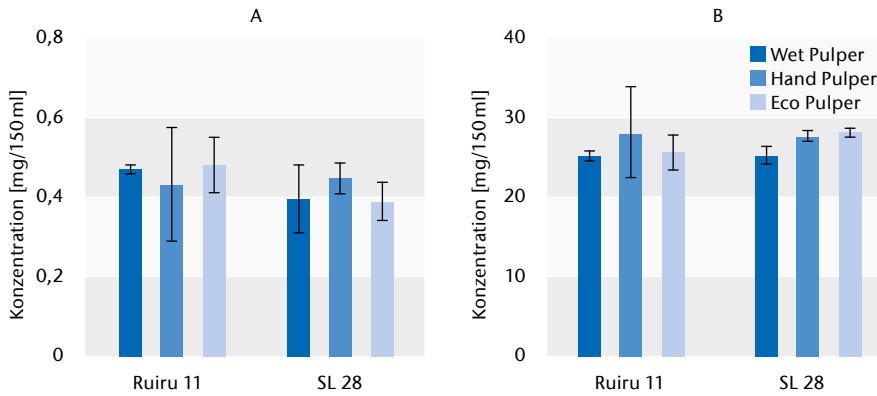


Abb. 4) Niacin- (A) und Zitronensäurekonzentrationen (B) in Bohnen aus unterschiedlichen Prozessierungsmethoden (Wet, Hand und Eco Pulper) und von unterschiedlichen Kultursorten (Ruiru 11 und SL28).

Acrylamid

Die Bildung von Acrylamid in Lebensmitteln ist bis heute noch nicht vollständig verstanden, dennoch konnten einige Studien zeigen, dass die Bildung während der frühen Maillard-Reaktion stattfinden muss (Farah 2012). Abhängig von der Mischung und dem verwendeten Röstprofil schwanken die Acrylamidkonzentrationen im Kaffee. In den untersuchten Proben konnte kein Acrylamid nachgewiesen werden. Entweder wurde durch die Filtrationschritte das Acrylamid entfernt bzw. zu gering konzentriert oder der Röstprozess war hinreichend schonend.

Vanillin

Vanillin ist ein wichtiger Aromastoff, welcher vielen Lebensmitteln zugefügt wird, um deren Geschmack zu beeinflussen. Im Kaffee kommt diese Substanz auch in geringen Mengen natürlich vor.

In den untersuchten Proben lagen die Vanillinkonzentrationen unter der Detektionsgrenze. Um die erstellte Methode auch für die Probenmatrix Kaffee zu validieren, wurden zu jeder Probe 20 ng/µl Vanillinstandard hinzugefügt. Nach der Zugabe konnte eine Konzentration reproduzierbar gemessen werden, die geringfügig über der des zugegebenen Standards lag. Insofern wurde gezeigt, dass Vanillin enthalten war. Da jedoch eine direkte Messung nicht möglich war, geben wir den Gehalt von Vanillin nicht an.

Saccharose

Der Gehalt an Saccharose schwankt für die untersuchten Kaffeeproben zwischen 3,99 und 11,95 mg/Tasse Kaffee (150 ml), wobei eine gegenläufige

Tendenz bei den verschiedenen Prozessierungsmethoden beobachtet werden konnte. Je mehr Wasser verwendet wurde, desto höher ist die Saccharosekonzentration. Dies widerspricht jedoch Literaturangaben, nach denen der Saccharosegehalt bei Wet-Pulperprozessierten Bohnen niedrig ist (Kienreich & Schwarz 2008). Saccharose ist sehr polar und löst sich hervorragend in Wasser. Insofern müsste eigentlich zumindest ein Teil der Saccharose ausgewaschen werden und es müsste sich ein ähnliches Konzentrationsprofil wie bei Koffein und Chlorogensäure zeigen. Diese Beobachtung erfordert gegebenenfalls eine weitere Untersuchung.

Zitronensäure

Der Zitronensäuregehalt in den hier untersuchten Kaffeeproben lag zwischen 25,2 mg und 28,15 mg je Tasse (150 ml), also zwischen 166,67 mg/l und 186,67 mg/l. Diese geringen Konzentrationsunterschiede schwankten geringfügig zwischen den Prozessierungsmethoden und Kultursorten. Ein Einfluss dieser Faktoren ist nicht erkennbar.

Niacin

Der Niacingehalt in den untersuchten Kaffeeproben lag zwischen 0,389 mg und 0,487 mg je Tasse (150 ml) und ist damit etwas niedriger als in der Literatur angegeben (0,41 mg je 175 ml und 2,85 mg je 150 ml) (Bressani & Navarrete 1959).

Auch zwischen den beiden Kultursorten zeigen sich keine signifikanten Unterschiede. Die unterschiedlichen Anbaugelände und mögliche Unterschiede im verwendeten Wasser oder den Maschinen scheinen insofern keinen Einfluss zu haben.

Messmethodik

Aufgrund der hohen Sensitivität und Selektivität eignet sich LC-MS/MS sehr gut zur Quantifizierung. Allerdings können nur nicht flüchtige Substanzen detektiert werden, da sie in der mobilen Phase löslich sein müssen. Außerdem müssen die Moleküle ionisierbar sein und einen polaren Charakter haben, damit sie mit den zur Verfügung stehenden Säulen von anderen Substanzen getrennt und im Massenspektrometer nachgewiesen werden können. Ein Großteil der im Kaffee vorkommenden Aromastoffe ist jedoch flüchtig und damit für eine Messung mit dieser Methode nicht geeignet. Um den Einfluss der verwendeten Wassermenge bei den Prozessierungsmethoden besser einschätzen zu können, sollten noch weitere Untersuchungen insbesondere für die flüchtigen Aromastoffe durchgeführt werden. Dafür bietet sich die Gaschromatografie-Massenspektrometrie (GC-MS) an.

5. Schlussfolgerung und Ausblick

Durch eine Vielzahl vorheriger Studien konnte gezeigt werden, dass die Inhaltsstoffe durch verschiedene Faktoren, angefangen vom Anbaugelände der Kaffeepflanze bis hin zur Röstung, nachhaltig beeinflusst werden. Gleichzeitig wird dabei deutlich, wie auch in unserer Untersuchung, dass eine präzise Beschreibung bzw. Kontrolle aller Parameter einer landwirtschaftlichen Produktion, insbesondere unter nicht experimentellen Realbedingungen respektive in Schwellenländern, schwierig ist.

In Bezug auf die Prozessierungsmethoden konnten in dieser Arbeit folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Der Koffein- und Chlorogensäuregehalt ist von der verwendeten Prozessierungsmethode abhängig. Je mehr Wasser bei der Aufbereitung der Kaffeekirschen verwendet wurde, desto geringer war die Konzentration dieser beiden Komponenten im Kaffee.
- In keiner Probe war Acrylamid zu finden, unabhängig davon, wie die Kaffeebohnen vorher aufbereitet

wurden. Dies könnte ein Hinweis auf ein schonendes Röstverfahren sein.

- Vanillin ist im fertigen Kaffee nur in sehr geringen Konzentrationen vorhanden.
- Der Saccharosegehalt ist ebenfalls von der verwendeten Prozessierungsmethode abhängig. Im Gegensatz zu Koffein und Chlorogensäure zeigte Saccharose eine entgegengesetzte Abhängigkeit von der Prozessierungsmethode. Je mehr Wasser bei der Prozessierungsmethode eingesetzt wurde, desto höher war der Saccharosegehalt im Kaffee.
- Die Konzentrationen an Zitronensäure und Niacin waren nach den einzelnen Prozessierungsmethoden annähernd gleich. Die verwendete Wassermenge bei der Aufbereitung der Kaffeekirschen scheint hier keinen Einfluss zu haben.
- Ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Kultursorten Ruiru 11 und SL28 konnte für Chlorogensäure und Saccharose festgestellt werden. Dies könnte durch die unterschiedlichen Anbaugebiete, Unterschiede im Wasser, die verwendeten Maschinen oder insbesondere die Charakteristika der Pflanzensorten bedingt sein (Gering 2015).

Aus ökologischer Sicht ist es sinnvoll, zur Prozessierung auf das Eco-Pulper-Verfahren umzusteigen, da der Kaffee qualitativ-analytisch nicht schlechter erscheint als Kaffee, der mit einer anderen Methode aufbereitet wurde. Teilweise wurden sogar höhere Konzentrationen einzelner Inhaltsstoffe gemessen, was den Geschmack des Kaffees ggf. positiv beeinflusst. Hierfür ist eine gustatorische Prüfung erforderlich, bei der Kaffee von geschultem Personal getestet und hinsichtlich verschiedener Parameter, bspw. Säuregrad, Aroma oder Süße des Kaffees, untersucht wird. Laut Auskunft der kenianischen Partner schneidet Eco-Pulper-Kaffee hierbei nicht schlechter ab als anders prozessierte Kaffees.

LITERATUR

Agilent Technologies (2001) Basics of LC/MS Primer. <http://ccc.chem.pitt.edu/wipf/Agilent%20LC-MS%20primer.pdf>. Accessed 12 Jan 2017

Bressani R, Navarrete DA (1959) Niacin content of coffee in Central America. *Journal of Food Science* 24(4):344–351

Farah A (2012) Coffee Constituents. In: Chu Y-F (ed) *Coffee. Emerging Health Effects and Disease Prevention*, 1., Auflage. Institute of Food Technologists Series. John Wiley & Sons, New York, NY, ISBN: 978-0-470-95878-0, pp 21–58

Gering V (2015) LC-MS/MS als Detektions- und Quantifizierungsmethode für Kaffee Komponenten. Masterarbeit, Technische Hochschule Wildau

Kienreich M, Schwarz S (2008) "FAQ Kaffee" - Fragen, Antworten, Quintessenzen. Ein Handbuch über Kaffeewelten, 1., Aufl. coffee, media & events, Mannheim. ISBN: 9783200013186

Koskei RK (2015) Effects of different processing technologies on quality characteristics of kenya coffee. Dissertation, Dedan Kimathi University of Technology

Lindsay S (1996) Einführung in die HPLC. Vieweg, Braunschweig. ISBN: 3-528-06759-4

Moldvaer A (2014) Das Kaffee-Buch. Sorten, Anbaugebiete, Barista-Wissen und Rezepte aus der ganzen Welt. Dorling Kindersley, München. ISBN: 3831026815

Roa G, Oliveros CE, Alvarez J, Sanz JR, Ramirez CA, Dávila MT, Alvarez JR, Zambrano DA, Puerta GI, Rodriguez N (1996) Ecological Processing of Coffee at Farm Level. Hrsg.: Cenicafé Colombia

AUTOREN

Vanessa Gering, M.Sc.

Liane Kober, M.Sc.

Dr. Oliver Brödel

Prof. Dr. Marcus Frohme

Molekulare Biotechnologie und Funktionelle Genomik
Institut für Angewandte Biowissenschaften
Technische Hochschule Wildau

Dr. Richard Kipkorir Koskei

Prof. Dr. Jane Beatrice W. Mugendi

Coffee Technology

Dedan Kimathi University of Technology, Kenya

E-Mail für Korrespondenz:

marcus.frohme@th-wildau.de



Die Flavin-abhängige Fruktosedehydrogenase und Cytochrom c: Elektronentransfer und Sensorstrategien

Christoph Wettstein, Kenji Kano, Daniel Schäfer, Ulla Wollenberger, Fred Lisdat*

Zusammenfassung

Die hier durchgeführten Untersuchungen ermöglichen ein besseres Verständnis der Elektronentransferprozesse zwischen der Flavin-abhängigen Fruktosedehydrogenase (FDH) und dem Redoxprotein Cytochrom c (Cyt c). Dies liefert im Hinblick auf sensorische Anwendungen wichtige Erkenntnisse für vorteilhafte Sensorarchitekturen und deren Messbedingungen. Es wurden zwei unterschiedliche pH-Optima für die Redoxreaktion der beiden Proteine untereinander entdeckt. Die Reaktion wurde im Weiteren mit Elektroden kombiniert und so eine Fruktose-abhängige Stromantwort detektiert. Darüber hinaus konnten definierte dreidimensionale Sensorarchitekturen der beiden Proteine, mit Hilfe von DNA als zusätzlichen biologischen Baustein erzeugt und für die Sensorik genutzt werden.

Abstract

With regard to sensor application, flavin-dependent fructose dehydrogenase (FDH) and the redox protein cytochrome c (cyt c) were examined for a better understanding of electron transfer (ET) pathways. First, two different pH optima could be determined for the reaction of both proteins. A fructose-dependent signal can be achieved on a cyt c electrode with adsorbed FDH as well as with the enzyme in solution. Furthermore, fructose sensors could be produced using a defined arrangement of cyt c and FDH by the layer-by-layer technique with DNA as a second building block.

1. Einleitung

Elektronentransfer-(ET-)Reaktionen spielen eine entscheidende Rolle in den Stoffwechselprozessen aller Organismen (Berg et al. 2012). Die Reaktionskaskaden der Proteine innerhalb der Atmungskette oder der Photosynthese sind für diese Zwecke optimal angepasst. Es gibt verschiedene Beispiele, in denen versucht wurde, diese Elektronentransferkaskaden zu imitieren, um sie für die analytische Stoffdetektion oder auch für eine bioenergetische Anwendung zu nutzen. In diesem Zusammenhang wurde auch die Elektronenübertragung durch das Redoxprotein Cytochrom c umfassend untersucht. Cytochrom c zeigt einen direkten Elektronentransfer (DET) an modifizierten Elektroden, wie sie bspw. durch Selbstorganisierte Monoschichten (SAM) auf Gold erreicht werden (Taniguchi et al. 1982, Armstrong et al. 1988, Song et

al. 1993, Ge et al. 2002). So kann man auf den Einsatz von Redoxmediatoren verzichten, die unter Umständen Interferenzen oder Seitenreaktionen verursachen. Aufgrund des möglichen Selbstaustausches von Elektronen zwischen Cyt c Molekülen gibt es auch verschiedene Ansätze, das Protein in Multischichten anzuordnen (Lisdat et al. 2009, Sarauli et al. 2010, Feifel et al. 2012). Im Hinblick auf sensorische Anwendungen kann Cyt c so genutzt werden, um gekoppelt mit Erkennungselementen, wie bspw. bestimmten Enzymen oder sogar mehreren unterschiedlichen Enzymen auf einer Sensoroberfläche, bioelektrochemische Signale in Abhängigkeit vom Substrat zu generieren (Jin et al. 1996, 1997, Sarauli et al. 2012, Feifel et al. 2014). Hierbei kommen überwiegend voltammetrische Messmethoden zum Einsatz. Gezeigt wurde das bereits für das Flavo-Enzym Cellobiosedehydrogenase (Feifel et al. 2013) und die

PQQ-abhängiger Glukosedehydrogenase (Wettstein et al. 2012). Diese Proteinaufbauten besitzen Potential für Anwendungen in der Bioelektronik, Biosensorik und in Biobrennstoffzellen (Wu et al. 2007, Cooney et al. 2008, Lisdat et al. 2009).

In der hier gezeigten Studie wurde das Hämflavo-Enzym Fruktosedehydrogenase verwendet. Dies ist ein Membran-assoziiertes Enzym mit einer molaren Masse von ca. 140 kDa. Es besteht aus drei Untereinheiten, von denen die größte ein Flavin-Adenin-Dinucleotid (FAD) und die mittlere Untereinheit drei prosthetische Gruppen Häm c enthält, während die kleinste Untereinheit der Membranassoziiierung dient (Ameyama et al. 1981, Kawai et al. 2013, 2014). Die Formalen Potentiale (E_r) der Hämgruppen werden mit 10 ± 4 mV, 60 ± 8 mV und 150 ± 4 mV vs. Ag/AgCl (sat. KCl) bei pH 5,0 beschrieben. Werte anderer Studien zeigen das

Formale Potential adsorbierter FDH an Goldelektroden (+ 80 mV; Kahn et al. 1991) und Kohlenstoffelektroden (+ 39 mV vs. Ag/AgCl, sat. KCl; Kamitaka et al. 2007), diese liegen im Bereich des E_f vom Häm 2, bei 60 ± 8 mV.

Der K_m Wert des Enzyms für Fruktose wurde mit 10 mM bei pH 4,5 ($K_3[Fe(CN)_6]$ als Elektronenakzeptor) bestimmt (Ameyama et al. 1981). Die FDH ist ein Enzym mit einem pI von $5,0 \pm 0,1$, sein pH-Optimum liegt bei pH 4,0 bis 4,5 und sein Temperatur-optimum bei $37^\circ C$. Aufgrund hydrophober Oberflächengruppen tendiert FDH in wässriger Lösung zur Präzipitation, was zu einer Inaktivierung des Enzyms führt. Die Lagerung des Enzyms in einem Triton X[®]-enthaltenden Puffer bei $4^\circ C$ erhält jedoch die Aktivität für mindestens zwei Wochen (Ameyama et al. 1981).

Die FDH wurde in vergangenen Untersuchungen für die Konstruktion von Biosensoren (Kahn et al. 1992, Kinneer et al. 1997, Bassi et al. 1998) sowie für Biobrennstoffzellen (Kamitaka et al. 2007, Tkac et al. 2009, Tamaki et al. 2012) verwendet. Die Immobilisierung konnte gezeigt werden, und sowohl ein Direkter Elektronentransfer (DET) als auch ein Mediator-vermittelter Elektronentransfer (MET) ließen sich nachweisen. Dabei zeigte sich vor allem an kohlenstoffbasierten Materialien die Möglichkeit eines DET (Kamitaka et al. 2007, Tominaga et al. 2007, 2009). Besonders effizienter DET kann beobachtet werden, wenn das Enzym mit der Häm-Untereinheit zur Elektrodenoberfläche ausgerichtet wird. Tominaga et al. (2007) generierten bioelektrokatalytische Ströme auf HOPG (highly oriented pyrolytic graphite, basal-plane) und Kohlenstoffplatten. Die katalytischen Oxidationsströme zeigten sich nur im sauren Milieu (\leq pH 6), während im neutralen oder alkalischen Milieu keine katalytischen Reaktionen nachweisbar waren. Hierbei wurde auch eine Zersetzung des FDH-Trimers beobachtet. Als effizientestes System zeigt sich bis dato eine kohlenstoffbasierte Elektrode (Ketjen black), deren höchste Stromdichten bei pH 5 erreicht wurden. Neben Kohlenstoff eignet sich nach vielen Studien auch Gold als mögliche Oberfläche für einen ET von FDH. Beispielsweise können Goldnanopartikel, modifiziert

mit Mercaptoethanol, in Anwesenheit von FDH und Fruktose bioelektrokatalytische Signale zeigen (Murata et al. 2009). Auch Polyanilin-modifizierte ITO-Elektroden zeigen einen effizienten DET (Sarauli et al. 2015). Ferapontova et al. (2005) wiesen Reaktionen an Cysteamin- und Mercaptoethanol-modifizierten Goldelektroden nach, mit FDH und Cyt c als Mediator (beides in Lösung). Hier wird ein pH von 7 als besonders effizient genannt.

Die im Folgenden gezeigten Untersuchungen wollen den Interprotein-ET zwischen FDH und Cyt c sowohl in Lösung als auch mit auf Elektroden gebundenem Protein charakterisieren. Dies hat das Ziel, die Gestaltung von ET-Ketten für analytische Fragestellungen zu ermöglichen, in deren Folge substratspezifische Sensoren (Fruktose) mit einstellbarer Sensitivität erzeugt werden können.

2. Material und Methoden

Chemikalien

Citronensäure, D-Fruktose, Eisen(III)-sulfat, Kaliumhexacyanoferrat (III), Kalimhydroxid, 11-Mercapto-1-undecanol (MU), 11-Mercaptoundecansäure (MUA), Triton X[®]-100 (TX), Cytochrom c (Horse heart) und dsDNA (Calf thymus) wurden von Sigma-Aldrich (Taufkirchen, Germany) bezogen. Ethanol, Natriumdodecylsulfat (SDS), Na_2HPO_4 , H_2SO_4 (96 %), H_3PO_4 (\geq 85 %), H_2O_2 (30 %) und HNO_3 (\geq 65 %) wurden bei Carl Roth (Karlsruhe, Germany) erworben, KCl and K_2HPO_4/KH_2PO_4 bei der Firma Merck bestellt. Golddraht (0,5 mm Durchmesser, 99,999 % Reinheit) wurde bei der Firma Goodfellow (Bad Nauheim, Germany) bestellt. Amicon[®] Ultra Zentrifugalfilter mit einem MWCO von 10 kDa wurden über Merck Millipore Ltd. (Cork, Ireland) bezogen. Alle Lösungen wurden mit 18 M Ω Reinstwasser hergestellt (Evoqua Water Technologies GmbH, Germany, Ultra Clear Direct).

Kommerziell erhältliche lyophilisierte und mit Stabilisierungsagenzien versehene FDH (*Gluconobacter japonicus*, NBRCA3260, vorher *Gluconobacter industrius*) wurde über Sigma Aldrich bezogen (4,5 mg FDH enthielten 5,1 % Protein). Eine 0,5 mg (Protein)/ml Stammlösung (\triangleq 3,3 μ M) wurde

durch Lösen des Lyophilisats in 0,5 ml McIlvaine-Puffer (pH 4,5) hergestellt. Alternativ wurde FDH (*Gluconobacter japonicas*, NBRCA3260) aus der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Kenji Kano (Kyoto University, Japan) bezogen. Das Enzym wurde rekombinant in *Gluconobacter oxydans* expremiert und nach Kawai et al. (2013) aufgereinigt. Es war in einer Stammlösung mit einer Konzentration von 5,6 mg/ml in 100 mM McIlvaine-Puffer (pH 6,0) gelöst und enthielt zur Stabilisierung 300 mM Saccharose. Die Aktivität wurde nach Ameyama et al. (1981) vor der Verwendung bestimmt. Der Aktivitätstest basiert auf der Reduktion von Hexacyanoferrat (III) durch FDH in Anwesenheit von Fruktose. Die Reaktion wird gestoppt durch die Zugabe von Phosphorsäure, SDS und Eisen(III)-sulfat. Dabei denaturiert SDS das Enzym, wodurch die weitere Reduktion des Hexacyanoferrats unterbunden ist. Eisen(III)-sulfat reagiert mit dem Reaktionsprodukt der Reduktion, dem Hexacyanoferrat (II), zu Preußischblau, welches spektroskopisch bei einer Wellenlänge von 660 nm gemessen werden kann.

UV-Vis-Spektroskopie. Kinetische Messungen wurden mit einem Thermo-Scientific-Evolution-300-Spektrometer (Weltham, MA, USA) durchgeführt. Es wurden je 1 U FDH zu 25 μ M Cyt c-Lösung, in 100 mM McIlvaine-Puffern bei verschiedenen pH-Werten hinzugegeben. Jede Probe wurde vor der Messung durch Rühren für 5 s gemischt und für 5 min bei $37^\circ C$ equilibriert. Nachfolgend wurde Fruktose zur Cyt c/FDH-Mischung zugegeben, so dass sich eine Konzentration von 50 mM einstellte. Die Mischung wurde erneut für 5 s gerührt. Anschließend wurde die Reduktionsrate von Cyt c durch Aufzeichnung der spektroskopischen Veränderung bei einer Wellenlänge von 550 nm für 5 min ermittelt. Für die Abschätzung der Reduktionsrate des Cyt c wurde die Geschwindigkeit aus der Anfangssteigung der kinetischen Kurve, innerhalb der linearen Phase und unter Subtraktion der Kontrollwerte (Messung ohne Substratzugabe) berechnet. Unter Verwendung des Lambert-Beer-Gesetzes sowie eines Extinktionskoeffizienten (ϵ) für reduziertes Cyt c von $\epsilon_{(550)red} - \epsilon_{(550)ox} =$

21,1 mM⁻¹cm⁻¹ (van Gelder) und einer Schichtdicke von 1 cm konnte die umgewandelte Substratkonzentration ermittelt werden. Als Kontrolle diente die Absorption von vollständig reduzierten Cyt c, welche durch die Zugabe von Ascorbinsäure erhalten wurde.

Präparation der Proteinelektroden. Golddrahtelektroden (AuE) wurden 3 x in frischer Piranhalösung (H₂SO₄/H₂O₂, 3 : 1) für 20 min gereinigt. Jedem Schritt folgt eine kurz Ultraschallbehandlung und gründliches Spülen mit Reinstwasser. Anschließend wurden die Elektroden für 4 h in 2,5 M KOH gekocht und nach Spülen in Reinstwasser in 96%iger H₂SO₄ gelagert. Für die Modifizierung mit einer SAM aus MU/MUA wurden Elektroden für 20 min in 65 % HNO₃ gereinigt und mit Reinstwasser, gefolgt von EtOH (reinst), gespült. Nachfolgend wurde jede Elektrode in einer 3:1-Mischung aus 5 mM MU und MUA (ethanolische Lösung) für mindestens 24 h inkubiert. MU und MUA bilden eine selbstorganisierte Monoschicht (SAM) auf der Elektrodenoberfläche. Die negativ geladenen Carboxylsäuregruppen binden adsorptiv positiv geladene Cyt c-Moleküle, in einem neutralen pH-Bereich, während MU als Abstandhalter zwischen den MUA-Molekülen dient, um die Dichte der negativ geladenen MUA-Moleküle zu reduzieren (Ge et al. 2002).

Präparation von Cyt c-Monoschichtelektroden. Cyt c-Monoschichten wurden durch zykovoltammetrische Messung (Scanrate 100 mV/s) einer MU:MUA-modifizierten Elektrode in 30 µM Cyt c-Lösung (5 mM KPP pH 7,0) erzeugt.

Präparation von Cyt c-Monoschichtelektroden mit immobilisierter FDH. Cyt c-Monoschichtelektroden wurden wie zuvor beschrieben hergestellt und anschließend in einer 200 µg/ml FDH-Lösung in 5 mM KPP-Puffer pH 7,0 inkubiert. Da FDH-Stammlösungen im McIlvaine-Puffer mit zusätzlichen Stabilisierungsagentien vorlagen, wurde die Lösung mit Hilfe von Amicon-Zentrifugenfiltern (MWCO 10 kDa) umgepuffert (Protokoll nach Herstellerangaben). Präparierte Cyt c/FDH-Elektroden wurden vor der Messung

gründlich 5 x in 5 mM KPP-Puffer pH 7,0 gespült.

Präparation von Cyt c/FDH-Multischichtelektroden. Es wurden verschiedene Mischungen aus 20 µM Cyt c und FDH mit Konzentrationsverhältnissen von 100 : 1 bis zu 5 : 1 in 0,5 mM KPP-Puffer pH 5,0 hergestellt. Auch die hier verwendeten FDH-Stammlösungen wurden wie zuvor mit Amicon-Zentrifugenfiltern umgepuffert. Auf frisch präparierte Cyt c-Monoschichtelektroden wurden durch wechselnde 10-minütige Inkubation in 0,2 mg/ml DNA (0,5 mM KPP-Puffer pH 5,0) und oben genannte Cyt c/FDH-Mischungen Multischichtarchitekturen erzeugt. Die Elektroden wurden zwischen jedem Immobilisierungsschritt 5 x mit 0,5 mM KPP-Puffer pH 5,0 gespült. Zur Stabilisierung der Multischichtarchitektur wurden modifizierte Elektroden bei Raumtemperatur getrocknet und anschließend bei 40 °C für 40 min in 0,5 mM KPP-Puffer pH 5,0 inkubiert (Kepplinger et al. 2011).

Zykovoltammetrie. Zykovoltammetrische Messungen wurden mit einem Autolab PGSTAT 20 (Metrohm, Germany) durchgeführt. Präparierte Elektroden (Arbeitselektrode) wurden in einer selbstkonstruierten 1-ml-Messzelle bei einer Eintauchtiefe von 2 mm (\triangleq 3,3 mm² aktive Elektrodenoberfläche) vermessen. Als Referenzelektrode diente eine Ag/AgCl in 1 M KCl (Microelectrodes Inc., Bedford, USA) mit einem Potential von +236 mV vs. NHE (Bard et al. 2007). Als Gegenelektrode diente ein Platindraht mit einer Oberfläche von ca. 50 mm².

Zur Bestimmung der elektroaktiven Menge Cyt c wurden Zykovoltammogramme der präparierten Elektroden in 5 mM KPP-Puffer pH 7,0 bei einer Scanrate von 100 mV/s durchgeführt. Dem Faraday-Gesetz folgend korreliert die Ladung (Flächenintegral des Peaks) mit der Anzahl an Redoxmolekülen (Cyt c). Präparierte Elektroden wurden vor der Vermessung im jeweiligen Messpuffer für 2 min equilibriert, im Falle der wärmostabilisierten Multischichtelektroden für 10 min. Messungen nach Zugabe von Substrat oder freiem Enzym erfolgten immer nach 30-sekündiger Durchmischung

der Lösung durch Rühren. Dargestellte Zykovoltammogramme sind immer zweite Scans. Wenn nötig, sind weitere Scans zur Beurteilung der Stabilität durchgeführt worden.

SPR-Messungen. Messungen der Surface-Plasmon-Resonance (SPR) erfolgten mit einem Biacore T100 (GE Healthcare) bei einer fixen Flussrate von 1 µl/min und einer Temperatur von 25 °C. Goldsensor-Chips (SIA Kit-Au, BT-1004-0, GE Healthcare) wurden zunächst 3 x für 10 min in frischer Piranhalösung (3:1-Mischung aus 96 %iger H₂SO₄ und 30%iger H₂O₂) gereinigt und anschließend mit Reinstwasser und Ethanol (reinst) gespült. Die gereinigten Goldsensorchips wurden analog zu Golddrahtelektroden (siehe oben) mit einer SAM-Schicht aus MU/MUA versehen. Abweichend von der Präparation der Golddrahtelektroden wurden die Schritte des Cyt c-Monoschichtaufbaus und des Multischichtaufbaus aus einer DNA sowie einer Cyt c/FDH-Lösung, unter Einhalten der Konzentrations- und Pufferbedingungen, im Fließsystem mit oben genannter Flussrate durchgeführt. Hierbei konnte mittels SPR-Messungen die Kinetik der Massenzunahmen durch die Modifizierungsschritte verfolgt werden.

3. Ergebnisse und Diskussion

Untersuchungen zu Cyt c und FDH in Lösung. Die Elektronentransferreaktion zwischen Cyt c und FDH wurde, durch Bestimmung der Reduktionsgeschwindigkeit von Cyt c, im Bereich zwischen pH 4,5 und 7,0 untersucht. Im Zeitraum der Verfolgung der Absorptionsänderung von Cyt c konnte keine Sättigung der Absorption beobachtet werden. Dies bestätigt, dass die kinetischen Daten im linearen Bereich der Reaktion ermittelt wurden. Abb. 1 sind die einzelnen Reduktionsgeschwindigkeiten für den untersuchten pH-Bereich zu entnehmen. Man erkennt bei pH 4,0 die höchste Geschwindigkeit und damit den effizientesten Elektronentransfer. Im Weiteren ist eine Abnahme mit zunehmenden pH-Werten festzustellen, jedoch kommt es bei pH-Werten oberhalb von pH 6,0 wiederum zu einer Zunahme der Reaktionsgeschwindigkeit.

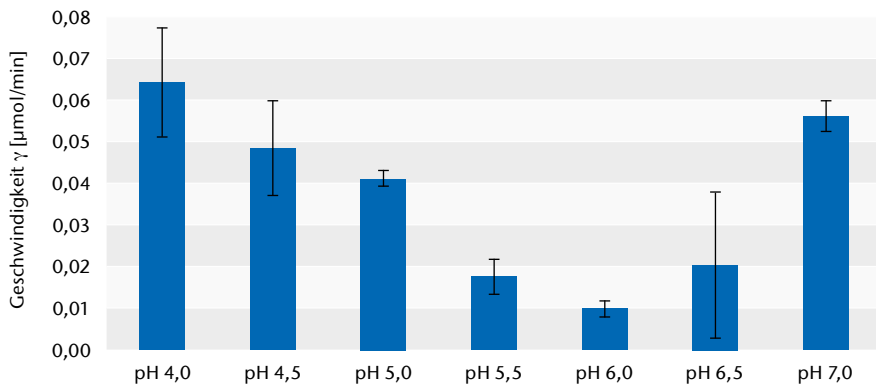


Abb. 1) Geschwindigkeit der Cyt c-Reduktion in Anwesenheit von FDH und Fruktose in Lösung bei unterschiedlichen pH-Werten (100 mM Mcllvaine-Puffer, Cyt c = 25 μM , FDH = 1 U/ml, Fruktose = 50 mM). Hier verwendet: kommerzielle FDH (Sigma Aldrich). Mittelwerte aus 3 Wiederholungsmessungen ($n = 3$).

Dies steht im Kontrast zum Verhalten des Enzyms (FDH) mit dem Elektronakzeptor Hexacyanoferrat (III). Hier konnte nur im sauren Medium eine hohe Enzymaktivität festgestellt werden, während im neutralen pH lediglich ~4 % der Aktivität beobachtet wurden (Ameyama et al. 1981). Dass für die Reaktion der FDH mit Cyt c ein weiterer pH-Bereich mit hoher Enzymaktivität gefunden werden konnte, impliziert unterschiedliche Mechanismen in der Interaktion der beiden Moleküle. Zum einen kann der ET über die FAD enthaltende Untereinheit und dann weiter über die Häm enthaltende Untereinheit zum Cyt c erfolgen. Zum anderen besteht die Möglichkeit des direkten ET von der FAD-Untereinheit auf Cyt c. Eine ähnliche Schlussfolgerung ziehen auch Feropontova et al. (2005) aus ihren zykovoltammetrischen Untersuchungen der FDH mit Cyt c bei verschiedenen Scanraten. Auch hier wurde im neutralen pH-Bereich eine überraschend hohe FDH-Aktivität beobachtet.

Untersuchungen der Reaktion von oberflächengebundenem Cyt c mit FDH in Lösung. Neutraler pH: Da der heterogene ET von Cyt c, gebunden an SAM-Schichten aus MU/MUA, bereits hinreichend charakterisiert und als schnell eingestuft worden ist (Ge et al. 2002), wurde hier direkt mit einer Cyt c-Monoschichtelektrode begonnen, die Reaktion des Redoxproteins mit FDH zu untersuchen. Die Reaktion der beiden Moleküle zeigte bereits in Lösung einen effizienten ET bei pH 7,0. Ausgehend von dieser Erkenntnis wurden substratabhängige zykovoltammetrische Messungen durchgeführt.

Während Cyt c adsorptiv immobilisiert auf einer MU/MUA-Golddrahtelektrode vorlag, wurden der Messlösung nacheinander FDH sowie zunehmende Konzentrationen Fruktose zugegeben. Abb. 2 sind die daraus resultierenden, substratabhängigen katalytischen Ströme zu entnehmen. Die Katalyse startet bei einem Potential von -50 mV (vs. Ag/AgCl, 1 M KCl) und zeigt eine

effiziente Reduktion des Cyt c durch FDH, obwohl es oberflächengebunden nur eingeschränkt zugänglich ist. Die Auftragung der katalytischen Ströme (Abb. 2 B) ergibt eine typische enzymatische Reaktionskinetik vom Michaelis-Menten-Typ. In Näherung kann ein apparenter K_m -Wert von 0,5 mM bestimmt werden. Darüber hinaus zeigt sich eine Abhängigkeit der biokatalytischen Reaktion von der Konzentration der FDH in Lösung (Ergebnisse hier nicht grafisch dargestellt).

Diese Untersuchungen wurden sowohl mit der kommerziell erhältlichen als auch der nicht kommerziellen FDH vorgenommen. Beide Enzymchargen zeigten ein ähnliches Verhalten, mit einer leicht höheren Aktivität zugunsten der nicht kommerziellen Enzymcharge. Nach Ameyama et al. (1981) wird FDH in Abwesenheit von stabilisierenden Detergenzien durch Präzipitation inaktiviert. Daher wurden hier Vergleichsmessungen mit und ohne

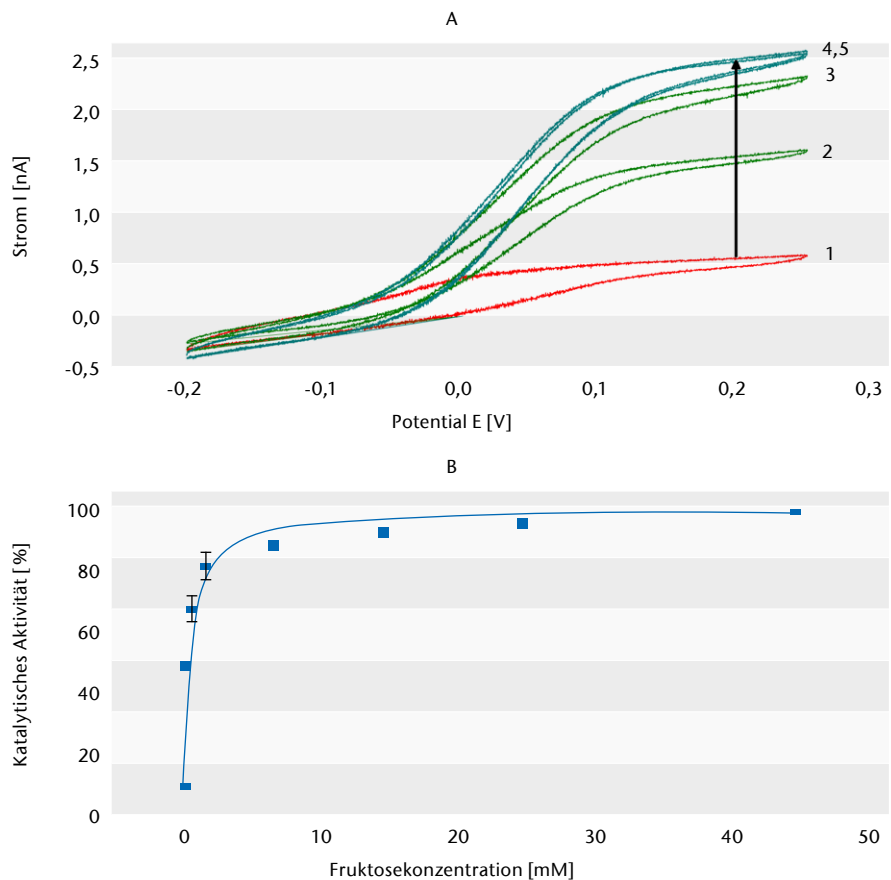


Abb. 2) Zykovoltammogramme einer Cyt c-Monoschicht-Elektrode in Anwesenheit von 4 U/ml FDH in Lösung (5 mM KPP-Puffer pH 7,0, Scanrate 2 mV/s). (A) Cyt c-Monoschicht mit FDH (1) nach Zugabe von FDH und Fruktose unterschiedlicher Konzentrationen: 1,0 mM (2), 6,6 mM (3), 14,6 mM (4), 24,6 mM (5). (B) Plot der prozentualen katalytischen Stroms gemessen bei +200 mV (vs. Ag/AgCl, 1 M KCl) als Funktion der Fruktosekonzentration. Hier verwendet: nichtkommerzielle FDH aus der AG Kano. Mittelwerte aus 3 Wiederholungsmessungen ($n = 3$).

das nichtionische Detergens Triton X-100 (TX) durchgeführt (Ergebnisse hier nicht grafisch dargestellt). Dabei konnte nach Zugabe von 0,1 % TX eine deutliche Abnahme des katalytischen Stroms beobachtet werden. Um zusätzliche Einflussfaktoren auf die Protein-Protein-Interaktion auszuschließen, wurde daher für die nachfolgenden Untersuchungen zum ET-Mechanismus auf eine zusätzliche Zugabe von TX verzichtet.

Saurer pH: Sowohl die eigenen Untersuchungen zur Reaktion der FDH mit Cyt c in Lösung als auch zuvor publizierte Daten zeigen das pH-Optimum im sauren pH-Bereich zwischen pH 4,0 und 4,5. Untersucht man den ET von immobilisiertem Cyt c mit FDH in Lösung, stellt man jedoch erst ab pH-Werten von pH 5,0 eine signifikante katalytische Aktivität fest (Abb. 3). Ein eindeutiges und konzentrationsabhängiges katalytisches Signal kann hier beobachtet werden, jedoch ist es deutlich geringer als das, was bei

pH 7,0 festgestellt werden konnte. Die Abhängigkeit des katalytischen Stroms von der Fruktosekonzentration ist Abb. 3 B zu entnehmen. Der Verlauf ist prinzipiell ähnlich dem bei pH 7, jedoch kann hier ein deutlich höherer K_m -Wert von 2,6 mM abgeschätzt werden. Zusammenfassend ist festzustellen, dass der ET-Weg im neutralen pH-Bereich im Vergleich zum sauren Milieu deutlich höhere Ströme bei kleineren Substratkonzentrationen zulässt. Gleich ist in beiden pH-Bereichen die Limitierung der Abfuhr der Elektronen vom reduzierten Enzym bei hohen Fruktosekonzentrationen.

Untersuchungen mit auf Cyt c-Monoschichten gebundener FDH. Die Immobilisierung von FDH auf Cyt c-Monoschichten wurde hier basierend auf adsorptiven Wechselwirkungen aufgrund unterschiedlicher Ladungen der beiden Biomoleküle erreicht. Dieses Prinzip wurde bereits in frühe-

ren Arbeiten genutzt (bspw. Dronov et al. 2008). FDH hat einen isoelektrischen Punkt von 5,0 während der von Cyt c bei ~ 10 liegt. Damit sind bei einem pH von 7,0 entgegengesetzte Ladungen zu erwarten und FDH kann auf einer Schicht von Cyt c immobilisiert werden.

Anschließende zykovoltammetrische Messungen in Puffer unter Fruktosezugabe zeigten signifikante oxidative Ströme, ab einem Potential von -100 mV (vs. Ag/AgCl, 1 M KCl) und einen maximalen Strom bei $+200$ mV von $0,7$ nA (Ergebnisse hier nicht grafisch dargestellt).

Im Gegensatz zu bereits publizierten Untersuchungen von Kahn et al. (1991) konnte hier unter den gewählten Bedingungen, kein ET von FDH an modifizierten Goldelektroden festgestellt werden. Um dies zu überprüfen, wurden Goldelektroden zunächst mit einer SAM aus MU/MUA modifiziert und anschließend mit FDH adsorptiv beschichtet. Nach Zugabe von Fruktose konnten keine katalytischen Ströme gefunden werden. Daher erscheint die Kopplung der FDH über das Redoxmolekül Cyt c unter den gegebenen Bedingungen deutlich effizienter.

Weitere zykovoltammetrische Untersuchungen zeigten jedoch, dass die FDH relativ leicht von der Elektrode desorbiert, besonders nach Fruktosezugabe zur Messlösung, wohingegen das Cyt c recht stabil immobilisiert bleibt. Schlussfolgernd behalten beide Proteine auch immobilisiert eine gute Reaktionsfähigkeit, jedoch gilt es, in der weiteren Sensorentwicklung eine stabile Fixierung zu erreichen und die relativ schwachen Signale zu verstärken. Dies wurde in der Folge mit der Abscheidung von Multischichtarchitekturen umgesetzt und untersucht.

Charakterisierung von Cyt c/FDH-Multischichtsystemen. Der Idee folgend, höhere katalytische Ströme zu erhalten und dabei stabilere Sensorarchitekturen zu erzeugen, wurde die Layer-by-Layer-Technik aufgegriffen. Mit Hilfe eines Polymers (hier DNA) kann ein enger Kontakt der beiden Proteine, unter Erhalt der Proteinstruktur, erreicht werden. Das Enzym kann auf diese Weise in eine Matrix aus elektronübertragenden Redoxproteinen eingebettet werden. Die erfolgreiche

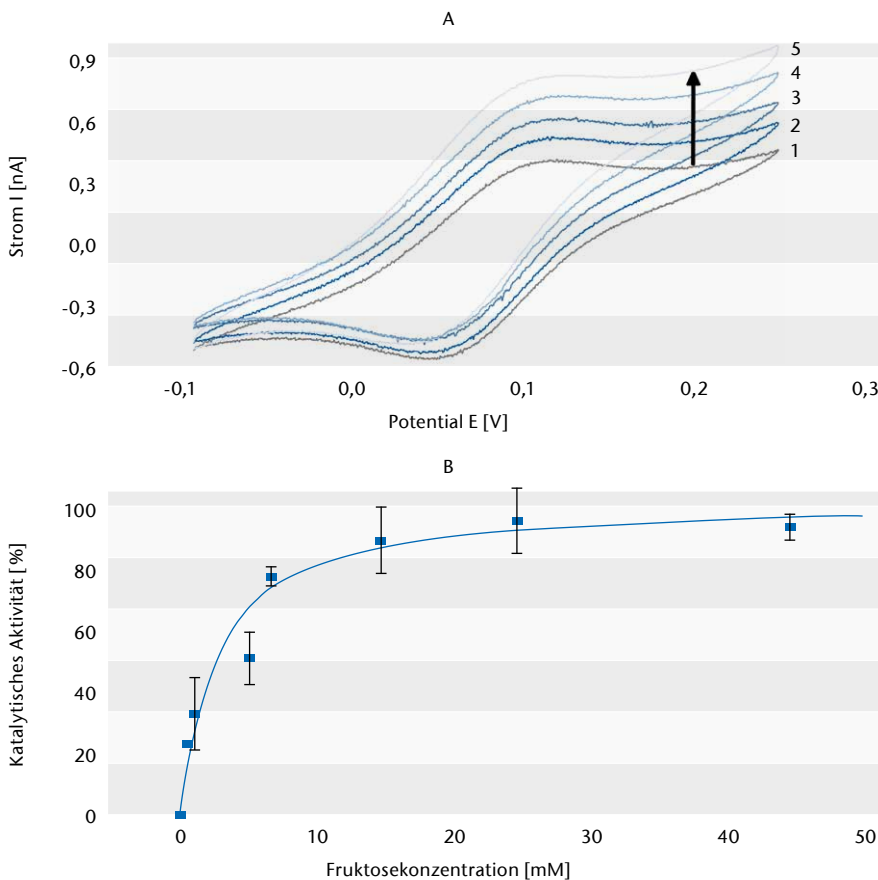


Abb. 3) Zykovoltammogramme einer Cyt c-Monoschicht-Elektrode mit 4 U/ml FDH in Lösung (20 mM KPP-Puffer pH 5,0, Scanrate 2 mV/s). (A) Cyt c-Monoschicht mit FDH in Lösung (1) und nach Zugabe von Fruktose verschiedener Konzentrationen: 0,5 mM (2), 5,0 mM (3), 15,0 mM (4), 45,0 mM (5). (B) Plot des prozentualen katalytischen Stroms erhalten bei $+200$ mV (vs. Ag/AgCl, 1 M KCl), als Funktion der Fruktosekonzentration. Hier verwendet: kommerzielle FDH (Sigma Aldrich). Mittelwerte aus 4 Wiederholungsmessungen ($n = 4$).

Umsetzung solcher Architekturen, unter Erhalt der Elektronentransfereigenschaften von Cyt c konnte schon mehrfach gezeigt werden (Spricigo et al. 2008, Wegerich et al. 2011, Feifel et al. 2014). Cyt c ist somit nicht nur Reaktionspartner der FDH, sondern fungiert auch als elektronleitender „Draht“ durch die kompakte Multischichtstruktur. Im Hinblick auf den Aufbau von Multischichten ist die Wahl eines negativ geladenen Polymers wie DNA sinnvoll. Sie dient hierbei nur als strukturelles Bauelement, dessen negative Ladung in Interaktion mit dem positiv geladenen Cyt c ausgenutzt wird. DNA selbst ist im angewendeten Potentialbereich nicht elektroaktiv und bindet, wie zuvor durch Sarauli et al. (2009) und Wettstein et al. (2014) beschrieben, im sauren Milieu stabil elektrostatisch eine große Menge Cyt c. Die alternierende Abscheidung von DNA und einer Cyt c/FDH-Mischung wurde in dieser Arbeit so durchgeführt, dass Strukturen mit 3, 5 oder 7 Multischichten entstanden sind (Au-MU/MUA-Cyt c-[DNA-Cyt c/FDH]_n).

Zunächst ergaben sich jedoch die Fragestellungen, ob erstens Cyt c und FDH tatsächlich co-immobilisiert werden können und ob zweitens ein ET zwischen beiden innerhalb der Multischichten möglich ist.

Um die Frage der Co-Immobilisierung zu klären, wurde hier zunächst eine SPR-Untersuchung durchgeführt. Auf einem modifizierten SPR-Sensorschip (siehe Abschnitt 3) wurden in einem Fließsystem schrittweise Schichten aufgebracht. In Abb. 4 ist die stetige Abscheidung der Biomoleküle durch eine Zunahme der „Response Units“ (RU) sichtbar. Das Ansprechen im SPR wird in erster Linie durch Anlagerung von bloßer Molekülmasse hervorgerufen, aber auch durch Veränderungen in der Lösung. Auch deshalb folgt jedem Anlagerungsschritt ein Spülschritt, um die Änderung der RU von Indexsprüngen zu bereinigen. Wie der Abbildung zu entnehmen, führt jede Biomolekül-lösung zu einer eindeutigen Assoziation, gefolgt von einer vergleichsweise geringen Dissoziation der Moleküle im Spülschritt. Jedoch fällt die Assoziation der DNA deutlich geringer aus. Die Tatsache, dass nach erfolgter DNA-Abscheidung erneut ein ähnlich großes Abscheidungssignal für die Cyt c/FDH-

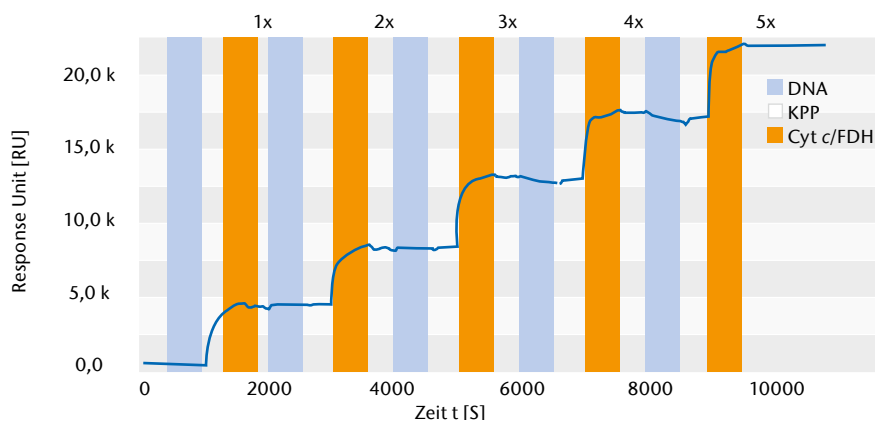


Abb. 4) SPR-Sensorgramm von [DNA-Cyt c/FDH]-Multischicht-Abscheidungen auf einem MU/MUA-modifizierten Goldchip mit einer Cyt c-Monoschicht. Cyt c/FDH-Molverhältnis: 24 : 1, Flussrate 1 μ l/min, Laufpuffer 0,5 mM KPP pH 5,0. Hier verwendet: nichtkommerzielle FDH aus der AG Kano.

Mischung erreicht werden kann, lässt sich als Beweis für eine hinreichende DNA-Assemblierung werten. Es kann anhand der SPR-Messung nicht aufgeklärt werden, ob und in welchem Umfang die Massenlagerung aus der Cyt c/FDH-Mischung durch Cyt c oder FDH bzw. beiden hervorgerufen wird. Spätere Untersuchungen zeigen jedoch, dass beide Proteine gemeinsam abgeschieden werden (Zyklovoltmetrie).

Für zykovoltammetrische Messungen ist ein Wechsel der Pufferbedingungen gegenüber dem Aufbau der Multischichten notwendig. Hier wird von 0,5 mM KPP-Puffer pH 5,0 auf 5 mM KPP pH 7,0 gewechselt. Für die Herstellung der Sensorelektroden wurde zudem eine stabilisierende Hitzebehandlung eingesetzt (Kepplinger et al. 2011).

Zunächst kann die Erhöhung der Oberflächenkonzentration von Cyt c durch die Zunahme der entsprechen-

den Redoxpeaks im Zyklovoltammogramm, festgestellt werden. Es lässt sich aus den Flächenintegralen der Redoxpeaks eine Oberflächenbelegung von ~ 127 pmol/cm² für eine 5-Schichtelektrode (Au-MU/MUA-Cyt c-[DNA - Cyt c/FDH]₅) bestimmen. Die Zugabe von 10 mM Fruktose führt zu einem detektierbaren katalytischen Strom. Tab. 1 sind Werte für weitere Multischichten zu entnehmen. Eine sukzessive Zunahme sowohl der Konzentration der Redoxproteine als auch der katalytischen Ströme mit der Anzahl der aufgetragenen Schichten ist zu konstatieren. Dies ist auch ein Beweis für die gemeinsame Abscheidung beider Proteine während der Herstellung. Wenn das Cyt c/FDH Verhältnis weiter gesenkt wird (von 24:1 auf 5:1) dann kann der katalytische Strom noch weiter gesteigert werden (siehe Abb.5).

Damit kann in dem Multischichtsystem ein effizienter ET sichergestellt

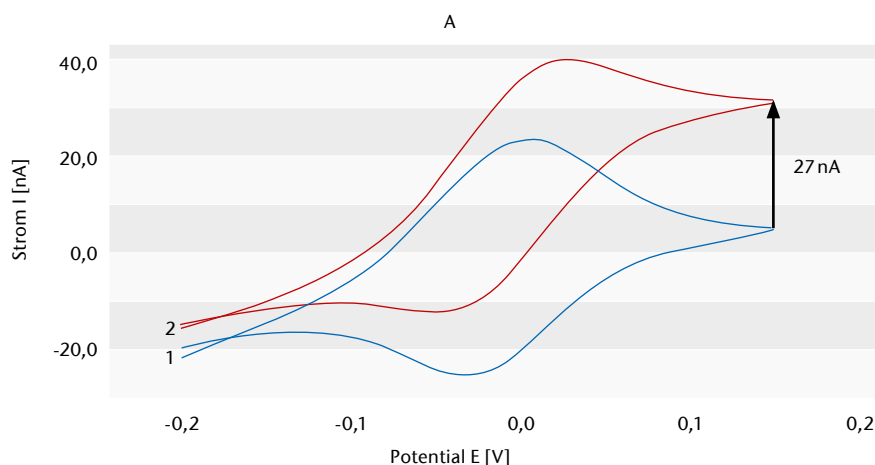


Abb. 5) Zyklovoltammogramm einer 5-Schichtelektrode (Au-MU/MUA-Cyt c-[DNA-Cyt c/FDH]₅). Cyt c/FDH-Molverhältnis: 5 : 1, 5 mM KPP-Puffer pH 7,0, Scanrate 2 mV/s. In Abwesenheit von Fruktose (1) und nach Zugabe von 10 mM Fruktose (2). Hier verwendet: nichtkommerzielle FDH aus der AG Kano.

werden, und zwar sowohl durch Selbstaustausch (Cyt c zu Cyt c) als auch durch Interprotein-ET (FDH zu Cyt c). In Abb. 6 ist schematisch der Elektronentransportweg dargestellt. Die FDH liefert nach Substratzugabe und erfolgter Umsetzung diese Elektronen für die Reduktion von Cyt c-Molekülen in unmittelbarer Umgebung. Anschließend werden Elektronen über einen Shuttle-Prozess (Cyt c-Cyt c-Elektronenaustausch) zur Elektrode abgeführt, wo im finalen Schritt Elektronen über die an der SAM-Schicht gebundenen Cyt c-Moleküle einen oxidativen katalytischen Strom generieren.

Vergleicht man an dieser Stelle den hier verwendeten reinen proteinbasierten Ansatz mit bereits publizierten, in denen ein Redoxpolymer (bspw. Osmiumkomplex) verwendet wird, so findet man in beiden Ansätzen einen ET-Mechanismus, der auf dem „Hopping“ zwischen den Redoxzentren beruht. Die Diffusionskoeffizienten für Redoxpolymer bewegen sich in dem Bereich von 10^{-9} bis 10^{-11} cm^2s^{-1} und resultieren in einer Austauschrate (k_{ex}) von 10^4 bis 10^6 $\text{M}^{-1}\text{s}^{-1}$ (Pickup et al. 1983, Sosnoff et al. 1994, O'Mullane et al. 2004). Cyt c zeigt eine etwas geringere Effizienz im Austausch ($k_{ex} \sim 10^4$ $\text{M}^{-1}\text{s}^{-1}$, nach Feifel et al. 2011), aber gewährleistet dennoch einen ausreichenden Elektronentransport um Fruktose-abhängige katalytische Ströme zu detektieren. Hierbei sei angemerkt, dass lediglich bei höheren Scanraten eine Limitierung im Elektronenaustausch der Cyt c-Moleküle untereinander zu verzeichnen ist (sichtbar durch abnehmende katalytische Ströme). Darüber hinaus bietet der hier gezeigte Ansatz den Vorteil, einzig auf Biomolekülen zu basieren, was im Hinblick auf sensorische Anwendungen und deren Bioverträglichkeit von Bedeutung ist.

Um die Sensitivität des Systems zu untersuchen, wurden amperometrische Messungen durchgeführt. Das 5-Multischichtsystem (Au-MU/MUA-Cyt c-[DNA-Cyt c/FDH]₃) ist für das Substrat Fruktose im Bereich von 5 μM bis 10 mM sensitiv. Kleinere Konzentrationen (unterhalb 5 μM) ergeben keine detektierbaren Signale. Abb. 7 gibt einen Ausschnitt einer amperometrischen Messung wieder. Nach Zugabe des Substrates stellt sich ein

Tab. 1: Katalytische Ströme (bestimmt bei +200 mV vs. Ag/AgCl, 1 M KCl) und Cyt c-Oberflächenkonzentrationen nach Abscheidung von 3, 5 und 7 Multischichten ([DNA-Cyt c/FDH], Cyt c/FDH-Verhältnis 24 : 1 auf einer thiolmodifizierten Gold-elektrode (MU/MUA)).

Schichtanzahl	Katalytischer Strom [nA]	Cyt c-Oberflächenkonzentration [pmol/cm ²]
3	0,5	15
5	4,4	127
7	8,3	222

stabiles, gut definiertes Signal ein. Die Konzentrationsabhängigkeit ist in Abb. 7 B zusammengefasst und zeigt eine typische Michaelis-Menten-Kinetik. Eine Sättigung ist bei niedrigen mM-Konzentration erreicht. Der apparente K_m -Wert kann mit 0,3 mM angegeben werden. Dieser Wert ähnelt stark dem Wert für frei in Lösung befindliche FDH (0,5 mM) und zeigt erneut, dass in den DNA-basierten Sensorarchitekturen, die Cyt c/FDH-Interaktion limitiert ist durch den Abtransport der Elektronen vom reduzierten Enzym zur Elektrode. Die Stabilität der Multischichtarchitekturen während der Messung und Lagerung wurde ebenfalls untersucht. Dabei erweisen sich die Sensorstrukturen stabil gegen mechanischen Stress, wie Rühren oder Pufferwechsel. Nach Lagerung in 0,5 mM KPP-Puffer pH 5,0 bei 4 °C konnte nach drei Tagen eine durchschnittliche Aktivitätsminderung um 25 % und nach elf Tagen um 45 % festgestellt werden. Dies zeigt, dass auch in Abwesenheit von

stabilisierenden Detergenzien, FDH durch die Co-Immobilisierung hinreichend vor Denaturierungsprozessen geschützt wird.

4. Fazit

Es wurde die ET-Reaktion des Flavin-abhängigen Enzyms FDH mit dem Redoxprotein Cyt c sowohl in Lösung als auch gebunden an Oberflächen untersucht. In Lösung konnte neben einem pH-Optimum von 4,0 ein weiterer vorteilhafter pH bei 7,0 festgestellt werden. Wenn Cyt c gebunden an der Oberfläche vorliegt, ist ein ET mit FDH für pH-Werte von 5,0 und 7,0 detektierbar. Gleichwohl ist der ET im neutralen pH-Bereich effizienter. Dieses Verhalten suggeriert, dass es zwei ET-Wege gibt. Darüber hinaus zeigen die hier gemachten Untersuchungen, dass ein ET zwischen Cyt c und FDH möglich ist, auch wenn ein Protein oberflächengebunden vorliegt.

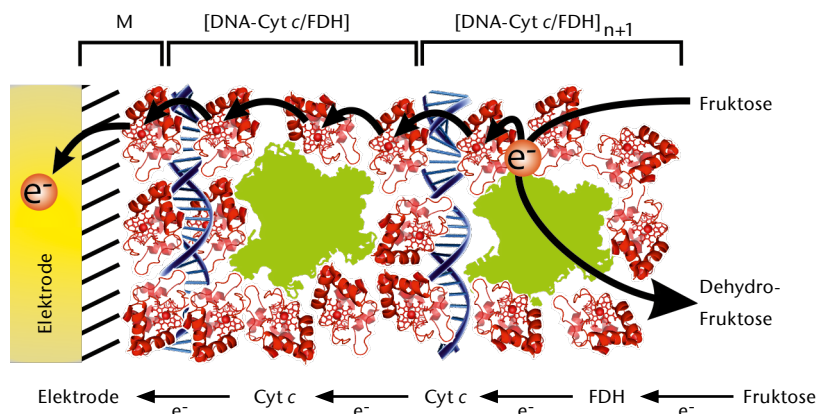


Abb. 6) Schematische Illustration der Elektronentransferschritte in einer Cyt c/FDH-Multischichtelektrode in Anwesenheit von Fruktose.

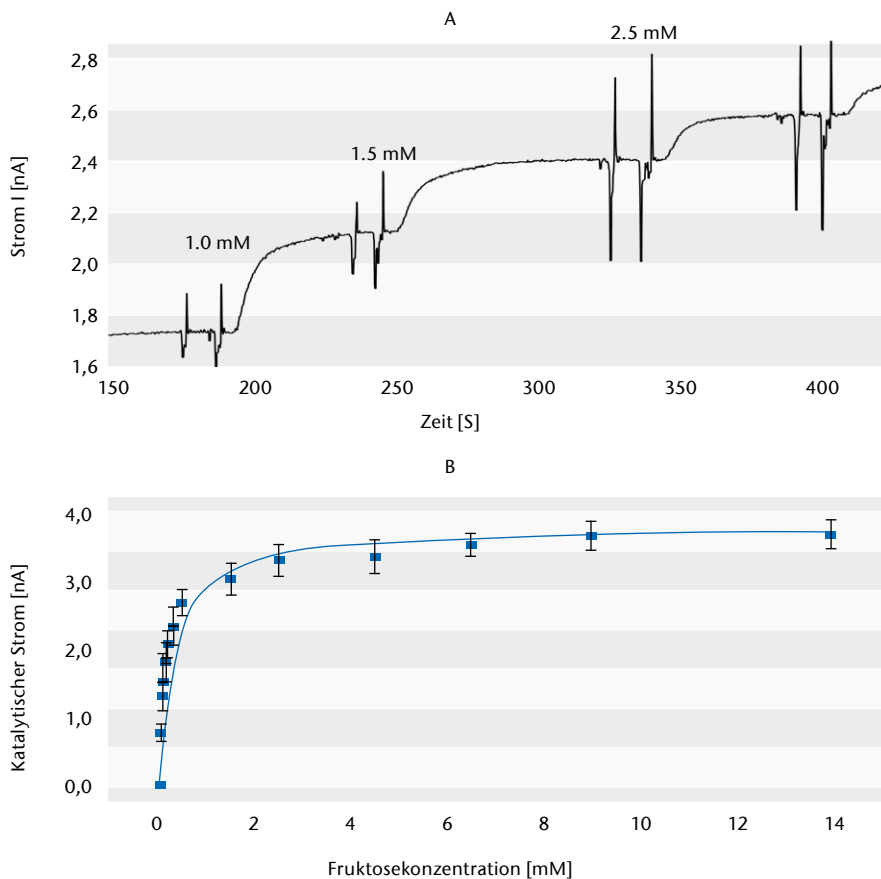


Abb. 7) Elektrochemische Charakterisierung einer 5-Schichtelektrode (Au-MU/MUA-Cyt *c*-[DNA-Cyt *c*/FDH]5) in 5 mM KPP-Puffer pH 7,0 und mit einem Potential von +200 mV (vs. Ag/AgCl, 1 M KCl). (A) Amperometrische Messung der modifizierten Elektrode unter schrittweiser Zugabe steigender Substratkonzentrationen im Bereich von 0,01 mM bis 21 mM Fructose. (B) Plot der katalytischen Ströme im Substratbereich von 0,01 mM bis 14,0 mM Fructose. Mittelwerte aus 3 Wiederholungsmessungen ($n = 3$).

Es konnte im Weiteren gezeigt werden, dass eine ET-Reaktion auch dann noch möglich ist, wenn beide Proteine an der Elektrodenoberfläche fixiert werden. Während die direkte Immobilisierung von FDH auf Cyt *c*-Monoschichten lediglich in eine moderate katalytische Aktivität mündete, konnte durch die Konstruktion von Multischichtarchitekturen mit Hilfe von DNA eine deutliche Steigerung in den katalytischen Strömen erzielt werden. Dabei ließ sich eine Erhöhung der Sensorsignale mit zunehmender Anzahl der Multischichten erreichen. Die Sensitivität dieser Multischichtelektroden kann somit während der Herstellung gesteuert werden. Die hier erzeugten 3D-Strukturen, einzig aus Biomolekülen aufgebaut, haben ein hohes Potential zur Anwendung in sensorischen Fragestellungen und bieten eine Reihe weiterer interessanter Vorteile. So können bspw. mehrere unterschiedliche Enzyme in solch eine Struktur eingebunden werden, um weitere natürliche Reaktionskaskaden zu imitieren (Dronov et al. 2008, Lisdat

et al. 2009, Spricigo et al. 2009). Die Sensoreigenschaften können durch die Anzahl der Schichten, aber auch durch das Verhältnis der Proteine zueinander beeinflusst werden. Die Co-Immobilisierung verschiedener Biomoleküle stabilisiert empfindliche Enzyme. Ausblickend sind Anwendungen in weiteren Forschungsfeldern wie bspw. der Photobioelektrokatalyse denkbar, wo es darum geht, komplexere Biomoleküle, wie das Photosystem I, auf Elektrodenoberflächen zu immobilisieren und eine Licht-Strom-Wandlung zu realisieren (Stieger et al. 2014).

LITERATUR

- Ameyama M, Shinagawa E, Matsushita K, Adachi O (1981) D-fructose dehydrogenase of *Gluconobacter industrius*: purification, characterization, and application to enzymatic microdetermination of D-fructose. *Journal of Bacteriology* 145(2):814–823
- Armstrong FA, Hill HAO, Walton NJ (1988) Direct electrochemistry of redox proteins. *Accounts of Chemical Research* 21(11):407–413. doi: 10.1021/ar00155a004
- Bard AJ, Stratmann M (2007), c2002) *Encyclopedia of electrochemistry*. Wiley-VCH, Weinheim. ISBN: 3527610421
- Bassi AS, Lee E, Zhu J-X (1998) Carbon paste mediated, amperometric, thin film biosensors for fructose monitoring in honey. *Food Research International* 31(2):119–127. doi: 10.1016/S0963-9969(98)00071-4
- Berg JM, Tymoczko JL, Stryer L (2012) *Biochemistry*, 7. ed., international ed., [Nachdr.]. Freeman Palgrave Macmillan, New York, NY. ISBN: 9781429276351
- Cooney MJ, Svoboda V, Lau C, Martin G, Minteer SD (2008) Enzyme catalysed biofuel cells. *Energy Environ. Sci.* 1(3):320. doi: 10.1039/b809009b
- Dronov R, Kurth DG, Mohwald H, Spricigo R, Leimkuhler S, Wollenberger U, Rajagopalan KV, Scheller FW, Lisdat F (2008) Layer-by-layer arrangement by protein-protein interaction of sulfite oxidase and cytochrome *c* catalyzing oxidation of sulfite. *J Am Chem Soc* 130(4):1122–1123. doi: 10.1021/ja0768690
- Feifel SC, Kapp A, Lisdat F (2014) Electroactive Nanobio-molecular Architectures of Laccase and Cytochrome *c* on Electrodes: Applying Silica Nanoparticles as Artificial Matrix. *Langmuir* 30(19):5363–5367. doi: 10.1021/la500460n
- Feifel SC, Kapp A, Ludwig R, Gorton L, Lisdat F (2013) Electrocatalytically active multi-protein assemblies using nanoscaled building blocks. *RSC Adv* 3(10):3428–3437. doi: 10.1039/C2RA22819j
- Feifel SC, Lisdat F (2011) Silica nanoparticles for the layer-by-layer assembly of fully electro-active cytochrome *c* multilayers. *J Nanobiotechnol* 9(59). doi: 10.1186/1477-3155-9-59
- Feifel SC, Ludwig R, Gorton L, Lisdat F (2012) Catalytically Active Silica Nanoparticle-Based Supramolecular Architectures of Two Proteins – Cellobiose Dehydrogenase and Cytochrome *c* on Electrodes. *Langmuir* 28(25):9189–9194. doi: 10.1021/la301290z
- Ferapontova EE, Lo Gorton (2005) Direct electrochemistry of heme multifactor-containing enzymes on alkanethiol-modified gold electrodes. *Bioelectrochemistry* 66(1-2):55–63. doi: 10.1016/j.bioelectchem.2004.04.004
- Ge B, Lisdat F (2002) Superoxide sensor based on cytochrome *c* immobilized on mixed-thiol SAM with a new calibration method. *Analytica Chimica Acta* 454(1):53–64. doi: 10.1016/S0003-2670(01)01545-8
- Ikeda T, Matsushita F, Senda M (1991) Amperometric fructose sensor based on direct bioelectrocatalysis. *Biosensors and Bioelectronics* 6(4):299–304. doi: 10.1016/0956-5663(91)85015-O
- Jin W, Wollenberger U, Bier FF, Makower A, Scheller FW (1996) Electron transfer between cytochrome *c* and copper enzymes. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics* 39(2):221–225. doi: 10.1016/0302-4598(95)01879-4
- Jin W, Wollenberger U, Kärger E, Schunck W-H, Scheller FW (1997) Electrochemical investigations of the intermolecular electron transfer between cytochrome *c* and NADPH-cytochrome P450-reductase. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 433(1-2):135–139. doi: 10.1016/S0022-0728(97)00272-6
- Kamitaka Y, Tsujimura S, Setoyama N, Kajino T, Kano K (2007) Fructose/dioxygen biofuel cell based on direct electron transfer-type bioelectrocatalysis. *Phys Chem Chem Phys* 9(15):1793–1801. doi: 10.1039/b617650j

Katz E, Willner I (2003) A biofuel cell with electrochemically switchable and tunable power output. *J Am Chem Soc* 125(22):6803–6813. doi: 10.1021/ja034008v

Kawai S, Goda-Tsutomu M, Yakushi T, Kano K, Matsushita K (2013) Heterologous overexpression and characterization of a flavoprotein-cytochrome c complex fructose dehydrogenase of *Gluconobacter japonicus* NBRC3260. *Appl Environ Microbiol* 79(5):1654–1660. doi: 10.1128/AEM.03152-12

Kawai S, Yakushi T, Matsushita K, Kitazumi Y, Shirai O, Kano K (2014) The electron transfer pathway in direct electrochemical communication of fructose dehydrogenase with electrodes. *Electrochemistry Communications* 38:28–31. doi: 10.1016/j.elecom.2013.10.024

Keplinger C, Lisdat F, Wollenberger U (2011) Cytochrome c/Polyelectrolyte multilayer investigated by E-QCM-D: Effect of temperature on the assembly structure. *Langmuir* 27(13):8309–8315. doi: 10.1021/la200860p

Khan GF, Kobatake E, Shinohara H, Ikariyama Y, Aizawa M (1992) Molecular interface for an activity controlled enzyme electrode and its application for the determination of fructose. *Anal. Chem.* 64(11):1254–1258. doi: 10.1021/ac00035a011

Khan GF, Shinohara H, Ikariyama Y, Aizawa M (1991) Electrochemical behaviour of monolayer quinoprotein adsorbed on the electrode surface. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry* 315(1-2):263–273. doi: 10.1016/0022-0728(91)80075-2

Kinnear KT, Monbouquette HG (1997) An amperometric fructose biosensor based on fructose dehydrogenase immobilized in a membrane mimetic layer on gold. *Anal Chem* 69(9):1771–1775. doi: 10.1021/ac960665c

Lisdat F, Dronov R, Möhwald H, Scheller FW, Kurth DG (2009) Self-assembly of electro-active protein architectures on electrodes for the construction of biomimetic single chains. *Chem Commun* 2009(3):274–283. doi: 10.1039/b813559b

Marcinkeviciene J, Johansson G (1993) Kinetic studies of the active sites functioning in the quinohemoprotein fructose dehydrogenase. *FEBS Letters* 318(1):23–26. doi: 10.1016/0014-5793(93)81319-U

Murata K, Suzuki M, Kajiya K, Nakamura N, Ohno H (2009) High performance bioanode based on direct electron transfer of fructose dehydrogenase at gold nanoparticle-modified electrodes. *Electrochemistry Communications* 11(3):668–671. doi: 10.1016/j.elecom.2009.01.011

O'Mullane AP, Macpherson JV, Unwin PR, Cervera-Montesinos J, Manzanares JA, Frehill F, Vos JG (2004) Measurement of Lateral Charge Propagation in [Os(bpy)₂(PVP) n Cl]Cl Thin Films. A Scanning Electrochemical Microscopy Approach. *J. Phys. Chem. B* 108(22):7219–7227. doi: 10.1021/jp049500v

Pickup PG, Murray RW (1983) Redox conduction in mixed-valent polymers. *J. Am. Chem. Soc.* 105(14):4510–4514. doi: 10.1021/ja00352a002

Sarauli D, Ludwig R, Haltrich D, Gorton L, Lisdat F (2012) Investigation of the mediated electron transfer mechanism of cellobiose dehydrogenase at cytochrome c-modified gold electrodes. *Bioelectrochem* 87:9–14. doi: 10.1016/j.bioelechem.2011.07.003

Sarauli D, Tanne J, Schäfer D, Schubart IW, Lisdat F (2009) Multilayer electrodes: Fully electroactive cytochrome c on gold as a part of a DNA/protein architecture. *Electrochem Comm* 11(12):2288–2291. doi: 10.1016/j.elecom.2009.10.012

Sarauli D, Tanne J, Xu C, Schulz B, Trnkova L, Lisdat F (2010) Insights into the Formation of Polyaniline Sulfonate/Cytochrome c Multilayer Electrodes: Contributions of Polyelectrolyte Properties. *Phys Chem Chem Phys* 12(42):14271–14277. doi: 10.1039/C0CP00793E

Sarauli D, Wettstein C, Peters K, Schulz B, Fattakhova-Rohlfing D, Lisdat F (2015) Interaction of Fructose Dehydrogenase with a Sulfonated Polyaniline. Application for Enhanced Bioelectrocatalysis. *ACS Catal* 5(4):2081–2087. doi: 10.1021/acscatal.5b00136

Sasaki Y, Sugihara T, Osakai T (2011) Electron transfer mediated by membrane-bound d-fructose dehydrogenase adsorbed at an oil/water interface. *Anal Biochem* 417(1):129–135. doi: 10.1016/j.ab.2011.06.003

Song S, Clark RA, Bowden EF, Tarlov MJ (1993) Characterization of cytochrome c/alkanethiolate structures prepared by self-assembly on gold. *J. Phys. Chem.* 97(24):6564–6572. doi: 10.1021/j100126a037

Sosnoff CS, Sullivan M, Murray RW (1994) Electron Self-Exchange Rates in a Site-Dilutable Osmium Bipyridine Redox Polymer. *J. Phys. Chem.* 98(51):13643–13650. doi: 10.1021/j100102a034

Spricigo R, Dronov R, Lisdat F, Leimkühler S, Scheller FW, Wollenberger U (2009) Electrocatalytic sulfite biosensor with human sulfite oxidase co-immobilized with cytochrome c in a polyelectrolyte-containing multilayer. *Anal Bioanal Chem* 393(1):225–233. doi: 10.1007/s00216-008-2432-y

Spricigo R, Dronov R, Rajagopalan KV, Lisdat F, Leimkühler S, Scheller FW, Wollenberger U (2008) Electrocatalytically functional multilayer assembly of sulfite oxidase and cytochrome c. *Soft Matter* 4(5):972. doi: 10.1039/b717694e

Stieger KR, Feifel SC, Lokstein H, Lisdat F (2014) Advanced unidirectional photocurrent generation via cytochrome c as reaction partner for directed assembly of photosystem I. *Phys Chem Chem Phys* 16(29):15667–15674. doi: 10.1039/c4cp00935e

Tamaki T (2012) Enzymatic Biofuel Cells Based on Three-Dimensional Conducting Electrode Matrices. *Top Catal* 55(16-18):1162–1180. doi: 10.1007/s11244-012-9895-y

Taniguchi I, Toyosawa K, Yamaguchi H, Yasukouchi K (1982) Voltammetric response of horse heart cytochrome c at a gold electrode in the presence of sulfur bridged bipyridines. *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry* 140(1):187–193. doi: 10.1016/0368-1874(82)85313-6

Tkac J, Svitel J, Vostiar I, Navratil M, Gemeiner P (2009) Membrane-bound dehydrogenases from *Gluconobacter* sp.: interfacial electrochemistry and direct bioelectrocatalysis. *Bioelectrochemistry* 76(1-2):53–62. doi: 10.1016/j.bioelechem.2009.02.013

Tominaga M, Nomura S, Taniguchi I (2009) D-fructose detection based on the direct heterogeneous electron transfer reaction of fructose dehydrogenase adsorbed onto multi-walled carbon nanotubes synthesized on platinum electrode. *Biosens Bioelectron* 24(5):1184–1188. doi: 10.1016/j.bios.2008.07.002

Tominaga M, Shirakihara C, Taniguchi I (2007) Direct heterogeneous electron transfer reactions and molecular orientation of fructose dehydrogenase adsorbed onto pyrolytic graphite electrodes. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 610(1):1–8. doi: 10.1016/j.jelechem.2007.06.014

van GELDER B, SLATER EC (1962) The extinction coefficient of cytochrome c. *Biochim Biophys Acta* 58:593–595

Wegerich F, Turano P, Allegrozzi M, Möhwald H, Lisdat F (2011) Electroactive Multilayer Assemblies of Bilirubin Oxidase and Human Cytochrome C Mutants: Insight in Formation and Kinetic Behavior. *Langmuir* 27(7):4202–4211. doi: 10.1021/la104964z

Wettstein C, Kyne C, Doolan AM, Möhwald H, Crowley PB, Lisdat F (2014) Study of Cytochrome c-DNA Interaction – Evaluation of Binding Sites on the Redox Protein. *Nanoscale* 6(22):13779–13786. doi: 10.1039/c4nr05301j

Wettstein C, Möhwald H, Lisdat F (2012) Coupling of pyrroloquinoline quinone dependent glucose dehydrogenase to (cytochrome c/DNA)-multilayer systems on electrodes. *Bioelectrochem* 88:97–102. doi: 10.1016/j.bioelechem.2012.06.003

Wu Y, Hu S (2007) Biosensors based on direct electron transfer in redox proteins. *Microchim Acta* 159(1-2):1–17. doi: 10.1007/s00604-007-0749-4.

AUTOREN

Prof. Dr. habil. Fred Lisdat
Dr. Christoph Wettstein
Daniel Schäfer
Biosystemtechnik
Technische Hochschule Wildau

Prof. Dr. Kenji Kano
Division of Applied Life Sciences
Graduate School of Agriculture
Kyoto University, Sakyo

Prof. Dr. Ulla Wollenberger
Institut für Biochemie und Biologie
Universität Potsdam

E-Mail für Korrespondenz:
fred.lisdat@th-wildau.de



Das Projekt SecAware4job: Auf spielerischem Weg zu erhöhtem Informationssicherheitsbewusstsein für den Berufseinstieg

Margit Scholl*, Frauke Fuhrmann, Denis Edich, Peter Ehrlich, Benjamin Leiner, Robin Scholl, Peter Koppatz

Zusammenfassung

Die fortschreitende Digitalisierung durchdringt zunehmend alle Lebensbereiche und erfordert ein stärkeres Bewusstsein sowie verbesserte Kompetenzen im Bereich der Informationssicherheit – sowohl im Privat- als auch im Arbeitsleben. Das Projekt SecAware4job dient der Steigerung des Informationssicherheitsbewusstseins von Studierenden an der TH Wildau. Als zukünftige Mitarbeiter/innen sollen die Studierenden spielerisch für Informationssicherheit sensibilisiert werden und entsprechende Kenntnisse für ihren Berufseinstieg erwerben. Dieser Beitrag skizziert Methoden und Übungen, die in dem Fach Sensibilisierung für Informationssicherheit zur Anwendung kommen. Diese innovativen Lehr- und Lernmethoden basieren auf dem Game-based-Learning-Ansatz, denn durch die Einbeziehung spielerischer Elemente kann insbesondere die Motivation gefördert werden und lassen sich Verhaltensänderungen anregen. Damit widmet sich SecAware4job aktuellen Forschungsfragen zum spielebasierten und kooperativen Lernen im Bereich der Awareness/Bewusstseins-Förderung. Es wird angestrebt, Sensibilisierung für Informationssicherheit als Wahlpflichtfach in allen Studiengängen der TH Wildau zu etablieren.

Abstract

The constant proliferation of digitalization is increasingly penetrating all areas of life and requires a greater awareness and improved skills for information security – both in private and in working life. The project SecAware4job aims at increasing the information security awareness of students at the Technical University of Applied Sciences (TUAS) Wildau. As prospective employees, students should become aware of information security in a playful way, and they should acquire the appropriate skills and knowledge for their career entry. This paper (a "work in progress") outlines methods and exercises applied in the lecture Sensitization for Information Security. These innovative teaching and learning methods are based on the game-based learning approach because the inclusion of playful elements is particularly suitable to develop motivation and encourage behavioural change. Thereby, SecAware4job addresses current research issues of playful and cooperative learning within the area of raising awareness. We aim at establishing Sensitization for Information Security as a compulsory elective subject in all courses at the TUAS Wildau.

1. Einleitung

Aufgrund der weltweit voranschreitenden Digitalisierung aller wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Bereiche durchzieht die Informationstechnik (IT) heutzutage nahezu alle Lebensbereiche. Während jedoch die meisten Menschen mit der oberflächlichen Nutzung vertraut sind, bieten die zunehmende Verbreitung und Komplexität von Soft- und Hardware eine stetig wachsende Anzahl an Möglichkeiten zu deren Missbrauch. Da diese Möglichkeiten sowohl technischer (z. B. Hacking) als auch zwischenmenschlicher (z. B. Social Engineering) Na-

tur sein können, sind ein höheres Bewusstsein und verbesserte Kenntnisse hinsichtlich der mit der Digitalisierung einhergehenden Gefahren und entsprechenden Schutzmaßnahmen für Privat- und Arbeitsleben unerlässlich. Informationssicherheit ist keineswegs nur eine Aufgabe von IT-Fachkräften. Vielmehr sind alle Nutzergruppen angesprochen und sollten diesbezügliches Bewusstsein und entsprechende Kompetenzen zum Schutz sensibler Informationen aufweisen.

Da die Mehrheit der Vorfälle von Verletzung der Informations- oder Datensicherheit auf unbewusstes oder bewusstes Verschulden von Mitarbeiter/innen

zurückzuführen ist (Guo et al. 2011, EnBW et al. 2008, DSV-Gruppe et al. 2006), kann Sensibilisierung und die Vermittlung von Kompetenzen im Hinblick auf Informationssicherheit nicht früh genug beginnen. Die Technische Hochschule Wildau (TH Wildau) versteht sich als angewandte forschende Hochschule mit starkem Praxisbezug. Eine konsequente Einheit von Forschung und Lehre dient nicht nur der Bewältigung zukünftiger Herausforderungen, sondern ist auch für die Vorbereitung der Studierenden auf den Berufseinstieg von zentraler Bedeutung. Die Ausbildung der Studierenden als zukünftige Mitarbeiter/

innen sollte demnach an dem aktuellen Stand der Wissenschaft und an den Anforderungen der Praxis in Betrieben, Verwaltungen und Institutionen orientiert sein. Dazu gehört auch der Wissensaufbau für ein ganzheitliches Technikverständnis und die Sensibilisierung für Informationssicherheit. Dies betrifft vor allem auch die Studierenden der weniger technik-affinen Studiengänge wie Betriebswirtschaftslehre (BWL) und Verwaltungswissenschaft.

Ziel des von der Horst Görtz Stiftung finanzierten Forschungsprojektes „Informationssicherheitsbewusstsein für den Berufseinstieg: SecAware4Job“ ist es daher, bei den Studierenden der TH Wildau, insbesondere der nicht technischen Studiengänge, ein stärkeres Bewusstsein für Informationssicherheit und Datenschutz unter besonderem Einsatz von didaktischen Kreativmethoden – spielbasierten analogen und digitalen Lernszenarien – zu entwickeln. So sollen sie als zukünftige Mitarbeiter/innen für die alltäglichen Herausforderungen des Schutzes von sensiblen Informationen und der digitalen Infrastruktur sensibilisiert werden und ihr Sicherheitsbewusstsein soll fundiert gefördert werden.

2. Internationaler Forschungsstand

2.1 Game-based Learning

Traditionell wird Game-based Learning (GBL) als pädagogische Methode angewandt, um Lernende zu motivieren und sie für Lernprozesse zu begeistern (Hsu et al. 2008). Digitales Game-based Learning (DGBL) ist durch (mobile) Hightech-Geräte und Software die moderne Möglichkeit, den Lernenden neue Erfahrungen näherzubringen. Nach Hsu et al. (2008) haben beide GBL-Strategien ihre eigenen Vorteile und die Schwierigkeit liegt darin, diese beiden Arten von Lernstrategien zu verbinden und ein ausgewogenes Verhältnis zwischen ihnen zu finden. Die Betrachtung des internationalen Forschungsstandes zeigt, dass keine konsequente Zuordnung GBL = analog und DGBL = digital vorgenommen wird: So bezieht sich die aktuelle internationale Forschung überwiegend auf „digital serious games“ und auch

unter dem Begriff GBL finden sich Forschungsergebnisse, die digitale Szenarien zum Inhalt haben. In SecAware4Job wird konsequent zwischen GBL und DGBL unterschieden und beide Lernstrategien werden mit Studierenden sowohl getrennt als auch in ihrer Kombination erforscht (Scholl & Fuhrmann 2016a). Dies stellt eine Besonderheit im internationalen Vergleich dar. Die kombinierte Anwendung von analogen und digitalen spielbasierten Lernszenarien nutzt die Vorteile jeder Lernstrategie aus und sollte in der Summe zu einem höheren Lernerfolg führen. Die Vorteile analoger Lernszenarien bestehen in der gemeinsamen Lösung im Team, im dadurch möglich werdenden sozialen Erfahrungs- und Wissensaustausch vor Ort sowie in der Stärkung der Team- und Kommunikationsfähigkeiten. Digitale Lernszenarien dienen der individuellen Vertiefung der Lerninhalte. Dies kann orts- und zeitunabhängig erfolgen und orientiert sich somit an der Lebenssituation sowie den Bedürfnissen und Wissensständen der Lernenden.

Unabhängig von der genauen Zuordnung hat sich GBL/DGBL international als anerkannte Lehr- und Lernmethode im Bildungsbereich (Hamari et al. 2016, Hsiao & Chen 2016, Abdul Jabbar & Felicia 2015, Spires 2015) und in der Weiterbildung (Zweck et al. 2015, Helisch & Pokoyski 2009) etabliert. Gleichwohl besteht nach wie vor Forschungsbedarf im Hinblick auf die Wirkungsweise, auf die Lernleistung (Chen & Law 2016, Eseryel et al. 2013) und das Design von Lernarrangements (Halverson et al. 2015). Die Befürworter von GBL argumentieren, dass Lernspiele die Teilnehmenden stärker involvieren und ihr Engagement fördern und somit zu besseren Lernergebnissen führen. Denn sie ermöglichen aktives, erlebnisorientiertes Lernen durch Ausprobieren, unmittelbares Feedback zum Lernfortschritt, Wiederholen und die Möglichkeit, aus eigenen Fehlern zu lernen (Zweck et al. 2015, Institute of Play 2013, Helisch & Pokoyski 2009). Darüber hinaus üben nach Le et al. (2013) hochwertig produzierte, digitale Spiele eine große Faszinationskraft auf Spielende aus und virtuelle Explorationsräume sind für die Initiierung von Lernprozessen gut geeignet.

Insbesondere die Förderung der Motivation und die Anregung von Verhaltensänderungen sind angestrebte Ziele. Studienergebnisse legen nahe, dass die Motivation, das Engagement und die Entwicklung von Problemlösungskompetenzen stark von der Natur und Gestaltung der Spielaufgaben beeinflusst werden (Eseryel et al. 2013). Shi & Shih (2015) entwickelten daher für DGBL ein „Game-Based Learning Design Model“, das sich aus elf Faktoren zusammensetzt: Spielziele, Spielmechanismus, Spielfantasie, Spielwert, Interaktion, Freiheit, Erzählung, Empfindung, Herausforderungen, Sozialität und Mysterien.

Des Weiteren werden die Effektivität spielerischer Elemente wie Feedbackfunktionen und Wettbewerbskomponenten empirisch untersucht. So sollen Rückmeldungen eine tiefe kognitive Verarbeitung auslösen und die Erinnerung von Lernenden verbessern, was zum besseren Lernen beiträgt (Erhel & Jamet 2013, Sweller et al. 1998, Leutner 1993). Allerdings ergeben Untersuchungen verschiedener Spielarten und Feedbacktypen bislang keine belastbaren Wirkungsunterschiede (Tsai et al. 2015). Doch die Spielenden erfahren, was ihr Handeln bewirkt oder woran sie arbeiten müssen. Die Forschungsergebnisse zur Integration einer Wettbewerbskomponente sind ebenfalls nicht eindeutig: So führt in einem Experiment von Zaphiris et al. (2007) ein E-Learning-Spiel mit Wettbewerbskontext im Vergleich zu einem nicht kompetitiven Spiel zu einer niedrigeren Lernverbesserung. Abweichend davon zeigen die Untersuchungen von Admiraal et al. (2011), dass Wettbewerb zwischen Teams sich positiv auf den Lernerfolg auswirkt. Plass et al. (2015) reflektieren Lerntheorien und kommen zu dem Schluss, dass eine Kombination von kognitiven, affektiven, motivationalen und soziokulturellen Perspektiven für das Spieldesign und die Spielforschung notwendig ist, um in vollem Umfang zu erfassen, was Spiele für das Lernen zu bieten haben. Die größte Herausforderung für das Instruktions- und Spieldesign liegt nach Le et al. (2013) in der Integration von Lerninhalten und Spielmechanik. Somit ist es nicht einfach, interessante und wirksame spielbasierte Lernszenarien zu ent-

wickeln. Nach einem systematischen Literaturreview zu GBL kommen Abdul Jabbar & Felicia (2015) zu dem Ergebnis, dass das Spieldesign mit unterschiedlichen Lerntools und interessanten Materialien begleitet sein muss, die es den Lernenden ermöglichen, die Spiel- und Lernaktivitäten in Übereinstimmung mit ihren Bedürfnissen und Fähigkeiten zu erkunden. Eine besondere Schwierigkeit stellt das Entwerfen von Spielszenen in Kombination mit einem konkreten Kursunterricht und Curriculum dar (Lai et al. 2014). Als eine der zentralen Herausforderungen bleibt, die Lernenden dabei zu unterstützen, die Verbindungen zwischen dem Wissen, das im Spiel gelernt wird, und dem Wissen, das unterrichtet wird, zu ziehen. Damit hängt die Fragestellung zusammen, wie viele Vorgaben bei gleichzeitig hohem Maß an (Eigen-) Engagement gemacht werden sollten (Barzilai & Blau 2014). Sowohl Feedback als auch Vorgaben sollten abhängig von den Lernanforderungen in verschiedenen Formen zur Verfügung stehen (Abdul Jabbar & Felicia 2015).

2.2 Sensibilisierung für Informationssicherheit

Die aufgezeigten Forschungsbedarfe im Hinblick auf (D)GBL werden in SecAware4job für die Sensibilisierung für Informationssicherheit und das Erlernen entsprechender Kompetenzen adressiert (siehe Forschungsfragen in Kapitel 3). Studien zeigen, dass die zur Stärkung des Bewusstseins (Awareness) und der Kompetenzen für Informations- und IT-Sicherheit oftmals angewandten Sensibilisierungs- und Schulungsmaßnahmen wie Awarenesskampagnen (z.B. Flyer, Broschüren, Poster, Filme), rein IT-basierte Schulungen (z. B. web-basierte Trainings, Videospiele) oder die alleinige Weitergabe von Informationen in Vorträgen ineffektiv sind und zu keinem nachhaltigen Sicherheitsbewusstsein bei den Adressat/innen führen (Albrechtsen 2007, Cone et al. 2007, Straub & Welke 1998). Stattdessen sind Schulungsmaßnahmen, die Möglichkeiten für persönliche Kommunikation und zur Interaktion bieten, erfolgversprechend für die Förderung von Informationssicherheitsbewusstsein und das

Auslösen von sicherheitskonformem Verhalten. Als Folge könnte sich auch die Akzeptanz entsprechender technischer, organisatorischer, individueller und administrativer Maßnahmen erhöhen (Albrechtsen 2007).

Aufgrund dieser Erkenntnisse wird in dem Fach Sensibilisierung für Informationssicherheit im Rahmen des Projektes SecAware4job ein integrativer Methodenmix – bestehend aus Präsenzveranstaltung mit Informationsinput, Erfahrungsaustausch, interaktiven Übungen sowie analogen und digitalen spielebasierten Lernszenarien – angewandt (s. Abb. 2 in Kapitel 3).

3. Methodischer Ansatz und Forschungsfragen

Die betriebliche Security und Privacy Awareness ist eine relativ junge Disziplin, die sich methodisch in drei Teildisziplinen einteilen lässt: erstens die lerntheoretischen Ansätze, bei denen die Wissens- und Know-how-Vermittlung im Vordergrund steht; zweitens die werblichen Ansätze, bei denen das Wollen bzw. die Mitwirkung durch Security Marketing und Emotionalisierung erhöht werden soll; drittens die systemischen Ansätze, die das Können adressieren, indem z. B. teamorientierte Anwendungen des erworbenen Wissens im konkreten, sozialen Umfeld gefördert werden. Das Projekt SecAware4job vereint, im Sinne von Blended Learning, diese drei Ansätze, um bei den Studierenden ein nachhaltiges Bewusstsein für Informationssicherheit zu erzielen (vgl. Abb. 2). Wir benennen diese Art des Methodenmixes als Ansatz 3.0 (Scholl et al. 2016a): Die

psychologische Forschung zeigt, dass neben dem theoretischen Ansatz für den Wissenstransfer und dem marktingorientierten Ansatz ein systemischer Ansatz mit Emotionen und sozialer Teilhabe im Team und Interaktion in erlebbaren Szenarien benötigt wird, um dauerhafte Sensibilisierung für Informationssicherheit zu erreichen.

Um das abstrakte und komplexe Thema Informationssicherheit mit all seinen Facetten (z. B. rechtliche Rahmenbedingungen, Normen & Standards, Schutzmaßnahmen, Konzepte) verständlich sowie greif- und erlebbar zu vermitteln, werden kreative, auf Spielmechanismen basierende Lehr- und Lernmethoden entwickelt und erprobt. Gemäß den oben zitierten Forschungserkenntnissen sollen die angewandten Methoden ausreichend Raum für persönlichen (Erfahrungs-) Austausch und Interaktion sowie das Sammeln eigener Erfahrungen bieten.

Da Studien gezeigt haben, dass die Beteiligung von Nutzer/innen bei der Entwicklung von Schulungsmaßnahmen für Informationssicherheit den Wissensaustausch und die Einhaltung von Informationssicherheit verbessert (SanNicolas-Rocca et al. 2014), sollen die Studierenden angeregt werden, selbst eine kreative Maßnahme zur Sensibilisierung für Informationssicherheit (weiter) zu entwickeln. Honoriert wird diese freiwillige Leistung mit einem Moderationszertifikat für Sensibilisierungsmaßnahmen im Bereich Informationssicherheit (Abb. 1, Stufe 1). Zudem erhalten die Studierenden im Rahmen des Projektes SecAware4job die Möglichkeit, in der jeweiligen Veranstaltung die Zertifikatstests des international anerkannten Europäischen



Abb. 1) Zertifizierungshierarchie für die im Projekt SecAware4job teilnehmenden Studierenden.

Computerführerscheins (ECDL) in den Modulen IT-Sicherheit und/oder Datenschutz zu absolvieren (Abb. 1, Stufe 2). Darüber hinaus können sich die Studierenden zusätzlich zum Absolvieren der umfangreichen Prüfung zum IT-Sicherheitsbeauftragten (IT-SiBe) nach Bundesakademie für öffentliche Verwaltung (BAkÖV)/Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) entschließen (Abb. 1, Stufe 3 und 4). Deren erfolgreicher Abschluss wird mit einem offiziellen, für fünf Jahre gültigen Zertifikat gekrönt. Diese Zertifikate belegen nachweislich die erworbenen Kompetenzen der Studierenden im Hinblick auf Informationssicherheit und sind für deren Berufseinstieg wertvoll. Sowohl der Erwerb der ECDL-Zertifikate als auch des IT-SiBe-Zertifikats werden im Rahmen von SecAware4job den Studierenden kostenfrei ermöglicht.

SecAware4job beinhaltet eine begleitende Forschung, die die Wirkung der eingesetzten Methoden und den Lernerfolg analysiert. Um diese Untersuchungen durchführen zu können, müssen zum einen Unterrichtsinhalte angepasst und zum anderen die Inhalte als neues Wahlpflichtfach (WPF) Sensibilisierung für Informationssicherheit in den Studiengängen etabliert werden. Im Sommersemester 2016 wurde ein erster Durchlauf als WPF im berufsbegleitenden BWL-Studiengang (BFG) durchgeführt. Die teilnehmenden Studierenden entschieden sich alle für die höchste Stufe der Zertifizierung zum IT-SiBe. Das Projekt befindet sich weiterhin in der Umsetzung. Der verfolgte Forschungsansatz (Abb. 2) orientiert sich dabei an den Zielgruppen, dem Kenntnisstand der Einzelnen, den organisatorischen Notwendigkeiten in Unternehmen und Verwaltungen sowie den technologischen Unterstützungsmöglichkeiten. Durch die Einbeziehung der teilnehmenden Studierenden in die Konzeption und Evaluation der spielebasierten Lernszenarien ist der Forschungsansatz sowohl partizipativ und klientenzentriert gestaltet als auch integrativ hinsichtlich der genutzten Methoden- und Medienvielfalt. Entsprechend der Projektlaufzeit wird der Forschungsansatz im Wintersemester 2016/17 mit dem Studiengang Kommunales Verwaltungsmanagement (KVR) und im Sommersemester 2017 erneut im



Abb. 2) Der in SecAware4job angewandte Methodenmix und Forschungsansatz.

BFG-Studiengang erprobt und praktisch umgesetzt.

Die mit dem Projekt verbundenen Forschungsfragen zur spielebasierten Vermittlung von Informationssicherheit basieren auf dem internationalen Forschungsstand zu (D)GBL (vgl. Kapitel 2) und entwickeln sich sukzessive im Projektverlauf. Sie können zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht beantwortet werden.

Die Forschungsfragen (FF) lauten derzeit:

FF#1: Welche Faktoren des „Game-Based Learning Design Model“ von Shi und Shih (2015) sollten in welcher Weise bei der Entwicklung und Anwendung (a) der analogen spielebasierten Lernszenarien und (b) der digitalen Varianten berücksichtigt werden?

FF#2: Durch welche spielerischen Elemente (z. B. Belohnung, Feedback, Wettbewerb) lässt sich (a) das Engagement, (b) die Motivation und (c) der Lernprozess der Studierenden fördern?

FF#3: Wie lassen sich (a) analoge und digitale spielebasierte Lernszenarien effektiv verbinden, so dass (b) ihre eigenständigen

Einsatzbereiche sinnvoll erhalten werden?

FF#4: Wie lassen sich die spielebasierten Lernszenarien in ein zeitgemäßes Lehr- und Lernkonzept integrieren?

FF#5: Wie (a) motiviert sind die Studierenden, die angebotene Zertifizierungshierarchie zu absolvieren? Wie (b) erfolgreich absolvieren sie welche Stufe?

FF#6: Wie lassen sich (a) die Wirksamkeit der Lernszenarien sowie (b) der Lernerfolg und (c) das Informationssicherheitsbewusstsein der Lernenden messen?

4. Beispiele spielebasierter Lernszenarien

Im Folgenden werden Beispiele von auf Spielemechanismen basierenden Lehr- und Lernmethoden vorgestellt, die im Fach Sensibilisierung für Informationssicherheit eingesetzt werden. Sie wurden mehrheitlich im Rahmen des Projektes SecAware4job entwickelt.

Lerneinheit Strafgesetzbuch (StGB): Die Lerneinheit zu relevanten Paragraphen des Strafgesetzbuchs (StGB) orientiert sich an didaktisch-metho-

dischen Gesichtspunkten einer Hilfe zur Selbsthilfe bzw. -bildung. Dabei soll der Lerngegenstand so einfach und konkret wie möglich vermittelt werden, um den Studierenden praxisrelevante Bezüge aufzuzeigen, mit denen ein Erlernen des Gegenstandes auch ohne tiefreichende Vorkenntnisse möglich ist. Weiterhin soll die Einheit viele kommunikative und spielerische Methoden beinhalten, um zur Auseinandersetzung mit dem Thema zu motivieren. Als Vorbereitung sollen sich die Teilnehmenden mit den relevanten Paragraphen zum Thema Cybercrime und Informationssicherheit des StGB vertraut machen, indem sie nach aktuellen Fällen bzw. Urteilen recherchieren. Die Ergebnisse werden auf Moodle zur Verfügung gestellt, so dass jede/r Teilnehmer/in mit Hilfe ausgewählter Beispiele alle wichtigen Paragraphen verinnerlicht. Zudem wird vorab auf Moodle zu einer Diskussion der Fälle angeregt, die zu einer vertieften Auseinandersetzung führen kann. Zum Einstieg in die Unterrichtseinheit werden die Studierenden gebeten, die Lücken bei „geschwärzten“ Grafiken zu Cybercrime zu schätzen, z. B. welche Branchen am häufigsten von Angriffen betroffen sind. Hierdurch erhalten die Teilnehmenden einen Einblick in aktuelle Zahlen und Ausmaße des Themengebietes. Anschließend werden den Studierenden aktuelle Straffälle ausgeteilt. In Gruppen sollen sie

diskutieren, welche Paragraphen des StGB jeweils betroffen sind. Am Ende werden die entsprechenden Urteile zu den Fällen als Musterlösung ausgegeben. Als Nachbereitung können Gitterrätsel, in welchen zentrale Begriffe der Paragraphen versteckt sind, gelöst werden. Die Musterlösungen können auf Moodle eingesehen werden.

ABC-Liste: Als Training für die Bildung von Assoziationen wichtiger Begriffe eines Themengebietes wird die „ABC-Liste“ eingesetzt (Birkenbihl 2004). Die Studierenden erhalten eine Liste mit allen Buchstaben des Alphabets und sollen zu jedem Buchstaben mindestens einen wichtigen Begriff zum Thema Informations-/IT-Sicherheit sowie Datenschutz/-sicherheit eintragen. Nach Birkenbihl (2004) kann und sollte jeder in kurzen Ruhepausen wie Wartezeiten diese Methode immer wieder anwenden. Je öfter die ABC-Liste zu einem bestimmten Thema gespielt wird, desto mehr entwickelt sich ein assoziatives Denken. Dies kann ad hoc und frei für Statements zum Thema abgerufen werden.

BINGO: Als analoges Lernszenario dient auch ein papierbasiertes BINGO-Spiel zur Informationssicherheit, das in zwei Varianten entwickelt wurde: Die erste Variante bezieht sich auf das persönliche Verhalten; die zweite Variante erfragt den Ist-Stand und die Vorga-

ben der Organisationen, in denen die Studierenden arbeiten. In beiden Varianten existieren jeweils zwei Bögen (Fragen 1, Fragen 2) für zwei Gruppen (Gruppe 1, Gruppe 2) mit einem 4x4-Fragenfeld. Die enthaltenen Fragen zur Informationssicherheit beziehen sich auf Wissen, Fertigkeiten sowie Verhalten und sind so gestellt, dass sie mit Ja und Nein beantwortet werden können. Teilnehmende der Gruppe 1 befragen Teilnehmende der Gruppe 2 und umgekehrt. In einer Reihe bzw. Spalte des 4x4-Fragenfeldes müssen vier verschiedene Teilnehmende der jeweils anderen Gruppe mit Ja geantwortet haben, damit laut „Bingo“ gerufen werden darf. Nach drei Bingo-Rufen ist das Spiel beendet. Im Rahmen der Auswertung müssen diejenigen, die mit Ja antworteten, ihre Antwort erklären. Sollten sich Defizite oder Fehler zeigen, werden diese im Plenum behandelt und geklärt.

Netzwerk-Domino: Das Netzwerk-Domino wurde vom Forschungsteam Prof. Dr. Scholl entwickelt und in Zusammenarbeit mit known_sense umgesetzt. In diesem Lernspiel vertiefen die Teilnehmenden ihr erworbenes Wissen über die Arbeitsweise von Netzwerkkomponenten und deren sinnvolle Anordnung. Gemäß dem GBL-Ansatz soll die haptische Erfahrung bei der Durchführung zum wirklichen Begreifen der Spielelemente

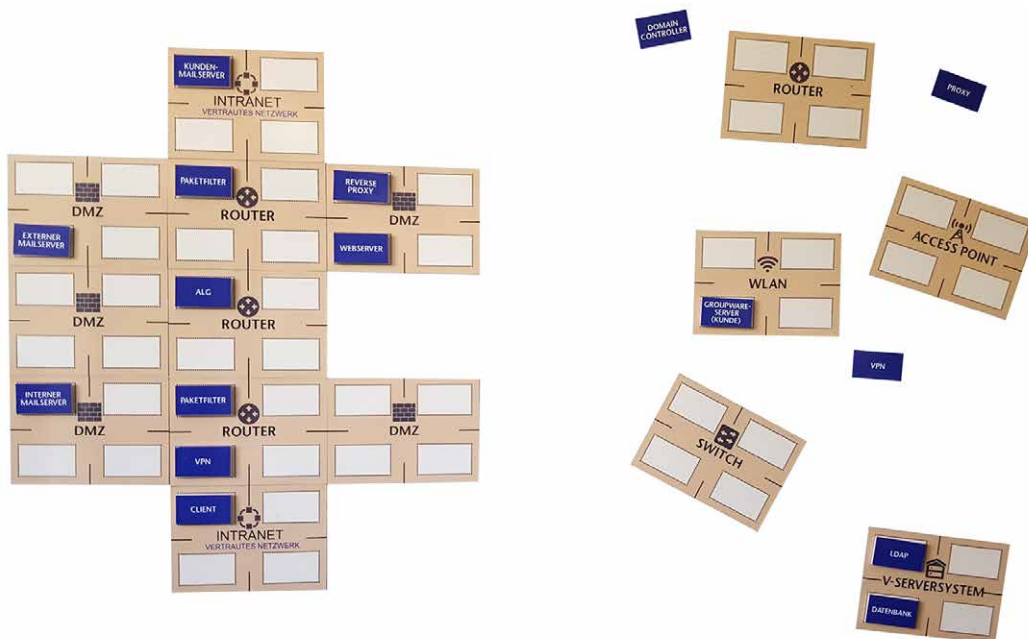


Abb. 3) Beispiel einer Netzwerk-Architektur beim Netzwerk-Domino.

führen. Ziel des Spieles ist es, mit den vorgegebenen Spielelementen ein Netzwerk zu legen, welches vorgegebene Anforderungen an Sicherheit und Funktionalität erfüllt. Dabei kann der Schwierigkeitsgrad durch die Vorgabe des bereits existierenden Netzwerkes, die Anzahl verfügbarer Elemente sowie die Zielvorgabe flexibel an die Kenntnisse der Studierenden angepasst werden (siehe Abb. 3). Die Teilnehmenden müssen in Teams von 3–6 Personen die Aufgabe innerhalb von 5–15 Minuten lösen. Durch die Kommunikation innerhalb der Gruppe während des selbstständigen Lösen der Aufgabe und die anschließende Besprechung mit dem/der Moderator/in entsteht ein doppelter Lerneffekt, der zu einer nachhaltigen Vertiefung des Unterrichtsinhaltes führen soll.

Schutzspiel – Gefahrenabwehr mit begrenztem Budget: Lernziel dieses noch im Entwicklungsstadium befindlichen analogen Szenarios ist es, Sicherheitsmaßnahmen zu verstehen sowie verschiedene Level der Absicherung unterscheiden und bewerten zu können. Zudem soll ein Bewusstsein für den sinnvollen Einsatz der Maßnahmen und die damit verbundenen Kosten geschaffen werden. Auf einem Spielfeld sind neun Sicherheitsbedrohungen für eine fiktive Organisation dargestellt. Auf jede Bedrohung kann auf vier Arten, die sich in ihrem Schutzlevel und den erforderlichen Kosten unterscheiden, reagiert werden. Bei Spielstart wird ein bestimmtes Budget an das spielende Team ausgegeben, das – gemäß realen Bedingungen – nicht für den maximalen Schutz aller neun Sicherheitsbedrohungen ausreicht. Die Karten mit den Schutzmaßnahmen enthalten sichtbar auf der Vorderseite die Kosten, nicht aber das entsprechende Schutzlevel. Das spielende Team hat neun Minuten Zeit, ihre Schutzmaßnahmen für die neun Gefahren zu bestimmen. Anschließend erfolgt die Auswertung mit dem/der Moderator/in, wie sinnvoll welche Maßnahme war, wo zu viel oder zu wenig abgesichert wurde. Alternativ kann das Spiel auch mit zwei Teams gespielt werden. Nach der Auswahl der Sicherheitsmaßnahmen werden die Spielfelder mit den neun Gefahren getauscht,

ohne dass eine Auswertung stattfindet. Das gegnerische Team darf sich auf der Spielfläche drei Angriffspunkte aussuchen. Die Schutzlevel sehen sie dabei nicht. Wird ein Punkt mit höchstem Schutz gewählt, muss das gegnerische Team vier Fragen, bei zweithöchstem Schutzlevel drei Fragen, bei dritthöchstem Schutzlevel zwei Fragen und bei niedrigstem Schutzlevel lediglich eine Frage beantworten. Der Schwierigkeitsgrad steigt von einer zur nächsten Frage. Sobald eine Frage falsch beantwortet wurde, ist der Angriff an dem Punkt gescheitert und kann nicht fortgesetzt werden.

Interaktive Übung „Phishing“: Im Rahmen der digitalen, webbasierten Anwendung „Phishing“ können sich die Studierenden mit theoretischen Grundlagen zu Phishing vertraut machen und zwei Tests mit unterschiedlichem Schwierigkeitsgrad durchführen. Der Abschnitt „Was ist Phishing?“ beinhaltet eine kurze Zusammenfassung von Definitionen, typischen Phishing-Vorgehensweisen und praktischen Beispielen, wie eine Phishing-Mail und eine gefälschte Seite aussehen können. In dem Test „Phishing erkennen“ müssen die Teilnehmenden entscheiden, ob es sich bei den gezeigten E-Mails um einen Phishing-Angriff handelt oder nicht. Dieser erste Teil des digitalen Lernszenarios unterscheidet sich nicht von anderen digitalen Übungen zum Thema Phishing (z. B. <http://www.it.tum.de/it-sicherheit/glossar/phishing-mails/selbstlerntest-phishing/>). Der Mehr-

wert besteht vor allem im zweiten Teil „Phishing-Merkmale erkennen“, in dem es um die Vertiefung der vermittelten Kenntnisse zum Thema Phishing geht. Hier müssen aus mehreren Optionen die Merkmale ausgewählt werden, die in der gezeigten E-Mail auf einen Phishing-Versuch hinweisen. Nach dem Absolvieren jedes Tests wird den Teilnehmenden die erreichte Punktzahl angezeigt und sie haben die Möglichkeit, die Fragen im Review-Modus nochmals durchzugehen und die richtigen Antworten sowie Lösungshinweise einzusehen. Die beiden Tests können unabhängig voneinander durchgeführt werden. Das Absolvieren beider Tests sollte nicht länger als 5–10 Minuten in Anspruch nehmen.

App „CBubbles“: Was als Hilfe für das Erlernen einer Sprache gedacht war, stellte sich im Laufe der Entwicklung als geeignetes Werkzeug für die Verinnerlichung von Fachbegriffen heraus. Ohne eine differenzierte Anwendung des Fachvokabulars kann ein Fachgebiet nicht gemeistert werden. Was liegt näher, als eine App mit Fachbegriffen und Wortlisten zu füllen, die das vermittelte Wissen noch einmal abrufen und vertieft? Durch das Projekt SecAware4job steht mit der App-Entwicklung „CBubbles“ eine solche Möglichkeit zum Thema Informationssicherheit zur Verfügung. Für den ersten Test im Sommersemester 2016 wurden zwei spezielle Wortlisten erstellt und erprobt. Zum einen wurde eine Liste der beliebtesten Passwörter im englischsprachigen Raum erstellt,

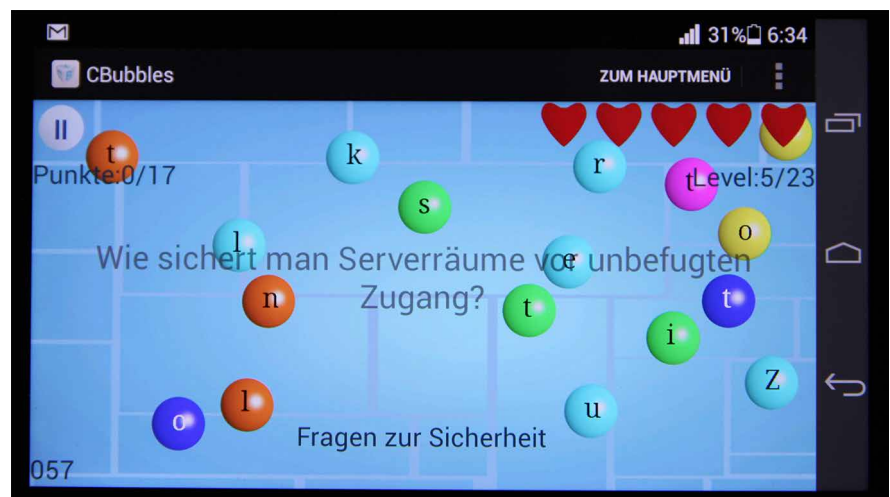


Abb. 4) Das App-Spiel „CBubbles“ in der Lite-Version für Informationssicherheit.

die zeigt, wie einfach diese Passwörter auch ohne Computerunterstützung zu erraten sind. Eine zweite Liste fragt nach Fachbegriffen, die sich nicht ohne Weiteres einprägen. Im Unterschied zu vielen anderen Vokabel- und Karteikarten-Systemen, die es in vielen Ausprägungen gibt, werden mit „CBubbles“ die Worte in ihre kleinsten Einheiten – Buchstaben – zerlegt (Abb. 4). Das erzeugt, neben der Abfrage der Begriffe selbst, eine zweite Herausforderung: Wie wird das Wort korrekt geschrieben? Das muss nicht immer sofort klar sein und ist ein Mehrwert des Spieles. Das App-Spiel ist damit eine gute Alternative, um in Wartesituationen wie im Zug oder in der S-Bahn wichtige Begrifflichkeiten zu wiederholen.

5. Erste Forschungsergebnisse

Im Zuge der Durchführung von SecAware4job werden analoge Lernszenarien auch englischsprachig aufbereitet, international vorgestellt (Scholl & Fuhrmann 2016b) und in Auszügen mit einem internationalen Publikum getestet (Scholl et al. 2016b). Durch systematische Versuchsreihen sollen so die Forschungsfragen (s. Kapitel 3) am Ende von SecAware4job umfassend beantwortet werden können. Die im Sommersemester 2016 durchgeführten Evaluationen mittels wöchentlicher Kurzfeedbackbögen durch die Studierenden des WPF zeigen bereits sehr gute Ergebnisse: So wurde das Fach mit dem angewandten methodischen Ansatz – bestehend aus einer Kombination aus Vortrag, analogen und digitalen spielebasierten Lernszenarien sowie interaktiven Übungen – von den Studierenden sehr gut bewertet. Das Ziel des Projektes, Informationssicherheitsbewusstsein und entsprechende Kenntnisse zu verbessern sowie idealerweise Verhaltensänderungen auszulösen, wurde bei den Teilnehmenden im Sommersemester 2016, insbesondere für das Arbeitsleben, erreicht. Um Aussagen zu den Wirkungsweisen der einzelnen Methoden, zum Lernerfolg und zur Nachhaltigkeit fundiert treffen zu können, ist es allerdings noch zu früh, da die empirische Basis bisher zu gering ist. Für die digitalen Entwicklungen hat die intensive Partizipation der

Lernenden bereits zu Verbesserungen geführt. Die Studierenden beurteilten die digitalen Varianten als gute Ergänzung zu den analogen spielebasierten Lernszenarien, da sie in den digitalen Varianten alleine gefordert seien und sich dadurch intensiver und ausführlicher mit den Aufgaben auseinandersetzen könnten und müssten. Als Vorteil der analogen Szenarien betonten sie den Teamansatz sowie den dadurch ermöglichten sozialen Erfahrungs- und Wissensaustausch.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Spielend lernen – lernen und spielen, ist das zeitgemäß? Diese Mischung wird bislang eher in der frühkindlichen Erziehung angewendet. Wie ist es aber im Studium, wenn es gilt, Zusammenhänge zu erkennen und neben dem neuen das schon vorhandene Wissen anzuwenden, um Probleme zu lösen? Allen vorgestellten Methoden und Übungen ist einerseits gemein, dass die Studierenden in Teams kooperativ lernen und von ihrem bereits vorhandenen Wissen gegenseitig im Erfahrungsaustausch und bei der gemeinsamen Lösung der Aufgaben profitieren. Andererseits erhalten die Teilnehmenden durch die sofortige Auflösung der Aufgaben und gemeinsame Besprechung der Ergebnisse ein direktes Feedback zu ihrem Lernerfolg, so dass sich unmittelbar ein Lerneffekt einstellen kann. Die Auswertung der Ergebnisse sollte stets zum Anlass genommen werden, Aspekte zu vertiefen, Unsicherheiten auszuräumen und auf Hilfsmittel hinzuweisen. In Planung ist die Entwicklung eines umfangreicheren Spieles zum Thema Social Engineering – eine Gefahr, die noch relativ unbekannt ist und dessen Bezeichnung aufgrund seiner Bestandteile „Social“ und „Engineer“ sogar eher positive Assoziationen weckt. Gleichwohl bedeutet Social Engineering „die zwischenmenschliche Manipulation, mit dem Ziel – unter Vortäuschung falscher Tatsachen – unberechtigten Zugang zu Informationen oder IT-Systemen zu erlangen“ (known_sense et al. 2015). In dem geplanten Lernszenario sollen der Tagesablauf eines fiktiven Charakters sowie potentielle Angriffspunkte und Risiken dargestellt und als Rollenspiel

erlebt werden. Mit konkreten Gefahren der Digitalisierung konfrontiert, sollen Lernende die Notwendigkeit des Schutzes sensibler Daten begreifen lernen.

Zukünftig werden somit eine Bewertung der Ansätze im Hinblick auf ihre Lernförderlichkeit und eine Awareness-Messung in den Mittelpunkt gerückt. Die Forschungsfragen rund um diesen Praxisbeitrag werden für neue Projektanträge weiterentwickelt. Dazu werden sowohl die theoretischen Ansätze zur Wirksamkeit von GBL/DGBL als auch Gamification-Elemente näher einbezogen, um ein neues, empirisches Design entwickeln zu können, das auch mit anderen Proband/innen getestet werden kann.

Projektwebseite:

<http://secaware4job.th-wildau.de/>

LITERATUR

- Admiraal W, Huizenga J, Akkerman S, Ten Dam G (2011) The concept of flow in collaborative game-based learning. *Computers in Human Behavior* 27(3):1185–1194. doi:10.1016/j.chb.2010.12.013
- Abdul Jabbar AI, Felicia P (2015) Gameplay Engagement and Learning in Game-Based Learning. A Systematic Review. *Review of Educational Research* 85(4):740–779. doi: 10.3102/0034654315577210
- Albrechtsen E (2007) A qualitative study of users' view on information security. *Computers & Security* 26(4):276–289. doi: 10.1016/j.cose.2006.11.004
- Barzilai S, Blau I (2014) Scaffolding game-based learning. Impact on learning achievements, perceived learning, and game experiences. *Computers & Education* 70:65–79. doi: 10.1016/j.compedu.2013.08.003
- Birkenbihl VF (2004) *Kopf-Spiele*. Breuer und Wardin, Bergisch Gladbach. ISBN: 3937864210
- Chen C-H, Law V (2016) Scaffolding individual and collaborative game-based learning in learning performance and intrinsic motivation. *Computers in Human Behavior* 55:1201–1212. doi: 10.1016/j.chb.2015.03.010
- Cone BD, Irvine CE, Thompson MF, Nguyen TD (2007) A video game for cyber security training and awareness. *Computers & Security* 26(1):63–72. doi: 10.1016/j.cose.2006.10.005
- DSV-Gruppe, EnBW, <kes>, known_sense, et al. (eds) (2006) *Entsicherung am Arbeitsplatz - die geheime Logik der IT-Security in Unternehmen*, München, Köln
- EnBW, known_sense, Pallas, SAP, Sonicwall, Steria Mummert Consulting, Trend Micro (eds) (2008) *Aus der Abwehr in den Beichtstuhl – qualitative Wirkungsanalyse*. CISO & Co., Köln
- Erhel S, Jamet E (2013) Digital game-based learning. Impact of instructions and feedback on motivation and learning effectiveness. *Computers & Education* 67:156–167. doi: 10.1016/j.compedu.2013.02.019
- Eseryel D, Law V, Ifenthaler D, Ge X, Miller R (2013) An Investigation of the Interrelationships between Motivation, Engagement, and Complex Problem Solving in Game-based Learning. *Educational Technology and Society* 17(1):42–53. ISSN: 1176-3647

Guo KH, Yuan Y, Archer NP, Connelly CE (2011) Understanding Nonmalicious Security Violations in the Workplace. A Composite Behavior Model. *Journal of Management Information Systems* 28(2):203–236. doi: 10.2753/MIS0742-1222280208

Halverson R, Berland M, Owen E V (2015) Assessment in Game-Based Learning. Spector, J M (ed) *The SAGE Encyclopedia of Educational Technology*. SAGE Publications, Inc., Los Angeles, London, New Delhi, Singapore, Washington DC, Boston. ISBN: 9781452258225. doi:10.4135/9781483346397.n28

Hamari J, Shernoff DJ, Rowe E, Coller B, Asbell-Clarke J, Edwards T (2016) Challenging games help students learn. An empirical study on engagement, flow and immersion in game-based learning. *Computers in Human Behavior* 54:170–179. doi: 10.1016/j.chb.2015.07.045

Helisch M, Pokoyski D (eds) (2009) *Security awareness. Neue Wege zur erfolgreichen Mitarbeiter-Sensibilisierung*, 1. Aufl. Edition kes. Vieweg + Teubner, Wiesbaden. ISBN: 978-3834806680

Hsiao H-S, Chen J-C (2016) Using a gesture interactive game-based learning approach to improve preschool children's learning performance and motor skills. *Computers & Education* 95:151–162. doi: 10.1016/j.compedu.2016.01.005

Hsu S H, Wu P H, Huang T C, Jeng Y L, Huang Y M (2008) From traditional to Digital: Factors to integrate traditional Game-Based learning into digital Game-Based learning environment. *Proceedings - 2nd IEEE International Conference on Digital Game and Intelligent Toy Enhanced Learning, DIGITEL 2008:83–89*. doi:10.1109/DIGITEL.2008.24

Institute of Play (2013) *Q Design Pack School*. http://www.instituteofplay.org/wp-content/uploads/2013/09/IOP_QDesignPack_School_1.0.pdf. Accessed 13 Dec 2016

known_sense, Lanxess, Technische Hochschule Wildau, <kes> (2015) *Bluff me if u can – Gefährliche Freundschaften am Arbeitsplatz. Tiefenpsychologische Wirkungsanalyse Social Engineering und seine Abwehr*. <http://www.known-sense.de/BluffMelfUCanAuszug.pdf>. Accessed 13 Dec 2016

Lai C-H, Lin Y-C, Jong B-S, Hsia Y-T (2014) Adding Social Elements to Game-Based Learning. *International Journal of Emerging Technologies in Learning* 9(3):12–15

Le S, Weber P, Ebner M (2013) *Game-Based Learning. Spielend Lernen?*. In: Ebner M, Schön S (2013) *Lehrbuch für Lernen und Lehren mit Technologien*. epubli, Berlin: 267–275. ISBN: 9783844265941

Leutner D (1993) Guided discovery learning with computer-based simulation games. Effects of adaptive and non-adaptive instructional support. *Learning and Instruction* 3(2):113–132. doi: 10.1016/0959-4752(93)90011-N

Plass J L, Homer B D, Kinzer C K (2015) Foundations of Game-Based Learning. *Educational Psychologist* 50(4):258–283. doi:10.1080/00461520.2015.1122533

SanNicolas-Rocca T, Schooley B, Spears (2014) *JL Designing Effective Knowledge Transfer Practices to Improve IS Security Awareness and Compliance*. In: 2014 47th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Waikoloa, HI, pp 3432–3441. doi: 10.1109/HICSS.2014.427

Shi Y-R, Shih J-L (2015) Game Factors and Game-Based Learning Design Model. *International Journal of Computer Games Technology*. 2015:1–11. doi:10.1155/2015/549684

Scholl M, Fuhrmann F (2016a) Analog – digital? Wie sich mit Hilfe analoger Methoden Bewusstsein für Informationssicherheit in der digitalen Welt fördern lässt. In: FTVI & FTRI (ed) *Fachtagungen Verwaltungsinformatik und Rechtsinformatik*, 21.–23.09.2016, Dresden

Scholl M, Fuhrmann F (2016b) *Information Security Awareness 3.0 for Job Beginners*. In: Book of industry papers, poster papers and abstracts, CENTERIS 2016 – International Conference on Enterprise Information Systems: 433–436

Scholl M, Fuhrmann F, Pokoyski D (2016a). *Information Security Awareness 3.0 for Job Beginners* In: J. E. Quintela Varajão, M. M. Cruz-Cunha, R. Martinho, R. Rijo, N. Bjørn-Andersen, R. Turner, & D. Alves (Eds.), *Conference on ENTERprise Information Systems (CENTERIS)*, Porto, Portugal, 433–436

Scholl M, Fuhrmann F, Pokoyski D (2016b) *The Human Factor: How Can Information Security Awareness Be Sustainably Achieved in E-Government?* In: Scholl HJ, Glassey O, Janssen MFVHA (eds) *Electronic government and electronic participation. Joint proceedings of ongoing research, PhD papers, posters and workshops of IFIP EGOV and ePart 2016. Innovation and the Public Sector*, 23. IOS Press, Netherlands, ISBN: 1614996709, pp 403–404

Spires HA (2015) Digital Game-Based Learning. *Journal of Adolescent and Adult Literacy* 59(2):125–130. doi: 10.1002/jaal.424

Straub DW, Welke RJ (1998) Coping with Systems Risk. *Security Planning Models for Management Decision Making*. *MIS Quarterly* 22(4):441–469. doi: 10.2307/249551

Sweller J, van Merriënboer J J G, Paas F G W C (1998) *Cognitive Architecture and Instructional Design*. *Educational Psychology Review* 10(3):251–296. doi: 10.1023/A:1022193728205

Tsai F-H, Tsai C-C, Lin K-Y (2015) The evaluation of different gaming modes and feedback types on game-based formative assessment in an online learning environment. *Computers & Education* 81:259–269. doi: 10.1016/j.compedu.2014.10.013

Zaphiris P, Ang C S, Law D (2007) Individualistic versus competitive game-based e-learning. *Advanced Technology for Learning* 4(4):206–211. doi:10.2316/Journal.208.2007.4.208-0921

Zweck A, Holtmannspötter D, Braun M, Hirt M, Kimpeler S, Warnke Ph (2015) *Gesellschaftliche Veränderungen 2030. Ergebnisband 1 zur Suchphase von BMBF-Foresight Zyklus II*. VDI Technologiezentrum (ed). <http://www.vditz.de/meldung/bmbf-foresight-berichte-so-sieht-die-welt-im-jahr-2030-aus>. Accessed 16 March 2016

AUTOREN

Prof. Dr. rer. nat. Margit Scholl

Frauke Fuhrmann

Denis Edich

Ernst Peter Ehrlich

Kai Benjamin Leiner

Lars Robin Scholl

Peter Koppatz

Technische Hochschule Wildau

Fachgebiet Wirtschafts- und Verwaltungsinformatik

Forschungsgruppe "Information Security Awareness"

E-Mail für Korrespondenz:
margit.scholl@th-wildau.de



Szenenanalyse und Unterscheidung der Skelette mehrerer Menschen in digitalen Bildern mit Graphentheorie durch eine k-kürzeste-disjunkte-Wege-Suche

Egbert Gedat*, Pascal Fechner, Richard Fiebelkorn, Ralf Vandenhouten

Zusammenfassung

Das Erkennen von Personen auf Fotos und in Videos geschieht in aktuellen Klassifizierungsverfahren durch die Zuordnung eines Körperteils zu jedem Pixel. Anschließend werden die gefundenen Körperteile zu Skeletten zusammengefasst. Im Falle mehrerer abgebildeter Personen ergibt sich das Problem der Zuordnung der Körperteile zu den verschiedenen Skeletten. Es wurde in dieser Arbeit ein auf dem Suurballe-Algorithmus basierendes graphentheoretisches Verfahren entwickelt, das diese Aufgabe löst. Aufbauend auf im Wesentlichen abstandsabhängigen Kantengewichten wird eine k-kürzeste-disjunkte-Wege-Suche durchgeführt. Unter Einbezug von möglicherweise fehlenden Körperteilen durch Unsichtbar-Knoten und automatisches Aussortieren zu viel gefundener Körperteile werden so die k-optimalen Skelette gefunden. Die Methode wurde an idealisierten computergenerierten Bildern mit einer Trefferquote von 100 % gefundener Personen getestet. Ein Test mit realen Bilddaten lieferte eine Trefferquote von 71,7 %.

Abstract

Recognition of humans on photos and in videos is done per current classification procedures by assigning a body part to each pixel. The body parts thus allocated are subsequently ordered into skeletons. In the case the images indicate that multiple humans are present, the problem arises of assigning the body parts to different skeletons. A Suurballe algorithm-based method developed by us solves this task. By mainly relying on distance-related edge weights, a k shortest disjoint paths search is performed. Accounting for possibly missing body parts by invisible-nodes and automatically sorting out redundant body parts, the optimal k skeletons are found. The method was tested with computer-generated data, yielding a rate of 100 % persons detected. A test with real-world images yielded a recall ratio of 71.7 %.

1. Einleitung

Automatisiertes Erkennen mehrerer Personen in Videos ist ein mächtiges Werkzeug für die Analyse des Verhaltens von Menschen in Gruppen. Aufbauend auf Ansätzen für die automatisierte Analyse der Pose einzelner Personen (Andriluka et al. 2009, Buys et al. 2014, Tran et al. 2008 und die darin zitierten Arbeiten) und Anwendungen in der medizinischen Therapie (Fraunhofer Fokus 2016) und in der Analyse von Sport (Bigontina et al. 2014) und Filmen (Laptev et al. 2008) wurden Erweiterungen für mehrere Personen entwickelt (Andriluka et al. 2012, Belagiannis et al. 2014, Luo et al. 2010, Kinect 2 Kamera für Windows (Microsoft

Corp., Redmond, WA, USA) mit OpenNI (<http://structure.io/openni>)).

In der hier vorgestellten Arbeit wurden für die Haltungserkennung die Skelette der Personen aus Körperteilen rekonstruiert. Bigontina et al. (2015) und Laptev et al. (2008) benutzten keine Skelette und Andriluka et al. (2009), Buys et al. (2014) und Tran et al. (2008) benutzten schematische Skelette ohne Anspruch auf anatomischer Korrektheit. Bei diesen wurde ein entweder vordefiniertes (Andriluka et al. 2009) oder aus einer Standardpose segmentiertes (Tran et al. 2008) Modell benutzt. Für die hier vorgestellte Erkennung der Skelette mehrerer Personen in Videos wurde ein graphentheoretischer Algorithmus entwickelt,

der auf dem von J. W. Suurballe für Netzwerke eingeführten k-kürzester-disjunkter-Wege-Algorithmus (Suurballe 1974) aufbaut. Andriluka et al. (2012) und Belagiannis et al. (2014) benutzten Zeichen-Boxen für jede Person und Luo et al. (2010) verwendeten personenabhängiges Markieren der Voxel, bevor die Skelette rekonstruiert wurden, so dass die Rekonstruktion auf jeweils ein Skelett reduziert wurde. Die Implementierung des hier vorgestellten Algorithmus ermöglicht die optimale Zuordnung einer Menge redundanter Körperteile zu einer diskreten Anzahl von Skeletten ohne vorherige Separation der Personen. Fehlende Körperteile wurden durch sog. Unsichtbar-Knoten modelliert.

Die Güte der Skelettrekonstruktion hängt von der Qualität der Körperteilklassifikation ab, die ihr als Eingabedient. Um unabhängig hiervon den Algorithmus testen zu können, wurde er auf idealisierte Daten angewendet: Szenen aus der MOCAP-Datenbank (CMU Graphics Lab Motion Capture Database 2016) wurden in Blender (The Blender Foundation, Amsterdam, Niederlande) mit einer speziell hierfür entworfenen Textur gerendert. Weiter wurde der Algorithmus mit realen Bildern von Personen getestet, die mit einer Asus-Xtion-Pro-Kamera aufgenommen und mit der von den Autoren geschriebenen Software SkeletonApp, basierend auf Shottons Methode des maschinellen Lernens mit Entscheidungswäldern (Shotton et al. 2013), klassifiziert wurden. Ebenso spielt die anatomisch korrekte Lokalisation der Gelenke eine wichtige Rolle. Sie ist nicht Teil dieses Artikels und kann in Gedat et al. (2016) nachgelesen werden.

2. Die Körperteile und ihr Graph

Ein Graph im Sinne der Graphentheorie ist eine Verkettung von verschiedenen Elementen – den Knoten – durch zwischen ihnen bestehende Abhängigkeiten – die Kanten. Im vorliegenden Fall sind die Knoten die aus den Bildern gewonnenen Körperteile, von denen durch die Bildanalyse der Typ, also Arm oder Bein etc., und die Lage im Raum bekannt sind. Durch die Anatomie des Menschen werden dann Zielgraphen definiert; beispielsweise weiß man, dass die Reihenfolge Hals-Oberarm-Unterarm-Hand korrekt ist, und definiert diese als einen Teilgraphen des Skeletts mit den Knoten Hals, Oberarm, Unterarm und Hand. In dieser Reihenfolge versucht man dann aus den im Körperteil-Klassifizierungs-Algorithmus gefundenen Körperteilen die auszuwählen, die am besten zusammenpassen. Dafür werden die Kanten zwischen allen benachbarten Körperteilen (z. B. alle Händen mit allen Unterarmen) durch eine Gauss'sche Verteilung der wahrscheinlichsten Abstände der Körperteile berechnet. Wird der Graph einmal durchlaufen, liefert er das beste Ergebnis. Sollen nun mehrere k-beste Ergebnisse gefunden werden, reicht es nicht aus, die Suche einfach k-mal

unter Ausschluss der schon ausgewählten Körperteile durchzuführen, sondern man muss eine k-kürzeste-disjunkte-Wege-Suche durchführen. Diese stellt sicher, dass jedes Körperteil höchstens einmal benutzt wird und dass global die geringsten Kosten entstehen. Dafür müssen manchmal in der ersten Suche gefundene Körperteile nachträglich noch einem anderen Weg zugeordnet werden. Das leistet die k-mal ausgeführte kürzester-Weg-Suche nicht. Es wurde aber von J. W. Suurballe bereits im Jahr 1974 ein k-kürzeste-disjunkte-Wege-Algorithmus für Netzwerke vorgestellt, der das gewünschte Ergebnis liefert (Suurballe 1974).

Input für den hier vorgestellten Algorithmus sind die 3D-Positionen der Körperteile der abgebildeten Personen. Der Algorithmus erhält die Körperteile in Form von 3D-Punktwolken. Diese werden für reale Bilder von einem Klassifizierungsalgorithmus ermittelt, der jedem Bildpunkt eine Klasse entsprechend dem Körperteil oder als Hintergrund zuweist. Im Fall von 2D-Bildern muss hier stereoskopisch gearbeitet werden, um die 3D-Information zu erhalten. Dies ist im Fall der MOCAP-Bilder geschehen. Bei den realen Bildern wurde die Klassifikation auf der Basis von Tiefenbildern vorgenommen, die mit einer Asus-Xtion-Pro-Kamera zusätzlich zu den RGB Bildern aufgenommen wurden. Die Körperteilklassifikation ist eine hochkomplexe Aufgabe, an deren Lösung in 2D wie in 3D in dieser Forschungsgruppe gearbeitet wird, die aber nicht Gegenstand dieses Artikels ist. Die resultierenden Klassifikationen sind noch fehlerbehaftet, so dass für den Test des hier vorgestellten Algorithmus zur Skelettrekonstruktion mehrerer Personen Modelldaten generiert wurden. Dazu wurden von der frei zugänglichen CMU-MOCAP-Datenbank (CMU Graphics Lab Motion Capture Database 2016) Dateien verwendet, die die Koordinaten von Personen in verschiedenen Bewegungen enthielten. Mit diesen Koordinaten lässt sich ein mit der Software MakeHuman (MakeHuman team, www.makehuman.org) generierter Körper in die Software Blender einladen, mit einer geeigneten Textur (siehe Abb. 2) versehen und die Bewegung aus ver-

schiedenen Kameraperspektiven rendern. Die Körperteilklassifikation ist hier durch die Farbcodes der Figur eingearbeitet und somit perfekt, abgesehen von in 2D verdeckten Körperbereichen. Da die MOCAP-Datenbank nur Bewegungen einzelner Personen enthält, wurden diese nachträglich zusammengeschnitten, so dass Filme mit drei Personen entstanden, die sich nicht gegenseitig überdecken.

Die so gewonnenen Punktwolken der Körperteile werden weiter verrechnet, um die erwünschten 3D-Koordinaten zu gewinnen. Für eine anatomische Korrektur siehe Gedat et al. (2016). Die Körperteile wurden ausgehend vom Hals in 6 jeweils zusammenhängende Teilgraphen eingeteilt:

(1) linker Kopf

Hals, linker unterer/oberer Kopf

(2) rechter Kopf

Hals, rechter unterer/oberer Kopf

(3) linker Arm

Hals, linker Ober- und Unterarm, Hand

(4) rechter Arm

Hals, rechter Ober- und Unterarm, Hand

(5) linker Rumpf und Bein

Hals, linke Brust, Hüfte, Ober- und Unterschenkel, Fuß

(6) rechter Rumpf und Bein

Hals, rechte Brust, Hüfte, Ober- und Unterschenkel, Fuß

Dabei wird unterschieden in ‚zentrierte‘ Körperteile und solche, die durch ein mediales und ein distales Gelenk beschrieben werden. Letztere sind Ober- und Unterarm und Ober- und Unterschenkel. Alle anderen werden durch den Schwerpunkt beschrieben.

3. Implementierung der Algorithmen für die Skelette

Der Suurballe-Algorithmus ist Teil eines komplexeren Prozesses, der sich in mehrere Schritte gliedert: (i) Aufnahme/Generierung der Bilder, (ii) Klassifikation der Körperteile in den Bildern, (iii) Rekonstruktion der Skelette. Der Suurballe-Algorithmus findet im letzten Teil ‚Rekonstruktion der Skelette‘ statt, der sich wiederum in die folgenden Abschnitte gliedert: (i) Bestimmung der Gelenkpositionen, (ii) Anatomische Korrektur, (iii) Konstruktion der Adjazenzmatrix mit distanzabhängiger Kostenfunktion, (iv) Finden der besten Skelette mit dem Suurballe-Algorithmus, (v) Ausgabe der Daten zur Weiterverarbeitung, z. B. zur Gestenerkennung.

Die Adjazenzmatrix wird wie folgt erstellt. Die 3D-Koordinaten der Körperteile sind die Knoten des Graphen. Die Kanten berechnen sich als Kosten c_{ij}

$$c_{ij} = \begin{cases} 1 - p_{ij} & t_c < p_{ij} \leq 1 \\ \text{inf} & \text{sonst} \end{cases} \quad (1)$$

mit t_c als unterem Wahrscheinlichkeits-Schwellwert und den Wahrscheinlichkeiten p_{ij} zwischen den Knoten i und j

$$p_{ij} = \begin{cases} e^{\left\{ \frac{-(|r_i - r_j| - \mu_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2} \right\}} & i, j \text{ Nachbarn} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (2)$$

mit den Körperteilpositionen r_i und r_j , dem mittleren Abstand der Körperteile μ_{ij} und der Standardabweichung des mittleren Abstandes der Körperteile σ_{ij} . μ_{ij} und σ_{ij} wurden aus Testdaten bestimmt.

Im Allgemeinen liefert der Klassifizierungsalgorithmus mehr Körperteile, als Personen im Bild sind, manchmal aber auch weniger. Die zu viel gefundenen Körperteile werden von dem Skelett-Rekonstruktions-Algorithmus aussortiert, indem sie nicht für die k kürzesten Wege berücksichtigt wurden. Für fehlende Körperteile muss in dem Graphen jeweils ein sog. Unsichtbar-Knoten eingeführt werden, damit der Algorithmus sein Ziel – das letzte Körperteil im Graphen – erreichen kann. Die Unsichtbar-Knoten helfen auch dabei, eventuell falsch gefundene Körperteile mit sehr hohen Kosten auszusortieren. Eine graphische Darstellung des Graphen für N Körperteile und k Personen ist in Abb. 1 gezeigt. Die Adjazenzmatrix ist ein Abbild des Graphen und wird für die k -kürzeste-disjunkte-Wege-Suche benutzt, die die k -besten Teilskelette findet. Der Algorithmus wird für die sechs Teilgraphen unabhängig durchgeführt. An-

schließend werden sie anhand des in allen Teilgraphen vorhandenen Halses zu ganzen Skeletten zusammengesetzt. Der Suurballe-Algorithmus startet mit einer einfachen kürzeste-Wege-Suche, dreht dann alle benutzten Kanten in die andere Richtung und spaltet alle benutzten Knoten in jeweils zwei Knoten auf, von denen einer alle eingehenden Kanten hat und der andere alle ausgehenden. Dann wird die kürzeste-Wege-Suche wiederholt. Für k kürzeste Wege wird die Prozedur $k - 1$ mal wiederholt. Die Implementierung des Suurballe-Algorithmus wurde gemäß Disjoint Path Finding (2016) realisiert. Abweichend wurde die Dijkstra-Methode anstatt der Bellman-Ford-Methode eingesetzt. Dies brachte eine Ersparnis an Rechenzeit und war möglich, weil gerichtete Kanten eingesetzt wurden. Die Algorithmen wurden in Matlab (The Mathworks, Natick, MA, USA) auf einem Standard-PC implementiert.

4. Ergebnisse und Diskussion

Der Algorithmus wurde zunächst zum Testen auf idealisierte computergenerierte Bilder angewendet. Diese zeichnen sich durch eine nahezu perfekte Körperteilklassifikation aus, lediglich perspektivisch verdeckte Körperteile können nicht dargestellt werden. Ein Beispiel ist in Abb. 2 gezeigt. MOCAP-Daten enthalten 4D-Koordinaten von Bewegungen. Es wurden alle 8 Bewegungen von Subjekt #56 ausgewählt. Mit MakeHuman wurde die Oberfläche der entsprechenden Personen erzeugt. In Blender wurde eine farbige Textur erzeugt, die die Körperteilklassifikation beinhaltet, und auf die Oberfläche gelegt. Dann wurden die Personen aus zwei Richtungen gerendert und stereoskopisch in 3D rekonstruiert. Da MOCAP-Daten grundsätzlich nur eine Person zeigen, wurden je drei Personen in jedem Bild zusammengesetzt.

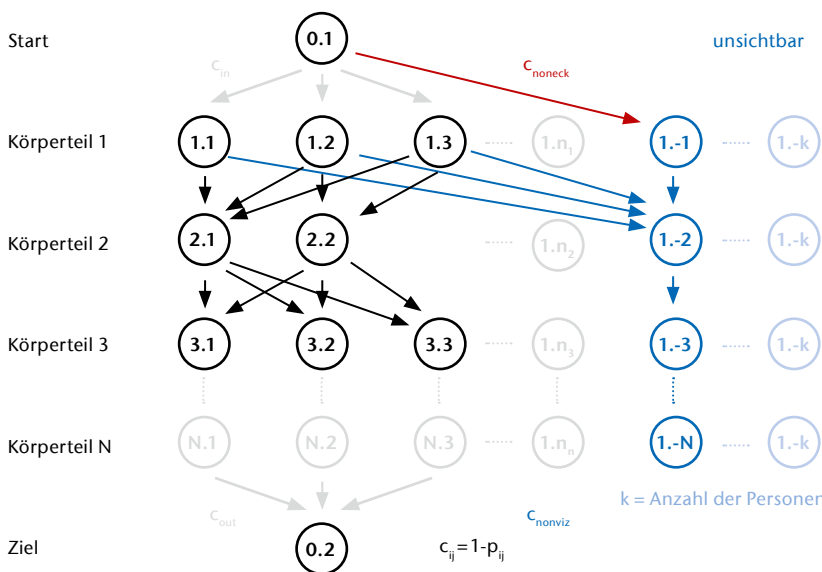


Abb. 1) Der Graph für die Rekonstruktion der Skelette. Beispielhaft sind die Kanten für einen Graphen mit 3 Körperteilen und 3 Personen eingezeichnet. Es ist jede beliebige, endliche Anzahl N an Körperteilen und k an Personen möglich. Die Knoten stellen die in der Klassifikation gefundenen Körperteil-Cluster dar. Zusätzlich wurden unsichtbar-Knoten eingeführt, die fehlende Körperteile, wie hier beispielhaft bei Körperteil 2, oder mit hohen Kosten c_{ij} verbundene Körperteile ersetzen. Als Einsprungstelle wurde Start-Knoten 0.1 und als Ende der Ziel-Knoten 0.2 eingeführt. So durchläuft der Algorithmus den Graphen k mal von oben nach unten und berechnet die besten k Skelette.

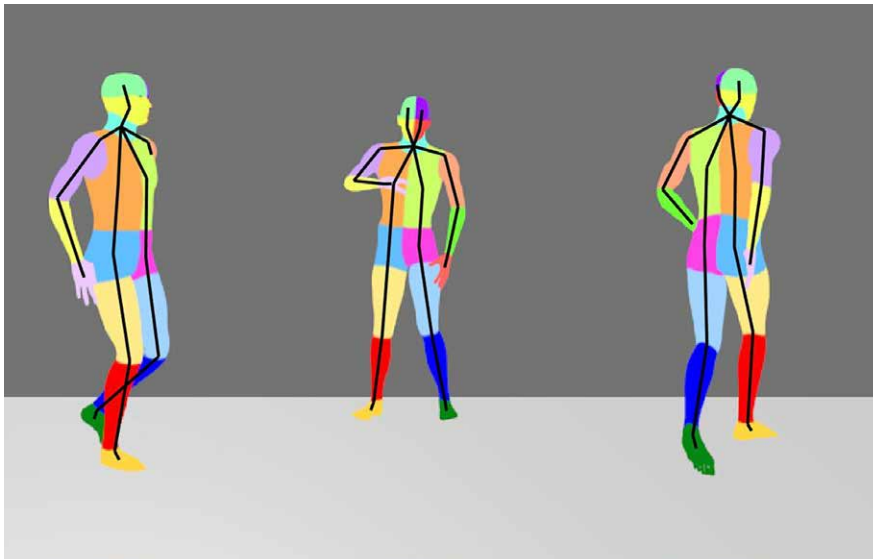


Abb. 2) Skelette der mit MOCAP Daten gerenderten Personen.

Anschließend wurden reale Bilder von Menschen verwendet. Es wurden Tiefenbilder und RGB-Bilder mit einer Asus Xtion Pro Kamera aufgezeichnet. Die 3D-Punktwolken wurden mit unserer Software SkeletonApp nach Körperteilen klassifiziert. Ein Beispiel für reale Menschen ist in Abb. 3 gezeigt.

Die Anzahl der gefundenen Körperteil-Cluster und ihre Verwendung für die Skelette sind in Tab. 1 zusammengefasst.

Es wird deutlich, dass die Skelettrekonstruktion für ideale computergenerierte Daten über 90 % der Körper-

teile zuordnen kann und über 96 % der Cluster benutzt werden. Für reale Menschen findet aber die Körperteilklassifikation nicht alle Körperteile, so dass nur etwa 56 % der Körperteile in den Skeletten enthalten sind. Im Falle der MOCAP-Bilder sind die fehlenden Körperteile die in den Bildern nicht zu sehenden verdeckten Körperteile. Außerdem wird ersichtlich, dass die Körperteilklassifikation für reale Bilder zu viele – falsche – Cluster findet. Diese werden durch den Suurballe-Algorithmus korrekt aussortiert.

Die Qualität des Algorithmus lässt sich zudem gut an der Anzahl richtig

gefundenen in sich abgeschlossener Personen beurteilen. Abgeschlossen bedeutet hier, dass es keine Sprünge in Körperteile anderer Personen gibt. Diese Daten sind in Tab. 2 zusammengefasst.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die Methode bei perfekt klassifizierten Bildern sehr gut funktioniert. Der Suurballe-Algorithmus ordnet die Körperteile korrekt den Skeletten zu. Bei realen Bildern ist die Zuordnung zu den Skeletten auch nahezu ohne Fehler, es werden aber nicht alle Skelette gefunden und bei den gefundenen Skeletten fehlen einige Körperteile. Es ergibt sich aber eine mit anderen Arbeiten vergleichbare Trefferquote. Andriluka et al. (2009, 2012) berichten für verschiedene Studien die Präzision und den Rückruf der Personendetektion im Bereich von 0,75 bis 0,95 am Break Even Point. Diese Werte liegen in der vorliegenden Arbeit bei jeweils 1,00 für MOCAP Bilder und 0,99 bzw. 0,72 für die Bilder mit realen Menschen. Die Zahlen belegen einen Skelett-Rekonstruktionsprozess auf dem neuesten Stand der Technik. Die Fehler bei der Anwendung auf reale Bilddaten sind vor allem auf die Vorverarbeitung durch den Körperteil-Klassifizierungs-Algorithmus zurückzuführen, der nicht alle Körperteile anbietet. Unsere derzeitigen Arbeiten konzentrieren sich deshalb auf eine Optimierung der Körperteilklassifikation.

5. Ausblick

Für die Optimierung der Methode und zur Verwertung in realen Szenarien gibt es drei wichtige Ansatzpunkte für weitere Arbeiten. Innerhalb der vorgestellten Skelettrekonstruktion wurden bisher nach einem fehlenden Körperteil alle folgenden Körperteile nicht weiter berücksichtigt. Die darin enthaltene Problematik kann eventuell durch eine modifizierte Form des Dijkstra-Algorithmus gelöst werden.

Das größte Augenmerk gilt aber dem Input in den Algorithmus. Wie die Ergebnisse gezeigt haben, ist die Körperteilklassifikation bei realen Filmen noch unvollständig. Dadurch geht Information verloren, die durch angepasste Klassifikationsalgorithmen bewahrt werden soll. Weiterhin erfordert



Abb. 3) Skelette realer Personen.

der aktuell benutzte Körperteilklassifikations-Algorithmus 3D-Daten einer Tiefenbildkamera. Dies ist für reale Szenarien nicht zufriedenstellend, so dass eine Ausweitung auf RGB-Daten ohne Tiefenbild angestrebt wird.

6. Danksagung

Diese Arbeit wurde gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Förderprogramm FH-profUnt, Förderkennzeichen 03FH-009PX3.

Die MOCAP-Daten, die in diesem Projekt benutzt wurden, stammen von mocap.cs.cmu.edu. Die Datenbank wurde errichtet mit Förderung der NSF EIA-0196217.

LITERATUR

Andriluka M, Roth S, Schiele B (2009) Pictorial Structures Revisited: People Detection and Articulated Pose Estimation. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition: 1014-1021. doi: 10.1109/CVPR.2009.5206754

Andriluka M, Roth S, Schiele B (2012) Discriminative Appearance Models for Pictorial Structures, International Journal of Computer Vision 99(3): 259-280. doi: 10.1007/s11263-011-0498-z

Belagiannis V, Amin S, Andriluka M, Schiele B, Navab N, Ilic S (2014) 3D Pictorial Structures for Multiple Human Pose Estimation. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition: 1669-1676. doi: 10.1109/CVPR.2014.216

Bigontina A, Herrmann M, Hoernig M, Radig B (2014) Human Body Part Classification in Monocular Soccer Images. In: Paulus D, Fuchs C, Droege D (eds) Proceedings of the 9th Open German-Russian Workshop on Pattern Recognition and Image Understanding. 2014, Koblenz. Active Vision Group, Koblenz, pp 128-131

Buys K, Cagniard C, Baksheev A, De Laet T, De Schutter J, Pantofaru C (2014) An adaptable system for RGB-D based human body detection and pose estimation. Journal of Visual Communication and Image Representation 25 (1): 39-52. doi: 10.1016/j.jvcir.2013.03.011

CMU Graphics Lab Motion Capture Database (2016). <http://mocap.cs.cmu.edu/>. Accessed 25 Aug 2016

Disjoint Path Finding (2016). http://www.macfreak.nl/memory/Disjoint_Path_Finding. Accessed 25 Aug 2016

Fraunhofer Fokus (2016) MyRehab. <https://www.fokus.fraunhofer.de/go/myrehab>. Accessed 25 Aug 2016

Gedat E, Fiebelkorn R, Vandenhousten R (2016) Multiple Human Skeleton Recognition in RGB and Depth Images with Graph Theory, Anatomic Refinement of Point Clouds and Machine Learning. In: 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics

Laptev I, Marszałek M, Schmid C, Rozenfeld B (2008) Learning realistic human actions from movies, IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition: 1-8. doi: 10.1109/CVPR.2008.4587756

Luo X, Berendsen B, Tan RT, Veltkamp RC (2010) Human Pose Estimation for Multiple Persons Based on Volume Reconstruction, IEEE International Conference on Pattern Recognition: 3591-3594. doi: 10.1109/ICPR.2010.876

Tab. 1: Verwendung der Körperteil-Cluster für die Skelette in MOCAP-Daten und für reale Menschen. ‚Körperteile‘ sind alle anatomisch möglichen Körperteile, ‚gefundene Körperteile‘ die von dem hier vorgestellten Algorithmus für die Skelette verwendeten Körperteile, ‚Cluster‘ die von dem Körperteilklassifizierungsalgorithmus gefundenen Cluster und ‚benutze Cluster‘ die von dem hier vorgestellten Algorithmus für die Skelette verwendeten Cluster.

		Körperteile	gefundene Körperteile	Cluster	benutzte Cluster
MOCAP	Anzahl	4.284	3.899	4.032	3.899
	Prozent	100	91.0	100	96.7
Reale Menschen	Anzahl	2.079	1.166	2.679	1.166
	Prozent	100	56.1	100	43.2

Tab. 2: Präzision der Skelettdetektion

	detektierte Personen	richtige Personen	Sprünge zu anderen Personen
MOCAP (n = 204)	100 %	100 %	0 %
Reale Menschen (n = 99)	72,7 %	71,7 %	1,0 %

Shotton J, Girshick R, Fitzgibbon A, Sharp T, Cook M, Finocchio M, Moore R, Kohli P, Criminisi A, Kipman A, Blake A (2013) Efficient Human Pose Estimation from Single Depth Images. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 35 (12): 2821-2840. doi 10.1109/TPAMI.2012.241

Suurballe JW (1974) Disjoint Paths in a Network. Networks 4 (2): 125-145. doi: 10.1002/net.3230040204

Tran C, Trivedi MM (2008) Human body modelling and tracking using volumetric representation: Selected recent studies and possibilities for extensions. Second ACM/IEEE International Conference on Distributed Smart Cameras: 1-9. doi: 10.1109/ICDSC.2008.4635733

AUTOREN

Dr. rer. nat. Egbert Gedat
Pascal Fechner, Dipl.-Inform.
Richard Fiebelkorn, Dipl.-Ing. (FH)
Prof. Dr. rer. nat. Ralf Vandenhousten
 Forschungsgruppe Telematik
 Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften
 Technische Hochschule Wildau

E-Mail für Korrespondenz:
 gedat@th-wildau.de



Gott denken – für einen Naturwissenschaftler denkbar?

Bernhard Eylert*

Zusammenfassung

Dieser Beitrag enthält einige Neuerungen in der wissenschaftlichen Auseinandersetzung zwischen naturwissenschaftlicher Erkenntnis, philosophischem Anspruch und mathematischen Möglichkeiten des Existenzbeweises einer gottähnlichen Entität (nach Gödel: God-like being). Nach ausführlicher Diskussion des Ausbleibens der Notwendigkeit einer göttlichen Existenz in der Evolution und des parallel dazu entstehenden Bedürfnisses der Soziologien nach Transzendenz werden die Begriffe Materie, Geist und Denken von verschiedenen philosophischen Ansätzen her beleuchtet, um dann in einem mathematischen Konstrukt einen Gottesgedanken zu formulieren. Aufbauend auf dem Gödel'schen Gottesbeweis von 1970, veröffentlicht 1987 und bewiesen 2013, wird eine weitere Eigenschaft dieser Entität, nämlich die Unendlich-Dimensionalität, mit Hilfe der Topologie gezeigt. Letzterer Beweis ist neu und bisher unveröffentlicht.

Abstract

This article presents new findings regarding the discussion in science, philosophy and mathematics regarding the proof of the existence of God. The author looks at the theory of evolution and finds no relevance of the existence of God in this area. This is not the case in cultural evolution, as human societies express the wish to address transcendence. The items matter, spirit, and thought are discussed in philosophical terms with the aim of finding a mathematical construct that formulates the idea of God. Drawing on the proof of the existence of God developed by Kurt Gödel in 1970, published in 1987, and finally proven in 2013, this article presents a new predicate of God's entity, the dimension of infinity, in terms of the mathematical field of topology. This proof is new and has not yet been published. The result is mirrored in theological theorems and philosophical views.

1. Motivation

Warum befasst sich ein Mathematiker, Naturwissenschaftler und Ingenieur mit der Frage „Gott denken“? Auch einen Naturwissenschaftler lässt die Kernfrage der Philosophie nach dem „Wesen des menschlichen Seins“ oder in der Langfassung „Wie lässt sich die Welt und mit ihr der Mensch als vernünftiges Ganzes in dieser Welt vernünftig verstehen?“ nicht unberührt. Diese Frage(n) zu beantworten, mühen sich die Menschen seit Jahrtausenden und es gibt keine einfachen Antworten. Viele philosophische Schulen haben sich in den letzten 5.000 Jahren gebildet und alle haben unterschiedliche Aspekte aufgedeckt. Diese hier zu erörtern, würde bei Weitem zu weit führen. Dennoch beschäftigt Menschen seit Langem die Frage: Ist Gott für einen Naturwissenschaftler denk-

bar? Darüber haben viele große Mathematiker, Naturwissenschaftler und Philosophen intensiv nachgedacht. Auf den einen oder anderen wird in diesem Beitrag noch zu sprechen zu kommen sein. Speziell beim Autor dieses Beitrages hatte sich im Laufe der Zeit ein Gedanke verfestigt, der offensichtlich bisher noch nicht tiefer erörtert wurde: der Beweis der Unendlichkeit Gottes. Drei Dinge haben letztendlich dazu veranlasst, diesen Beitrag zu schreiben, zu veröffentlichen und damit eine Diskussion in Gang zu bringen.

1. In einem Interview der Zeitschrift GEO mit Joseph Henrich aus dem Jahr 2014 heißt es an einer Stelle wörtlich (Hanig 2014): „Wenn man die Entwicklungen von Gesellschaften betrachtet, erscheint Religion wie ein Trick, den die kulturelle Evo-

lution sich ausgedacht hat, um uns zur Zusammenarbeit anzuregen.“

2. Wenn dieser Gedanke zutrifft, wie passt das Ganze in einen Diskurs über Naturwissenschaft und Gott?
3. Wenn es schon kluge Leute in der Geschichte gegeben hat, die mathematisch einen Gottesbeweis unter wohldefinierten Voraussetzungen führen konnten, kann man daraus auch noch weitere Eigenschaften, z. B. die Unendlichkeit, ableiten?

Es soll zunächst mit einem Missverständnis begonnen werden, das Theologie und Naturwissenschaft über Jahrhunderte entzweite.

2. Galileo Galilei im Spannungsfeld von Religion und Naturwissenschaft

Naturwissenschaft und Religion erscheinen rückblickend über die Jahrhunderte wie Feuer und Wasser. Das berühmteste Beispiel ist das allgemein kommunizierte Schicksal des italienischen Mathematikers, Physikers und Philosophen Galileo Galilei (1564–1642), der seine aus heutiger Sicht offensichtlich klaren physikalischen Erkenntnisse widerrufen musste, um dem vermeintlich vernichtenden Urteil der Inquisition zu entgehen. Der deutsche Mathematiker und Astronom Nikolaus Kopernikus (1473–1543) hat aus Furcht vor der Inquisition seine astronomischen Erkenntnisse erst kurz vor seinem Tod veröffentlichen lassen. Ein anderer deutscher Mathematiker und Astronom, Johannes Kepler (1571–1630), wurde von Luther und Calvin wegen seiner astronomischen Bewegungsgesetze, die im Widerspruch zum damals gängigen Weltbild des griechischen Mathematikers, Geographen, Astronomen und Philosophen Ptolemäus (~100–160 v. Chr.) standen, heftig gescholten und theologisch verurteilt.

Begonnen werden sollte mit dem Erstgenannten. Man muss wissen, dass der Disput Galileis mit den Vertretern der Kirche ursprünglich rein wissenschaftlich war. Mittlerweile ist wissenschaftlich auch geklärt, dass Galileo irrte. Und das aus zwei Gründen.

1. Galilei hatte 1610 ein Heftchen mit dem Titel „Siderius nuncius – Der Sternenbote“ (Galilei & Blumenberg 2000) herausgebracht und ebendort behauptet, er sei der Erfinder des Fernrohrs.
2. In einer weiteren Abhandlung behauptete Galilei, die Kopernikanische Weltordnung mit Hilfe von Ebbe und Flut beweisen zu können (Galilei 1953).

Das Fernrohr hatte aber der niederländische Optiker Zacharias Janssen (1588–1631) schon 1604 erfunden. Es war zum Zeitpunkt der „Erfindung“ Galileis nördlich der Alpen längst am Markt erhältlich. Ferner wusste zu jener Zeit jeder in der Wissenschaft, dass Ebbe und Flut mit der Bewegung des

Mondes um die Erde und nicht mit der Bewegung der Erde um die Sonne zusammenhängen. Also forderte der seitens der Inquisition verantwortliche Kardinal Robert Bellarmin (1542–1621) von Galileo Galilei im Sinne wahrer philosophischer Wissenschaft, seine im Jahr 1616 aufgestellten Behauptungen als Hypothese und nicht als Wahrheit zu deklarieren. In eigener Selbstüberschätzung kümmerte sich Galileo aber nicht um die Auflage. Im Gegenteil, 1631 publizierte er gegen den Rat der Inquisition und seiner Freunde ein als Dialog aufgebautes Werk „Dialogo sopra i due massimissimi sistemi del mondo“, das die ptolemäische Welt mit der kopernikanischen vergleicht (vgl. Galilei 1953). Papst Urban VIII. (geb. als Maffeo Barberini (1568–1644), Papst der röm.-kath. Kirche), der übrigens ein Freund und Förderer Galileis war, sah jetzt seine Autorität in Gefahr und sich zum Handeln gezwungen. Er zitierte Galilei 1633 vor die Inquisition, um ebendort seine als wissenschaftliche Wahrheit formulierten Thesen zu widerrufen. Dann nahm das Schicksal den uns bekannten Lauf. Dieses Ereignis ist gepaart mit dem Schicksal Keplers, dem in Tübingen durch den Einfluss von Calvin und Luther die Berufung als Professor zeitweilig versagt blieb. Dieser Tatbestand war auch Urban VIII. bekannt. Er wollte einer Verurteilung Keplers aus Genf mit einer Verurteilung Galileis aus Rom zuvorkommen.

Wissenschaftlich lag Galileo also tatsächlich falsch, denn er konnte zum damaligen Zeitpunkt seine Thesen nicht beweisen. Dafür brauchte es Newtons Gravitationsgesetz in Verbindung mit den Kepler'schen Regeln, und der Vernunft gehorchend, hätte er sie als Hypothese veröffentlichen müssen. Der gedemütigte Galilei, der nie Kerker und Folter seitens der Inquisition erleiden musste, vermarktete seine Niederlage so geschickt, dass alle Welt ihn als Opfer der Inquisition sehen sollte. Das brachte ihm in Vatikan-kritischen Kreisen zusätzlichen Ruhm ein. Hans Conrad Zander (Zander 2008) und Paul Badde (Badde 2012) haben diese beiden Fälle, Galilei und Kepler, allgemein verständlich in Beiträgen mit zahlreichen Quellen sehr schön zusammenfassend dargestellt.

Nicht nur in der Renaissance wurde

in der Wissenschaft mit dem Thema Wahrheit bisweilen sehr eigenwillig umgegangen. Aufklärung und ideologisierte Betrachtung des Falls Galilei, besonders im 19. Jahrhundert, haben zu einer immer größeren Ferne zwischen Naturwissenschaft und Religion, speziell der katholischen Kirche, geführt. Das Thema Wahrheit bzw. der Begriff „wahr“ sind in diesem Kontext so bedeutsam, dass sie in einem späteren Kapitel noch ausführlich besprochen werden sollen.

3. Gott in der Evolution

Ist Gott in der Evolution gegenwärtig, und wenn ja, wann hat er sich ins (menschliche) Bewusstsein eingebracht? Naturwissenschaftlern geht die Frage nach dem Leben als evolutionärer Prozess sehr nahe. Insbesondere ist aus physikalischer Sicht die Frage nach dem Beginn unseres Universums und aus biologischer Sicht die Frage nach dem Beginn des Lebens von besonderem Interesse. Philosophen, Theologen und Naturwissenschaftler haben unterschiedliche Ansichten zum Begriff „Leben“. Sehr schön hat das Jörg Hacker, Präsident der Leopoldina, in seinem Vortrag an der WWU Münster am 9.6.2015 ausgeführt. Den Aufzeichnungen des Autors zufolge sagte er sinngemäß: „Neben den ethischen und rechtlichen Aspekten beweisen die Genomwissenschaften heute, dass die fundamentalen Lebensprozesse im Zusammenwirken von Genen und Proteinen bestehen. Damit allein kann man Leben aber nicht beschreiben. Verantwortung und Geist sowie die Fähigkeit zur Kommunikation spielen für die Bestimmung des menschlichen Lebens eine weitere wichtige Rolle“ (Hacker 2015).

Eine andere, sehr klare Position bezieht der Physiker und Wissenschaftskabarettist Vince Ebert, der zum Schluss seiner ausgezeichneten Satiresendung „Evolution“ mit dem Fazit aufwartet: „Wir brauchen keinen dreifaltigen Gott, um unsterblich zu sein. Die drei Hauptsätze der Thermodynamik reichen vollkommen aus“ (Ebert 2015).

Das ist natürlich eine bewusst provokante Äußerung. Biochemisch und physikalisch ist ein Teil der Aussage vollkommen korrekt, denn Menschen bestehen aus etwa 10^{28} unterschiedli-

chen Atomen, und diese gehen nach ihrem Tod andere Verbindungen ein, bleiben aber grundsätzlich bestehen. Mit diesem Tatbestand der atomaren Auflösung und Neubindung nach dem Tode geben sich manche Menschen zufrieden und sehen damit ihre Lebensaufgabe als beendet an. Im Kontext mit Gott verlässt Ebert aber die rein naturwissenschaftliche Ebene. Die Persönlichkeit des Menschen bleibt außen vor. Ein Aspekt, der nicht unbeachtet bleiben darf. Setzt man beides in einen Zusammenhang, muss man die Sache ganzheitlich betrachten. Das aber würde einen neuen Themenkreis öffnen, der in diesem Beitrag nicht besprochen werden soll.

Mit den drei Hauptsätzen der Thermodynamik, mit der Kosmologie, der Quantentheorie oder ganz modern mit der sogenannten String-Theorie kommt man dem Ursprung allen Seins physikalisch nahe. Dieser Zustand wird allgemein hin als Urknall bezeichnet. Die Theorie des Urknalls im Einzelnen zu erörtern, würde an dieser Stelle zu weit führen. Es sei auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen. Dennoch sollte man einen Moment beim Urknall verharren. Was weiß man wirklich darüber? Eigentlich sehr wenig. Man hat es hier nicht nur im physikalischen Sinne mit einer Singularität zu tun, sondern besonders auch im mathematischen Sinne mit einem Pol. Physiker wissen nicht, was sich sozusagen ‚links auf der Zeitachse‘, die ja nach der Quantentheorie im Urknall beginnt, abspielt. Für den britischen Astrophysiker und Kosmologen Stephen Hawking beginnt die Welt im Urknall und endet irgendwann im schwarzen Loch. Physikalisch mag das nach der derzeitigen Erkenntnis richtig sein: eine Hypothese. Nach der Relativitätstheorie des deutschen Physikers Albert Einstein (1871–1955) verschwindet mit der Zeit auch der Raum. Demnach stellt sich für Physiker nicht die Frage: Was war vor der Zeit? Dennoch bleibt der denkende Mensch dort nicht stehen. Er fragt sich: Was war vor dem Urknall? Wer oder was hat die Zutaten zur Auslösung des Urknalls (Materiebildung) und damit erst die Möglichkeit des Wirkens der thermodynamischen Gesetze bereitgestellt und ausgelöst? Oder wer oder was hat die ungeheure Energie be-

reitgestellt, die sich im Bruchteil einer Sekunde im quantenleeren Raum ausgebreitet hat? Diese Frage ist naturwissenschaftlich derzeit wohl nicht zu beantworten. Sich auf den Zufall allein zurückzuziehen, scheint als Antwort nicht weitgehend genug zu sein. Dennoch stößt man auch hier immer noch nicht auf fruchtbaren Boden für göttliche Notwendigkeit, aber es bietet sich eine Möglichkeit, Gott zu positionieren. Mathematiker haben zwar Lösungen für Probleme der Singularitäten im Spezialgebiet der Funktionentheorie, kennen aber bis heute keine geeignete Funktion oder Funktionsmenge, die den Zustand zum Zeitpunkt des Urknalls vollständig beschreiben könnte. Es wäre vermutlich die Weltformel. Einen anderen Ansatz könnte man in der Theorie des deutschen Mathematikers David Hilbert (1862–1943) finden, mit der die Quantenmechanik mathematisch erklärt werden kann. Dem steht die Unvollständigkeitstheorie des österreichischen Logikers Kurt Gödel entgegen, der bewies, dass ein konsistentes formales System wie die Mathematik nicht vollständig sein kann. Damit war Hilberts Hypothese von der Widerspruchsfreiheit mathematischer Axiome widerlegt. Das ist eine sehr komplexe Materie, für deren Diskussion im Einzelnen an dieser Stelle weder Zeit noch Raum bleiben. Als Zwischenfazit lässt sich aus naturwissenschaftlicher Sicht festhalten: In der Evolution scheint Gott keine Rolle zu spielen. Oder anders ausgedrückt: Zur naturwissenschaftlichen Beschreibung der Evolution wird kein Gott gebraucht, er kommt einfach nicht vor.

4. Bedeutung der Transzendenz und der Übergang zum Ein-Gott-Kult

Warum redet alle Welt aber dennoch von Gott, zumindest von Transzendenz? An dieser Stelle kann noch einmal auf das zu Anfang dieser Ausarbeitung zitierte Interview mit Joseph Henrich in der Zeitschrift GEO zurückgekommen werden. Auf die Frage „Aber was treibt uns dann an, komplexe Gesellschaften zu errichten? Was bleibt dann übrig? Ein göttlicher Plan?“ antwortet Henrich: „Ich würde eher sagen: eine Evolution. Wenn man die Entwicklung von Gesellschaften betrachtet, erscheint Religion wie ein

Trick, den die kulturelle Evolution sich ausgedacht hat, um uns zur Zusammenarbeit anzuregen. Anfangs noch nicht: Jäger-und-Sammler-Gesellschaften glauben zwar an übernatürliche Kräfte, aber diese Kräfte moralisieren nicht, sie kümmern sich nicht darum, Menschen für schlechtes Verhalten zu bestrafen. Erst mit dem Auftauchen komplexer Gesellschaften finden wir den Glauben an übernatürliche Kräfte, die bestimmte Werte durchsetzen, welche uns sozialer stimmen“ (Hanig 2014).

Unter kulturellen Gesellschaften versteht man in diesem Beitrag Völker mit und ohne staatliche Strukturen, im Gegensatz zu Jäger-und-Sammler-Gesellschaften, die im Wesentlichen aus Familienverbänden bestehen. Ist Gott also nur ein Gedankenkonstrukt des Menschen, ausgelöst durch die kulturelle Evolution, eine menschengemachte Kreatur zum Zwecke gesellschaftlicher Strukturierung, wenn nicht gar ausschließlich der Disziplinierung der Menschen dienend? Warum erscheint er in der Literatur erst 60–70.000 Jahre später, nachdem sich der Homo sapiens vom Süden Afrikas aus über dessen Ostküste in den Norden aufgemacht hat? Eben doch ein „Hirngespinnst“ menschlicher Phantasie?

Dazu muss man noch einmal etwas zurückgehen. Die Einführung des aufrechten Gangs hat beim Menschen erhebliche körperliche und vor allem psychische Veränderungen bewirkt. Sie markiert den Beginn zwischenmenschlicher Beziehungen. In diesem Kontext wurde es notwendig, Familienverbände zu entwickeln. Daraus entstanden die Jäger-und-Sammler-Gesellschaften, aus denen dann, wie bei Ensminger und Henrich (Ensminger & Henrich 2014) beschrieben, die kulturellen Gesellschaften hervorgingen. Aus archäologischen Forschungen weiß man, dass spätestens in der Steinzeit, dem Magdalénien (ca. 12.000 v. Chr.), die Menschen begannen, den Verstorbenen Grabbeilagen mitzugeben (vgl. Street et al. 1999). Das deutet darauf hin, dass die Menschen spätestens dann begannen, an übernatürliche Kräfte und/oder ein Weiterleben nach dem Tode zu glauben, und das zu einer Zeit, als die

großen monotheistischen Religionen noch gar nicht existierten. Diese treten erst fast 10.000 Jahre später auf den Plan, darunter die Religion des großen Volks der Juden.

Was kann man daraus lernen? Sicherlich eins: Schon der frühe Homo sapiens hatte, vorsichtig ausgedrückt, einen ‚Hang zur Transzendenz‘. Neben der reinen Existenz muss da wohl noch was anderes sein, was menschliches Leben bestimmt: der Geist. Und damit ist man wieder bei Jörg Hacker (Hacker 2015), der dieses Element als überaus wesentlich für Leben an sich ansieht. Bis heute entzieht sich den Biowissenschaftlern und Evolutionstheoretikern, zu welchem Zeitpunkt der Geist den Menschen in Besitz genommen hat. Nimmt man das zuvor Gesagte hinzu, muss dies schon sehr früh geschehen sein, möglicherweise im Zusammenhang mit der Einführung des aufrechten Gangs und der sich daraus entwickelnden Psyche. Der Geist ist das Element, was Mensch und Tier wohl am meisten voneinander unterscheidet. Philosophisch ist die Frage nach dem Geist so interessant, dass diesem Thema ein eigenes Kapitel gewidmet werden soll. Dabei soll darüber nachgedacht werden, ob man ‚richtig denkt‘.

5. Geist und Materie: Was war zuerst da, wer steht höher? – Ein ungelöstes Dilemma

Zurück zu einer der Kernfragen der Philosophie: Geist oder Materie, was war zuerst da? Wer steht höher? Auch diese Frage(n) kann man hier nicht umfassend beantworten, aber einige Aspekte sollen doch vorgestellt werden. Seit mehr als 2.000 Jahren beschäftigen sie die abendländischen Philosophen, und ein allgemeingültiges Verständnis gibt es bis heute nicht.

Zum Ursprung der Materie wurde schon zuvor im Kontext des Urknalls etwas gesagt. Für die alten Griechen war Geist immer ein wesentlicher Bestandteil menschlichen Lebens, der mit dem Tod auch nicht verschwand und als Seele weiterexistierte. Manche Philosophen und Physiker wie Werner Heisenberg (1901–1976) und Karl Friedrich von Weizsäcker

(1912–2007) korrelieren Geist und Materie, wobei die Frage, wer aus wem hervorgeht, heftig umstritten ist. Andere glauben, der Geist sei aus der Materie hervorgegangen (vgl. Livio 2014: 11, Penrose 2002), wieder andere halten die Materie für eine Art Phasenübergang des Geistes zur Materie. Geist und Gedanken gehen eine Symbiose ein. Gedanken brauchen keine Materie, um gedacht zu werden. Der Prozess läuft zwar in Materie (Gehirn, Zellen) ab, Gedanken und Materie bilden aber physikalisch keine Einheit. Man kann diese Funktion mit dem Zusammenspiel von Soft- und Hardware eines Elektronenrechners vergleichen. Ohne den Geist wäre es uns nicht möglich, uns über die Kernfrage der Philosophie „Was ist das Wesen des Seins?“ oder „Wie lässt sich die Welt und mit ihr der Mensch als vernünftiges Ganzes in dieser Welt vernünftig verstehen?“ Gedanken zu machen. Für Theologen ist der Geist göttlichen Ursprungs, das was Mensch und Gott verbindet.

Der große griechische Philosoph Platon (ca. 428–347 v. Chr.) war der Erste, der dank seiner geistigen Fähigkeiten Philosophie, Mathematik, Physik, Religion, Ethik und Kunst holistisch zu betrachten vermochte. Er hat eine Denkrichtung begründet, die platonische Philosophie, die bis heute viele Anhänger hat. Ein Kernpunkt dieses Denkens ist die Mathematik und ihre Rolle, die sie im geistigen Konstrukt spielt.

1. Für Platon ist die Mathematik ein a priori bestehender Bestandteil des Universums, den es zu ‚entdecken‘ gilt (‚das Universum ist Mathematik‘), oder um es mit dem französischen Mathematiker und Philosophen René Descartes (1596–1650) zu sagen: „Das Universum ist in der Sprache der Mathematik geschrieben.“ Diese Auffassung teilen auch die anderen großen Mathematiker und Naturwissenschaftler des 17. Jahrhunderts wie Isaac Newton (1642–1726) und Galileo Galilei. Für sie wird die Mathematik entdeckt, d. h. sie ist Teil der Schöpfung.
2. Mit der Aufklärung und der Einführung der Logik in das große

mathematische Gesamtsystem ändert sich das Bild. Zwar hatte schon der große deutsche Mathematiker und Philosoph Gottfried Wilhelm Leibniz (1646–1716) die beiden Disziplinen Mathematik und Logik miteinander vereint, den Durchbruch dieses Gedankens erlebt man aber erst im 19. Jahrhundert mit den Mathematikern Augustus de Morgan (1806–1871), George Boole (1815–1864), Gottlob Frege (1848–1925) und Giuseppe Peano (1858–1932). Jetzt beginnt das Nachdenken über das Denken. Zwar findet man Ansätze dieser Philosophie schon bei René Descartes mit seinem zentralen Gedanken ‚Cogito ergo sum‘ (‚Ich denke, also bin ich‘), aber dass Geist und Denken eine Einheit bilden, ist philosophisches Gedankengut des 19. und 20. Jahrhunderts. In dieser Zeit entwickelt sich auch die postplatonische Vorstellung, nach dem die Mathematik erfunden und nicht entdeckt wird. Das bedeutet auch, dass sie nicht a priori war, sondern ihre Wesensmerkmale erfunden werden müssen.

Diese Gegensätze zerreißen fast die Mathematiker und Philosophen bis in unsere Zeit hinein. Als Beispiele für die verschiedenen ‚Glaubensrichtungen‘ seien hier die Mathematiker Godfrey Harold Hardy (1877–1947) (pro platonisch) und Edward Kasner (1878–1955) sowie James Newman (1907–1966) (antiplatonisch) erwähnt. Neuere Veröffentlichungen sprechen für ein Sowohl-als-auch, was als Wigners Mysterium, benannt nach dem ungarischen Physiker Eugene Wigner (1902–1995), in die Literatur (Livio 2014: 296) eingegangen ist. Wigner sieht die Mathematik als ‚unbegreifliche Erklärungsmacht‘ an. So könnte man sagen, die Axiome der Mathematik gehören ins Universum, sind also a priori existent, mussten aber entdeckt werden, während die sich daraus ergebenden Sätze und Konzepte erfunden werden. Hier vielleicht noch zur Erinnerung eine wichtige Definition: Eine Aussage, die einen mathematischen Sachverhalt beschreibt und wahr ist, wird als Satz oder Theorem bezeichnet.

6. Wahrheit in Literatur und Religion

Und damit ist man bei einem ganz entscheidenden Begriffspaar: ‚wahr‘ und ‚Wahrheit‘. Wie schon oben im Fall Galilei angesprochen, hat es mit der Wahrheit schon etwas Besonderes auf sich. Man erinnere sich an die Ringparabel in Lessings „Nathan der Weise“, wo die drei Ringe für die drei monotheistischen Religionen Judentum, Christentum und Islam stehen. Saladin sagt dort: „Von diesen drei Religionen kann doch eine nur die wahre sein“ (Lessing & Diekhans 2004).

Eine Lehrmeinung, die für Christen unumstößlich ist, lautet:

- Für die Menschen christlichen Glaubens hat sich Gott in Jesus offenbart. Er ist der Messias (Aussage A), und er ist der Sohn Gottes (Aussage B). So steht es zum Beispiel im Neuen Testament im Johannes-Evangelium.

Dem würden die Menschen jüdischen Glaubens sofort widersprechen, denn für sie hat sich Gott in der Thora offenbart. Dort wird der Messias z. B. bei Jesaja an verschiedenen Stellen zwar angekündigt, sein Kommen steht nach jüdischem Verständnis aber noch aus, und Jesus ist für sie nicht der Messias und schon gar nicht der Sohn Gottes.

Für die Menschen muslimischen Glaubens ist Jesus ein großer Prophet und wird an verschiedenen Stellen des Koran, der muslimischen Offenbarung Gottes, genannt, ist aber nach ihrem Verständnis weder der Messias noch Gottes Sohn.

Jeder widerspricht dem anderen und beruft sich auf seine göttliche Offenbarung. Jede dieser drei Religionen behauptet von sich, aufgrund der jeweiligen Offenbarung im Besitz der Wahrheit zu sein. Ist das möglich? Es wird versucht, die Frage mit Hilfe der Mathematik anzugehen, denn schließlich gibt es dort ein Gebiet, die schon oben angesprochene Logik, die den Begriff ‚wahr‘ als Kernelement beinhaltet.

7. Wahrheit in der Mathematik

Unter den Wissenschaften gilt die Mathematik als die einzig exakte Wissenschaft. Sie erfordert ein streng formales Arbeiten. Mathematiker lernen, logisch und strukturell zu denken. Logik und Struktur sind die Grundelemente der Mathematik (Eylert & Eylert 2014). Man kann nun schauen, was die Aussagenlogik zu bieten hat. Hier geht es um Widerspruchsfreiheit, was der Philosoph ‚ausgeschlossenen Widerspruch‘ nennt und mit ‚Vernunft‘ gleichsetzen würde. Damit hat man die Definition eines wesentlichen Begriffs der o. g. Leitfrage der Philosophie nachgeholt. Die Erkenntnisse der Aussagenlogik sind in unserem Beispiel schon sehr bedeutsam, und deshalb sollen sie an dieser Stelle zur Erinnerung oder Auffrischung kurz wiederholt werden.

Im Gegensatz zur Umgangssprache benutzt die Mathematik eine sehr präzise Sprechweise. Sachverhalte der Realität werden als Aussagen gefasst. Eine solche Aussage kann entweder wahr oder falsch sein. Eine Aussage ist ein ‚sinnvolles‘ sprachliches Gebilde, was der Philosoph wohl ‚vernünftig‘ nennen würde. Da der Mathematiker immer an der Einfachheit und Allgemeingültigkeit interessiert ist, bezeichnet er Aussagen mit lateinischen Großbuchstaben A, B, C,... Nun müssen die Aussagen ja irgendwie miteinander verknüpft werden. Dazu hat er folgende Verknüpfungen eingeführt:

und (in Zeichen \wedge),
oder (in Zeichen \vee),
nicht (in Zeichen \neg),
wenn-dann oder Implikation
(in Zeichen \Rightarrow) und
genau dann – wenn
(in Zeichen \Leftrightarrow)

Die Verknüpfung ‚oder‘ ist genau dann wahr, wenn wenigstens eine Aussage A oder B wahr ist. Die Umgangssprache kennt vorwiegend das Entweder-oder. Mathematisch macht diese Unterscheidung aber keinen Sinn, weshalb man grundsätzlich den einfachen Begriff ‚oder‘ nutzt. Der Mathematiker fasst diese fünf Verknüpfungen in so genannten Wahr-

heitstabellen zusammen. Dabei steht W für wahr und F für falsch. Hier soll nur eine dieser Tabellen zur Sprache kommen: die Implikation oder Folge-Wahrheitstabelle, da sie in unserem Kontext eine wichtige Bedeutung spielt:

A	B	$A \Rightarrow B$
W	W	W
W	F	F
F	W	W
F	F	W

Die Implikation, aus A folgt B, ist nur dann falsch, wenn A wahr und B falsch sind. In allen anderen Fällen ist die Gesamtaussage, aus „A folgt B“ immer wahr. Das wird den unvorbereiteten Leser sicher überraschen, aber man folgt hier ganz streng den Gesetzen der mathematischen Logik. An dieser Stelle sollte man noch einmal in das vorige Kapitel zurückgehen und die dort gemachten theologischen Aussagen anschauen. Dann ist es gar nicht mehr so trivial, die Wahrheit herauszufinden. Mit mathematischen Kenntnissen kann man nicht sicher bestimmen, ob die Kernaussage (christliche Offenbarung) oder eine der beiden oben genannten Erwidern (jüdische bzw. muslimische Position), wirklich richtig ist. Denn aus der wahren Gesamtaussage der Implikation lässt sich nicht schließen, ob die Prämisse wahr oder falsch ist. Man ist also ‚so klug als wie zuvor‘. Folglich muss man einen anderen mathematischen Ansatz wählen, mit dem zu hoffen ist, weiterkommen zu können.

8. Gödels Gottesbeweis

Der schon zuvor erwähnte Mathematiker Kurt Gödel hat einen erweiterten logischen Ansatz gewählt. Gödel gilt als der brillante Logiker des 20. Jahrhunderts, der die Logik wesentlich weiterentwickelt hat und auf bedeutenden Arbeiten von Gottfried Wilhelm Leibniz aufbaut. Im Gegensatz zur klassischen Logik spricht man bei dieser Weiterentwicklung von der Modallogik. Sie enthält Operatoren wie möglicherweise gilt (in Zeichen \blacklozenge)

und ‚notwendigerweise, gilt (in Zeichen []) (vgl. Gödel 1931). Das Ganze wird dann noch komplizierter, wenn man es um Quantoren wie Gottartig (Leibniz), Gott oder Gott-ähnlich (God-like, Gödel) erweitert. Mit der Technik der Modallogik hat Gödel 1970 eine Skizze für einen Gottesbeweis geschrieben, der von einem seiner Schüler, Dana Scott, aufgeschrieben und erst nach seinem Tod von Jordan Howard Sobel (Sobel 1987) veröffentlicht wurde. Man nimmt an, dass Gödel sich nicht getraut hat, den Gottesbeweis selbst zu veröffentlichen, da er sich nicht dem Gespött der Leute aussetzen wollte. Günther J. Wirsching hat den Beweis in einem Vortrag in Eichstätt aufbereitet und das Skript im Internet veröffentlicht (Wirsching 2012). Darin ist auch Gödels originale Beweisskizze enthalten:

Gödels Notizen [Transkription von Sobel 1987],
Feb 10, 1970, Ontologischer Beweis:

$P(\phi)$ ϕ is positive ($\epsilon \phi \in P$)
 Ax 1 $P(\phi).P(\psi) \supset P(\phi.\psi)^{\circ}$
 Ax 2 $P(\phi) \vee^* P(\sim\phi)$
 Df 1 $G(x) \equiv (\phi)[P(\phi) \supset \phi(x)]$ (God)
 Df 2 ϕ Ess. $x \equiv (\psi)[\psi(x) \supset N(y)[\phi(y) \supset \psi(y)]]$ (Essence of x)
 $p \supset N q = N(p \supset q)$ Necessity
 Ax 2 $P(\phi) \supset N P(\phi)$
 $\sim P(\phi) \supset N \sim P(\phi)$ because it follows from the nature of the property
 Th $G(x) \supset G$ Ess. x
 Df $E(x) \equiv (\phi)[\phi$ Ess. $x \supset N(\exists x)\phi(x)]$ necessary Existence
 Ax 3 $P(E)$
 Th $G(x) \supset N(\exists y)G(y)$
 hence $(\exists x)G(x) \supset N(\exists y)G(y)$
 " $M(\exists x)G(x) \supset MN(\exists y)G(y)$ $M =$ possibility
 " $\supset N(\exists y)G(y)$

$M(\exists x)G(x)$ means the system of all positive properties is compatible. This is true because of:
 Ax 4: $P(\phi).\phi \supset N \psi : \supset P(\psi)$, which implies
 $x = x$ is positive
 $x \neq x$ is negative

^o and for any number of summands
^{*} exclusive or
^{*} any two essences of x are *nec. equivalent*

Diese Beweisskizze enthält einige Lücken. Einige Abkürzungen geben Anlass zur Interpretation und werfen Fragen dahin gehend auf, was eigentlich gemeint ist. In den folgenden Jahrzehnten haben sich viele Mathematiker mit dem Thema beschäftigt. Die Mathematiker und KI-Wissenschaftler Christoph Benz Müller von der FU Berlin und Bruno Woltzenlogel Paleo von der TU Wien haben 2013 (Benz Müller & Woltzenlogel Paleo 2014) die meisten Lücken heben und eine schlüssige Formulierung finden können, auf der dieser Beweis letztendlich abschließend geführt werden konnte.

Setzt man die Gödel'sche Beweisskizze in der Formulierung von Benz Müller und Woltzenlogel Paleo aus der formalen Logik in natürliche Sprache um, dann lautet sie (vgl. Pressestelle der Freien Universität Berlin 2013):

Annahme 1:
Entweder eine Eigenschaft oder ihre Negation ist positiv.

Annahme 2:
Eine Eigenschaft, die **notwendigerweise** durch eine positive Eigenschaft impliziert wird, ist positiv.

Theorem 1:
Positive Eigenschaften kommen möglicherweise einem existenten Wesen zu.

Definition 1:
Ein **gottähnliches Wesen** besitzt alle positiven Eigenschaften.

Annahme 3:
Die Eigenschaft, gottähnlich zu sein, ist positiv.

Schlussfolgerung: Möglicherweise existiert Gott.

Annahme 4:
Positive Eigenschaften sind **notwendigerweise** positiv.

Definition 2:
Eine Eigenschaft ist Kern eines Individuums, falls sie diesem Wesen zukommt und **notwendigerweise** alle Eigenschaften dieses Wesens impliziert.

Theorem 2:
Gottähnlich zu sein ist Kern jedes gottähnlichen Wesens.

Definition 3:
Ein Wesen existiert genau dann **notwendigerweise**, wenn all ihre Kerneigenschaften **notwendigerweise** in einem existenten Wesen realisiert sind.

Annahme 5:
Notwendigerweise zu existieren ist eine positive Eigenschaft.

Theorem 3:
Gott existiert **notwendigerweise**.

Benz Müller und Woltzenlogel Paleo haben mit Hilfe von Computerprogrammen, sog. Theorembeweisern, nachgewiesen, dass der Gödel'sche Gottesbeweis mathematisch in sich konsistent ist und damit auch das Theorem 3 bewiesen werden konnte. Ist damit der Gottesbeweis erbracht? Logisch schon, und dennoch bleiben Fragen offen wie z. B.: „Kann den mathematischen Aussagen eine Bedeutung im realen Leben zugewiesen werden, so wie es Gödel vorschlägt?“ „Welche Bedeutung misst man dem Begriff Gott-ähnlich im täglichen Leben zu?“ Oder um es mit Thomas von Aquin sinngemäß auszudrücken: „Stimmen Gegenstand und Verstand miteinander überein?“ Beispielsweise müsste der Gottgläubige begründen, warum die Rede von Gott in unserer Welt sinnvoll ist. Andererseits müsste der Atheist nachweisen, warum die verbliebenen Lücken nicht zu schlie-

ßen sind. Da ist sicher noch nicht das letzte Wort gesprochen, aber Gödels Beweisskizze in Verbindung mit den Beweisen von Benz Müller und Woltzenlogel Paleo sind das Präziseste, was in Sachen ontologischer Gottesbeweis bisher gezeigt wurde.

Nun ist das Lösen alltäglicher praktischer Probleme mit Hilfe mathematischer Verfahren das tägliche Geschäft der so genannten ‚angewandten‘ Mathematiker, die die Schnittstelle zwischen reiner (mathematischer) Theorie und praktischer Anwendung bilden. Hat der Physiker oder Ingenieur sein Problem klar und deutlich beschrieben, kann der (angewandte) Mathematiker ihm das passende mathematische Werkzeug zur Problemlösung zur Verfügung stellen oder auch das Problem für ihn lösen. Auch Informatiker sind in erster Linie Praktiker. Sie müssen die zuvor formulierte Problemlösung programmieren und in einen Rechner eingeben, der dann (hoffentlich) die praktische Lösung bringt.

9. Unendlichkeit Gottes

Wenn man sich das bisher Gesagte erneut vor Augen führt, dann ist auffällig, dass mathematisch vorgebildete Denker nahezu ausschließlich den logischen Ansatz wählen, wenn es darum geht Gott zu denken. Beobachtet man die Menschen in ihrer Alltagssprache, dann hört man, dass sie den Begriff ‚Gott‘ immer wieder benutzen, sicherlich meist unbewusst, wie in ‚Gott sei Dank‘, ‚Um Gottes Willen‘ oder ‚Gott bewahre‘. Wenn Menschen ihn aber bewusst benutzen, dann meist im Zusammenhang mit etwas Großem. Die Frage ist nun: Kann man dieses ‚Große‘ auch mathematisch bestimmen? Als angewandter Mathematiker schaut der Autor dieses Beitrags in den großen Fundus der Mathematik und da fällt die Topologie auf. Sie beschäftigt sich mit den Eigenschaften ‚allgemeiner Räume‘. Ein spezielles Kapitel darin ist die Dimensionstheorie. Fast jeder hat den Begriff ‚Dimension‘ schon gehört, jeder Studierende der Mathematik und anderer Naturwissenschaften muss sich im Studium damit auseinandersetzen. Die räum-

lichen Dimensionen Höhe, Breite, Tiefe sind vielen vertraut; in diesem Raum lebt der Mensch. Mathematiker nennen ihn den dreidimensionalen Raum. Bewegt man sich auf einer Fläche, z. B. einem Blatt Papier, befinden man sich im zweidimensionalen Raum, auch wenn es umgangssprachlich kein Raum mehr ist. Geht man eine Dimension tiefer, hat man es in diesem Bild mit der Gerade zu tun. Wiederum eine Dimension tiefer hat man den Punkt. Er hat keinerlei Ausdehnung – man spricht von der Dimension 0.

Nun konstruiert man daraus ein mathematisches Denkmodell (nach einer Idee von Abbott 1982). Man stelle sich vor, man sei ein Mathematiker der 2. Dimension. Dann könnte man sich nur Flächen vorstellen, Kreise, Quadrate, Rauten etc. Wie erklärt nun der Mathematiker der dritten Dimension dem der zweiten, wie eine Kugel aussieht? Nun, der Mathematiker der 3. Dimension schiebt eine Kugel durch die Fläche und fragt den Mathematiker der 2. Dimension, was er sieht. Er wird ihm ohne Zweifel antworten: ‚Ich sehe einen Punkt der immer größer zu einem Kreis mit maximaler Ausdehnung wird und sich dann wieder verkleinert, bis ich nur noch einen Punkt sehe‘. Wenn man sich jetzt einen Körper der vierten Dimension vorstellen will, so muss man einen Kunstgriff anwenden. Man geht noch einmal vom einfachen Punkt aus. Fügt man dem einen weiteren Punkt hinzu, so ergibt sich eine Linie, begrenzt durch 2 Punkte. Fügt man nun einen weiteren Punkt in der nächsten Dimension (Ebene) hinzu, gewinnt man ein Dreieck, das durch 3 Linien begrenzt ist. Fügt man wiederum einen Punkt in der nächsten Dimension (Raum) hinzu, so sieht man einen Tetraeder, der durch 4 Dreiecke begrenzt ist. Fügt man nun einen weiteren Punkt in der nächsten, der 4. Dimension hinzu, so sieht man die Konstruktion eines Simplex S_4 , der durch 5 Tetraeder begrenzt ist. Das könnte man nun fortsetzen und erkennen, dass die nächsthöhere Dimension immer durch $n + 1$ Körper der vorherigen Dimension ($n - 1$) begrenzt ist. Mathematiker können dies nun ad infinitum fortset-

zen und damit weiterarbeiten. Fazit: Man kann immer noch eine Dimension zur vorherigen hinzufügen, d. h. die Dimension strebt mit der natürlichen Zahl n gegen unendlich, der Mathematiker hat dafür die Schreibweise $n \in \mathbb{N}^1$, $n \rightarrow \infty$.

Auf diesem Denkmodell haben vor rund 100 Jahren die französischen Mathematiker Jules Henri Poincaré (1854–1912) und Henri Lebesgue (1875–1941) sowie der niederländische Mathematiker Luitzen Brouwer (1881–1966) die Dimensionstheorie aufgebaut und weiterentwickelt. Den Kulminationspunkt dieser Theorie findet man dann in den Arbeiten von David Hilbert, über dessen Theorie schon vorher kurz berichtet wurde. Nun soll der Fokus jedoch auf die früheren Arbeiten von Poincaré, Lebesgue und Brouwer gelegt werden. Sie sind heute ein wenig in Vergessenheit geraten, aber sie lassen sich jetzt sehr gut gebrauchen und mit den Gödel’schen Gedanken verbinden. Ein Wesen, ein Individuum, das alle positiven Eigenschaften beinhaltet, nennt Gödel Gott.

Folgernd aus dem Gödel’schen Beweis setzt man $X = G(x)$ mit $X = \{x_1, x_2, \dots\}$. Die $x_i, i \in \mathbb{N}$ repräsentieren die positiven Eigenschaften. Die Mengen M_k sind Teilmengen von X , mathematisch $M_k \subset X$. M_k heißt offene Umgebung von x_i , wenn $x_i \in M_k$. O. B. d. A.² sei $x_1 \in M_k, \forall k$. Dann folgt, $X = G(x)$ ist topologischer Raum (vgl. Behnke et al. 1964). Damit kann man ein wichtiges Theorem, das der französische Mathematiker Henri Lebesgue Anfang des letzten Jahrhunderts entwickelt und 1911 veröffentlicht hat, nämlich das Theorem von der Überdeckungsdimension, anwenden. Es besagt: Ein topologischer Raum X ist dann als n -dimensional zu bezeichnen, wenn es ein kleinstes n gibt, so dass bei jeder hinreichend feinen Überdeckung dieses Raumes durch offene Mengen M_n es Punkte $x_i \in X$ gibt, die $n+1$ Mengen des überdeckenden Mengensystems $\mathfrak{M}, M_n \in \mathfrak{M}, \forall n \in \mathbb{N}$ angehören. Gibt es ein solches n nicht, so ist der Raum ∞ -dimensional. (Koepp 2011)

¹ \in bedeutet Element aus; \mathbb{N} bedeutet die Menge der natürlichen Zahlen 1,2,3,4,... ² O. B. d. A. – mathematisch gebräuchliche Abkürzung für „ohne Beschränkung der Allgemeinheit“

Die Anzahl der positiven Eigenschaften ist unendlich, denn wäre sie endlich, dann müsste die nächste Eigenschaft negativ sein und nach Gödel ist dann das Gegenteil positiv – ein Widerspruch. Daraus folgt mit Lebesgue: $X = G(x)$ ist ∞ -dimensional.

10. Schlussfolgerung

Im Sinne der Fragestellung ‚Gott denken‘ konnte man also unter bestimmten mathematischen Voraussetzungen zeigen,

1. dass Gott nicht nur möglicherweise, sondern auch notwendigerweise existiert (Gödel), und darauf aufbauend,
2. dass, wenn Gott existiert, er unendlich dimensional sein muss.

Man muss auch konstatieren, dass es sich bei Gödels Beweis nicht um einen genuin mathematischen Beweis handelt, denn er greift in den Voraussetzungen mehrfach auf nicht mathematische Erkenntnisse (z. B. „positive Eigenschaften“) zurück. Aber schon Platon sagt: „Das Gute scheint notwendig.“ Dass Gott unendlich sei und weder Anfang noch Ende habe, ist – wie oben gesagt – im Theismus nicht neu. Man findet eine ausführliche Diskussion dieser These u. a. in „Prosligion Seu Alloquium De Die Existentia“ des großen englischen Theologen und Philosophen Anselm von Canterbury (1033–1109). Neu ist nur, Gott mit Hilfe der Modallogik zu beweisen und darauf aufbauend ihm mit der Dimensionstheorie eine Topologie unendlicher Dimension zuzuordnen.

Daraus lassen sich zwei Schlussfolgerungen ziehen:

1. Mathematisch-naturwissenschaftliche Überlegungen müssen nicht notwendigerweise atheistisch enden. Der rationale Theismus macht durchaus Sinn.
2. Keine Wissenschaft soll sich über die andere erheben, weder die Mathematik über die Religion, die Religion über die Philosophie, die Philosophie über die Mathematik und im Ringschluss jede über die jeweils andere.

Diese Gedanken passen schlüssig in die Argumentation eines realen Theismus, wie er z. B. bei Holm Tetens (Tetens 2015) in „Ein eschatologisches ‚Eperimentum Crucis‘“ vorgetragen wird. Damit ist noch nichts über die Kernthese des theistischen Idealismus von der Auferstehung der Toten, von Gericht, Vergebung und Versöhnung der Menschen gesagt, auch nicht über das Verhältnis von Gott zu den Menschen und umgekehrt oder über die verschiedenen Beschreibungen Gottes im Alten Testament oder die 99 Namen Gottes bei den Muslimen. Das war und ist nicht das Ziel dieser Arbeit, und es ist von der Mathematik nach Ansicht des Autors auch nicht zu leisten. Man kann sie in diesem mathematischen Modell nicht abbilden. Das gilt insbesondere auch für die Trinität (ein Gott in drei Personen), die von Matthias Haudel in seinem Buch „Gotteslehre“ (Haudel 2015) aus dem historisch-philosophischen Kontext heraus sehr verständlich beschrieben wird. Es kommt bei diesem Beitrag, insbesondere in Verbindung mit dem neuen Unendlichkeitsbeweis Gottes, darauf an, weitere, u. U. auch neue Diskussionen zwischen den Vertretern der angesprochenen Wissenschaften anzuregen.

LITERATUR

Abbott EA (1982) Flächenland. Reihe reprinta historica didactica, Bd. 5. Franzbecker - Didaktischer Dienst, Bad Salzdetfurth über Hildesheim. ISBN: 3881200207

Badde P (2012) Galileo Galilei – übereifrig, skrupellos, verwildert. Die Welt

Behnke H, Rimmert R, Steiner HG, Tietz H (eds) (1964) Mathematik 1. Das Fischer Lexikon, Frankfurt (Main)

Benzmüller C, Woltzenlogel Paleo B (2014) Formalization, Mechanization and Automation of Gödel's Proof of God's Existence. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*(263)

Ebert V (2015) Evolution. 3sat festival 2014

Ensminger JE, Henrich J (eds) (2014) Experimenting with social norms. Fairness and punishment in cross-cultural perspective. Russell Sage Foundation, New York NY. ISBN: 978-1-61044-840-6

Eylert B, Eylert D (2014) Kryptologische Grundlagen. In: Eylert B (ed) Informationssicherheit. Steganographie, Kryptologie, Organisation und Recht. Wildau Verlag, Wildau, ISBN: 978-3-945560-01-3, pp 18–38

Galilei G (1953) Dialogue on the great world systems. In the Salusbury translation. Rev., annotated, and with an introd. by Giorgio de Santillana

Galilei G, Blumenberg H (2000) Sidereus Nuncius. (Nachricht von neuen Sternen). Taschenbuch Wissenschaft, vol 337. Suhrkamp, Frankfurt am Main. ISBN: 9783518279373

Gödel K (1931) Über formal unentscheidbare Sätze der 'Principia Mathematica' und verwandter Systeme. Monatshefte für Mathematik und Physik(38):173–198

Hacker J (2015) Was ist Leben – Reflexionen über eine alte Frage im Zeitalter der Genomwissenschaften. Bernhard Rensch Vorlesung

Hanig F (2014) Wieso wir verschieden ticken. Im Gespräch mit Joseph Henrich. Geo Magazin(5):41–44

Haudel M (2015) Gotteslehre. Die Bedeutung der Trinitätslehre für Theologie, Kirche und Welt, 1. Aufl. UTB, vol 4292. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen. ISBN: 978-3-8252-4292-3

Koepf W (2011) 1911: Der mathematische Dimensionsbegriff. <http://www.mathematik.de/ger/information/kalenderblatt/dimensionsbegriff/dimensionsbegriff.html>

Lessing GE, Diekhans J (eds) (2004) Nathan der Weise. Ein dramatisches Gedicht in fünf Aufzügen, 6th edn. Einfach deutsch. Schöningh, Paderborn. ISBN: 978-3-14-022287-7

Livio M (2014) Ist Gott ein Mathematiker? Warum das Buch der Natur in der Sprache der Mathematik geschrieben ist, Ungekürzte Taschenbuchausg. dtv, vol 34800. Dt. Taschenbuch-Verl., München. ISBN: 978-3-423-34800-3

Penrose R (2002) Computerdenken. Die Debatte um künstliche Intelligenz, Bewußtsein und die Gesetze der Physik. Spektrum Akad. Verl., Heidelberg u. a. ISBN: 3-8274-1332-X

Pressestelle der Freien Universität Berlin (2013) Gödels „Gottesbeweis“ bestätigt. Wissenschaftler der Freien Universität und der TU Wien überprüfen Argumentationskette des österreichischen Mathematikers mit Hilfe von Computern

Sobel JH (1987) Gödel's ontological proof. In: Thomson JJ (ed) On being and saying. Essays for Richard Cartwright. MIT Press, Cambridge Mass. u. a., ISBN: 0-262-20063-5, pp 241–261

Street M, Baales M, Jöris O (1999) Beiträge zur Chronologie archäologischer Fundstellen des letzten Glazials im nördlichen Rheinland. In: Becker-Haumann R (ed) Terrestrische Quartärgeologie. Logabook, Köln, ISBN: 3-934346-03-0, pp 426–465

Tetens H (2015) Gott denken. Ein Versuch über rationale Theologie. Was bedeutet das alles?, Nr. 19295. Reclam, Stuttgart. ISBN: 978-3-15-019295-5

Wirsching GJ (2012) Der Gödelsche Gottesbeweis. Eichstätter theologisch-mathematisches Kolloquium

Zander HC (2008) Warum die Inquisition im Fall Galilei Recht hatte. Die Welt

AUTOREN

Prof. Dr. Bernhard Eylert (Emeritus)
Technische Hochschule Wildau

E-Mail für Korrespondenz:
bernhard.eylert@th-wildau.de



Exploring the Adoption of E-Government Tools with WISE Work Index

Esther Ruiz Ben, Margit Scholl*, Peter Ehrlich

Zusammenfassung

In diesem Beitrag erläutern wir die Entwicklung eines Analyse-tools (Wildau Information System Evaluation [WISE] Work Index) zur Erforschung der Einführung innovativer E-Government-Anwendungen und zeigen erste Evaluationsergebnisse bezogen auf die Anwendung „eAkte“. Wir argumentieren, dass die mit dem Einsatz von E-Government-Anwendungen und -Tools verbundenen Innovationsprozesse für die Arbeitsteilung und die organisatorischen Aspekte der Arbeit kontinuierlich Unsicherheiten erzeugen können. In einigen Fällen könnte die unreflektierte Einführung von E-Government-Tools für die Arbeitseffektivität und -effizienz sogar negativ sein. Eine kontinuierliche Bewertung mit dem WISE Work Index und ein partizipatives Redesign von E-Government-Tools könnten helfen, negative E-Government-Gewohnheiten zu vermeiden. Unser Forschungsziel ist zudem, unseren WISE Work Index selbst durch die Analyse seiner Anwendung auf E-Government-Tools unter Beschäftigten des öffentlichen Sektors zu verbessern. Wir untersuchen mit unserem Index, wie Beschäftigte des öffentlichen Dienstes neue E-Government-Tools in ihrer täglichen Arbeit nutzen, wie sie den Nutzen der Tools wahrnehmen und wie sie ihre früheren Arbeitsabläufe an die neue IT-Umgebung anpassen. Die Implementation unseres Indexes macht es möglich, die Auswirkung der Verwendung von E-Government-Online-Diensten sowie deren Inhalte zu verfolgen und konkrete Vorschläge für die Führungskräfte der öffentlichen Verwaltung anzubieten, um den öffentlichen Wert ihrer Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) einschließlich Arbeitnehmersichten zu verbessern und die öffentliche Informationsdienste im aktiven Co-Design zu entwerfen.

Abstract

In this paper, we explain the development of an analysis tool (Wildau Information System Evaluation [WISE] Work Index) for exploring the adoption of innovative E-Government applications and for presenting preliminary results regarding the application “eAkte”. We argue that the innovation processes characterized by the use of E-Government applications and tools continually transform the division of labour and the organizational aspects of work in uncertain ways. In some cases, adopting E-Government tools might exert a negative influence on work effectiveness and efficiency. A continuous evaluation and a participative redesigning of E-Government applications might help to avoid negative adopting habits in E-Government. Our research goal is to improve our WISE Work Index which aims at analysing the adoption of E-Government tools among public sector employees. Through our index, we explore how public employees use new E-Government tools in their day-to-day work, how they perceive the usefulness of the tools, and how they adapt their former working routines to the new IT environment. Implementing our index makes it possible to monitor the impact of using E-Government online services as well as their content and to offer concrete suggestions to public managers about ways to enhance the public value of their information and communication technologies (ICT) including employees' views on actively co-designing the public informational services.

1. Introduction

The term E-Government has been shaped by the claim that information and communication technologies (ICT) would enable innovative direct-democratic practices. However, rapid changes in technology itself and the difficulties in predicting the impact of innovating with E-Government

tools make it hard to foresee the effectiveness of E-Government in fulfilling this promise. The main challenge involved in innovating with E-Government is not just the functionality of information technologies but also their participative adaptation or institutionalization within the particular political or bureaucratic situations. Such a participative institutionalization could

lead to a better communication and cooperation across public organizations, but also to the specialization of public organizations and their eventual fragmentation. To include the diverse participants' perspectives and needs more effectively in the introduction of E-Government instruments in public organizations, it is necessary to focus the innovation analysis on adopting

* corresponding author

these instruments for concrete practices and context, and specific analysis tools are needed for this aim.

On the basis of empirical evidence extracted from several studies in the area of E-Government implementation, we have taken the developed evaluation tool TEDS*MOODLE (Scholl et al. 2014) a great deal further, presenting the analytical framework WISE (Wildau Information Systems Evaluation) Work Index for analysing the impact of E-Government applications in public-sector work environments. TEDS*MOODLE is a finely structured, analytical instrument with 33 criteria for evaluating information artifacts (IA), specifically emphasising the actors and usage, thus providing user-oriented quality. Several different IA were evaluated regarding the user experience of various target groups (Scholl 2015). However, for evaluating E-Government applications within a working process, TEDS*MOODLE had to be changed by compressing the criteria for the pure system review and complementing the factors for assessing the work situation. For that, in theoretical terms, we moved away from technology-acceptance models toward the technology focused on and developed an evaluation model to assess the impact of these tools on the work habits and organizational dynamics. The application of our evaluation model responds to previous findings of the need for more participative designs for developing E-Government tools.

More concretely, this is based upon the main lessons learned from our previous empirical analysis (Meier et al. 2013, Ruiz Ben & Schuppan 2014):

- Employees should participate in the initial phase of the innovation, not just as information “receivers” but with an active role in the innovation design. This means establishing a dialogue in order to communicate and make visible the needs of the organization and the users of the new electronic tools.
- During the implementation phase, the technology design should take into account the tool’s specific social learning in employee work practices. This includes a flexible

connection with existing tools and different departments. The design should thus be flexible enough to enable tool changes prompted by new work practices emerging through the use of the tool.

- Training should be developed on the basis of the employees’ working needs as a means to help the organization adapt. The scope of the training should be considered from a long-term perspective and not just as an isolated measure. Social innovations, such as ongoing mutual help between employees, could improve support for the tool and motivate staff to use it.

In this paper, we focus on developing our index as an evaluation tool and presenting the preliminary results of its empirical application in a large public-sector organization pertaining to the “eAkte” (electronic administrative file documents). We explain our theoretical basis in Chapter Two and then go on to refer to the methodology used for developing of our evaluation tool and for its empirical testing in Chapter Three. In the last parts, we present the results of our testing in Chapter Four, conclude with a short summary and critical discussion of our results in Chapter Five, and offer an outlook in Chapter Six.

2. Theoretical Basis

The scope of research conducted on information systems and tools has expanded during the last decade to include a wide range of disciplines. In order to gain insights into the quality of such information artifacts (IA), these should be analysed using a clearly structured and well-organized approach that specifically allows for the different usage scenarios and the variety of users involved (Scholl et al. 2011, Taylor 1982). Evaluation tools have been developed, like the integrated application TEDS*MOODLE (Scholl et al. 2014), which can be universally applied to different IA scenarios on different devices (Scholl 2015) for obtaining detailed user-experience (UX) data and which might also be an innovative solution for E-Government platforms and tools. Moreover,

in general, technology acceptance models (TAM) (Davis 1985, Davis et al. 1989, King & He 2006, Venkatesh & Davis 2000, Venkatesh et al. 2003, Venkatesh & Bala 2008) are widely used tools for analysing innovations in implementing electronic government services. However, these models are unduly focused on the technological aspects emphasizing individual usage pattern issues, despite that technology acceptance is not just an individual matter. Focusing on E-Government organizations, we argue that technology acceptance is an important aspect of transforming public-sector organizations associated with a larger process of technological, organizational, social, and work innovation. Analysing the transformation of public-sector organizations needs to consider the whole innovation process, including the social, organizational, and work-related factors that influence resistance to or support for the new technologies. Innovation and acceptance, or resistance to change, involve the social processes of learning, sense-making, and flexibly adapting the practices taking place in the interactions between the actors involved at different moments of the work-transformation process, as numerous social and organizational research analyses have shown (Brown & Duguid 1991, Weick 1979, Argyris & Schön 1978, Cicourel 1990, Hippel 2001). Moreover, the division and categorization of tasks, as well as their fragmentation and consolidation, may simultaneously occur when introducing electronic tools into the work processes (Huws 2003, Ruiz Ben 2013). This means that new activities, or the recombination and concentration of diversified tasks into a single activity, occur in the innovation process when introducing the electronic tools. Thus, employees themselves must confront the change in requirements for using the electronic tools in their day-to-day tasks, while interacting with their colleagues and informally creating organizational strategies for supporting or resisting the innovation process. In summary, the analysis of E-Government and E-Governance must go beyond the individual and technological perspectives of employees in public-sector organizations. More extensive research should consider how the

multiple contextual, social, functional, and technological factors in the course of a whole innovation process influence the resistance to and support for the electronic records systems in public-sector organizations and specific analysis models are needed for that. Our analysis model is theoretically based on the ideas of Ebbers and van Dijk (2007) (Meier et al. 2013), who consider the total innovation process of introducing electronic tools into public-sector environments. We have, in previous publications, explained our theoretical adaptation of this model for analysing innovation in the public sector (Meier et al. 2013). Our adaptation of the Ebbers and Van Dick (2007) model distinguishes two innovation phases in several dimensions: first, initiation (gestation, perception of urgency, plan) and second, implementation (management involvement, adaptation of the innovation, adaptation of the organizational structure, deploying information systems). Concretely, during these two innovation phases, we concentrate on the following topics: the initial phase focuses on the gestation of the innovation, the perception of an urgency of introducing a new electronic tool, and the plan for introducing it. The implementation phase focuses on involving the management, adapting the technology, adapting the organizational structure, as well as deploying the information systems (Meier et al. 2013).

We have introduced these topics in our WISE Work Index to analyse the impact of innovative E-Government tools in public-sector work environments on our development of TEDS*MOODLE (Scholl et al. 2014). Using the WISE index, we want to overcome not only the linearity of previous theories but also the one-sided perspective of the individually, organizationally, and technologically determined approaches. Our test scenario concretely focuses on determining whether the questions/pointers developed to clarify the evaluation criteria for the users are correctly understood by the respondents. At the same time, the test results offer a short-term, limited view of the respondents' user experiences of applying a particular document management system (DMS) – in this case, eAkte. We apply the WISE Work Index

empirically to answer questions about the introduction of electronic records systems (ERS) in a public-sector organization in Germany. In the next section, we describe our tool WISE and the methodology used for testing it.

3. Methodology and Model Tool Development

The original evaluation tool for IA, the TEDS*MOODLE, was developed according to the methodology of the TEDS framework (Scholl et al. 2011), which itself was a significant extension of the Taylor value-added model of information systems (Taylor 1982), which strongly focused on the needs of the human actors using the information systems. The TEDS framework and the tool TEDS*MOODLE distinguishes the following six main evaluation categories – these are then divided up, using what is known as a scorecard, into further sub-criteria to be applied in the actual assessment of the information artifact: Ease of Use, Noise Reduction, Quality, Adaptability, Performance, and Affection (Scholl et al. 2014). The evaluation tool available with TEDS*MOODLE delivers very detailed results concerning the IA investigated. However, this generated comprehensive framework is an evaluation tool for IA-like information systems and does not provide direct insight into the process of the working itself. Therefore, we changed and reduced the criteria, as well as added new criteria, concerning an evaluation

of the working processes with IA. We introduced other categories about the employees' involvement in the innovation process as well as about their attitudes toward working with the new system and their acceptance of the new electronic tool. We have developed WISE through the combination of these categories theoretically grounded in our extension of the Ebbers and Van Dick analytical model. For checking the validity of our evaluation tool, we have developed a test in one public-sector agency in October 2014. The sample includes 19 people who were asked to participate in the test by the managers of the agency. Two people from the sample did not take part in the test. The test took place in two rooms of the agency where computers were provided. The participants received an Internet address that gave them access to WISE. The participants were informed of the objectives of the test and its importance for the further development of the eAkte. We also showed the participants the structure of the questionnaire and offered them our support whenever they had any technical or comprehension problems. The test took about 45 minutes, and at the end, we also had the opportunity to discuss any redundancies or missing aspects that the test participants thought were particularly relevant to include. Regarding the demographics of the sample, the age groups "31–45 years" and "over 55 years" were particularly strongly represented (see Tab. 1). The distribution of gender

Tab. 1: Test participants' age

Age		Frequency	Per cent
Missing	0	2	10.5
	under 30 years	1	5.3
	between 31 and 45 years	7	36.8
	between 46 and 55 years	3	15.8
	over 55 years	6	31.6
	Sum	17	89.5
Total		19	100.0

was approximately equal (see Tab. 2). Slightly more than half of the participants have been working in the organization for more than 20 years (Tab. 3), and a majority of over 70% have had several years of experience with the eAkte (Tab. 4).

4. Results

4.1 Attitudes toward the impact of working with the eAkte

4.1.1 Usage behaviour

Frequency of use (time utility): The majority of the participants (31.8%) are using eAkte throughout their working day (7–8 hours). There are no participants using the tool for less than three hours per day (see Fig. 1).

Printing behaviour (print behavior): Although most of the participants (28.6%) print documents very rarely, a certain proportion of participants (19%) still do it.

4.1.2 Perceived advantages of working with the eAkte

Access to the documents (files access): As shown in Fig. 2, the majority of the participants (47.6%) agree and 28.6% of the participants strongly agree with the statement that they have better access to documents when using the eAkte than when not using it. Only 4.8% of the participants do not agree that the tool led to an improvement in document accessibility.

Reduction in face-to-face communication (communication shortcuts): Although most of the participants (28.6%) show a neutral attitude toward the statement about the reduction in face-to-face communication caused by using the eAkte 23.8% agree, and a further 23.8% of the participants strongly agree with the statement.

Reduction in team communication (communication shortcuts in team): In contrast to the previous item, although most of the participants (33.3%) express a neutral opinion about the statement regarding the reduction in team communica-

Tab. 2: Test participants' gender

Gender		Frequency	Per cent
Missing	0	2	10.5
	women	9	47.4
	men	8	42.1
	Sum	17	89.5
Total		19	100.0

Tab. 3: Test participants' length of experience in the agency

Experience in the Organisation		Frequency	Per cent
Missing	0	2	10.5
	10 to 20 years	6	31.6
	over 20 years	11	57.9
	Sum	17	89.5
Total		19	100.0

Tab. 4: Test participants' length of experience with the E-Akte

Experience with the Tool		Frequency	Per cent
Missing	0	2	10.5
	under 2 years	3	15.8
	2 to 5 years	14	73.7
	Sum	17	89.5
Total		19	100.0

tion as a result of working with the eAkte, 28.6% of the participants do not agree and 4.8% strongly disagree, 14.3% agree and 9.5% strongly agree with this statement. This means that the participants see the eAkte as affecting the reduction of face-to-face communication, but not team communication, which might indicate that

technology-based communication has replaced face-to-face communication for team working purposes.

Improvement of work quality (work quality): When asked about the improvement of work quality through using the eAkte, most of the participants (33.3%) express a neutral opinion.

However, 28.6% of the participants do not agree that the eAkte has improved the quality of their work, and 19% of the participants strongly disagree with the statement.

Acceleration of work output (work-flow speed): Work output has been accelerated by using the eAkte, in the opinion of the majority of the participants (38.1%). Nevertheless, 19% of the participants express a neutral opinion about the statement. 14.3% do not agree, and 9.5% strongly disagree with the statement.

Improvement of work output (process amount): Although most of the participants (28.6%) agree with the statement that they achieve an improvement in their work output using the eAkte, 19% of the participants show a neutral opinion about the statement. Moreover, 19% of the participants do not agree, and a further 19% strongly disagree with the statement.

In summary, while running the implementation phase of the innovation with the eAkte, the employees perceive some benefits in their work using the new tool regarding access to documents or improving their work output. However, the employees do not strongly agree with the benefits of the eAkte in their work. Moreover, they show that their communication habits have changed by the eAkte usage during the innovation journey.

4.1.3 Technology Acceptance Model (TAM)

Ease of use (easy to use): The majority of the participants (47.6 %) agree that the eAkte is easy to use and 9.5% totally agree with the statement (Fig. 3). However, 23.8% have a neutral opinion and 9.5% do not agree that the usage of the eAkte is easy.

Clarity of use (handling): Although a majority of the participants (38.1%) agree that the use of the eAkte is clear and understandable, 33.3% of the participants have a neutral opinion, and 14.3% do not agree with the statement.

Productivity: A majority of the participants (42.9%) agree that they can be more productive in their work using the eAkte. However, 23.8% of the participants have a neutral opinion, 19% do not agree, and 4.8% strongly disagree with the statement.

Usefulness: The majority of the participants have a positive opinion

about the usefulness of the eAkte for their work (33.3% totally agree, and 33.3% agree with the statement). 14.3% of the participants have a neutral opinion about the usefulness of the tool for their work. 4.8% do not agree and 4.8% strongly disagree.

Also, regarding the acceptance of the new electronic tool, the participants

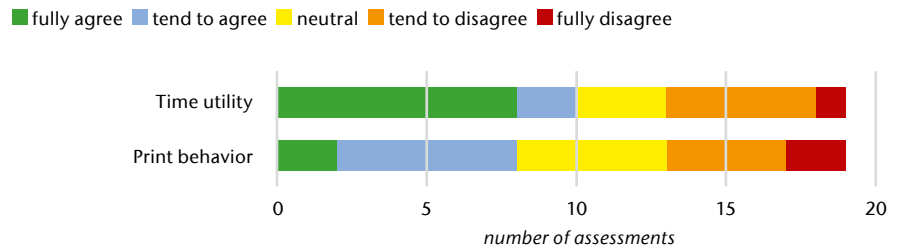


Fig. 1) Usage behaviour

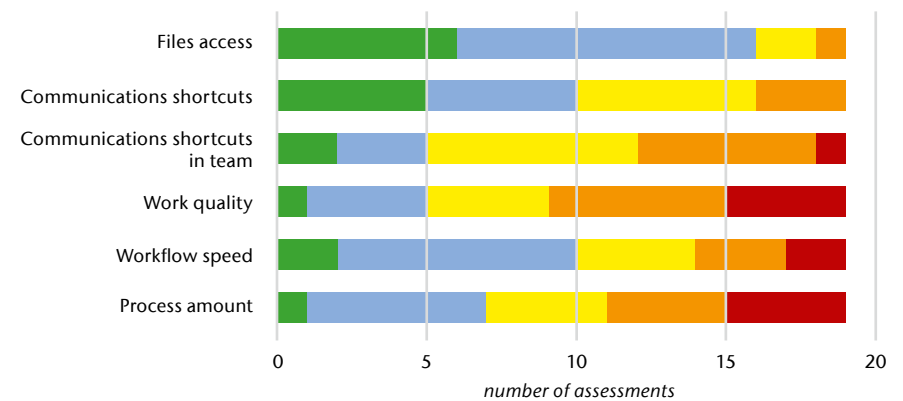


Fig. 2) Perceived advantages of working with the eAkte

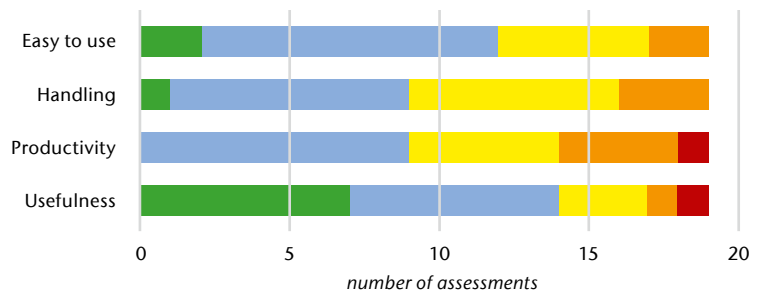


Fig. 3) Technology Acceptance Model (TAM)

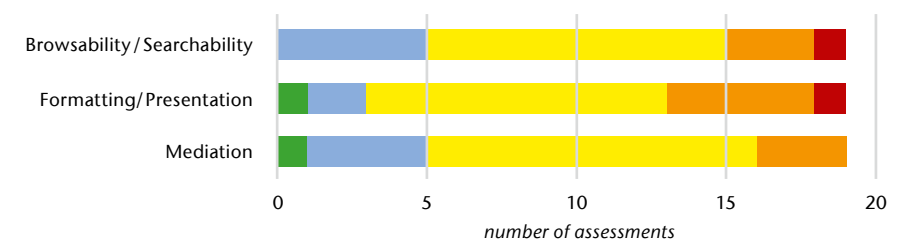


Fig. 4) User friendliness

express their agreement with the tool's usefulness for their work and their productivity. Moreover, they mostly perceive the tool as easy to use, even if in this last case, a third of the participants show a neutral opinion.

4.2 Attitudes toward the content and functionality of the eAkte

4.2.1 User friendliness

Ease of search facilities (browsability/searchability): A majority of the participants (47.6%) have a neutral opinion about the ease with which information can be found using the eAkte. 23.8% of the participants agree that the eAkte is easy to use for information searching. However, 14.3% of the participants do not agree with the statement, and 4.8% strongly disagree with it (Fig. 4).

Friendliness of design and format (formatting/presentation): As regards the friendliness of the eAkte's design and format, the majority of the test participants (47.6%) express a neutral opinion. However, whereas in the positive attitude area, 4.8% of the participants strongly agree with the statement, and 9.5% agree with it, in the negative attitude area, 23.8% of the participants do not agree with the statement, and 4.8% strongly disagree.

Information guide (mediation): With regard to the statement about the existence of a clear information guide in the system, the majority of the participants (52.4%) have a neutral opinion. However, a larger proportion of the participants position themselves as having a positive attitude about the statement: 19% agree and 4.8% strongly agree with it, whereas 14.3% disagree with the statement.

4.2.3 Information delivery

Effectiveness of information identification (item identification): In respect to the statement about the effectiveness of identifying information with the eAkte, the majority of the test participants (47.6%) have a neutral attitude (Fig. 5). Nonetheless, 28.6% of the participants agree that identifying

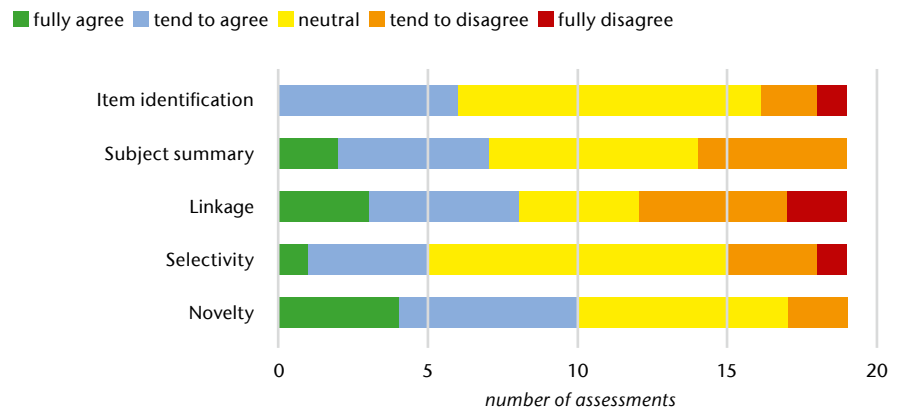


Fig. 5) Information delivery

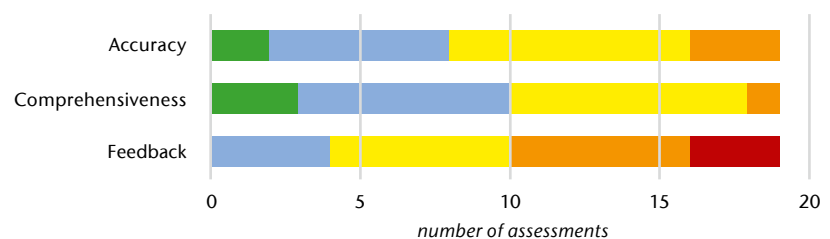


Fig. 6) Quality of the delivered information and feedback

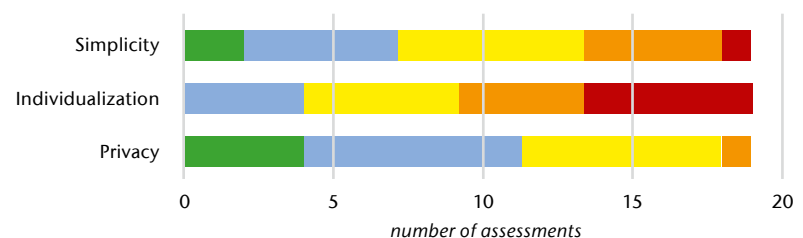


Fig. 7) Adaptability of the eAkte

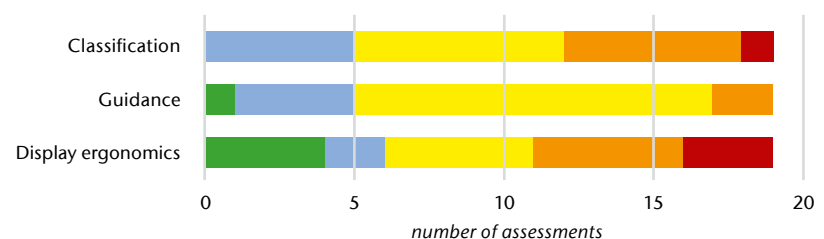


Fig. 8) Additional features

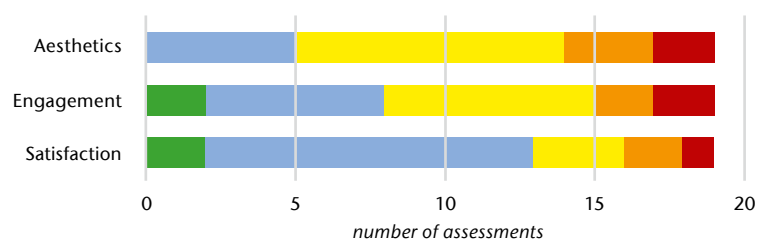


Fig. 9) Emotional Attitudes

the information using the eAkte is effective for their work. In the negative attitude area, 9.5% of the participants do not agree, and 4.8% strongly disagree with the statement.

Information summary (subject summary): As regards the effectiveness of the eAkte's information summary for their work, a majority of the test participants (33.3%) have a neutral attitude. However, on the positive area of the scale, 23.8% agree with the effectiveness of the information summary, and 9.5% strongly agree with the statement. 23.8% of the test participants do not agree with the statement.

Information linkages (linkage): The attitudes of the test participants toward the effectiveness of the information linkages included in the eAkte are mostly positive: 23.8% of the participants agree with the statement, and 14.3% strongly agree with it. 19% of the participants have a neutral attitude. 23.8% do not agree with the statement, and 9.5% strongly disagree.

Information selection (selectivity): The majority of the test participants (42.9%) agree with the statement that specific information requested can be found using the eAkte. However, 23.8% have a neutral attitude, 14.3% do not agree with the statement, and 4.8% strongly disagree.

Current relevance of the information (novelty): Although a majority of the test participants have a neutral opinion about the current relevance of the information included in the eAkte, most of the participants position themselves on the positive attitude area of the scale: 28.6% agree with the statement, and 19% strongly agree with it.

4.2.4 Quality of the delivered information and feedback

Accuracy of the information (accuracy): The majority of the test participants (38.1%) have a neutral opinion about the accuracy of the information included in the eAkte. However, 28.6% agree that the information included in the tool is accurate, and 9.5% strongly

agree with the statement. 14.3% do not agree with this statement (Fig. 6).

Completeness of the information (comprehensiveness): Although the majority of the test participants (38.1%) have a neutral opinion about the completeness of the information available in the eAkte, most of the participants position themselves on the positive area of the attitude scale: 33.3% of the participants agree with the statement, and 14.3% strongly agree with it. Only 4.8% do not agree with the statement.

Feedback: Most of the test participants have a negative attitude about the possibility of giving feedback in the eAkte: 28.6% do not agree with the statement, and 14.3% strongly disagree. However, 19% of the participants agree with the statement, and 28.6% express a neutral opinion.

4.2.5 Adaptability of the eAkte

Design simplicity (simplicity): Although a majority of the test participants (28.6%) show a neutral attitude toward the simplicity of the eAkte design (Fig. 7), the proportion of participants positioning themselves on the positive or in the negative area of the attitude scale is relatively even. 23.8% of the participants agree with the statement, and 9.5% strongly agree, whereas 23.8% do not agree, and 4.8% strongly disagree with the statement.

Individual adaptability (individualization): A majority of the test participants (28.6%) strongly disagree with the statement that it is possible to customize the tool, while 19% of the participants disagree with the statement. 23.8% of the test participants have a neutral attitude toward the statement, and 19% agree that they have the opportunity to individually adapt the tool.

Data privacy (privacy): As regards the privacy of the data included in the eAkte, most of the test participants have a positive attitude: 33.3% agree with the statement, and 19% strongly agree with it. 33.3% have a neutral opinion, while only 4.8% of the par-

ticipants disagree with the statement. **Classification:** A majority of the test participants (33.3%) have a neutral attitude toward the statement that the classification of the information included in the eAkte is helpful for their work (Fig. 8). Nonetheless, most of the participants position themselves in the negative attitude area of the scale: 28.6% do not agree that the classification is helpful, and 4.8% strongly disagree with the statement. 23.8% of the participants agree that the classification of the information is helpful in improving the effectiveness of their work.

User help (guidance): A majority of the test participants (57.1%) have a neutral attitude toward the statement that the available user help is useful in their work. However, 19% agree with the statement, and 4.8% strongly agree with it, while 9.5% disagree.

Design (display ergonomics): Most of the test participants position themselves in the negative attitude area of the scale: 23.8% do not agree with the statement that the design of the eAkte is visually helpful for them to complete their work effectively, and 14.3% strongly disagree with this statement. Nonetheless, 19% of the participants strongly agree with the statement, and 9.5% simply agree with it. 23.8% have a neutral attitude toward the statement.

4.2.6 Emotional Attitudes

Aesthetics of the eAkte design: A majority of the test participants (42.9%) have a neutral attitude toward the statement aesthetics design working with the eAkte. 23.8% agree with this statement, whereas 14.3% of the participants do not agree and 9.5% strongly disagree with it (Fig. 9).

Attractiveness of information and elements (engagement): 9.5% of the users strongly agree that the existing system eAkte has a stimulating appeal. About 20% tend to contradict this. But the majority feels that an attractiveness of the system for their own commitment is quite given or is neutral.

Satisfaction with the eAkte: A major-

ity of the participants (52.4%) are satisfied with the use of the eAkte. 9.5% strongly agree that they are satisfied with the use of the tool. However, 9.5% do not agree, and 4.8% strongly disagree with the statement.

5. Discussion

The results of our test show that even if the adoption of the eAkte in the public organization is positive in general terms, some aspects related to the adaptability, the additional features, as well as the possibilities to give feedback about the tool are not very positive among the employees' responses. Particularly the possibility of giving feedback could be an important feature to integrate into the E-Government tool to enable a participatory "innovation journey" of the IT instrument and to enhance the attitudes of the employees toward its use.

Regarding the development of our analysis tool, the integration of the items selected about the attitudes toward the impact of working with an ERS enhances the measuring accuracy of the TEDS instrument, which focuses on the evaluation of Information Artifacts (IA). Until now, this tool has been mostly used for the analysis of web sites. In some cases, it has been used to analyse other types of IA. However, an adaptation and reinterpretation of the included items was needed (Scholl 2015). In the case of the extension of the WISE Work Index, including TAM questions and items, it is related to the perceived advantages of working with the eAkte and allows a specific analysis of the impact of ERS innovations on any work in this regard.

Departing from the concrete descriptive test results described in previous chapters, we can see that the usage behaviour of the document management system eAkte still involves the printing of documents. Even though the duration of using of the eAkte is never shorter than three hours during the working time, the test participants do still print their documents. An open question related to this is, what the possible variations of time use and printing behaviours are and what factors contribute to them. Another important open question concerns the relation between the functionality of

the eAkte and the improvement of work quality. As the test results show, a majority of the test participants agree on the impact of the eAkte on the acceleration of delivering work outputs; however, regarding the impact on the improvement of work quality, the results are rather negative. Further analysis should be conducted to find out which specific factors lead to this negative attitude, and whether it is related to TAM items as well. An important additional information to be added to the WISE Work Index is the particular use of the eAkte in the day-to-day work beyond the time use. Depending on the particular function and area of work, the eAkte is more or less relevant for the work of the public organization members. In the next to last section, we include some ideas to improve the accuracy of the WISE Work Index.

6. Outlook

In this paper, we have concentrated on the description of the attitudes toward the ERS (particularly the document management system eAkte). However, our new analysis instrument WISE Work Index allows us to further analyse the impact of content and functionality of the ERS on the attitudes toward working with the ERS. Moreover, the WISE Work Index can be applied for longitudinal analysis of innovation with ERS in public organizations. Thus, the WISE Work Index significantly contributes to enhancing the research of innovation in and with E-Government which is still in its infancy.

Other important decisions to be taken for improving the WISE Work Index consists of reducing the number of items and changing the five-point scale. As we can see in our test results, the responses to the last items particularly cumulate in the neutral area (Point 3 of the Likert scale). This could be an indication of the participants' tiredness due to an excessively long questionnaire, a misunderstanding, or the inaccuracy of the item, etc. Already in the beginning of the seventies, it was noted that the decision about the adequate number of points in Likert scales represents a difficult dilemma: the use of a neutral value can easily result in an "escape" for respondents.

Nevertheless, forcing response dichotomies can lead to non-sincere answers: "On the one hand, this is sometimes considered inadvisable because it provides too easy and attractive an escape for respondents who are disinclined to express a definite view. On the other, forcing responses into an agree or disagree format is likely to cause difficulty for many respondents. It is also likely to yield results that are less realistic and more misleading than is true when an intermediate reply is provided for" (Matell & Jacoby 1972). A decision should also be taken considering a reduction in the number of items. As some participants pointed out, some items corresponding, for example, to the accuracy of information provided are not relevant because the information included in the eAkte cannot be changed or doubted. However, looking beyond the application of the WISE Work Index for analysing other ERS in E-Government, an earlier research about the possibilities of changing the information provided in ERS is needed in order to adapt the items.

For further developing the instrument to extend its application to a wide analysis of innovation in and with E-Government, we aim at conducting a factor analysis as well as a reliability testing of our results. This analysis would go beyond the framework of this paper.

This article is the unabridged version of Ben Ruiz, E., Scholl, M., & Ehrlich, E. (2016). Exploring the adoption of E-Government Tools with WISE Work Index (shortened version) International conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPE5)-2016.

REFERENCES

- Argyris C, Schön DA (1978) Organizational Learning. A Theory of Action Perspective. Organization development series. Addison-Wesley Pub. Co, Reading, Mass. ISBN: 978-0201001747
- Brown JS, Duguid P (1991) Organizational Learning and Communities-of-Practice: Toward a Unified View of Working, Learning, and Innovation. *Organizational Science* 2(1):40–57
- Cicourel AV (1990) The integration of distributed knowledge in collaborative medical diagnosis. In: Galegher J, Kraut RE (eds) *Intellectual teamwork. Social and technological foundations of cooperative work*. Erlbaum, Hillsdale, NJ, ISBN: 0-8058-0534-6, pp 221–242
- Davis FD (1985) A technology acceptance model for empirically testing new end-user information systems: theory and results. Dissertation, Cambridge University
- Davis FD, Bagozzi RP, Warshaw PR (1989) User Acceptance of Computer Technology. A Comparison of Two Theoretical Models. *Management Science* 35(8):982–1003. doi: 10.1287/mnsc.35.8.982
- Ebbers WE, van Dijk J (2007) Resistance and support to electronic government, building a model of innovation. *Government Information Quarterly* 24(3):554–575. doi: 10.1016/j.giq.2006.09.008
- Hippel Ev (2001) User toolkits for innovation. *Journal of Product Innovation Management* 18(4):247–257. doi: 10.1111/1540-5885.1840247
- Huus U (2003) *The making of a cyberariat. Virtual work in a real world*, 1. ed. Monthly Review Press, New York, NY. ISBN: 1583670874
- King WR, He J (2006) A meta-analysis of the technology acceptance model. *Information & Management* 43(6):740–755. doi: 10.1016/j.im.2006.05.003
- Matell MS, Jacoby J (1972) Is there an optimal number of alternatives for Likert-scale items? Effects of testing time and scale properties. *Journal of Applied Psychology* 56(6):506–509. doi: 10.1037/h0033601
- Meier R, Ruiz Ben E, Schuppan T (2013) ICT-enabled public sector organisational transformation: Factors constituting resistance to change. *Information Polity* 18(4)
- Ruiz Ben E (2013) *Internationale Professionalität. Transformation der Arbeit und des Wissens in transnationalen Arbeitsfeldern*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. ISBN: 9783531931838
- Ruiz Ben E, Schuppan T (2014) E-Government Innovations and Work Transformations: Implications of the Introduction of Electronic Tools in Public Government Organizations. *IJEGR* 10(1):1–17. doi: 10.4018/ije-gr.2014010101
- Scholl HJ, Eisenberg MB, Dirks L, Carlson TS (2011) The TEDS framework for assessing information systems from a human actors' perspective: Extending and repurposing Taylor's Value-Added Model. *J Am Soc Inf Sci Tec* 62(4):789–804. doi: 10.1002/asi.21500
- Scholl M (2015) An Implementation of User-Experience-Based Evaluation to Achieve Transparency in the Usage and Design of Information Artifacts. In: *Proc 48th Hawai'i Int Conf System Sciences (HICSS)*, 5–8 Jan 2015, Kaua'i. IEEE, pp 21–32. doi: 10.1109/HICSS.2015.14
- Scholl M, Ehrlich E-P, Wiesner-Steiner A, Edich D (2014) The Project TEDS@wildau. TEDS Framework Integration into the Moodle Platform for User-Specific Quality Assurance of Learning Scenarios. In: *Proc 47th Hawai'i Int Conf System Sciences (HICSS)*, 6–9 Jan 2014, Waikoloa. IEEE, ISBN: 978-1-4799-2504-9, pp 1935–1945
- Taylor RS (1982) Value-Added Processes in the Information Life Cycle. *J Am Soc Inf Sci* 33(5):341–346. doi: 10.1002/asi.4630330517

Venkatesh V, Bala H (2008) Technology Acceptance Model 3 and a Research Agenda on Interventions. *Decision Sciences* 39(2):273–315. doi: 10.1111/j.1540-5915.2008.00192.x

Venkatesh V, Davis FD (2000) A Theoretical Extension of the Technology Acceptance Model. Four Longitudinal Field Studies. *Management Science* 46(2):186–204. doi: 10.1287/mnsc.46.2.186.11926

Venkatesh V, Morris MG, Davis GB, Davis FD (2003) User Acceptance of Information Technology: Toward a Unified View. *MIS Quarterly* 27(3):425–478

Weick KE (1979) *The social psychology of organizing*, 2. ed. Topics in social psychology. McGraw-Hill Inc, New York. ISBN: 0075548089

AUTHORS

PD Dr. Esther Ruiz Ben
Technische Universität Berlin (TU Berlin)
Technik- und Innovationssoziologie

Prof. Dr. rer. nat. Margit Scholl
Dipl.-Wirt.-Inf. (FH) Ernst Peter Ehrlich
Technische Hochschule Wildau
Fachgebiet Wirtschafts- und Verwaltungsinformatik

E-Mail for correspondence:
margit.scholl@th-wildau.de



Chip-integrierte photonische Bauelemente

Patrick Steglich*, Claus Villringer, Silvio Pulwer, Birgit Dietzel, Viachaslau Ksianzou und Sigurd Schrader

Zusammenfassung

In unserer hochtechnologisierten Gesellschaft spielt die optische Datenübertragung aufgrund der stetig wachsenden Informationsvielfalt eine immer bedeutendere Rolle. In den Anfängen der Nachrichtentechnik waren Datenraten von wenigen bit/s realisierbar. Heute werden mittels optischer Technologien Übertragungsraten von mehreren Gbit/s umgesetzt. Möglich wird dies durch neue Entwicklungen in der Chip-integrierten Photonik. Beispiele dafür sind Chip-integrierte elektrooptische Modulatoren und Schalter. In diesem Artikel werden neue Entwicklungen in der Chip-integrierten Photonik diskutiert und die experimentelle Charakterisierung der Bauelemente in Form eines Ringresonators beschrieben. Für die Experimente wird exemplarisch ein photonisches Bauelement genutzt, das aus einem hybriden Silizium-Polymer-Materialsystem besetzt. Die Ergebnisse zeigen, dass diese Materialkombination vielversprechend für zukünftige Chip-integrierte photonische Bauelemente mit extrem geringem Energiebedarf ist.

Abstract

The focus on high-tech in our society makes optical data transmission increasingly important due to the continually growing diversity of information. At the very beginning of integrated photonics, the data rates achieved were only a few bit/s. Today, transfer rates of several Gbit/s are possible due to novel chip-integrated devices such as electro-optical modulators and switches. This trend was made possible due to new developments in the field of chip-integrated photonics. In this article, we discuss latest developments in the field of chip-integrated photonic devices and describe their experimental characterization. The experimental setup is developed and described in detail. The example used in our experiments is a hybrid silicon-polymer material system. Our results show that the hybrid material approach is a promising candidate for future on-chip integrated photonic devices with low power consumption.

1. Einführung

In dem Artikel „Integrated Optics: An Introduction“ formulierte Miller im Jahre 1969 erstmals die Idee, optische Komponenten zu miniaturisieren und in Analogie zur Elektronik verschiedene Komponenten auf einem gemeinsamen Substrat zu integrieren (Miller 1969). Diese integrierten optischen Schaltkreise basieren auf optischen Wellenleitern und funktionellen Komponenten. Beispiele für funktionelle Komponenten sind elektrooptische Modulatoren und Schalter, die in Abhängigkeit von einer Spannung das Licht modulieren bzw. schalten.

Elektrooptische Modulatoren haben sich für Langstrecken (long-haul) und Mittelstrecken (z. B. Metropolitan Area Networks) als Signalwandler von elektrischen Signalen in Lichtsignale etabliert. Die Integration von elektro-

optischen Modulatoren als aktiver Teil für die Übertragung optischer Signale im Kurzstreckebereich (Local Area Networks, FTTH – Fibre To The Home, Rack-to-Rack, Board-to-Board), aber auch für die integrierte Optik (Chip-to-Board, On-Chip) sind Entwicklungsziele der nächsten Jahre. Aufgrund der technologisch ausgereiften, zuverlässigen und kostengünstigen CMOS-Technologie (CMOS – Complementary Metal Oxide Semiconductor) gelten elektrooptische Modulatoren auf der Basis der Siliziumtechnologie als aussichtsreiche Kandidaten für Massenprodukte mit potentiell hoher Marktdurchdringung.

Bandbreiten und Übertragungsgeschwindigkeiten optischer Signale in siliziumbasierten Modulatoren sind jedoch aufgrund geringer und verlustbehafteter optischer Nichtlinearitäten von Silizium auf einen Bereich von ei-

nigen zehn Gbit/s beschränkt. Ursache dafür sind die relativ geringe Ladungsträgerbeweglichkeit und die hohen Ladungsträgerlebensdauern bei dissipativen (resonanten) Prozessen wie der resonanten Zweiphotonenabsorption oder der Absorption durch freie Ladungsträger.

2. Neue Entwicklungen in der Chip-integrierten Photonik

Heute werden Chip-integrierte Komponenten aus Silizium, funktionellen Polymeren oder aus einer Kombination beider Materialien hergestellt. Letzteres hat sich in den vergangenen Jahren durch die Kombination der Vorteile beider Materialeigenschaften und die Entwicklung von neuartigen organischen Materialien für elektrooptische Anwendungen immer mehr etabliert und wird im Folgenden als

* korrespondierender Autor

Silizium-Organik-Hybrid-(SOH)-Photonik bezeichnet (Korn et al. 2014). Zur Erhöhung der Übertragungsgeschwindigkeit ist es notwendig, alternative Materialien einzusetzen, die kürzere inhärente Schaltzeiten für elektrische bzw. optische Signalübertragungsvorgänge aufweisen und höherwertige digitale Modulationsarten wie die Quadraturamplitudenmodulation (QAM) ermöglichen. Dazu ist eine gleichzeitige, voneinander unabhängige Amplituden- und Phasenmodulation nötig. Im Fall von Halbleitermaterialien wie Silizium ist dies wegen der resonanten Anregungsprozesse nicht realisierbar. Deshalb sind organische Materialien von besonderem Interesse, welche hohe dispersive (off-resonante) optische Nichtlinearitäten aufweisen, weil mit ihnen Amplitude, Phase und ggf. die Polarisation optischer Felder unabhängig voneinander beeinflusst werden können und diese Materialien daher für die QAM prädestiniert sind. Die SOH-Technologie nutzt die Vorteile der etablierten CMOS-Technologie, um neuartige integrierte photonische Bauelemente zu schaffen, in welche organische Materialien mit besonderen linearen und nichtlinearen optischen Eigenschaften implementiert sind. Eine wichtige Variante der SOH-Photonik nutzt mikro- und nanostrukturierte Siliziumsubstrate mit vorgefertigten Bauelementstrukturen, in welche die organischen Funktionsmaterialien mit geeigneten Depositionsmethoden an speziellen Bereichen, wie beispielsweise der Kavität eines Fabry-Perot-Interferometers oder Ringresonators, eingebracht werden.

Neue Entwicklungen im Bereich des Bauelementdesigns im Bereich der SOH-Photonik führten zudem zu einem großen Interesse in der Forschung. Durch die Optimierung der Wellenleiterstrukturen gelang es, die Vorteile organischer Materialien zu nutzen und gleichzeitig auf etablierte Herstellungsverfahren der Halbleitertechnologie zurückzugreifen (Steglich et al. 2015b, 2015c). So konnte kürzlich ein effektiver optischer Schalter auf der Basis einer Siliziumtechnologie hergestellt werden, der zusätzlich elektrooptische Polymere neben dem Silizium als aktives Material nutzt (Steglich et al. 2015a, 2016a, 2016b). Nicht nur die Bauelementdesigns, son-

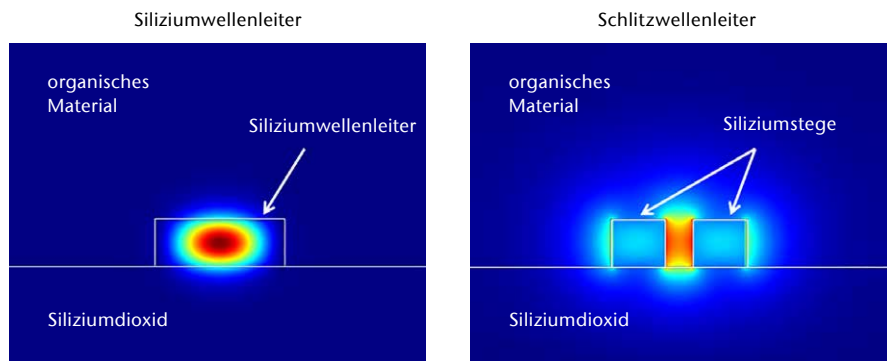


Abb. 1) Querschnitt durch einen herkömmlichen Siliziumwellenleiter (links) und dessen Feldverteilung im Vergleich zu einem Schlitzwellenleiter (rechts). Die Feldüberhöhung im Schlitzwellenleiter ermöglicht eine effiziente Nutzung der optischen Nichtlinearität des im Schlitzwellenleiter deponierten organischen Funktionsmaterials (Steglich et al. 2015c).

dern auch elektrooptische Polymere konnten in den letzten Jahrzehnten weiterentwickelt werden und erreichen mittlerweile lineare elektrooptische Koeffizienten von bis zu 230 pm/V (Dalton 2010). Die Polymere dienen als Cladding, also als Mantelmaterial, und werden dementsprechend direkt auf den Siliziumwellenleiter deponiert.

Abb. 1 zeigt zwei verschiedene Wellenleiterarten, den Kanalwellenleiter und den Schlitzwellenleiter. Sie stellt vergleichend das optische Feld dar, welches von einem gewöhnlichen Siliziumwellenleiter bzw. einem Schlitzwellenleiter geführt wird. Dabei bilden Hochindexkontrastwellenleiter, wie Schlitzwellenleiter auch genannt

werden, das Schlüsselbauelement zur Implementierung organischer Materialien in die Silizium-Photonik. Von Vorteil ist hierbei die Eigenheit von Schlitzwellenleitern, dass ein Großteil des Lichts im Schlitz zwischen den beiden Siliziumstegen des Wellenleiters geführt wird, also dort, wo sich auch das organische Material befindet. Die Folge ist eine höhere Interaktion des geführten Lichts und des aktiven Polymers.

Der Grund für die Lichtverstärkung im Schlitz ist folgender: Der hohe Brechungsindexkontrast zwischen Silizium ($n = 3,48$) und dem organischen Material ($n = 1,3$ bis $1,8$) verursacht eine hohe Diskontinuität der optischen Feldstärkeamplituden an den Grenz-

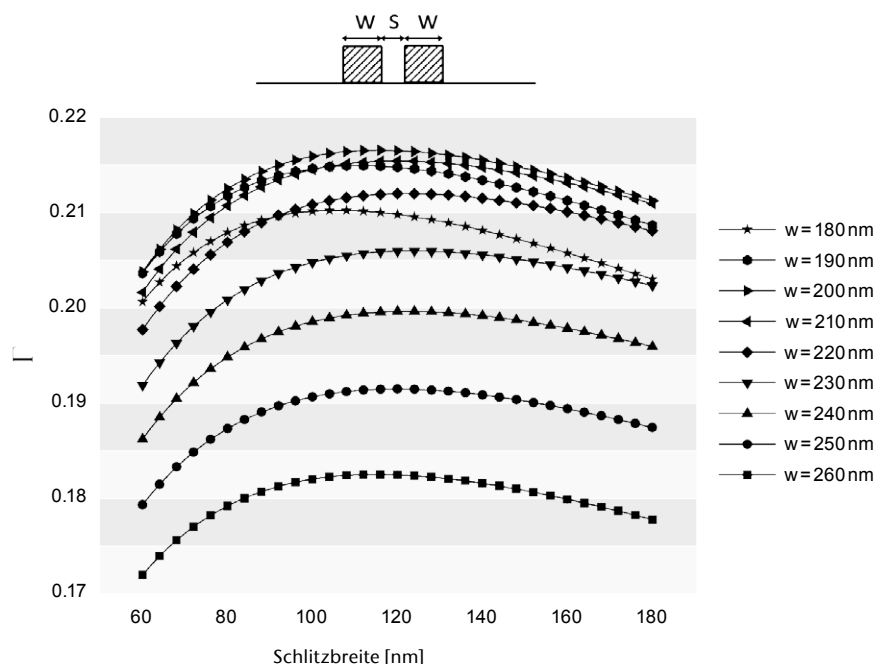


Abb. 2) Simulierter Field Confinement Factor eines Schlitzwellenleiters in Abhängigkeit von der Schlitzbreite und der Stegbreite als Parameter (Steglich et al. 2015c).

flächen zwischen beiden Materialien, was zu einer starken Konzentration des im Schlitz geführten Lichts führt. Ein Maß für die Lichtkonzentration ist der sogenannte Field Confinement Factor. Der Field Confinement Factor

$$\Gamma = \frac{\iint_{\text{Schlitz}} \text{Re}(\vec{E} \cdot \vec{H}^*) dA}{\iint_{\text{Total}} \text{Re}(\vec{E} \cdot \vec{H}^*) dA}$$

wird definiert als Verhältnis der im Zeitmittel im Schlitz transferierten Leistung zur zeitlich gemittelten Leistung, welche insgesamt im System übertragen wird.

Abb. 2 zeigt die Ergebnisse einer Simulationsstudie für eine vorgegebene Lichtwellenlänge von 1550 nm. Dargestellt ist der Field Confinement Factor in Abhängigkeit von der Schlitzbreite w und der Stegbreite w .

Nicht nur Wellenleiterarten sind in den letzten Jahren entstanden, auch photonische Bauelemente wie Ringresonatoren wurden weiterentwickelt. Ringresonatoren, basierend auf Schlitzwellenleitern mit elektronischen Kontakten, besitzen kleine Q-Faktoren, auch Gütefaktoren genannt. Der Gütefaktor ist die Gesamtenergie des im Resonator geführten Lichts in Bezug auf den auftretenden Energieverlust pro Umlauf. Resonatoren für

optische Modulatoren benötigen Gütefaktoren von 10.000 bis 30.000, was mit Resonatoren, auf Schlitzwellenleitern basieren, nicht möglich ist.

Bisherige Resonatoren, basierend auf Schlitzwellenleitern mit elektronischen Kontakten, besitzen Gütefaktoren von bis zu 5.000 (Gould et al. 2011). Grund dafür ist, dass die elektronischen Kontakte den Q-Faktor reduzieren, da sie zu höheren optischen Verlusten aufgrund von Absorption durch freie Ladungsträger führen. Die elektronischen Kontakte sind allerdings notwendig, um das geführte Licht aktiv schalten zu können. Ein weiterer Grund für die kleinen Gütefaktoren sind die hohen optischen Verluste an den kleinen Ringradien. Mit dem an der TH Wildau entwickelten Konzept des teilweise geschlitzten Resonators lassen sich diese Verluste verringern, so dass Gütefaktoren von 10.000 bis 100.000 erreicht worden sind (Steglich et al. 2015a).

Das neue Konzept besteht darin, dass ein Schlitzwellenleiter mit herkömmlichen Siliziumwellenleitern kombiniert wird. Dies führt zu einer Reduktion optischer Verluste an den kritischen Stellen, wie an den erwähnten Ringradien. Diese Kombination erlaubt eine Erhöhung der Übertragungsgeschwindigkeit bzw. der Sensitivität eines entsprechenden optischen Sensors. Ein weiterer erfinderischer Schritt des neuen Konzepts liegt in der

Nutzung eines sogenannten Strip-to-Slot-Mode-Converters, durch welchen man Licht von der einen zur anderen Lichtwellenleiterart mit geringen optischen Verlusten einkoppeln kann. Diese Lichtkonverter wurden direkt als Teil des Resonators implementiert und nicht, wie bisher üblich, vor dem Resonator platziert (Steglich et al. 2016a).

3. Experimentelle Charakterisierung Chip-integrierter photonischer Bauelemente

Für die optische Charakterisierung der photonischen Bauelemente wurde ein Messplatz aufgebaut, der es erlaubt, sowohl passive als auch aktive Messungen vorzunehmen. Abb. 4 zeigt den gesamten Aufbau und eine Vergrößerung der Faserkopplung mit der das Licht in den Chip eingekoppelt wird. Mit passiven Messungen sind optische Transmissionsmessungen gemeint. Als aktive Messungen werden die Transmissionsmessungen bei gleichzeitigem Anlegen einer elektrischen Spannung, die einen elektrooptischen Effekt hervorruft und so das Transmissionsverhalten des Ringresonators beeinflussen. Für die Messungen wird eine Superlumineszenz-Diode oder ein durchstimmbarer Laser verwendet, deren Licht durch Koppelgitter in den Siliziumwellenleiter ein- und wieder ausgekoppelt wird. Zur Justage der optischen Fasern wer-

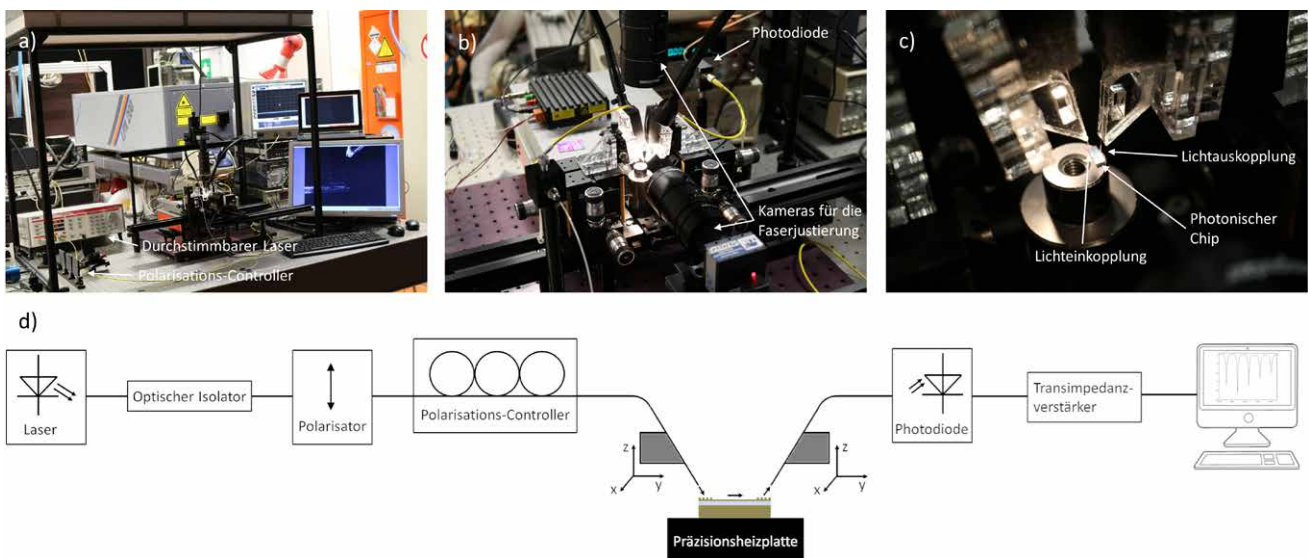


Abb. 3) Experimenteller Aufbau zur optischen Charakterisierung Chip-integrierter photonischer Bauelemente. Das Licht eines durchstimmbaren Lasers bzw. einer Superlumineszenzdiode wird über optische Fasern und ein Koppelgitter in den Chip ein- und ausgekoppelt. Zur Einstellung des Polarisationszustandes wird ein Polarisations-Controller genutzt und als Detektor dient eine rauscharme InGaAs-Photodiode. Der gesamte Aufbau befindet sich unter einer Flow-Box zur Vermeidung einer Kontamination der Chips.

den zwei Kameras verwendet, um optimale Verhältnisse für das Ein- und Auskoppeln des Laserlichts in den Chip zu erreichen. Das in Abb. 4 gezeigte Spektrum eines teilweise geschlitzten Ringresonators wurde mit einem optischen Spektrenanalysator (Optical Spectrum Analyzer – OSA) aufgenommen. Das erhaltene Spektrum zeigt extrem scharfe Peaks, die sehr schmalbandig sind und einen großen Dämpfungsfaktor besitzen. Zur hochgenauen Charakterisierung der Transmissionspeaks wird ein durchstimmbarer Laser verwendet. Zur Detektion des Laserlichts wird dabei eine rauscharme Avalanche Photodiode mit hoher Verstärkung statt eines OSA verwendet.

Um die Messungen durchführen zu können, wurde der Schutzlack der Chips in einem Aceton-Bad entfernt. Der Schutzlack war in einem zusätzlichen Prozessschritt aufgebracht worden, um die Chips ohne Beeinträchtigung der Photonik-Strukturen vereinzeln zu können. Anschließend erfolgte die Beschichtung mit elektrooptischen Polymeren mittels Spin-Coatings. Um sicherzustellen, dass kein Lösungsmittel in der Polymermatrix gebunden war, wurden die Chips nach dem Spin-Coating in einem Vakuumofen bei 90 °C über Nacht ausgeheizt. Als Lösungsmittel diente bei allen Experimenten 1.1.2.2-Tetrachlorethan. Für die ersten Experimen-

te wurde ein in der Verarbeitung und Handhabung einfaches Polymersystem gewählt, welches aus kommerziell erhältlichen, preiswerten Materialien besteht und für Voruntersuchungen qualitativ ausreichende lineare und nichtlineare optische Eigenschaften aufweist. Diese Polymerkomposite bestanden aus einer Polymermatrix, Polymethylmethacrylat (PMMA) und dem – typischerweise mit einer Masse-Konzentration von 1 wt% zugemischten – nichtlinearen optischen Chromophor Dispersrot 1 (DR1).

Nach dem Befüllen der Schlitzwellenleiter-Strukturen mit dem Wirt-Gast-Polymersystem PMMA/DR1 erfolgte die elektrooptische Charakterisierung der Ringresonatoren auf dem in Abb. 3 dargestellten Messplatz. Die aktive Messung erfolgte mit demselben Messaufbau, wie die passive Vermessung. Zur Ansteuerung dienten die GSG-Elektroden, die über Mikrokontaktspitzen mit einem Signalgenerator verbunden worden. Um Temperaturdrifts zu vermeiden wurde der Chip mit einer Präzisionsheizplatte auf eine Temperatur von 35 °C geheizt und stabilisiert. Das Anlegen einer Gleichspannung von 0 V bis 7 V verursachte eine erstaunlich hohe Resonanzwellenlängenverschiebung $\Delta\lambda$ von mehr als 0,5 nm. Zum Vergleich: Herkömmliche optische Schalter, basierend auf Silizium, erreichen Resonanzwellenlängenverschiebungen von bis zu 0,016 nm (Xuan et al. 2014).

4. Schlussfolgerungen und Ausblick

Der Einsatz Chip-integrierter photonischer Bauelemente in schnellen optischen Datenübertragungsstrecken besitzt ein sehr großes Marktpotential, da der Bedarf an schnellen Datenübertragungsstrecken insbesondere für kurze und mittlere Übertragungslängen stetig wächst. Die hier gezeigten Ergebnisse, insbesondere die hohe Resonanzwellenlängenverschiebung und die schmalbandigen Resonanzpeaks des Ringresonators, zeigen, dass die SOH-Photonik für energieeffiziente Bauelemente in zukünftigen optischen Datenübertragungsstrecken interessant ist. Die SOH-Photonik ermöglicht funktionsoptimierte Lichtmodulatoren für eine energieeffiziente und hochbitratige Datenübertragung. Grund dafür sind günstige Synergieeffekte, da Vorteile der siliziumbasierten Chiptechnologie mit denen von funktionalen, organischen Materialien verknüpft werden.

Zukünftige Arbeiten sollten sich nunmehr mit der Integration von elektrooptischen Polymeren in die bestehende CMOS-Technologie beschäftigen. Zwar zeigen die hier demonstrierten Ergebnisse hervorragende Eigenschaften der SOH-Ringresonatoren, jedoch ist noch keine Langzeitstabilität nachgewiesen. Als besondere Herausforderung wird dabei die Verkapselung der Polymere angesehen. Ziel sollte es sein, äußere Einflüsse wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und UV-Licht zu reduzieren, um so die SOH-Photonik für den Konsumentenmarkt attraktiv zu machen.

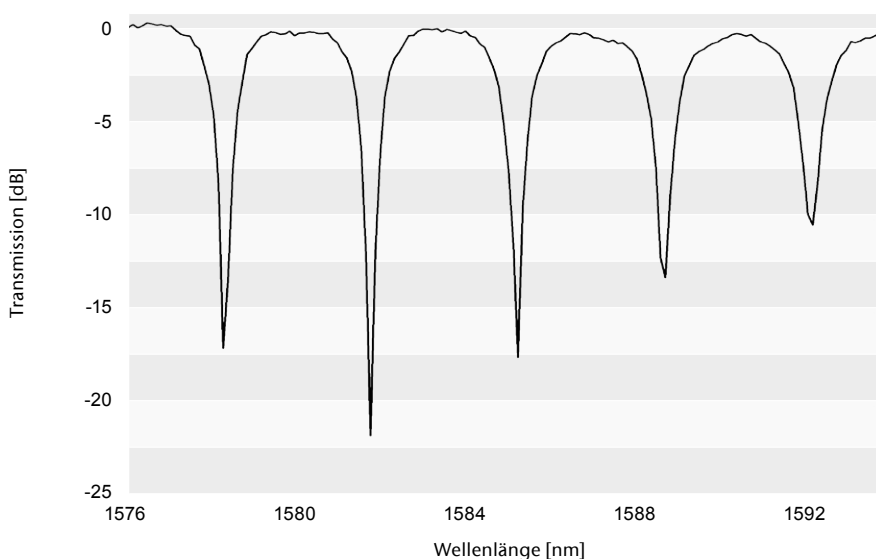


Abb. 4) Transmissionsspektrum eines partiell geschlitzten Ringresonators der mit einem Polymersystem bestehend aus PMMA und DR1 bedeckt ist. Das Spektrum zeigt extrem schmalbandige Peaks, wodurch derartige Resonatoren insbesondere für aktive photonische Bauelemente wie elektrooptische Modulatoren mit geringem Energiebedarf geeignet sind.

LITERATUR

Alloatti L, Palmer R, Diebold S, Pahl KP, Chen B, Dinu R, Fournier M, Fedeli J-M, Zwick T, Freude W, Koos C, Leuthold J (2014) 100 GHz silicon-organic hybrid modulator. *Light Sci Appl* 3(5):e173. doi: 10.1038/lsa.2014.54

Almeida VR, Xu Q, Barrios CA, Lipson M (2004) Guiding and confining light in void nanostructure. *Opt Lett* 29(11):1209–1211. doi: 10.1364/OL.29.001209
Dalton LR, Sullivan PA, Bale DH (2010) Electric field poled organic electro-optic materials: state of the art and future prospects. *Chem Rev* 110(1):25–55. doi: 10.1021/cr9000429

Gould M, Baehr-Jones T, Ding R, Huang S, Luo J, Jen AK-Y, Fedeli J-M, Fournier M, Hochberg M (2011) Silicon-polymer hybrid slot waveguide ring-resonator modulator. *Opt Express* 19(5):3952–3961. doi: 10.1364/OE.19.003952

Korn D, Jazbinsek M, Palmer R, Baier M, Alloatti L, Yu H, Bogaerts W, Lepage G, Verheyen P, Absil P, Guenter P, Koos C, Freude W, Leuthold J (2014) Electro-Optic Organic Crystal Silicon High-Speed Modulator. *IEEE Photonics J* 6(2):1–9. doi: 10.1109/JPHOT.2014.2314113
Miller SE (1969) *Integrated Optics. An Introduction*. Bell System Technical Journal 48(7):2059–2069. doi: 10.1002/j.1538-7305.1969.tb01165.x

Steglich P, Mai C, Stolarek D, Lischke S, Kupijai S, Villringer C, Pulwer S, Heinrich F, Bauer J, Meister S, Knoll D, Casalboni M, Schrader S (2015a) Novel Ring Resonator Combining Strong Field Confinement With High Optical Quality Factor. *IEEE Photon Technol Lett* 27(20):2197–2200. doi: 10.1109/LPT.2015.2456133

Steglich P, Mai C, Stolarek D, Lischke S, Kupijai S, Villringer C, Pulwer S, Heinrich F, Bauer J, Meister S, Knoll D, Casalboni M, Schrader S (2016a) Partially slotted silicon ring resonator covered with electro-optical polymer. In: Vivien L, Pavesi L, Pelli S (eds), *Sunday 3 April 2016*, Brussels, Belgium. *SPIE Proceedings*. SPIE, 98910R. doi: 10.1117/12.2217725

Steglich P, Padilla Michel Y, Villringer C, Dümecke S, Bauer J, Heinrich F, Casalboni M, Schrader S (2015b) Design Optimization of Slot-Waveguides Covered with Organic Cladding Materials for Integrated Photonic Devices. In: Knaut M (ed) 16. Nachwuchswissenschaftlerkonferenz. Tagungsband, 16 Apr 2015. *Berliner Wissenschafts-Verlag*, Berlin, ISBN: 978-3-8305-2044-3, pp 192–198

Steglich P, Villringer C, Dümecke S, Padilla Michel Y, Casalboni M, Schrader S (2015c) Silicon-on-Insulator Slot-waveguide Design Trade-offs. In: *Proc PHOTOPTICS – 3rd Int Conf Photonics, Optics and Laser Technology*, 12–14 Mar 2015, Berlin, ISBN: 978-989-758-093-2, pp 47–52. doi: 10.5220/0005336200470052

Steglich P, Villringer C, Pulwer S, Bauer J, Heinrich F, Casalboni M, Schrader S (2016b) Advanced Nanophotonics: Silicon-Organic Hybrid Technology. *Wiss Beitr TH Wildau* 20:45–48. doi: 10.15771/0949-8214_2016_1_6

Steglich P, Villringer C, Pulwer S, Casalboni M, Schrader S (2016c) Design Optimization of Silicon-on-Insulator Slot-Waveguides for Electro-optical Modulators and Biosensors. In: Ribeiro PA, Raposo M (eds) *Photoptics 2015. Proceedings of the 3rd International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology*, 1st ed. 2016. Springer Proceedings in Physics, vol 181. Springer International Publishing; Springer, Cham, ISBN: 3319301357, pp 173–187

Xuan Z, Ma Y, Liu Y, Ding R, Li Y, Ophir N, Lim AE-J, Lo G-Q, Magill P, Bergman K, Baehr-Jones T, Hochberg M (2014) Silicon microring modulator for 40 Gb/s NRZ-OOK metro networks in O-band. *Opt Express* 22(23):28284–28291. doi: 10.1364/OE.22.028284

AUTOREN

Patrick Steglich (M.Eng.)*
Claus Villringer (M.Eng.)*
Silvio Pulwer (M.Eng.)*
Dipl.-Chem. Birgit Dietzel
Dr. Viachaslau Ksianzou
Prof. Dr. Sigurd Schrader
Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften
Technische Hochschule Wildau

* Department of Industrial Engineering
University of Rome "Tor Vergata"

E-Mail für Korrespondenz:
patrick.steglich@th-wildau.de



Grundlagenuntersuchung zu ausgewählten finiten Elementen der Strukturmechanik für ein einfaches validierbares FE-Modell

Norbert Miersch*, Robert Roßmann, Christian Holz

Zusammenfassung

Das Thema beschäftigt sich mit der Finiten-Elemente-Analyse (FEA) ausgewählter Elemente der Strukturmechanik für ein einfaches validierbares FE-Modell. In einer Grundlagenuntersuchung wird zunächst am Modell eines einseitig eingespannten Trägers das Konvergenzverhalten der Biegespannung und Verformung bezüglich ausgewählter Elemente überprüft. In einem weiteren Schritt wird der Einfluss der Art und Anzahl der Elemente und Knoten in Bezug zur Berechnungszeit für die Analyse statischer und dynamischer Problemstellungen untersucht und ausgewertet. Darüber hinaus wird der Einfluss der zeitlichen Auflösung (Inkrementierung) und der Elementqualität mit Rücksicht auf die Berechnungszeit analysiert. Es ist der Untersuchung zu entnehmen, dass das Konvergenzverhalten der Biegespannung und deren Verwendung aufgrund von Singularitäten gesondert zu betrachten ist. Im Ergebnis der Analyse wurde festgestellt, dass die Berechnungszeit mit der Zunahme von Elementen und Knoten, aber auch mit feiner werdender Zeitauflösung bei Anwendung einer dynamischen Analyse ansteigt.

Abstract

This research focuses on the analysis of selected elements of the finite element analysis of simple validated FE models. It shows the types of elements of the finite element method and their application, where the convergence behaviour of the bending stress and deformation of a cantilever beam under force loading relating to selected elements is represented. In addition, the number of elements and nodes related to the dynamic and static calculation time are investigated. Moreover, the influence of the time interval resolution and the element quality is analysed in consideration of the calculation time. One of the outcomes of this investigation is the significant behaviour of the bending stress in terms of the fixing and their resultant singularities. The calculation time increases with the growing number of elements and nodes as well as with a capillary time resolution related to the dynamic examination.

1. Einleitung

Die Anwendung der Finiten-Elemente-Methode (FEM) ist Stand der Technik und hat sich in der industriellen Praxis als zweckmäßiges Werkzeug durchgesetzt. Sie ist demzufolge auch Bestandteil der studentischen Ausbildung im Studiengang Maschinenbau an der TH Wildau. Bezogen auf die traditionelle Maschinenbaubranche hat sich der Einsatz der Rechentechnik in den letzten Jahren besonders progressiv entwickelt. Simulationsverfahren, wie die FEM sind von besonderer Bedeutung, um die Anzahl der Versuche zu reduzieren und damit Entwicklungskosten

und -zeit zu sparen.

Da es sich bei der FEM um ein Näherungsverfahren handelt, sind deren Ergebnisse, um Fehler beurteilen zu können, möglichst zu verifizieren. Für jede Simulation wird ein FE-Modell generiert, das mehr oder weniger dem realen Bauteil unter realen Bedingungen angenähert ist. Dabei wird ein Fehler in bestimmten Grenzen von 3 bis 5% toleriert. Hierzu können unterschiedliche „Finite Elemente“ zur Lösung ein und desselben Problems in die Simulation eingebunden werden. Eine zweckmäßige Modellbildung steht im direkten Zusammenhang mit der Wahl der finiten Elemente und

kann bei komplizierten Bauteilen und/oder großen Modellen erhebliche Rechenzeit sparen.

Interessant sind zunächst einmal grundlegende Untersuchungen zur Elementgenauigkeit. Deshalb wird in einem ersten Schritt auf die Genauigkeit von ausgewählten finiten Elementen bezogen auf ein einfaches validierbares FE-Modell eingegangen, ohne einen kostspieligen Versuchsaufwand zu betreiben.

2. Einführung in die Problematik

Die FEM ist ein Teilgebiet der numerischen Lösungsverfahren und wird als

* korrespondierender Autor

Simulationswerkzeug sowohl in der Entwicklung als auch in der Fertigung eines Produktes eingesetzt. Beispielhaft sind die Anwendung der strukturellen Simulation während der Entwicklung/Konstruktion eines Produktes und die Nutzung der Erstarungssimulation bei der Gussteilherstellung zu nennen (siehe Abb. 1).

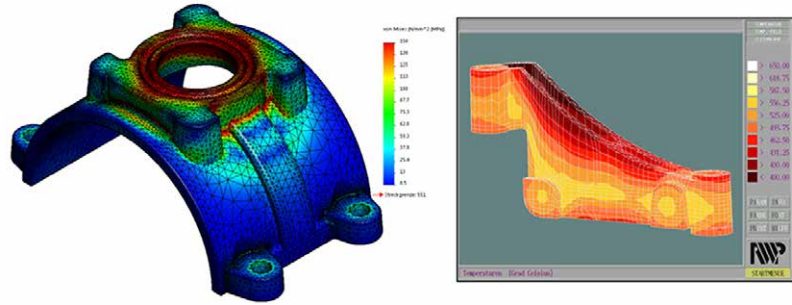
Auch im späteren Service, wenn das Produkt im Alltag des Kunden genutzt wird und es möglicherweise zum Versagen kommt, sind Nachrechnungen bestimmter Betriebslasten und deren Auswirkungen auf die Konstruktion möglich. In diesem Szenario dient die FEM zur Ursachenanalyse. Zu Beginn einer jeden FEM-Untersuchung steht die Modellbildung. Hierbei wird das reale Bauteil einer Idealisierung zu einem vereinfachten Modell und einer Diskretisierung unterzogen. In diesem Schritt werden auch Randbedingungen berücksichtigt, welche beispielsweise Lagerungen, Kräfte und Momente definieren.

Als räumliche Diskretisierung wird das Zerlegen des Bauteiles in endlich kleine „finite Elemente“ bezeichnet (Klein 2015), wobei das Element selbst durch seine Randknoten definiert wird. Mit den finiten Elementen wird das Bauteil vernetzt. Bei der zeitlichen Diskretisierung werden die Simulationsergebnisse einem jeweiligen Zeitschritt zugeordnet, was bei dynamischen Berechnungen der Fall ist und erheblich mehr Rechenzeit erfordert.

Die nachstehende Tab. 1 zeigt vereinfacht einige Elementtypen und deren Verwendung (Wittel 2010).

In der nächsten Phase erfolgt die Aufstellung von Algorithmen, die Steifigkeitsmatrizen der Elemente zur Gesamtsteifigkeitsmatrix zusammenfassen. Aus diesen resultieren schließlich Ergebnisse wie Verformungen, Spannungen oder Auflagerreaktionen. Betrachtet man an dieser Stelle das Vorgehen der FEM, so erfolgt die mathematische Näherung der Lösung an den Gaußpunkten (Integrationspunkten) eines Elementes. Die Spannungen bzw. Dehnungen werden auf die Knoten des jeweiligen Elementes extrapoliert.

Die nachstehende Abb. 2 zeigt die Näherung an die Referenzfunktion über den Linearansatz bzw. über den



a) Ergebnisse (Vergleichspannungen) einer strukturellen Simulation mittels FEM

b) Ergebnisse (Temperaturfeld) einer Gießsimulation mittels FEM (Todte et al. 1999)

Abb. 1) Beispiele für Simulationsergebnisse aus a) Entwicklung/Konstruktion und b) Fertigung.

Polynomansatz. Die Referenzfunktion spiegelt in diesem Fall die Geometrie eines Bauteiles wieder.

In Abb. 2 wird ersichtlich, dass zur Näherung über den Linearansatz eine deutlich höhere Anzahl an Elementen benötigt wird. Bei Verwendung eines Polynomansatzes kann eine bessere Annäherung mit wenigen Elementen erreicht werden. Dazu gehören beispielsweise quadratische oder kubische Funktionen, welche sich gut als Näherungs- bzw. Formfunktion für das finite Element eignen (Klein 2015). Die nachfolgenden Untersuchungen stützen sich im Wesentlichen darauf, mit welchen Elementen und welcher Elementanzahl eine Zielgröße, beispielsweise eine bestimmte Biegespannung, errechnet wird. Nähert man sich der Zielgröße, etwa einem theoretischen Wert, mit einer gewissen Elementanzahl an oder erreicht diesen Wert, liegt ein konvergentes Verhalten vor.

Die Konvergenz beschreibt die Annäherung an das physikalisch richtige Ergeb-

nis in Abhängigkeit von der Netzdichte. Die Divergenz beinhaltet das deutliche Ansteigen des Ergebnisses in Bezug zur Netzdichte, welche bei Spannungen an scharfkantigen Kerben oder Einspannungen resultieren kann. Hier kann auch von Singularitäten gesprochen werden (Gebhardt 2014).

Die Validierung solcher FE-Modelle erfolgt beispielsweise mit theoretischen Übersichtsrechnungen, sofern dies im Hinblick auf die Bauteilkomplexität möglich ist. Mit ersten Prototypen können schließlich Testdaten generiert werden, welche dem Vergleich der FE-Modelle dienen. Man spricht an dieser Stelle von einer Verifizierung.

3. Eingrenzungen

Um Aussagen zur Genauigkeit und zum Konvergenzverhalten der verschiedenen finiten Elemente machen zu können, wird zunächst auf ein einfaches Balkenmodell eingegangen, dessen Ergebnisse man direkt den Ergebnissen einer analytischen Be-

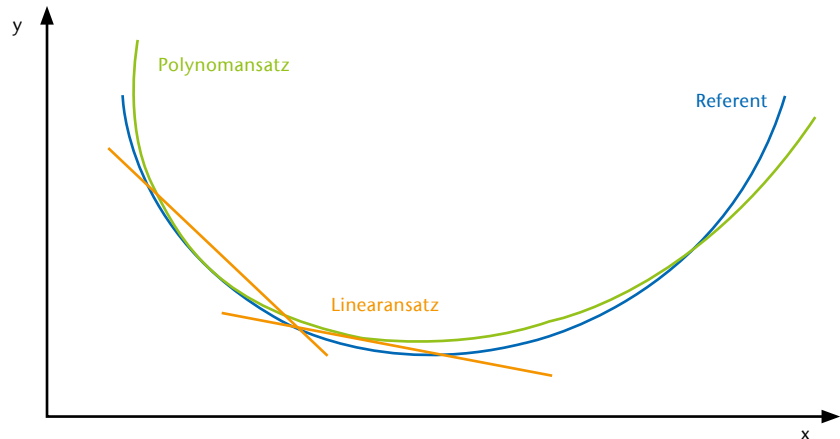


Abb. 2) Linearansatz und Polynomansatz.

Tab. 1: Elementtypen und deren Verwendung

Elementklasse	Dimension	Elementtyp	Anwendungsgebiet	Elementgeometrie
Linielemente	1 D	Stab Balken Rohr Feder Dämpfer	Fachwerke Wellen Rahmentragwerke Rohrleitungen	 Stab/ Balken
Flächenelemente	2 D	Dreieck Viereck Scheibe Platte Schalen	Blechbauteile Karosseriebau Behälter Gehäuse Rohrleitungen	 Dreieck
Volumenelemente	3 D	Tetraeder Hexaeder Pentaeder	Halter Dicke Bauteile Auflager	 Tetraeder
Sonstige Elemente		Federn Dämpfer	Randbedingungen Hilfselemente	 Dämpfer

trachtung mit Hilfe der technischen Mechanik gegenüberstellen kann. Die Ergebnisse können dann für weitere Untersuchungen von komplexeren Bauteilen bzw. Baugruppen herangezogen werden. Die Simulation wird mit dem FEM-Programm ANSYS Workbench durchgeführt.

Der Umfang der Analyse wird eingegrenzt auf Untersuchungen zu Dreiecks- und Viereckelementen sowie zu den Volumenelementen als Tetraeder, Hexaeder und Prisma. Für alle genannten finiten Elemente wird der lineare und quadratische Näherungsansatz untersucht (mit und ohne Zwischenknoten). Die Validierung und Prüfung der Plausibilität der Ergebnisse basiert auf dem Ansatz des Timoshenko-Balkens (Berücksichtigung der Biege- und Schubverformung). Für die Belastung wurden zwei Lastfälle vorgesehen. Die Belastung des Balkens erfolgt im ersten Lastfall statisch, bei dem die Last zeitunabhängig wirkt. Im zweiten Lastfall wird die Last transient, also in kurzer Zeit durch eine Kraft-Zeit-Funktion aufgebracht.

4. Modellbildung

Die nachfolgenden Untersuchungen

beziehen sich auf einen einseitig eingespannten Träger aus Aluminium mit einer Kraft von $F = 3.000 \text{ N}$, welche am Ende des Trägers auf die Fläche der Stirnseite angreift. Die Lagerung ist dabei durch die Bindung der sechs Freiheitsgrade gekennzeichnet (Tab. 2).

5. Konvergenzverhalten der Elemente bei statischer Belastung

Bei der Untersuchung des Biegespannungsverlaufes in der nachstehenden Abb. 3 der Volumenelemente mit steigender Netzauflösung kann eine deutliche Annäherung an den theoretischen Wert festgestellt werden. Die Ermittlung der theoretischen Lösung für die Spannung erfolgt über die nachstehende Gleichung (1).

$$\sigma_{b\ th} = \frac{6 \cdot F \cdot l}{b \cdot h^2} \quad (1)$$

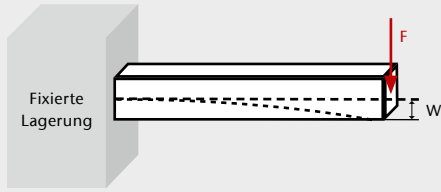
- F Kraft
- l Länge
- b Breite
- h Höhe
- $\sigma_{b\ th}$ Biegespannung

Auffallend sind die Elemente vom Typ Hexaeder mit Zwischenknoten. Diese erreichen bereits bei einer geringen Auflösung von $1 \times 3 \times 1$ eine sehr gute Annäherung an die theoretische Biegespannung. Die Auflösung beschreibt die Anzahl der finiten Elemente in den jeweiligen Koordinatenrichtungen in Höhe, Breite und Länge des Trägers. Es kann festgestellt werden, dass die Prisma- und Tetraederelemente ohne Zwischenknoten grundsätzlich ungenauere Ergebnisse liefern.

Mit steigender Auflösung der Elemente kann ein divergentes Verhalten der Biegespannung bei allen Elementtypen festgestellt werden. Die Hexaederelemente divergieren bereits in einer Auflösung von $8 \times 24 \times 1$ Elementen. Um diese Besonderheit genauer zu untersuchen, bedarf es der Darstellung der Spannungen in einem Modellschnitt. Hierzu wurde in Abb. 4 zur Verdeutlichung der Problematik eine nähere Untersuchung mit dem Elementtyp Hexaeder (quadratischer Ansatz) und einer Auflösung von $32 \times 96 \times 1$ durchgeführt.

Es kann festgestellt werden, dass die Biegespannung an der Stelle der Einspannung, an der dem Balken alle

Tab. 2: Untersuchungsmodell mit Parametern

Skizze	Parameter
 <p>Einseitig eingespannter Träger</p>	<p>Bedingungen:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Kraft $F = 3000 \text{ N}$ (Kraft auf Stirnseite) - Höhe $h = 50 \text{ mm}$ - Breite $b = 10 \text{ mm}$ - Länge $l = 150 \text{ mm}$ <p>Werkstoff:</p> <ul style="list-style-type: none"> - E-Modul $E = 7 \text{ E4 N/mm}^2$ - Querdehnzahl $\nu = 0,33$ <p>Lagerung:</p> <ul style="list-style-type: none"> - 6 D.O.F-Einspannung einseitig

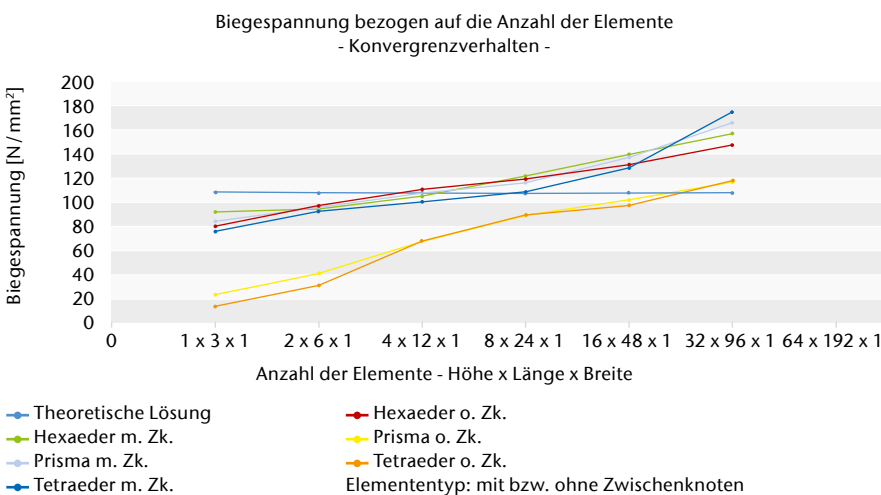


Abb. 3) Konvergenzverhalten der Biegespannung – Volumenelemente.

sechs Freiheitsgrade durch eine feste Einspannung entzogen werden, stark zunimmt. Auch mit steigender Netzdichte wird keine Konvergenz erreicht. Begründet werden kann dieser starke Spannungsanstieg durch die sich einstellende Singularität, die sich aufgrund der fixierten Lagerung im FE-System ergibt. Dabei kommt es zu sehr großen Steifigkeitssprüngen zwischen den Elementen an der Grenzfläche, was somit auch zu sehr hohen Spannungen führt. Diese Bereiche sollten aus der Konvergenzbetrachtung ausgeschlossen werden (siehe auch Gebhardt 2014). Weiterhin ist zu beachten, dass mit feiner werdendem Netz, also sehr kleinen Elementen, der numerische Fehler ansteigt. Im nächsten Schritt erfolgt die Untersuchung zu den Elementtypen Dreieck in Abb. 5 und Tetraeder in Abb. 6. Ebenfalls wird hier die theoretische berechnete Biegespannung

nach Gleichung (2) in den Diagrammen aufgezeigt.

$$\sigma(x) = \sigma_{b \text{ th}} + m \cdot x \quad (2)$$

$$m = -\sigma(x) l^{-1}$$

- $\sigma(x)$ Biegespannung
- m Steigung der Biegespannung (theoretisch)
- x Laufkoordinate des Balkens

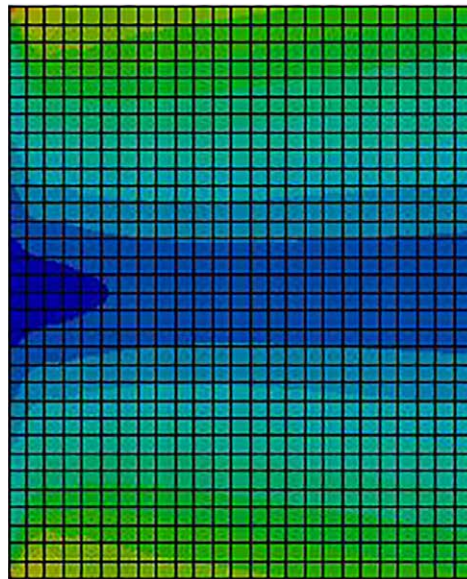
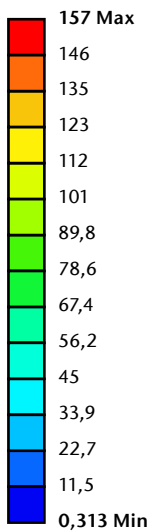
In Abb. 5 sind bei den Schalenelementen vom Typ Dreieck mit quadratischem Ansatz und steigender Auflösung übereinstimmende Ergebnisse im Bereich von 20 mm bis 130 mm erkennbar. Im Bereich der Einspannung kommt es im Vergleich zum theoretischen Wert mit 108 N/mm^2 wieder wie bei den Volumenelementen zu großen Abweichungen. Diese weisen einen relativen Fehler zur theoretischen Berechnung von bis zu 48 % ($\sigma_{b \text{ max}} = 160$

N/mm^2) auf. Bei den Schalenelementen weist aber eine feinere Auflösung von 4×12 (Anzahl der Elemente in Höhe und Breite) einen geringeren relativen Fehler von 3,7 % ($\sigma_{b \text{ max}} = 112 \text{ N/mm}^2$) auf. Bei einer Netzdichte von 2×6 wird der relative Fehler von $-4,6 \%$ ($\sigma_{b \text{ max}} = 103 \text{ N/mm}^2$) noch geringer. In der nachfolgenden Abb. 6 ist das Verhalten der Volumenelemente vom Typ Tetraeder mit quadratischem Ansatz dargestellt. Aus der Darstellung ist ersichtlich, dass unmittelbar an der Einspannstelle die Ergebnisse bei verschiedenen Auflösungen stark schwanken und bei zu grober oder zu feiner Vernetzung zu großen Fehlerabweichungen führen.

Die geringste Abweichung erzielte die Netzdichte von $8 \times 24 \times 1$ Elementen. Das ergibt einen relativen Fehler von 1,8% bei einer Biegespannung von $\sigma_{b \text{ max}} = 110 \text{ N/mm}^2$ gegenüber dem theoretischen berechneten Wert an der Einspannung. Wie in Abb. 6 ersichtlich ist, gibt es aber für diese Netzauflösung eine Spannungsschwankung auf $\sigma_b = 116 \text{ N/mm}^2$ in einem Abstand von 6 mm vor der Einspannung und somit keinen konstant ansteigenden Spannungsverlauf.

In Auswertung der Erkenntnisse zum divergenten Spannungsverhalten an der Einspannstelle wurden weiterführende Untersuchungen durchgeführt. Dazu zählten Änderungen der Elementseitenverhältnisse bzw. das Berücksichtigen eines Radius im Bereich der Einspannung. Keine der weiteren Untersuchungen mit dem Elementtyp Tetraeder führten zu einer signifikanten Verbesserung. Vergleicht man das Konvergenzverhalten von quadratischen Schalenelementen vom Typ Dreieck mit dem der quadratischen Volumenelemente vom Typ Tetraeder, so unterliegen die Schalenelemente auch bei unterschiedlicher Netzauflösung keinen so großen Schwankungen bei der Auswertung der Biegespannung und damit des relativen Fehlers. Aufgrund der Ungenauigkeit der Berechnungsergebnisse an der Einspannstelle bezogen auf die Biegespannung (keine Konvergenz) werden die folgenden Untersuchungen zum Nachweis der Elementgenauigkeit auf die Verformung bezogen (Abb. 7). Die Konvergenz der verschiedenen Elemente in Abhängigkeit von der

N: Quader mit ZK – Elementenzahl = 32 x 96
 Vergleichsspannung 2
 Typ: Vergleichsspannung (von Mises)
 Einheit: MPa
 Zeit: 1
 07.01.2016 10:35



Theoretische maximale Biegespannung = 108 MPa

Abb. 4) Normalspannungsverteilung in N/mm² an der Stelle der Einspannung-Modellschnitt, feines Netz (32 x 96 x 1)

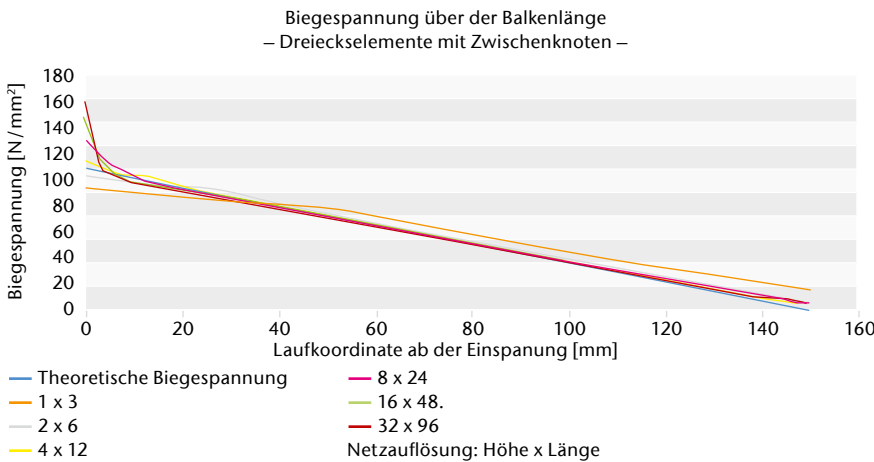


Abb. 5) Biegespannung über der Trägerlänge – Dreieckselemente mit Zwischenknoten.

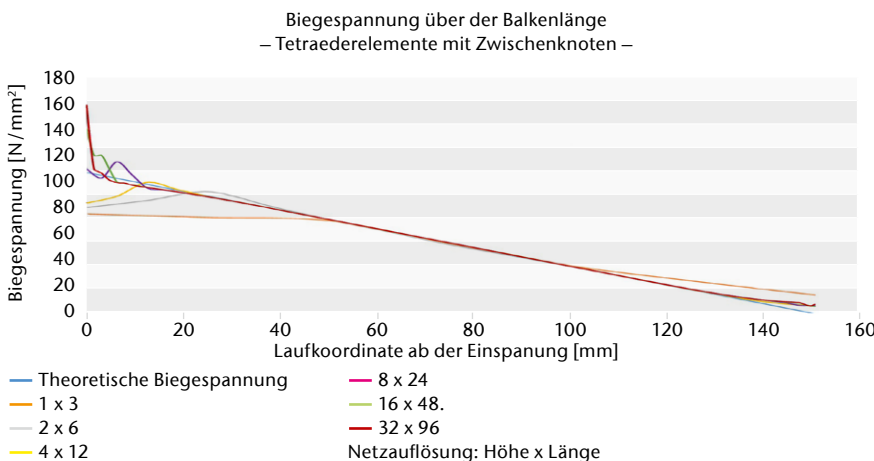


Abb. 6) Biegespannung über der Balkenlänge – Tetraederelemente mit Zwischenknoten.

Netzfeinheit ist hier eindeutig erkennbar. Die theoretisch maximal berechnete Verformung beträgt am Ende des Trägers $w = 0,51$ mm (siehe auch Tab. 2) und berücksichtigt die Durchbiegung sowie die Schubverformung. Eine Rückrechnung der Verformung auf die Biegespannungen ist an dieser Stelle des Trägers problemlos möglich. Nach den Untersuchungen wird ersichtlich, dass eine konkrete Berechnung der Biegespannung an der Einspannstelle mit der theoretischen Lösung nicht übereinstimmt. Betrachtet man hingegen den Bereich zwischen 20 mm und 130 mm vor der Einspannung, so kann ein mit der theoretischen Lösung identischer Spannungsverlauf festgestellt werden. Wie bereits oben erwähnt sollte der Bereich der Einspannung aus der Konvergenzbetrachtung im FE-System ausgeschlossen werden. Nach einem Datenexport in ein anderes Analyseprogramm wie beispielsweise Mathcad könnte dann das Konvergenzverhalten weiterführend untersucht werden. Dabei wird die gleiche Vorgehensweise für ähnliche Probleme an anderen Bauteilen empfohlen.

6. Genauigkeit der Elemente und Rechenzeit bei dynamischer Lastwirkung

Krafteinleitung und Dämpfung
 Zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens des Balkens wurde die auf den Träger einwirkende Last von $F = 3$ kN in einem Zeitintervall von 0 bis 0,00025 Sekunden festgelegt (siehe Abb. 8)

Das Antwortverhalten ist eine sich aufschwingende Struktur. Dabei wird die Schwingungsamplitude durch die Dämpfungseigenschaften des Systems fortlaufend verringert. Die Dämpfungseigenschaften eines Systems können beispielsweise durch experimentelle Untersuchungen ermittelt werden. Für den einseitig eingespannten Balken wurde eine modale Dämpfung von $\vartheta = 0,05$ festgelegt. Dieser Wert orientiert sich an Empfehlungen aus der Literatur (Irretier et al. 2001). Für die Krafteinleitung und die modale Dämpfung wurde das Zeitfenster für eine dynamische Belastung von 0 Sekunden bis 0,01 Sekunden festgelegt. Der zeitliche Verlauf der Verformung

mit und ohne Dämpfungswert ist der Abb. 9 und Abb. 10 zu entnehmen. Der Schwingungsverlauf in den Abb. 9 und 10 wurde für 1.000 Zwischenschritte berechnet. Der Zeitraum von 0 Sekunden bis zum vertikalen schwarzen Strich bei $2,5e-4$ Sekunden ist der Zeitraum der Krafteinleitung. Aus dem Vergleich der oberen beiden Abbildungen ist zu erkennen, dass schon die erste Amplitude gedämpft wird.

Einfluss der Elemente und des Netzes auf die Rechenzeit

Im weiteren Verlauf der Analyse wird untersucht, wie viele Zwischenschritte benötigt werden, um hinreichend genaue Ergebnisse in Bezug zur Rechenzeit zu erhalten. Die Rechenzeit ist dabei immer die absolute Prozessorzeit des Computers, welche der Lösungsinformation im FE-System ANSYS entnommen werden kann. Bisher wurde der Einfluss der Netzauflösung auf das Konvergenzverhalten untersucht. An dieser Stelle wird nun ermittelt, welchen Einfluss die Element- und Knotenanzahl auf die Berechnungszeit haben. In der Auswertung der zeitabhängigen Belastung wird auch die Zeit der statischen Analyse zum Vergleich mit herangezogen. Beide Zeiten können jedoch nicht absolut miteinander verglichen werden, da die Zeit für die dynamische Analyse im Wesentlichen von der Zeitintervallaufteilung abhängt, die es bei der statischen Analyse nicht gibt.

Der relative Verlauf der Zeiten bei der Lastfälle untereinander hingegen lässt sich vergleichen. Die dynamischen Berechnungen wurden mit einer Zeitintervallaufteilung von 1000 Berechnungsschritten innerhalb von 0 Sekunden bis 0,01 Sekunden durchgeführt. In der nachfolgenden Abb. 11 und Tab. 3 sind die Einflüsse der Netzauflösung am Tetraederelement dargestellt. Der Verlauf aller anderen bisher betrachtenden Elemente ist identisch und wurde der Übersichtlichkeit halber nicht mit in Abb. 11 aufgenommen.

In einer Auswertung von Abb. 11 kann festgestellt werden, dass die dynamische Berechnungszeit pro Element und Knoten ungefähr gleich ist. Aus Tab. 3 wird der Zusammenhang zwischen der Element- bzw.

Knotenanzahl und der Rechenzeit für die dynamische Analyse deutlich. So hat zum Beispiel die Auflösung $32 \times 96 \times 1$ im Vergleich zur Auflösung mit den Parametern $16 \times 48 \times 1$ in der Summe ca. 4,5-mal so viele Elemente und Knoten. Dieses Verhältnis lässt sich auch deutlich in

beiden Lastfällen (statische und dynamische Analyse) erkennen.

Einfluss der zeitlichen Inkrementierung auf die Rechenzeit

Weiterführend wird auf die Zeitintervallaufteilung bei der dynamischen Analyse eingegangen. Ausgewer-

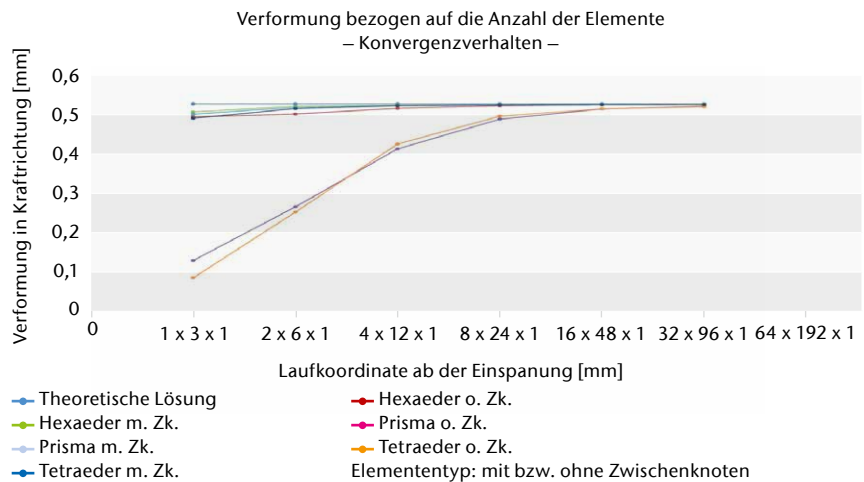


Abb. 7) Verformung über die Anzahl der Elemente – Konvergenzverhalten.

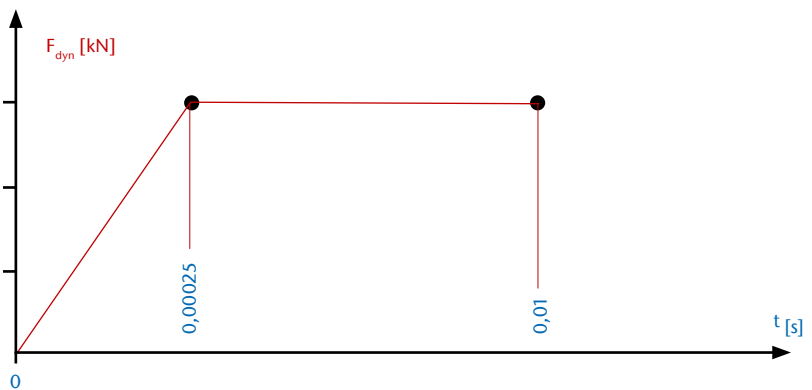


Abb. 8) Zeitabhängige Belastung des Balkens.

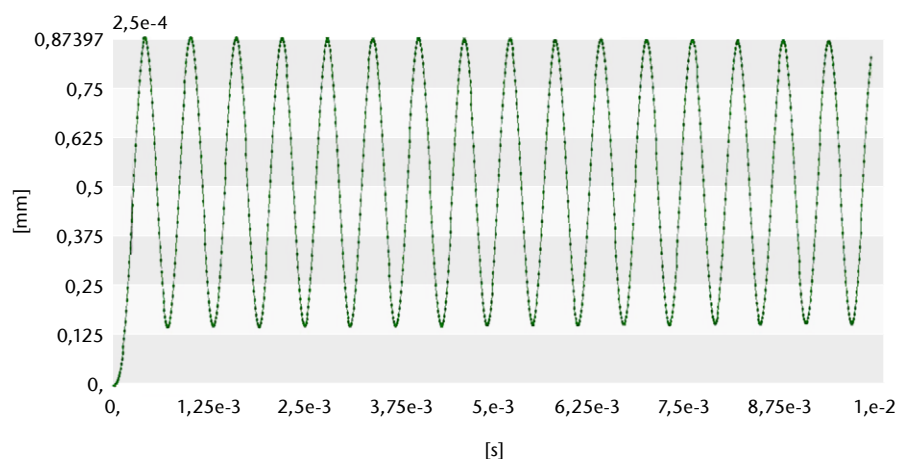


Abb. 9) Ungedämpfter Schwingungsverlauf der Verformung.

tet wurden die Verformung und die Rechenzeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Berechnungsschritte. Die Netzauflösung und somit auch die Element- und Knotenanzahl blieb über alle Untersuchungsvarianten gleich. Die Netzauflösung war zwar bei allen Elementtypen gleich, dennoch waren die Element- und Knotenanzahlen unterschiedlich. In der Tab. 4 ist dieser Zusammenhang dargestellt.

In Tab. 4 wird auch deutlich, dass die Elemente bezüglich der Rechenzeit nicht miteinander verglichen werden können, da sich Element- und Knotenanzahl trotz gleicher Netzauflösung stark unterscheiden. Die hohe Element- und Knotenanzahl bei Tetraederelementen kann durch den unstrukturierten Netzaufbau begründet werden. Die vorgegebene Netzauflösung an den Oberflächen ließ sich nicht vollständig auf das Volumen des Trägers übertragen. In Abb. 12 sind die Elementtypen und deren Rechenzeit sowie die Verformung dargestellt. Die Abszisse zeigt die Berechnungsschritte im betrachteten Zeitbereich von 0 Sekunden bis 0,01 Sekunden auf.

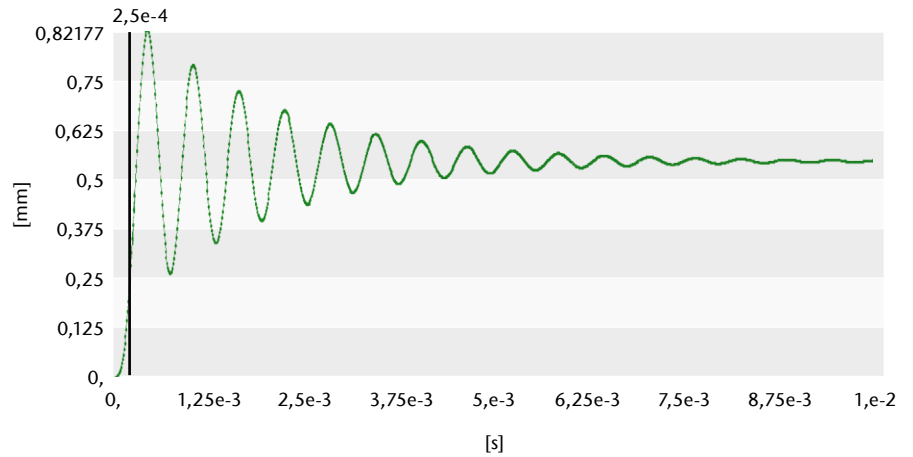


Abb. 10) Gedämpfter Schwingungsverlauf der Verformung.

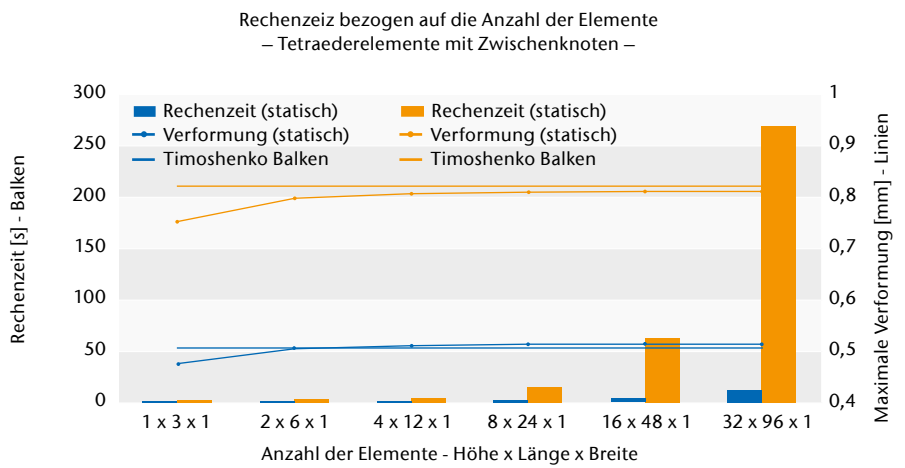


Abb. 11) Rechenzeit über die Anzahl der Elemente – Tetraeder mit Zwischenknoten.

Tab. 3: Zusammenhang zwischen Netzfeinheit und Rechenzeit für Tetraederelemente.

Elementtyp	Anzahl der Elemente (Höhe x Länge x Breite)	Elementanzahl	Knotenanzahl	Statische Rechenzeit [s]	Δt in [%] zur vorherigen statischen Zeit	Δw in [%] zur vorherigen statischen Verformung	Dynamische Rechenzeit [s]	Δt in [%] zur vorherigen dynamischen Zeit	Δw in [%] zur vorherigen dynamischen Verformung
Tetraederelemente mit Zwischenknoten	1 x 3 x 1	36	87	0,87	-	-	1,78	-	-
	2 x 6 x 1	114	251	0,84	-3,5	5,36	2,23	25,4	5,88
	4 x 12 x 1	372	787	0,89	5,5	1,06	3,78	69	1,06
	8 x 24 x 1	1858	3437	1,59	78	0,43	14,78	290	0,43
	16 x 48 x 1	8338	14581	3,54	122	0,15	62,34	321	0,16
	32 x 96 x 1	36308	61667	12,84	262	0,07	269,79	332	0,06

Aus der Abb. 12 wird ersichtlich, dass die Verformungswerte bei allen Elementtypen geringfügig voneinander abweichen, wobei die Rechenzeit unterschiedlich ist. In einer Auswertung kann festgestellt werden, dass die Rechenzeit von der Anzahl der Elemente und Knoten sowie von der Zeitauflösung abhängig ist. Die Rechenzeit steigt mit zunehmender Element- und Knotenanzahl und feiner werdender Zeitauflösung (kleinere Zeitinkremente).

Besonders hervorzuheben ist die Berechnungszeit bei Verwendung der Hexaederelemente. Sie ist bei gleichbleibender Elementzahl geringer als die der Viereckselemente, obwohl ein Hexaederelement mehr als doppelt so viel Knoten besitzt.

Um den Zeitschritt zu erkennen, bei dem die Extremwerte beispielsweise für die Spannungen und Verformungen ein Maximum ergeben, werden für die Festlegung der Zeitinkremente einer dynamischen Analyse normalerweise mehrere Kriterien herangezogen. Hierbei gelten folgende Empfehlungen (Stelzmann et al. 2008):

- Der Zeitschritt muss klein genug sein, um die zeitabhängige Belastung gut aufzulösen. Eine diskontinuierliche Kurve sollte mit mindestens sieben Zeitschritten inkrementiert werden.
- Die kleinste Periodendauer der Eigenfrequenzanalyse sollte in mindestens 10 bis 20 Zeitschritten inkrementiert werden.
- Die Geschwindigkeit der elastischen Welle sollte mit mindestens 5 bis 10 Zeitschritten inkrementiert werden (Berücksichtigung der Schallgeschwindigkeit des Materials).

Die vorliegende Untersuchung zur Berechnungszeit und zur Genauigkeit bezüglich der Verformung berücksichtigt nur die zeitliche Inkrementierung der Belastung nach Punkt a) und beschränkt sich nur auf die erste Eigenfrequenz und Eigenform.

Den Ergebnissen in Abb. 12 ist zu entnehmen, dass für alle in der Analyse verwendeten Elemente 320 Zeitschrit-

Tab. 4: Netzauflösung und Netzparameter.

Elementtyp (mit Zwischenknoten)	Anzahl der Elemente (Höhe x Länge x Breite)	Elementtyp	Anwendungsbereich
Timoshenko Balken	1 x 96 x 1	96	193
Dreieck	32 x 96 x 1	6144	12545
Viereck	32 x 96 x 1	3072	9473
Tetraeder	32 x 96 x 1	36308	61667
Hexaeder	32 x 96 x 1	3072	22147

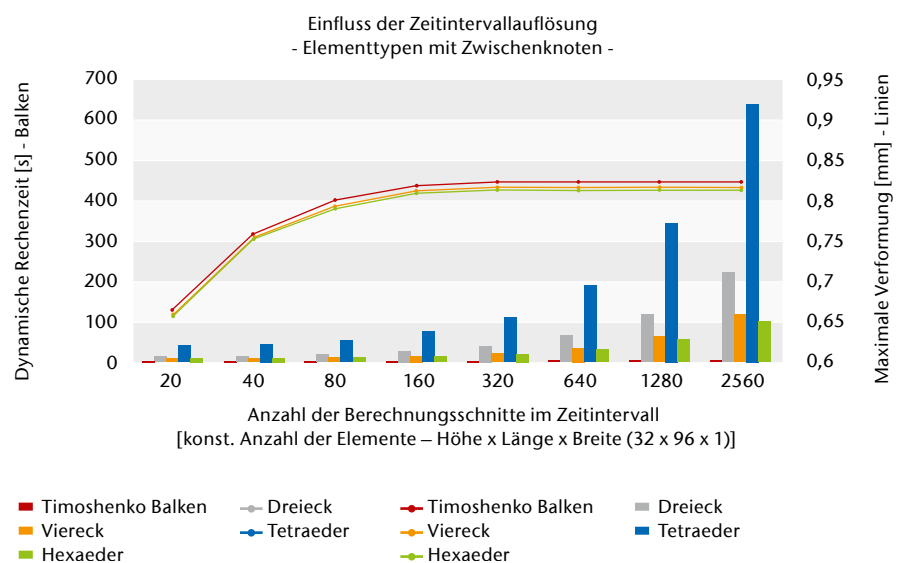


Abb. 12) Einfluss der Zeitintervallauflösung – Elementtypen mit Zwischenknoten.

te ausreichend sind, um die maximale Verformung zu berechnen.

Einfluss der Elementqualität

Wie in vielen Veröffentlichungen publiziert (beispielsweise Klein 2015), hängt die Genauigkeit einer FE-Analyse auch von der idealen Geometrie eines finiten Elementes ab. Diese steht in einem direkten Zusammenhang mit der Interpolation der Verschiebungen durch die Ansatzfunktion innerhalb des Elementes. Ideale Formen sind bei Schalenelementen das gleichseitige Dreieck und das Quadrat, bei den Hexaederelementen der quadratische Würfel. In der Praxis sind diese idealen Formen nur bei einfachen Bauteilen zu erreichen. Hinzu kommt, dass jedes FE-Programm besondere Vernetzungsalgorithmen verwendet. Die Elementqualität kann in jedem FE-Programm geprüft wer-

den. Für die Untersuchungen im ANSYS berücksichtigt die Prüfung der Elementqualität das Verhältnis der Seitenlängen einschließlich der Elementverzerrung.

Im Folgenden soll durch eine weitere Untersuchung der Nachweis erbracht werden, dass die Elementqualität Einfluss auf die Genauigkeit einer FE-Analyse hat. Hierbei wurde der Balken mit quadratischen Hexaederelementen vernetzt, um ein regelmäßiges Netz (sweepen) zu erhalten, bei dem das Verhältnis der Seitenlängen zueinander beeinflussbar ist. Dazu wurden zwei Netzauflösungen berücksichtigt.

In der nachfolgenden Abb. 13 sind die Berechnungsparameter der beiden Netzauflösungen dargestellt. Hinter der Netzauflösung auf der Abszisse befindet sich die Elementqualität als Klammerwert (1 – sehr gut; 0,16162 – schlecht).

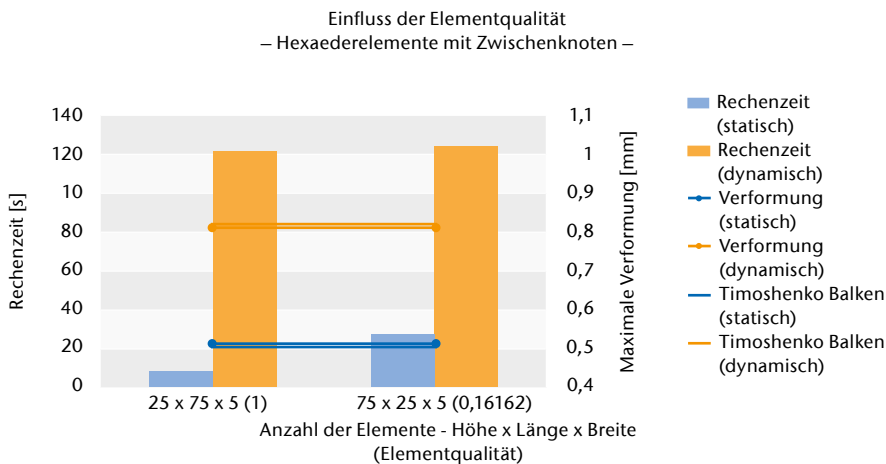


Abb. 13) Einfluss der Elementqualität – Hexaeder mit Zwischenknoten.

Bei der Auswertung der Analyse kann festgestellt werden, dass ein starker Unterschied in der Variation der Seitenlängen eines Elementes den größten Einfluss auf die Rechenzeit der statischen Analyse hat. Die Genauigkeit der Berechnung wird bei dieser Untersuchung mit diesen Parametern nicht beeinflusst. Hierzu müssten weitere Untersuchungen vorgenommen werden.

7. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Grundlagenuntersuchung wurde die Genauigkeit bzw. das Konvergenzverhalten ausgewählter finiter Elemente bezogen auf eine einfache validierbare Problemstellung untersucht. Berücksichtigt wurden hierbei zwei Lastfälle, nämlich die statische und die dynamische Belastung eines einseitig eingespannten Trägers. Die Aufgabenstellung wurde weiterhin für linear elastisches Materialverhalten eingegrenzt.

Die Auflistung der Elementtypen und der Ergebnisse der Biegespannung hinsichtlich der Anzahl der Elemente zeigen, dass die Elemente vom Typ Hexaeder und Tetraeder mit Zwischenknoten ein sehr gutes Konvergenzverhalten aufweisen und sich der theoretischen errechneten Biegespannung annähern.

Die Stelle der Einspannung stellt durch die Randbedingung „feste Einspannung“ im Sinne des Steifigkeitsverhaltens der Elemente bezogen auf die Randfläche eine „Singularität“ dar. Diese Bereiche sollten für die verwendeten Schalen- und Volumenelemente aus der Konvergenzbetrachtung aus-

geschlossen werden. Sind genauere Ergebnisse für diesen Bereich gefordert, sollte hier mit Balkenelementen gerechnet werden bzw. sollten die Daten der FE-Analyse in einem gesonderten Analysewerkzeug wie Mathcad weiterführend untersucht werden.

Aus den Untersuchungen zur dynamischen Analyse ist zu erkennen, dass die Berechnungszeit mit der Erhöhung von Elementen und Knoten bzw. feiner werdender Inkrementierung der Zeit zunimmt. Es konnte festgestellt werden, dass ein grobes Zeitinkrement genügt, um eine ausreichende Genauigkeit der Verformung zu erhalten (320 Zeitschritte für alle untersuchten Elemente). Der ermittelte Zeitschritt berücksichtigt die ausreichende Zeitauflösung der Last und die erste Eigenmode und Eigenform. Es konnte weiterhin festgestellt werden, dass zwischen Zeitauflösung und Berechnungszeit bei kleineren Zeitinkrementen ein linearer Zusammenhang besteht. Die Elementqualität hat den größten Einfluss auf die Dauer und die Genauigkeit der statischen Analyse.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen haben ein hohes Potential für weiterführende Betrachtungen an anderen und komplexeren Modellen. Zunächst einmal ist zu erwarten, dass für eine Auswertung der Spannungen lineare Elementansätze sehr ungenau sind. Dieser Sachverhalt kann durch weitere Untersuchungen zu den Elementen nachgewiesen werden. Dabei ist herauszustellen, welche Elemente für eine Spannungsberechnung zweckmäßig sind. Ebenfalls kann der Einfluss der Elementqualität durch das Steifigkeitsverhalten der

Struktur mittels Modalanalyse sehr gut dargestellt werden. Hierzu wäre ein einfaches Modell, wie etwa eine allseitig eingespannte Platte, ausreichend, denn es könnte eine genaue analytische Berechnung nach Irretier (2001) erfolgen. Ein großes Potenzial liegt auch in weiteren Untersuchungen zur dynamischen Analyse, mit dem Ziel hier eine ausreichende Genauigkeit für unterschiedliche Zielgrößen (Verformung/Amplitude, Spannung oder Eigenform), bei möglichst kurzer Rechenzeit zu erhalten. In diesem Artikel wurde nur ein erster Einblick in die Problematik gegeben.

KURZZEICHENVERZEICHNIS

Zeichen	Beschreibung	Einheit
b	Breite	mm
D.O.F	Degree of Freedom - Freiheitsgrade	
E	Elastizitätsmodul	N / mm ²
F	Kraft	N
F dyn	dynamische Kraft	
FE	Finite Elemente	
FEA	Finite Elemente Analyse	
FEM	Finite Elemente Methode	
FE-Modell	Finite Element Modell	
h	Höhe	mm
l	Länge	mm
m	Anstieg der Biegespannung	N / mm ³
o. g.	oben genannt	
o. Zk.	ohne Zwischenknoten	
m. Zk.	mit Zwischenknoten	
t	Zeit	s
w	Verformung, theoretische Verformung	mm
x	Laufkoordinate	mm
Δ	Differenz	
σ _b	Biegespannung	N / mm ²
σ _{b max}	maximale Biegespannung	N / mm ²
σ _{b th}	theoretische Biegespannung	N / mm ²
σ _∞	Funktion der Biegespannung	
ν	Querdehnzahl	
ϑ	Lehr'sches Dämpfungsmaß (Dämpfungsgrad)	

LITERATUR

Gebhardt C (2014) Praxisbuch FEM mit ANSYS Workbench. Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik, 2., überarbeitete Auflage. Hanser, Carl, München. ISBN: 978-3-446-43919-1

Irretier H (2001) Grundlagen der Schwingungstechnik, 1. Aufl. Vieweg, Braunschweig, Wiesbaden. ISBN: 978-3528039073

Klein B (2015) FEM. Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau, 10., verb. Aufl. Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-3658060534

Stelzmann U, Groth C, Müller G (2008) FEM für Praktiker. Band 2: Strukturmechanik, 5., neu bearb. Aufl. Edition expertsoft, vol 44. expert-Verl., Renningen. ISBN: 978-3816928423

Wittel FK (2010) Eine kurze Einführung in die Finite Elemente Methode.

AUTOREN

Prof. Dr.-Ing Norbert Miersch
B.Eng Robert Roßmann
B.Eng Christian Holz
Technische Hochschule Wildau
Maschinenbau/Werkzeugkonstruktion

E-Mail für Korrespondenz:
norbert.miersch@th-wildau.de



Thin Film Condensation in a Tesla Turbine

Roberto Lisker*, Udo Hellwig, Franz Xaver Wildenauer

Zusammenfassung

Im Folgenden wird der Einsatz eines dünnen Flüssigkeitsfilms in der Auslassregion einer Scheibenläuferturbine beschrieben. Die zunehmenden Relativgeschwindigkeiten am Auslass, die durch die Expansion des Arbeitsmediums bei gleichzeitiger Verminderung des durchströmten Querschnittes hervorgerufen wird, führen zu einer Reduktion der Turbineneffizienz und einem höheren Treibstoffverbrauch. Um dies zu unterbinden, soll ein Teil des gasförmigen Arbeitsmediums kondensiert werden, indem sich ein laminares, dünner Flüssigkeitsfilm bildet. In dem Flüssigkeitsfilm treten höhere Scherkräfte auf, die die Kraftübertragung verbessern. Durch die großen Unterschiede der spezifischen Volumina in der Gas- und Flüssigphase reduziert sich durch die Kondensation der Gasvolumenstrom und somit die Relativgeschwindigkeiten, was zu einer höheren Turbineneffizienz führt.

Abstract

This article deals with the development of a laminar thin film at the outlet area of a disk turbine. The increasing relative velocities at the outlet -caused by the expansion of the working fluid and the reduction of the cross-section area- are reducing the turbine efficiency, resulting in a lower power output and a higher fuel consumption. To overcome this, a certain amount of the working fluid shall condensate at the disk wall propagating a laminar thin film. Within the liquid film higher shear forces will be transported and therefore the power transfer to the disk optimized. Furthermore, and most important, due to the differences in the specific volume between the liquid and the gaseous phase, the volume flow of the gaseous phase is reduced and therefore the relative velocities are effectively reduced, resulting in a higher turbine efficiency.

1. Introduction

Since 2008 the Tesla turbine is a constant research topic at the Technical University of applied Sciences Wildau with the aim to improve the turbine efficiency, starting with the determination of the velocity field inside of the Tesla turbine (Lisker 2009) over various investigations to componentry (Holz 2014), and numerous computational simulations (Meller 2013). The aim is to improve the turbine efficiency, which resulted in the development of a test rig and a turbine Tesla stream turbine prototype (Lisker et al. 2015). The more recent idea to improve the turbine efficiency is the idea to apply condensation at the outlet region to prevent high tangential and radial velocities, which arise due to continuity reasons.

The Tesla turbine is due to its unconventional way to produce power a unique turbine. Invented by Nicola Tesla in 1909 (Tesla 1911), the tur-

bine was never a commercial success and is regarded as a “lost invention” today. Although the fail as a commercial product, the Tesla turbine has stayed an object of academic research throughout the last decades due to its simplicity, low production costs and unique flow field. The Turbine consists of several disks, which are plane parallel arranged on a shaft. The gap between these disks is depending on the working fluid which enters the gap at the outer perimeter with a high tangential velocity. Then the fluid continues its way in a nearly spiral pathway to the exit, located at the centre of the disks. Due to frictional forces, caused by the viscosity of the working fluid, the rotor starts spinning and torque is produced. In Fig. 1 left, a Tesla turbine model is displayed. However, the continuous expansion of the working fluid in the gap element and the decreasing of the cross section whilst increasing the specific volume of the working fluid, leads to an increase in the tan-

gential and radial velocities at the outlet region, causing high energetic losses. Nevertheless, the unconventional build-up of the turbine has a lot of advantages. It is resistant against particles enclosed in the working fluid stream as long as the particle diameter is smaller than the gap width. The turbine can easily be adjusted to different working fluids and conditions by simply changing the gap width. On the downside of this turbine is the limited amount of enthalpy depletion. Like all radial turbines, the maximum enthalpy depletion is determined by the diameter of the turbine rotor which is dependent on the rotational speed and the maximum tensile strain of the used material. If this threshold is reached, the working fluid has to leave the turbine for further expansion into another turbine.

Due to the high surface area in contact with the working fluid and the ability to handle particle laden flows, the turbine is predestined for the use as a heat exchanger. There are two

* corresponding author

possible applications. In the first application case, the turbine can be operated as high temperature gas turbine, which cools the hot gas down to a temperature level which most bladed turbines are capable of so the limited enthalpy depletion is not an issue anymore. The second application is the utilization as condensation turbine behind the main turbine. Here the working fluid can condense which reduces the size of the condenser and therefore increases the cycle efficiency. With in bladed turbines condensation is highly unwanted, due to the damage water particles or particles in general do to turbine blades. But the advantage of an opportunity to condense in a turbine is vast. The pressure can be lowered, the condenser itself can be smaller and the efficiency of the cycle will be increased. Therefore, a condensation stage benefits the cycle. By cooling the disks in the outlet area, the temperature and the specific volume of the working fluid as well as the energetic losses can be reduced. If the temperature at the outlet region is below the saturation temperature, condensation takes place. Hereby the gaseous working fluid changes its state and becomes liquid. The advantage is a much lower specific volume and thus leads to lower tangential and radial velocities. For example, the specific volume of steam at the saturation pressure of 1 bar is $1,694 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ whereas the specific volume of water at the same pressure is $0,001 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, which is 1694 times lower than the specific volume of steam.

2. The flow field inside of a Tesla turbine gap

In the following the flow field inside of a Tesla turbine is explained. As depicted in Fig. 1 right, the course of the Tesla turbine are the increasing relative velocities towards the outlet. The reason is the reduction of the cross-sectional area. To overcome this part of the gaseous working fluid shall condense which leads to a reduction of the tangential and radial velocities. In the following a model is presented for the determination of the radial and tangential velocities. This model is only valid for a laminar flow, which can be easily adjusted by the gap width.

1 Shaft 2 Multiple disks/rotor 3 Spacer with gap outlet 4 Housing 5 Inlet 6 Turbine Outlet

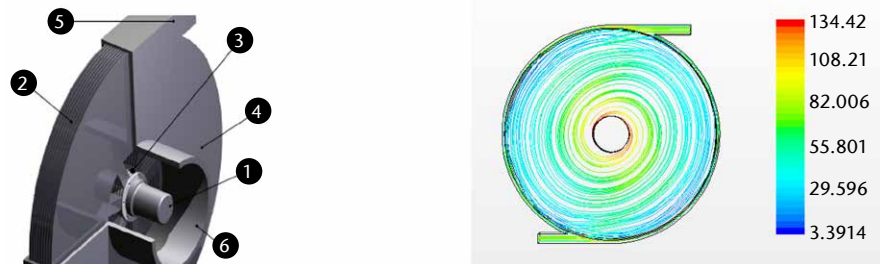


Fig. 1) Left: model of a Tesla turbine, Right: flow field inside of a Tesla turbine

2.1 Velocity field

The determination of the velocity field is essential for all calculations regarding design of a Tesla turbine. Especially the relative velocity between the disk and the fluid stream are important for heat transfer calculations and the determination of the propagation of the fluid film. For the determination of the velocity field it is assumed that the flow is laminar and the velocity profile has a parabolic shape. The laminar condition can be adjusted by the width of the gap b and the correctness of a parabolic velocity profile has been proven by Guha and Sengupta (2013). The velocities for a laminar flow are derived from the continuity and the momentum equations. A detailed derivation was presented by Lisker (2013). The radial velocity in a Tesla turbine is determined by the ratio of the fluid mass flow and the cross-section area as shown in equation 1.

$$c_r(r) = \frac{\dot{m} \phi}{2\pi b r \rho_G} \quad (1)$$

Here b is the width of the gap, r the radius, $\dot{m} \phi$ the mass flow and ρ_G the density of the used working fluid. From equation 1 it becomes immediately apparent, that with a reduction of the cross-section area $2\pi b r$ the radial velocity increases. The tangential velocity is the sum of the disk velocity $r\omega$ and the relative velocity c_r . The later one can be determined according to equation 2.

$$c_v(r) = \frac{2r_1^2 \omega}{r \zeta} + \left[\frac{u_1 r_1}{r} - \frac{2r_1^2 \omega}{r \zeta} \right] e^{\left(-\zeta \frac{1 - \left(\frac{r}{r_1}\right)^2}{2} \right)} \quad (2)$$

Here ω is the angular velocity of the disk, r_1 the outer radius, u_1 the tangential velocity at the inlet and ζ the friction coefficient for a laminar flow which stores information's about the viscosity and the radial velocity. The later one is of great importance. High viscous fluids are known to work best with the turbine. On the other hand, higher viscous working fluids can lead to a power transmission loss, due to the lack of energy transfer inside of the fluid and the resulting non-adaption of velocity changes (Lisker 2013). Due to the information's stored inside of that factor, changes in the radial velocity do affect the tangential velocity and vice versa. For the heat transfer determination, the absolute velocity c will be used to calculate the heat transferred. In the following Fig. 2 the normalised velocities are shown. The yellow line represents the relative tangential velocity ct and the grey one the radial velocity cr . It can be seen that the velocities are rising towards the outlet at the centre of the disk. The higher the relative velocities compared to the disk velocity (blue line) the greater the efficiency losses. The ideal relative tangen-

tial velocity would be just over the disk velocity (red dashed line), applying just enough drag that the system rotates with the load.

From the equations above some important statements regarding the operation and the performance of the turbine can be made. One can see from the radial velocity, that the impact of the mass flow is vast. A low mass flow rate reinforces the impact of the tangential velocity and the pathway of a fluid particle/element inside the gap becomes spiral shaped (Fig. 1 right). Within this mode of operation most of the kinetic energy of the working fluid is transferred to the disks. The turbine operates at its ideal state. A high mass flow rate leads to an increasing radial velocity and the tangential velocity cannot develop properly. At this point the fluid goes straight to the outlet and no momentum transfer in tangential direction takes place. The turbine is flooded with the working fluid and stops the operation.

3 A simplified model for the development of a thin film in a Tesla turbine

In the following a new, simplified model for the establishment of a liquid thin film on a rotating disk is presented. The fluid film shall be very thin and present at the outlet region of the turbine so that a laminar film can be expected to develop. As mentioned before, the reason for film condensation is the reduction of the relative velocities towards the outlet by condensing the gaseous phase and decreasing the volume flow. The first closed theory on film condensation was presented by Nusselt (Stephan 1988). He calculated the thickness and the heat transfer in a water film on vertical plate under the influence of gravity. His findings were remarkable and showed a good agreement with experimental results. Later on these models have been refined and transferred to tubular and turbulent flows (Rose 1999). A similar model with condensation on a rotating plate was presented by Beckett, but here the flow of the working fluid goes from the centre to the outer perimeter (Beckett et al. 1973) which does not fit the flow field inside of the turbine.

However, in a Tesla turbine the fluid film flow in radial direction is governed by balance between the centrifugal forces and the applied surface drag from the gaseous working fluid. If the drag forces of the gas flow are higher than the centrifugal forces, the fluid film is pushed towards the outlet. If the centrifugal influence dominates the film starts spreading all over the disc. For the application in a Tesla turbine the fluid film has to be very thin due to the gap width. Otherwise the turbine can be clogged by the fluid film. To determine the film thickness, a force balance according to Fig. 3 has to be drawn.

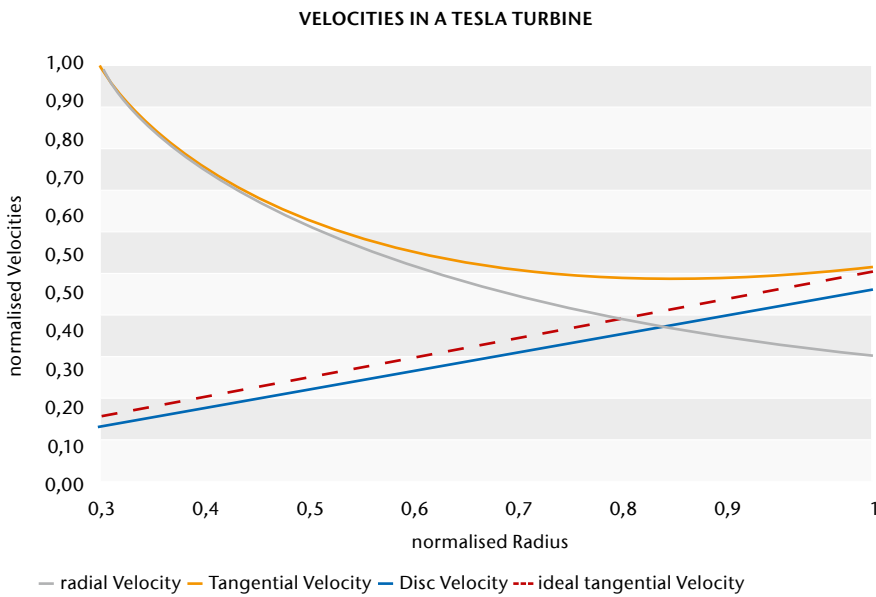


Fig. 2) Normalised velocities in a Tesla Turbine over the normalised radius. One is the outer perimeter and 0.3 the outlet.

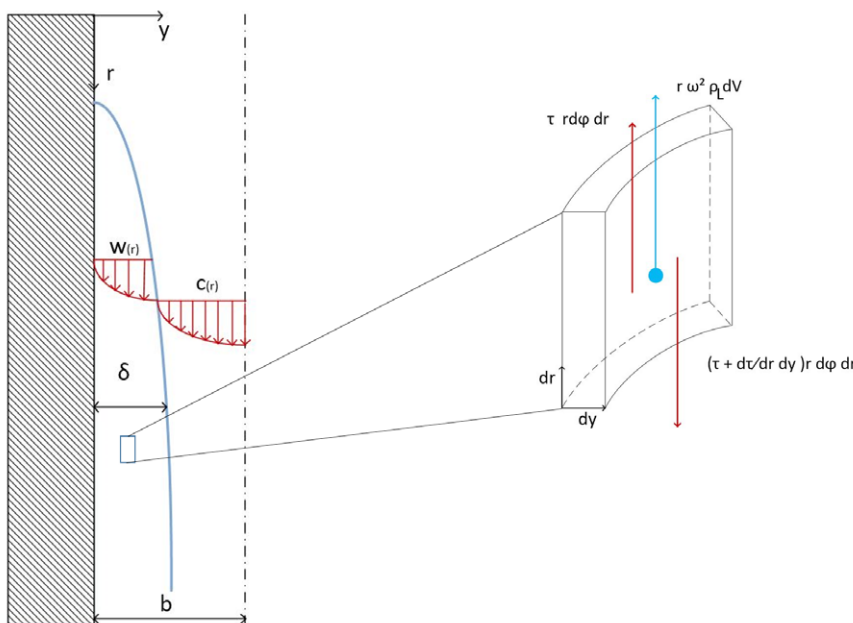


Fig. 3) Model of the Fluid film system

With the assumption of a parabolic the velocity profile in the film can be determined with the following equation.

$$w(y) = -\frac{r\omega^2\rho_L}{\eta_L}(y^2 - \delta y) + \frac{w_\delta(r)}{\delta}y \quad (4)$$

Here r is the radius, ω the rotational speed of the disk, ρ_L the density of the liquid film, η_L the dynamic viscosity of the film, δ the film thicknesses and w_δ the interfacial velocity. The velocity in the film can be depicted into the centrifugal force (1. Term of equation 4) and the interphase velocity w_δ at the phase boundary between the fluid and the gas flow.

The velocity profile of the gas flow can be determined with equation 5. Here $c_r(r)$ is the radial velocity gained from equation 1 b the gap width and $c_{r\delta}$ is the velocity of the gas phase at the interface to the fluid film.

$$c_{r(y)} = \frac{c_{r\delta}(r) - c_r(r)}{(\delta - b)^2}(y - b)^2 + c_r(r) \quad (5)$$

Within the system the no-slip condition applies, meaning that no slip between the wall, the fluid film and the gas phase occurs. This allows a momentum transfer between the single phases (wall - film and film - gas). Concluding from the no slip condition, it is apparent, that the velocity at the interfacial boundaries are equal. Therefore, one can substitute $c_{r\delta}(r)$ with $w_\delta(r)$ in equation 5. Within equation 4 and 5 the interfacial velocity and the film thickness $\delta(r)$ are unknown. Under the assumption that both fluids are Newtonian fluids, the force balance at the phase boundary applies to

$$\eta_G \frac{\partial w_{y=\delta}}{\partial y} = \eta_L \frac{\partial c_{r,y=\delta}}{\partial y} \quad (6)$$

Solving equation 6 leads to the interfacial velocity w_δ .

$$w_\delta(r) = \frac{r\omega^2\rho_L\delta^3 - r\omega^2\rho_L\delta^2b + 2c_r(r)\eta_G\delta}{2\eta_G\delta + \eta_Lb - \eta_L\delta} \quad (7)$$

Combining equation 7 and equation 4 the velocity profile $w(y)$ of the fluid film can be determined. Further simplifications especially neglecting terms of higher order, lead to the velocity profile following profile.

$$w(y) = \frac{r\omega^2\rho_Ly^2}{\eta_L} - \frac{2r\omega^2\rho_L\delta y}{\eta_L} + \frac{c_r2\eta_Gy}{\eta_Lb} \quad (8)$$

With the velocity profile, the mass flow rate of the liquid film, the film thickness can be determined by the energy equation, which is in this case a comparison between the heat available at condensation temperature and the heat conducted (equation 9)

$$\frac{\lambda_L}{\delta}(T_s - T_w)2\pi r dr = \Delta h_v d_{\text{film}} \dot{m} \quad (9)$$

Here Δh_v is the enthalpy of vaporization and λ_L is the thermal conductivity of the film. Rearranging and integrating of equation 9 leads to the final film thickness (equation 10).

$$\delta(r) = \sqrt[3]{\frac{3(T_s - T_w)bv_Lr}{Pr T_s (2\frac{\eta_G}{\eta_L}c_r(r) - Re_\delta\omega b)}} \quad (10)$$

Here Pr is the Prandtl number for the liquid film and Re_δ is the Reynolds number. The later one will be low due to

the thickness of the film. For the determination of the film thickness the denominator is of importance. Here the

velocity between the fluid film and the gas flow is present. If $Re_\delta\omega b > 2\frac{\eta_G}{\eta_L}c_r(r)$ then the centrifugal forces are dominating and the film is pushed towards the inlet. Therefore, the other way around is preferred. From the theory above, we expect the film thickness to be in the range of 10 -50 μm .

4. Results

For the calculation, it is assumed that the turbine is operated with steam/water at a steady state and condensing takes place at the outlet region. The pressure in that region is 0,1 MPa and the condensation temperature is 373,15 K. From that on, the thermophysical properties of steam and water can be calculated. The turbine operates at 750 rpm and the length of the film is assumed with 0,2 m. The reason for choosing a steam/water system are mostly utilisation reasons. For the following verification and testing of the presented model, the turbine test rig at the Technical University of Applied Sciences in Wildau, which is operated with water/steam, shall be used.

In the following picture left, the calculated film thickness for different rotation rates of the disk are presented. As one can see the film thickness is generally in the expected range. With a mass flow of 0.0018 kg/s of steam, a disk rotation rate of 750 rpm and an initial radial velocity of 35 m/s a fluid film thickness of 26 μm was achieved. Furthermore, the influence of the rotation rate ω is shown. Higher rotational rates do have an impact on the centrifugal forces, who pushes the mass of the film towards the inlet. The progression of the curve is bulgier at the start of the film resulting in a higher resistance for the gas flow.

From Fig. 4 left, one can further see that the film thickness decreases towards the outlet, which is caused by the increasing radial velocity. A higher radial velocity increases the drag on the film surface and therefore the film velocity increases which results in a thinner film. In Fig. 4 right, the interfacial velocity w_δ is presented for different mass flows. As mentioned above the interfacial velocity is of importance. A positive velocity indicates that the fluid film will develop and stay on the disk, since the drag

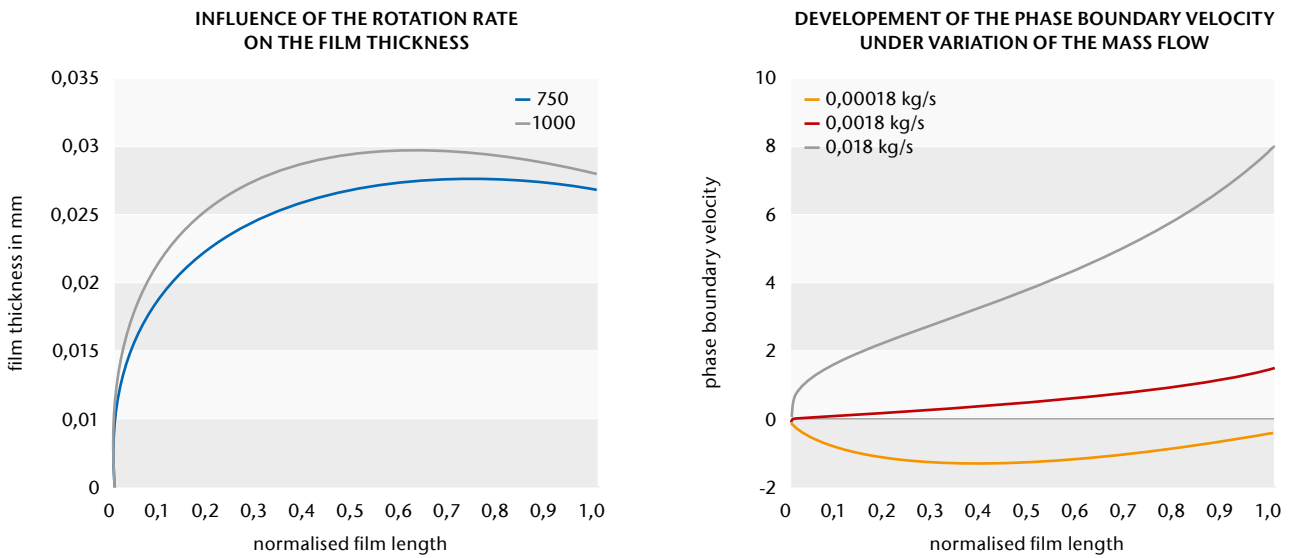


Fig. 4) Left: Calculated film thickness with a disk rotation rate of 750 1/s and 10000 1/s, Right: Interfacial velocity in dependence on the mass flow. Here 1 is the disk gap outlet and 0 is the beginning of the film development

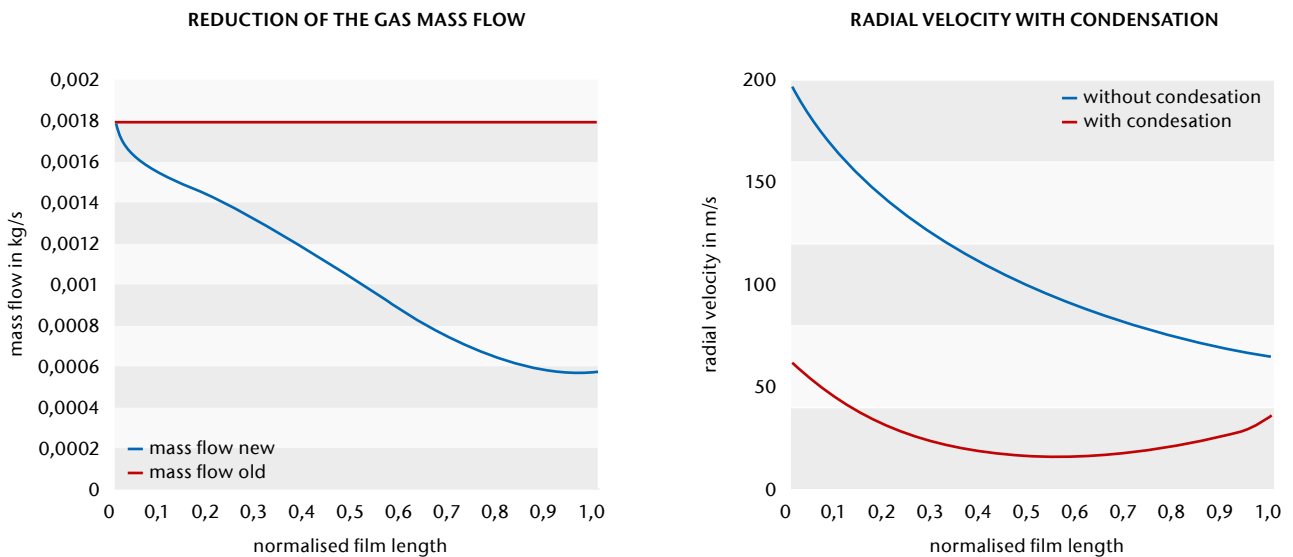


Fig. 5) Left: Adapted mass flow of the working fluid due to condensation, Right: Change in radial velocity due to condensation.

force applied by the radial velocity of the working fluid is higher than the centrifugal force induced by the disk rotation. A negative interfacial velocity shows that the centrifugal forces dominate and the film streams in the opposite direction. The grey line indicates a high mass flow, resulting into a high interfacial velocity, causing efficiency losses. The orange line represents an optimised interfacial velocity. The yellow line represents a negative interfacial velocity meaning that here the mass flow is too low to produce the necessary drag forces and establish a liquid film. Concluding one can say that the turbine operates best with low mass flow rates. Therefore, an op-

timum has to be found for the establishment of a liquid thin film. One goal of the fluid film is to reduce the radial velocities towards the outlet, since they account for efficiency losses. Per equation 1 the velocity is dependent on the mass flow of the working fluid and the cross-section area. By condensing the gaseous working fluid it states changes from gaseous to liquid, resulting in a lower specific volume and this results in a mass flow reduction of the gaseous phase. In Fig. 5 left, the reduction of the mass flow of the gaseous working fluid is shown. The red line indicates the mass flow without condensation and the blue line the mass flow with condensation.

Over the length of the fluid more than 50% of the gaseous working fluid will condensate which has a significant effect on the radial velocity. As shown in Fig. 5 right, the radial velocity decreases dramatically over the film length which shows that condensation at the outlet of a Tesla turbine decreases the velocity and therefore increases the turbine efficiency since the relative velocity between the disk and the working fluid is effectively lowered.

5 Discussion

With the presented model, the utilisation of a laminar thin film at the outlet of a Tesla turbine gap element could have been successfully modelled. From the model the thickness of the fluid film could have been calculated -maximum depth of $26\ \mu\text{m}$ -, which was in the expected range. Furthermore, the impact of the rotational speed of the disk on the film thickness and the importance of the radial gas velocity have been shown. It can be concluded that a higher radial velocity benefits the development of a laminar thin film due to the higher drag forces applied to the film. On the contrary, higher radial velocities are leading to efficiency losses. Therefore, like all engineering tasks, it is to find an optimum between drag forces and film thickness. To establish the fluid film, condensate must be present, which is generated by sub cooling the disks in the outlet area. With the ability to condensate inside of a Tesla turbine, the volume flow of the gaseous working fluid can be decreased dramatically, since the differences in specific volume between steam and water is in the range of 1: 1640. Meaning that $1,64\ \text{m}^3$ of steam at $0,1\ \text{MPa}$ and $100\ ^\circ\text{C}$ is an equivalent of $0,001\ \text{m}^3$ of water. Therefore, condensing has a big impact on lowering the specific volume and the radial and tangential velocity inside a Tesla turbine gap element. From the model presented the adapted radial velocity was calculated. Assuming that there is no impact on the film thickness. This is wrong in a certain way. Since the change in radial velocity affects the film thickness and the interfacial velocity. In the next iteration, this change will be implemented. In general, one can state that as long as the interfacial velocity is bigger than $0\ \text{m/s}$ the drag applied to the film surface will push it towards the outlet.

Furthermore, the presented model is only valid for a laminar flow under the assumption that the tangential velocity of the gaseous working fluid has no impact on the centrifugal forces. This could be assumed since the film is very thin. But nevertheless, the tangential velocity will have an impact on the fluid film. Wave formation could occur, and therefore droplets could be pulled

out of the film, resulting in a lower mass flow and depending on the droplet size, it could be pushed towards the inlet. In a practical application, the flow in radial direction must be present throughout the whole disk. This is not the case, since there are always minor changes in the radial velocity field (pressure drops from the nozzle, etc.). This has to be taken into account for the film design.

6 Outlook

With the presented model, the effects of film condensation in a disk turbine can be determined and described. By realising condensation inside of a disk turbine, the increasing velocities towards the outlet can be overcome and significantly reduced. The practical usage of a condensing turbine is huge. With such turbines, the steam cycle efficiency can be increased due to the improved enthalpy drop. The steam expansion can be ridden far more in the wet steam area, resulting into lower turbine outlet pressures and bigger energy extraction. With this advantage against conventional bladed turbines, the Tesla turbine could overcome its current winter sleep and face a future in industrial applications. At the moment, it is too early to predict an efficiency gain, since the theoretical model needs verification. But the results so far seem promising. Therefore, the next step is to develop a Tesla condensation turbine and verify the model, which will take place at the Turbine test rig at the Technical University of Applied Sciences in Wildau.

REFERENCES

- Beckett PM, Hudson PC, Poots G (1973) Laminar film condensation due to a rotating disk. *J Eng Math* 7(1):63–73. doi: 10.1007/BF01535269
- Guha A, Sengupta S (2013) The fluid dynamics of the rotating flow in a Tesla disc turbine. *European Journal of Mechanics - B/Fluids* 37:112–123. doi: 10.1016/j.euromechflu.2012.08.001
- Holz C (2014) Ansätze zur serientechnischen Auslegung von Tesla-Turbinen. Bachelorarbeit, Technische Hochschule Wildau
- Lisker R (2009) Numerische Strömungsuntersuchungen an einer Tesla Turbine. Diplomarbeit, Technische Hochschule Wildau
- Lisker R (2013) The Design of a Tesla Turbine based Organic Rankine Cycle for Waste Heat Recovery. Master Thesis, Technische Hochschule Wildau
- Lisker R, Hellwig U, Wildenauer FX (2015) Entwicklung und Leistungsbestimmung einer 2,2 kW Tesla Turbine. *Wiss Beitr TH Wildau* 19:61–66. doi: 10.15771/0949-8214_2015_1_8
- Meller R (2013) Strömungstechnische Untersuchung der Eintritts- und Austrittsströmung an einer Scheibenturbine. Bachelorarbeit, Technische Hochschule Wildau
- Rose JW (1999) Condensation heat transfer. *Heat and Mass Transfer* 35(6):479–485. doi: 10.1007/s002310050351
- Stephan K (1988) Wärmeübergang beim Kondensieren und beim Sieden. Wärme- und Stoffübertragung. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo. ISBN: 978-3-540-18075-3
- Tesla N (1911) Turbine. Patent Application US1061206, 17 Jan 1911

AUTHORS

M.Eng. Roberto Lisker
Prof. Dr.-Ing. Udo Hellwig
Prof. Dr. rer.nat. Franz Xaver Wildenauer
Technische Hochschule Wildau

E-Mail for correspondence:
roberto.lisker@th-wildau.de



Virtuelle Steuerung eines verteilten Energiemanagements

Jörg Reiff-Stephan*

Zusammenfassung

Energiemanagementaufgaben finden zunehmende Berücksichtigung für einen effizienten Betrieb von Produktionsanlagen. Kostenreduktion bei hoher Prozessstabilität ist hierbei eine wesentliche Aufgabenstellung zur Aufrechterhaltung der Wettbewerbsfähigkeit sowie zur Erfüllung von normativen wie auch gesetzlichen Rahmenbedingungen dar. Der vorliegende Beitrag zielt auf die Vorstellung eines Ansatzes zur Implementierung eines derartigen Managementsystems am Beispiel einer Thermoprozessanlage. Hierzu wird insbesondere das als Jidōka aus dem TPS bekannte Prinzip mit selbstadaptierender Grenzwertsetzung aufgenommen und eine Ausführungsmöglichkeit prototypisch vorgestellt.

Abstract

Manufacturing facilities must increasingly take the energy management into account for operating efficiently within a production process. Future efforts and solutions will focus on improvement of process stability and cost reduction to meet the needs of successfully competing in local and global markets, especially for small and medium-sized enterprises. This paper describes an approach for manufacturing facilities using an example for thermo-processing equipment. For this purpose, the Jidōka principle of the Toyota Production System (TPS) is used, prototypically presenting the mechanism of the self-adapting limit setting as well as its implementation.

1. Einführung

Um den Herausforderungen zukünftiger Wertschöpfungsnetzwerke gewachsen zu sein, sind produzierende Unternehmen in verstärktem Maße auf die Erfassung energetischer Daten sowie deren Verarbeitung in effizienten Prozessketten angewiesen (Blesl & Kessler 2013, Tönsing 1996, Kahlenborn et al. 2012, Weinert 2010). Somit gewinnen industrielle Energiemanagementsysteme zunehmend an Bedeutung. Die informationstechnische Vernetzung der Produktionsprozesse wird hierbei durch die Strategien und Befähiger der Industrie 4.0 stark vorangetrieben. Prozess- und Serviceorientierung, Interoperabilität, horizontal und vertikal vernetzte Informationsketten wie auch Datenübertragungssysteme, die bei hoher Verfügbarkeit in Echtzeit fungieren, sind hierzu einige der Bausteine für ein (energie-)effizientes Produktionssystem (MetamoFAB 2016). Zieht man die unter Federführung der acatech ent-

standene Studie (acatech 2016) hinzu, so sind die drei wesentlichen Entwicklungsfelder Datenauswertung und -analyse, Prozessmanagement sowie Kundenbeziehungsmanagement zu benennen. In diesem Umfeld werden im Folgenden Ansätze aufgezeigt, die erste Implementierungsmaßnahmen zu einem effizienten Energiemanagement ermöglichen könnten.

2. Anforderungsanalyse

2.1 Aufgabenbereiche

Für eine Erweiterung bestehender produktiver Strukturen um die Funktionalität eines Energiemanagements ist es erforderlich, sich ein klares Bild zu verschaffen, welche Möglichkeiten das bestehende Produktionssystem bereits aufweist. Die oben angeführte acatech-Kompetenzstudie macht deutlich, dass das Prozessmanagement wie auch die Prozessorientierung in der deutschen Wirtschaft offensichtlich noch unzureichend gelöste Herausforderungen dar-

stellen, obwohl diese unabhängig von Industrie 4.0 bereits lange als solche bekannt sind (acatech 2016).

Wesentlich wird es sein, sich über die Aufgaben des Energiemanagements in der Umsetzung der DIN EN ISO 50.001 bzw. DIN EN 16247-1 im Klaren zu sein (Abb. 1). Primäre betriebswirtschaftliche Größen wie beispielsweise der Energiepreis oder Kennzahlen zur Wettbewerbsfähigkeit sind hierbei als den rechtlichen und normativen Anforderungen, die aus der Ressourcenknappheit und Umweltbelastung resultieren, gleichrangig zu betrachten. Nicht zuletzt der Ausweis als energie-schonendes Unternehmen kann eine Verbesserung des eigenen Images bewirken. Wichtig ist, dass dieser Prozess des Analysierens und Ableitens als kontinuierlicher Prozess der Verbesserung des Produktionssystems berücksichtigt wird. Primäre Zielsetzungen beschreiben hierbei die Energiekostenreduzierung wie auch die Aufrechterhaltung eines stabilen, verfügbaren Prozesses.

* korrespondierender Autor

2.2 Befähiger

Für eine effiziente Führung energietischer Prozesse ist die Aufnahme, Übertragung und Verarbeitung von energierelevanten Kenngrößen eine entscheidende Anforderung. Die rapide sich entwickelnde Digitalisierung der Wertschöpfungsnetzwerke bietet hierfür hervorragende Ansatzpunkte. Die informationstechnische Integration der Dinge (technische Entitäten), Daten und Dienste (iD3) hat hierbei sowohl eine vertikale als auch eine horizontale Ausprägung (Lipinski et al. 2014). Es entstehen cyberphysische Produktionssysteme (CpPS), die den Verbund der informations- und softwaretechnischen Komponenten mit den mechanischen und elektronischen Entitäten beschreiben (Dorst et al. 2015).

Im Detail umfasst die vertikale Integration in diesem Kontext die automatisierte Entscheidungsfindung über die Ebenen der Automatisierungspyramide hinweg, um beispielsweise Anpassungen von technologischen Informationen zu technischen Entitäten (wie Motoren oder Ofensysteme) direkt am Einsatzort für Regelinformationen nutzbar zu machen. Dahingehend erfolgt die horizontale Integration entsprechend so, dass operative Informationen aus den Diensten (z. B. mit Hilfe von Energie-Monitoring-Systemen) zusammen mit Kontextinformationen (z. B. Bereitstellungsinformationen der Energiebörse) ohne Stopp rückwärts entlang der Wertschöpfungskette direkt in die jeweilige Produktion einfließen. Diese Integration überwindet dabei auch intelligent Unternehmensgrenzen, so dass jeder Kommunikationspartner flexibel entscheiden kann, welche Datengranularität bereitgestellt wird. Weiterhin könnten beispielsweise Energiebereitsteller vorwärtsgerichtet in Echtzeit Informationen über die Anforderungen bei ihren Abnehmern erhalten.

An Methoden und Werkzeugen zum Abfragen und Bereitstellen der Daten in Echtzeit wird hierbei intensiv gearbeitet. Es gibt mehrere Protagonisten, die durch Standardisierungsbemühungen versuchen, eine entsprechende allgemeine Lösung anzubieten. Derzeit realisiert diese harten Echt-

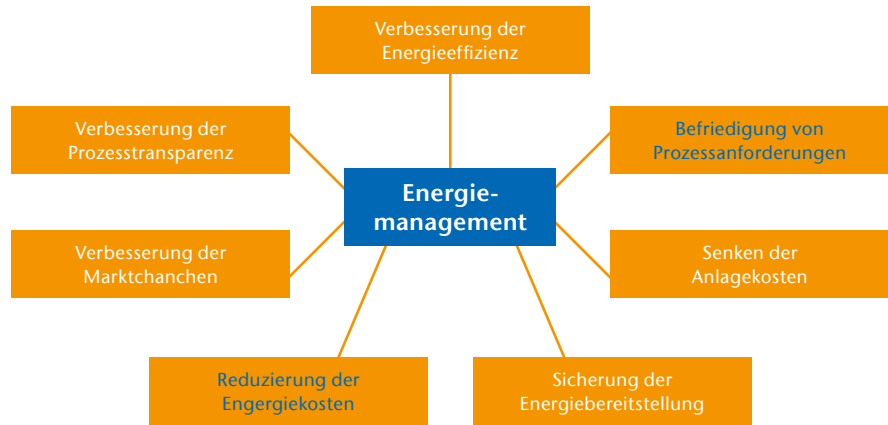


Abb. 1) Aufgaben von Energiemanagementsystemen.

zeitanforderungen für verteilte Systeme bis auf Applikationslevel der Standard DDS (Data Distribution Service) der Object Management Group (Object Management Group 2015). Der Standard ist als Open Source in vielen Bereichen weiterentwickelt worden, kann aber aufgrund seiner spezifischen Ausrichtung nicht an allen Stellen innerhalb des Informationsnetzwerkes Anwendung finden. Dahingehend ist das Standard-OPC-UA (Open Platforms Communication – Unified Architecture) der OPC Foundation ein sehr breit aufgestelltes industrielles M2M-Kommunikationsprotokoll (OPC Foundation 2015). Seine serviceorientierte Architektur (SOA) ermöglicht die Vermittlung von Datenpaketen zwischen den verschiedenen Teilnehmern basierend auf dem OSI-Schichtenmodell. Die Implementierung eigener Security-Dienste kann so sehr effizient erfolgen. Die derzeit noch einer breiten Anwendung entgegenstehende fehlende Zeitskalierbarkeit wird innerhalb einer ISO-Arbeitsgruppe der IEEE802.1 aufgegriffen. Der Bereitstellung der Informationen mit einem zeitsynchronen Protokoll soll in einem harten Echtzeitsystem, „Time Sensitive Networks“ (TSN) genannt, Rechnung getragen werden. Welcher Standard in Zukunft seine Anwendung in der CpPS-Applikation findet, wird sich anhand der Anforderungen an die eigentlichen Anwendungen entscheiden.

Die effiziente Verarbeitung der übertragenden Informationen wird im CpPS-System mitunter durch die Prinzipien der Selbstorganisation geregelt. Dies erfolgt beispielsweise mit Hilfe

von Kapazitätsbörsen oder dienstorientierten Agentensystemen. Derartige Systeme regeln den Verbrauch verfügbarer Ressourcen entsprechend festgelegter oder dynamisch erzeugter Gewichtungen und reagieren dynamisch auf sich ändernde Rahmenbedingungen. Je nach Prozess bleibt jedoch die Entität Mensch als Entscheidungsträger erhalten. In solchen Fällen erfährt der Mensch Unterstützung durch das selbstorganisierte System in Form von simulierten Varianten verschiedener Szenarien. Die endgültige Auswahl bleibt dann dem Menschen vorbehalten (MetamoFAB 2016).

3. Konzeptbetrachtung

Ausgehend von der Betrachtung zur verteilten Steuerungsarchitektur wird ein Konzept zum Energiemanagement vorgestellt, das den beiden anvisierten Themenstellungen Kostenreduktion und hohe Prozessstabilität gerecht wird.

3.1 Verteilte Steuerungsarchitektur

Wertschöpfungsprozesse in einem Produktionssystem sind durch die Umwandlung von Energie gekennzeichnet. Im überwiegenden Sinne werden alle nutzbaren Energieformen auf eine Bereitstellung elektrischer Energie zurückgeführt. Umwandlungs- und Nutzungsprozesse werden hierbei geregelt mit Steuerungs- und Sensorik/Aktorik-Entitäten an den verteilten Einsatzstellen im Wertschöpfungsprozess. Diese Entitäten können im Rahmen verteilter Architekturen in einem heterogenen Produktionsum-

feld künftig dynamisch an veränderte Prozessbedingungen angepasst, neu angeordnet oder ergänzt werden.

Eine Hardware-SPS könnte so zukünftig an Bedeutung verlieren, da Sensoren und Aktoren mit Hilfe IP-basierter Adressierung über standardisierte Kommunikationsknoten mit der Steuerungssoftware in der Cloud interagieren können (Abb. 2). Die Implementierung von neuen Feldgeräten verursacht nur noch einen minimalen Aufwand hinsichtlich der Verdrahtung. Dieser beschränkt sich dann auf die Verbindungen zur Energieversorgung und zum Kommunikationsknoten. Im Fall von energieautarken Funksensoren entfällt die Verdrahtung völlig. Die industrielle Cloud der Produktionsautomation wird aller Voraussicht nach eine private bzw. hybride Struktur aufweisen (Langmann & Stiller 2015, Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen 2016). Das Steuerungsnetzwerk wird somit vorzugsweise auf die Unternehmensgrenzen begrenzt sein, jedoch einen bedarfsgerechten Informationsaustausch mit anderen Netzwerken zulassen.

Mit den IP-basierten Entitäten wird die Realisierung der horizontalen und der vertikalen Integration im Produktionsnetzwerk möglich. Das in Abb. 2 vorgestellte System nimmt als Beispiel einen Industrieofen auf und verknüpft die wesentlichen Einzelprozesse zum Betreiben desselben im digitalen Netzwerk. Die Idee einer virtuellen SPS ist hier bereits mit aufgegriffen, sie ist jedoch nicht unabdingbare Voraussetzung für ein Energiemanagement

(Langmann & Stiller 2015). Der regulierte Zugang aus den Cloudsystemen außerhalb des eigenen Unternehmens wie auch innerhalb der eigenen Datenstrukturen muss durch den Schutz der Daten und Diensten gegen Missbrauch wie unbefugten Zugriff, Veränderung oder Zerstörung gewährleistet werden. Die Ziele von Maßnahmen zur Angriffssicherheit sind dahingehend die Erhöhung der Vertraulichkeit, der Integrität und der Verfügbarkeit.

3.2 Ableitung von Führungsaufgaben

Die Prozessabläufe werden unter betriebswirtschaftlichen Anforderungen in einem zunehmend hohen Maße material- und energieeffizient ausgeführt. So kann beispielsweise das energetische Profil eines Prozessschrittes als Entscheidungsfaktor in Produktionsplanungsvorgängen einfließen, wodurch Lastspitzen im fabrikinternen Energienetz vermieden werden (Weinert 2010). Lastspitzen sind hierbei mitunter auf Einschaltprozesse von Maschinen und Anlagen zurückzuführen. Oftmals wird das durchschnittliche Lastprofil des eigentlichen Produktionsprozesses um ein Vielfaches überschritten. Da die Maximalwerte im Lastprofil die energetischen Bereitstellungskosten direkt beeinflussen, bietet ein intelligentes Lastmanagement hohes Potential zur Kostenreduktion (Tönsing 1996).

Mit dem Wissen um die kostenoptimale Bereitstellung der elektrischen Energie an der Energiebörse kann eine Auftragseinstellung in den Produktionsprozess erfolgen. Hierzu kann über

Agenten die Preisentwicklung an der Börse automatisiert beobachtet und der wartende Prozess für die Auftragsabwicklung freigegeben werden.

Dem weiteren Aspekt der Prozessstabilität wird durch die genaue Kenntnis der aktuellen Energiebedarfe von Produktionsanlagen, Maschinen und einzelnen Baugruppen und die damit mögliche, vergleichende zeitliche Betrachtung Rechnung getragen, um beispielsweise Wartungs- und Instandhaltungsprozesse unterstützen zu helfen (Langlois 2002, Niggemann et al. 2014). Hierzu wird die Detektion anormaler Anlagenzustände anhand der Trendanalyse energetischer Daten herangezogen. Voraussetzung hierfür ist die Befähigung der bestehenden technischen Entitäten zur Erfassung entsprechender Daten. Diesbezüglich bietet der Markt eine Vielzahl an Lösungen zur Umsetzung. Ein Vergleich der Lösungen zeigt auf, dass für den jeweiligen Anwendungsfall das geeignetste System zu identifizieren ist (Lipinski et al. 2014).

Durch die genauen Kenntnisse der aktuellen und zukünftigen Energiebedarfe von Produktionsanlagen, Maschinen und einzelnen Baugruppen kann eine Verarbeitung der Daten beispielsweise unter Nutzung des durch das TOYOTA-Produktionssystem (TPS) unter dem Begriff Jidōka (Autonoma-tion) vorgestellten Prozessführungs-konzeptes erfolgen. Hierbei werden im Falle einer Störung durch ein automatisiertes Stoppen des Produktionsprozesses

- ein herstellungsbedingter Ausschuss,
- eine Beschädigung der Produktionsanlage sowie
- weitere Verschwendungen wie Energieineffizienzen,

vermieden. Für einen stabilen Prozess wird diese als selbstoptimierendes System ausgelegte Stopp-Strategie ergänzt durch Entscheidungsregeln zur Unterstützung von Wartungs- und Instandhaltungsprozess.

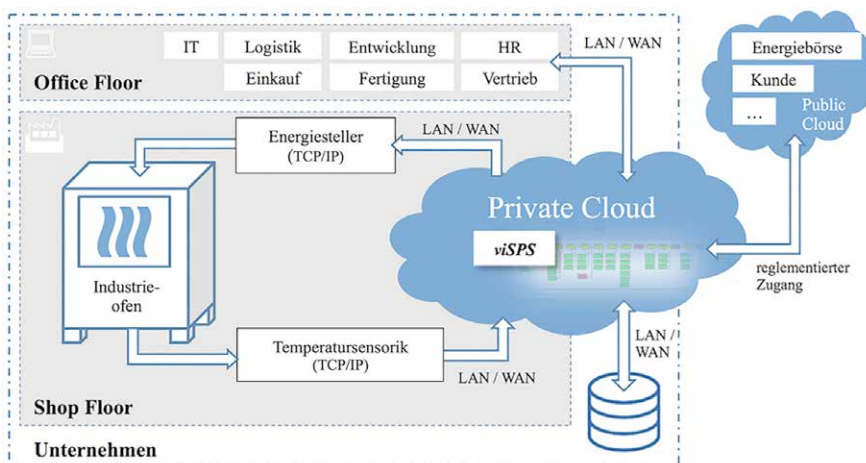


Abb. 2) Informationsfluss einer Thermoprozessanlage mit cloudbasiertem Führungssystem.

4. Applikation

4.1 Prototypischer Aufbau

Das Spektrum für Applikationen zur Nutzung energetischer Daten ist breit gefächert. Ein mit einem Industriepartner definiertes Anwendungsszenario, welches die zuvor genannten Aspekte vereint, ist beispielsweise die Verbesserung der Energieeffizienz an einer Thermoprozessanlage (siehe auch Abb. 2). Die Nutzungsdauer von Thermoprozessanlagen ist mit einer Betriebsdauer von bis zu 30 Jahren sehr lang. In Bezug auf die mitunter veralteten Technologien bietet sich hierbei ein hohes Potential zur Reduktion des Energiebedarfs durch Optimierungsmaßnahmen. Neben der Optimierung des Ofenwandaufbaus oder der Beheizungstechnik führt unter anderem auch eine intelligente Steuerungs- und Regelungstechnik zur Verbesserung der Energieeffizienz sowie zu einer höheren Prozessstabilität. Energetische Daten können hierbei direkt als Informationen für die Steuerungs- und Regelungsprozesse der Thermoprozessanlage dienen, aber als Entscheidungskriterium für übergeordnete Funktionen der Produktionsplanung und Steuerung zum Einsatz kommen. Die Umsetzung der beschriebenen Optimierung wird anhand eines Labordemonstrators prototypisch verdeutlicht. Als Thermoprozessanlage wurde hierbei bewusst ein Laborofen des Typs VD der Firma Mihm-Vogt & Co gewählt. Dieser ältere Bautyp wurde hinsichtlich der sensorischen Komponenten erneuert, um die Tauglichkeit der Optimierungsmaßnahmen für Anwendungen mit Brownfield-Charakter zu prüfen. Ein erster Versuchsaufbau ist in Abb. 3 dargestellt.

Die verbindungsprogrammierte Steuerung wurde durch eine modularisierte, speicherprogrammierbare Steuerung des Typs X20 der Firma B&R AUTOMATION GMBH ersetzt. Die Konfiguration wurde erweitert mit einer Energiemesskarte des Typs X20AP3131 und einem Analogmodul zur Einbindung der Temperatursensorik. Die Einkopplung der Lastströme erfolgt über einen Stromwandler vom Typ ASRD 14 3X80/5A der Firma MBS AG. Die Verwendung des Stromwandlers vereinfacht später die Umsetzung auf die

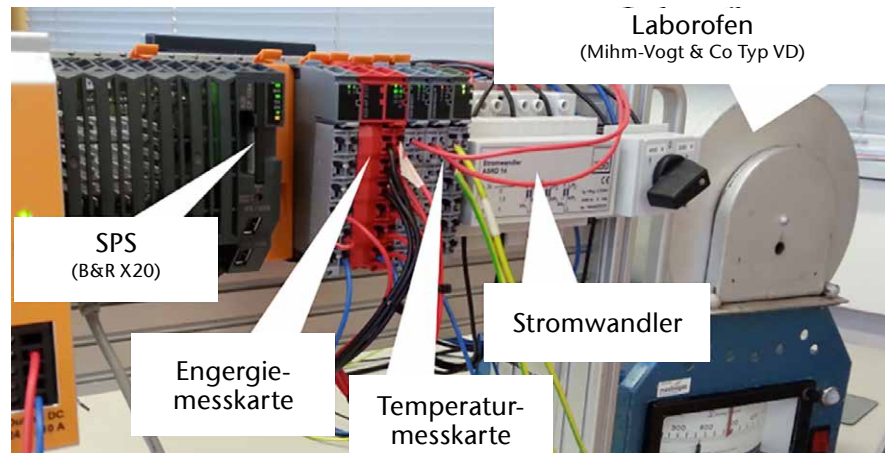


Abb. 3) Prototypischer Versuchsaufbau.

reale Prozessanlage. Logisch erfolgt die Bereitstellung der Daten über eine OPC-UA-Schnittstelle aus der Steuerung heraus. Eine Sicherung der Daten wird über eine relationale MS[®]SQL-Datenbank gewährleistet. Aus dieser können die erforderlichen Regeln für übergeordnete Steuerungsaufgaben sowie die Visualisierung inklusive der Kennzahlenbildung und der Echtzeitgraphen abgeleitet werden.

4.2 Selbstadaptierende Führung

Wie ausgeführt, kann zur Aufrechterhaltung der Prozessstabilität bei optimaler Energiepreisnutzung das Jidōka-Prinzip Anwendung finden. Für die betrachtete Applikation ist eine Führungsgröße beispielsweise die benötigte Energiemenge zur Durchführung eines thermischen Fertigungsprozesses. Der Prozess-Ist-Wert wird kontinuierlich erfasst und dem energetischen Fingerabdruck des zu fertigenden Produkts zugeordnet wie auch übergeordneten Steuerungsprozessen als Leistungskennzahl zur Verfügung gestellt. Mittels Trendanalyse können die Daten dann für die Erhöhung der Energieeffizienz der Thermoprozessanlage genutzt werden.

Wird etwa für die Produktion von einzelnen Werkstücken oder Losen bei gleichen Prozessparametern, für den thermischen Fertigungsprozess ein anhaltend höherer Energiebedarf festgestellt, kann dies auf anormale Anlagen- und Prozesszustände hinweisen. Der erhöhte Energiebedarf ist dann beispielsweise auf die ungünstige Parametrierung vorgelagerter Prozesse, unerkannte Wärmebrücken oder den

Verschleiß der Heizelemente bzw. des Wandaufbaus im Inneren des Ofens zurückzuführen. Durch eine Trendanalyse erfolgt der Abgleich historischer Daten mit der aktuellen Zustandsüberwachung. Überschreiten die Werte die Warngrenze, wird automatisiert ein Inspektionsauftrag ausgelöst, um der Aufgabe der Aufrechterhaltung der Prozessstabilität Rechnung zu tragen. Kommt es zur Überschreitung von Eingriffsgrenzen, wird der Prozess automatisiert gestoppt und es kann nach den Ursachen für die divergierenden Energiewerte gesucht werden.

Exemplarisch für den beschriebenen technologischen Prozess kann ein selbstadaptierendes Regelungsmodell spezifiziert werden. Unter Nutzung des Prozessparameters „Wirkleistung“ (P_w) kann eine Führung unter den Zielkriterien Energieeffizienz aber auch als Anpassung von Eingriffs- und Selbstabschaltungsgrenzen beschrieben werden. Hierbei werden mit Kenntnis der Ist-Werte $P_w(t)$ und einer betriebsschichtweisen Trendanalyse eine Warn- (ε_a) und eine Abschaltgrenze (ε_h) als regulierendes Element spezifiziert und in die Prozesssteuerung implementiert (Abb. 4). Das Führungssystem wird gleichermaßen befähigt, diese Grenzen auf der Basis vorangegangener Prozesszeiträume anzupassen. Hierzu wird folgender funktionaler Zusammenhang getroffen:

Warngrenze:

$$\lim_{t \rightarrow t_1} f(t) = P_w(t) + \varepsilon_a \quad (1)$$

Haltegrenze:

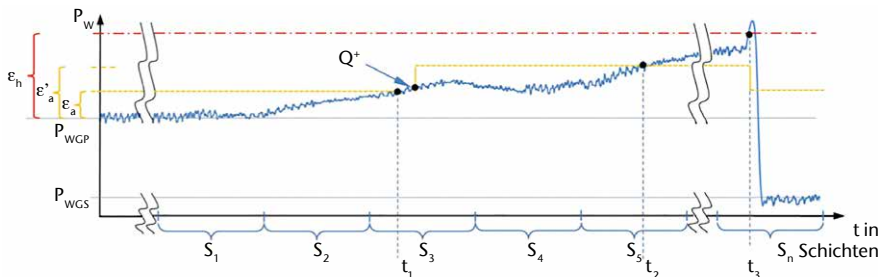
$$\lim_{t \rightarrow t_2} f(t) = P_w(t) + \varepsilon_h \quad (2)$$

Wesentliches Kriterium wird neben der Energie auch die Grundaussage zur Ursache des erhöhten Energieaufwandes sein. In der Diskussion nach Abb. 4 zeigt sich, dass über den Betrieb von zwei Schichten (S_1 und S_2) die Leistungsaufnahme (auf Grundlastniveau P_{WCP}) zum kontinuierlichen Betrieb annähernd stabil bleibt. Innerhalb der dritten dargestellten Periode konvergiert der Funktionswert $f(t) = P_w(t)$ mit dem Grenzwert $f(t_1) = P_w + \varepsilon_a$. Zum Zeitpunkt t_1 und mit Erreichen des Grenzwertes wird demnach eine Alarmmeldung automatisch ausgegeben und eine Prüfung der Anlage initiiert. Eine Quittierung des Signales ohne entsprechende Einflussnahme (Q^+) seitens des Bedienpersonals führt zu einer selbstadaptiven Grenzwertanpassung innerhalb des Führungssystems von $\varepsilon_a = \varepsilon_a + \xi_s \iff \xi_s \in x$ mit $x =$ Schrittweite. Der weitere Betrieb der Thermoprozessanlage in den Folgeschichten wird mit angepasstem Grenzwert getätigt. Der erweiterte Fall der Überschreitung der Haltegrenze nach Gleichung 2 führt zur selbsttätigen Stillsetzung der Anlage durch das Führungssystem und damit zu einem Sinken der Leistungsaufnahme auf das Grundlastniveau der Steuerung (P_{WCS}). Dieser Fall tritt ein, wenn bei Überschreiten der Warngrenze (ε_a) ein Weiterbetrieb der Anlage über Folgeschichten S_n (mit $n \in 6..m$) getätigt wird und durch einen sprunghaften Anstieg der relevanten Prozessgröße zum Zeitpunkt t_3 die Grenzüberschreitung ε_h eintritt. Prozessbedingt kann dies infolge von verspäteten Reaktionszeiten durch das Instandhaltungspersonal zu-

stände kommen. Nach einer automatischen Stillsetzung der Anlage wird der Grenzwert für die Warngrenze (ε_a) durch das Führungssystem selbsttätig auf den ursprünglichen Wert zurückgesetzt.

5. Zusammenfassung

Das Energiemanagement findet zunehmende Berücksichtigung in der Auslegung und dem Betrieb von agilen Produktionssystemen. Insbesondere wird das Jidōka-Prinzip, im Sinne des TOYOTA-Produktionssystems, durch die erweiterten, technologischen Möglichkeiten von cyberphysischen Systemen vorangetrieben. Aufgrund der forcierten Vernetzung industrieller Strukturen steht so beispielsweise für automatisierte Abschaltvorgänge zunehmend ein breites Spektrum an Daten zur Verfügung. Somit kann die Detektion anomaler Anlagenzustände anhand von Trendanalysen energetischer Daten erfolgen. Voraussetzung hierfür ist die Befähigung der bestehenden technischen Entitäten zur Erfassung entsprechender Daten und zu deren Auswertung. Das vorgestellte SPS-orientierte Gesamtkonzept ermöglicht neben der Messung der energierelevanten Prozesskenngröße die Bereitstellung über eine flexible MS^{SQL}-Datenbank und OPC-UA-Anbindung an die Steuerungsplattform. Zukünftig werden so auch die Auslegung und Integration eines virtuellen Prozessrechners in eine Private Cloud des Anlagenbetreibers angestrebt. Ziel wird die Steigerung der Flexibilität zukünftiger Produktionsanlagen bei hoher Prozess-, Daten- und Dienstverfügbarkeit sein.



- P_{WCP} = Grundlastniveau der Wirkleistung während des Produktionsprozess
- P_{WCS} = Grundlastniveau der Steuerung Q^+ = Quittierung der Grenzwertüberschreitung
- ε_a = Grenzwert Alarm ε_a' = Grenzwert Alarm adaptiert ε_h = Grenzwert Halt
- t_1 = Zeitpunkt Überschreitung ε_a t_2 = Zeitpunkt Überschreitung ε_a' t_3 = Zeitpunkt Überschreitung ε_h

Abb. 4) Funktionaler Zusammenhang selbstadaptierende Grenzwertsetzung.

LITERATUR

acatech (2016) Kompetenzentwicklungsstudie Industrie 4.0. Erste Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Blesl M, Kessler A (2013) Energieeffizienz in der Industrie. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783642365140

Dorst W, Glohr C, Hahn T, Knaffa F, Loewen U, Rosen R, Schiemann T, Vollmar F, Winterhalter C (2015) Umsetzungsstrategie Industrie 4.0: Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0. BITKOM e. V., VDMA e. V., ZWEI e. V., Frankfurt (Main)

Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (2016) Projekt Picasso. Industrielle cloudbasierte Steuerungsplattform für eine Produktion mit cyber-physischen Systemen. <http://www.projekt-picasso.de/>. Accessed 27 Jul 2016

Kahlenborn W, Kabisch S, Klein J, Richter I, Schürman S (2012) Energiemanagementsysteme in der Praxis. ISO 50001: Leitfaden für Unternehmen und Organisationen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Umweltbundesamt, Berlin, Dessau

Langlois RN (2002) Modularity in technology and organization. Journal of Economic Behavior & Organization 49(1):19–37. doi: 10.1016/S0167-2681(02)00056-2

Langmann R, Stiller M (2015) Industrial Cloud – Status und Ausblick. HMD Praxis der Wirtschaftsinformatik 52(5):647–664

Lipinski R von, Richter M, Reiff-Stephan J (2014) Intelligent sensor systems for self-optimizing production chains. In: Proc 1st Int Conf Exhib Future RFID Technol (FutureRFID 2014), 6–7 Nov 2014, Eger. Eszterházy Károly University of Applied Sciences, ISBN: 978-615-5509-23-0, pp 115–125. doi: 10.17048/FutureRFID.1.2014.115

MetamoFAB (2016) MetamoFAB. Metamorphose zur intelligenten und vernetzten Fabrik. <http://metamofab.de/>. Accessed 14 Aug 2016

Niggemann O, Jasperneite J, Vodencarevic A (2014) Konzepte und Anwendungsfälle für die intelligente Fabrik. In: Bauernhansl T, ten Hompel M, Vogel-Heuser B (eds) Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung · Technologien · Migration. Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-04681-1, pp 173–190. doi: 10.1007/978-3-658-04682-8_9

Object Management Group (2015) Data Distribution Service (DDS). V 1.4. <http://www.omg.org/spec/DDS/>. Accessed 14 Jul 2016

OPC Foundation (2015) Unified Architecture. Part 1: Overview and Concepts. Version 1.03. <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-unified-architecture/part-1-overview-and-concepts>. Accessed 14 Aug 2016

Tönsing E (1996) Energiekostenreduzierung durch betriebliches Energiemanagement. Fachartikel im Rahmen der Initiative „Energie effizient nutzen – Schwerpunkt Strom“. Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg; Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung, Stuttgart, Karlsruhe

Weinert N (2010) Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin. Fraunhofer-Verlag, Stuttgart. ISBN: 978-3-8396-0173-0

AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Jörg Reiff-Stephan
 Technische Hochschule Wildau
 Institut für Entwicklung, Material und Produktion (IMEP)
 Forschungsgruppe: Automatisierungstechnik

E-Mail für Korrespondenz:
 joerg.reiff-stephan@th-wildau.de



Agile Methoden als Moderatoren zur Steuerung der sozialen Beschleunigung

Bertil Haack*, Markus Müller-Trabucchi

Zusammenfassung

Das Gefühl, unter Zeitdruck zu stehen und unter Zeitnot zu leiden, ist zumindest in der westlichen Welt weit verbreitet. Klassisches Zeitmanagement kann als Mitverursacher für die Zeitverdichtung gesehen werden und sollte daher sinnvoll modifiziert bzw. ausgebaut werden. Hierzu bietet sich die Theorie der sozialen Beschleunigung als Ausgangspunkt an (Rosa 2012). Sie liefert eine Erklärung für die Zeitverdichtung und bringt die Autoren zu dem Vorschlag, die soziale Beschleunigung mittels sogenannter Moderatoren zu steuern. Ergebnisse aus Zeitmanagement-Workshops legen die Vermutung nahe, dass agile Arbeitsmethoden als Moderatoren zur Steuerung der sozialen Beschleunigung geeignet sein könnten, und führen die Autoren zu einem Konstruktionschema für derartige Moderatoren.

Abstract

In the Western world, the feeling of being under time pressure and suffering from a shortage of time is widely experienced. Classical time management can be seen as a contributing factor for the time compaction and should, therefore, be modified or extended, with the theory of social acceleration as the starting point (Rosa 2012). This theory provides an explanation for the time compression and leads us to the proposal that so-called moderators can control the social acceleration. Results from time management workshops suggest that agile working methods can be used as moderators to control social acceleration, and lead us to a design scheme for such moderators.

1. Einleitung: Von verlorener und verdichteter Zeit

Wem kommt nicht aus eigenem Erleben bekannt vor, was Florian Opitz in der Einleitung seines Buches „Speed – Auf der Suche nach der verlorenen Zeit“ (Opitz 2011) so eindrücklich beschreibt: „Ich hatte eigentlich immer das Gefühl, ein ganz normales und erfülltes Leben zu führen. [...] Doch irgendwie habe ich in den letzten Jahren gemerkt, dass etwas mit mir nicht stimmt. Ich habe keine Zeit. [...] Es ist jedes Mal das Gleiche: Ein Job ist erledigt, ein neues Jahr beginnt, und ich nehme mir vor, dass ab jetzt alles anders wird. Endlich mal wieder ausgehen, Zeit mit Freunden oder der Familie verbringen, ins Kino oder zu Konzerten gehen. Doch dann dauert es nicht lange, und meine Pläne zerplatzen wie Seifenblasen. Und ich hetze wieder genauso atemlos durchs Leben wie zuvor. [...] Meine Erfahrung

mit der Zeit beschränkt sich inzwischen nur auf das eine Gefühl – sie fehlt“ (Opitz 2011: 7ff.).

Wo aber bleibt die Zeit? Eine – zumal verblüffend einfache – Antwort lässt sich leicht geben: Man nutzt die durch die technischen Möglichkeiten – beispielsweise in Form von E-Mail-Systemen, immer schnelleren Rechnern und immer schnelleren Internetverbindungen – bestehenden Möglichkeiten gerade nicht dazu, „nur“ die gleiche Anzahl von Korrespondenzvorgängen wie ohne sie zu erledigen und die damit frei werdende Zeit für unerfüllten Wünsche einzusetzen. Stattdessen dient sie einem – um im Bild zu bleiben – dazu, mehr Korrespondenzvorgänge als vorher zu erledigen (vgl. Haack 2015: 241, Haack & Müller-Trabucchi 2016: 19). Man „verdichtet“ (Rosa 2015: 42) die eigene Zeit, „die freigesetzten Zeiteresourcen werden durch paralleles und häufig sogar exponentielles Mengen-

wachstum wieder aufgeessen“ (Rosa 2015: 42). Zeitdruck und Zeitnot nehmen spürbar sowohl im beruflichen als auch im privaten Kontext zu.

Der vorliegende Artikel gibt Antworten auf die Frage, wie mit dieser Zeitverdichtung umgegangen werden kann und wie ein Ausweg aus der Zeitnot aussehen könnte. Konkret wird argumentiert, dass das klassische Zeitmanagement als Mitverursacher für die Zeitverdichtung gesehen werden kann und Zeitmanagementmethoden daher sinnvoll modifiziert bzw. ausgebaut werden sollten: Beyond Zeitmanagement (Kapitel 2). Hierzu bietet sich die von Hartmut Rosa entwickelte Theorie der sozialen Beschleunigung als Ausgangspunkt an (vgl. Rosa 2012). Sie liefert eine Erklärung für die Zeitverdichtung in allen – beruflichen wie privaten – Lebensbereichen (Kapitel 3) und bringt uns zu dem Vorschlag, die soziale Beschleunigung in diesen Feldern mittels sogenannter Moderato-

* korrespondierender Autor

ren zu steuern (Kapitel 4). Ergebnisse aus Zeitmanagement-Workshops mit Technischen Redakteuren legen den Schluss nahe, dass sich agile Arbeitsmethoden als Moderatoren zur Steuerung der sozialen Beschleunigung eignen können, und führen zu einem Konstruktionsschema für derartige Moderatoren (Kapitel 5). Fazit und Ausblick beschließen die Ausführungen (Kapitel 6).

2. Beyond-Zeitmanagement

Klassische Zeitmanagementansätze wie man sie etwa bei Seiwert (2005) findet, sind selbst nach ihrer ‚Modernisierung‘ (vgl. Seiwert 2009, 2013) nicht unbedingt hilfreich, gegen die Zeitverdichtung anzugehen, sondern tragen vielmehr noch zur Zeitarmut bei: Ihnen geht es nicht darum, die mit ihrer Hilfe ‚eingesparte‘ Zeit tatsächlich zur Minderung des Zeitdrucks zu nutzen, sondern darum, wie diese ‚freie‘ Zeit zur Erhöhung unserer Arbeitsleistung eingesetzt werden kann. Wenn man der Zeitnot ernsthaft begegnen will, muss man demnach ein anderes Konzept als klassisches Zeitmanagement für den Umgang mit der eigenen Zeit finden. Konkret geht es den Autoren somit darum, Ideen für ein modernes Zeitmanagement zu entwickeln, das die nützlichen Komponenten des klassischen Zeitmanagements, wie beispielsweise das Eisenhower-Prinzip (vgl. Covey 2014: 182), integriert, das aber darüber hinausreicht, indem es dessen „sehr eindimensionale Ausrichtung auf das ‚Immer-schneller-sein-Wollen‘ überwindet, ohne die ökonomischen Belange und Zielsetzungen der anwendenden Organisation aus dem Auge zu verlieren“ (Haack et al. 2016: 21): Beyond Zeitmanagement! Hierzu bietet sich die von Hartmut Rosa entwickelte Theorie der sozialen Beschleunigung als Ausgangspunkt an (vgl. Rosa 2012, 2014, Kodalle & Rosa 2008, King & Gerisch 2009). Sie liefert eine Erklärung für die Zeitverdichtung in jedwedem menschlichen Handlungsfeld und führt entsprechend zum Vorschlag, die soziale Beschleunigung mittels sogenannter Moderatoren zu steuern.

3. Zeitverdichtung durch soziale Beschleunigung

Nach Hartmut Rosa (2012: 243ff.) leben wir in einer durch die beschleunigte Umwandlung von Verhältnissen, Institutionen und Beziehungen geprägten Welt – sprich: in einer Welt sozialer Beschleunigung. Die soziale Beschleunigung stellt sich dabei als eine Mischung von

- technischer Beschleunigung,
- Beschleunigung des sozialen Wandels sowie
- Beschleunigung des Lebens-/Arbeitstempos

dar, die einerseits jeweils einen eigenen Motor als Antrieb besitzen und die sich andererseits ohne Unterlass wie in Abb. 1 dargestellt beschleunigen. Dies kann als Ursache der stets voranschreitenden Zeitverdichtung und damit von Zeitdruck und -not gesehen werden.

Zur Erklärung legen die Autoren den Fokus auf die Wirtschaft als Teilelement der Gesellschaft und beginnen mit der technischen Beschleunigung: Historische Untersuchungen zeigen, dass der Zusammenhang ‚Zeit ist Geld‘ schon sehr frühzeitig gesehen und deshalb zum steten Motor für technische Entwicklung und Beschleunigung wurde. Beispielsweise war Vertretern des in Augsburg ansässigen schwäbischen Kaufmannsgeschlechts der Fugger bereits im 16. Jahrhundert klar, dass ein Zeitvorsprung einen Wettbe-

werbsvorsprung bedeutet und damit die Möglichkeit bietet, wirtschaftlich erfolgreicher als die Konkurrenten zu sein. Entsprechend ersetzten sie die in ihrer Zeit üblichen Ratsboten durch ein Stafettensystem, mit dem sie ihre kaufmännischen Daten schneller als ihre Wettbewerber übertragen konnten (Haack 2015: 252f.).

Weitere Exempel insbesondere aus der Gegenwart verdeutlichen, dass die technische Beschleunigung aber nicht nur in Geld zählbare Effekte bedingt. Sie ist zudem eine wesentliche Ursache für einen beschleunigten Wandel des sozialen Miteinanders von Menschen sowohl in ihren beruflichen als auch in ihren privaten Umfeldern. So führen Computer, Smartphones und Internet in immer schnellerer Abfolge „u. a. zu neuen Arbeitsstrukturen (Beispiel: virtuelle Projektteams), neuen Produktionsweisen (Beispiel: 3D-Druck), veränderten Kommunikationsstrukturen (Beispiel: E-Mail), veränderten Beziehungsstrukturen (Beispiel: soziale Netzwerke) und neuen Formen sozialer Identität (Beispiel: Avatare in virtuellen Lebensräumen wie etwa Second Life)“ (Haack 2015: 257f.). Mit Hilfe der Technik wird die Gesellschaft, in der wir leben, mehr und mehr zu einer 24/7-Non-Stopp-Gesellschaft. Nahezu jeder Service kann zu jeder Zeit via Internet in Anspruch genommen werden. Wartezeiten, etwa bis ein Büro oder ein Geschäft am nächsten Morgen wieder öffnet, werden so zum einen in Richtung null reduziert. Zum anderen geht dadurch umgekehrt aber auch die Bereitschaft vieler Menschen, auf irgendetwas oder

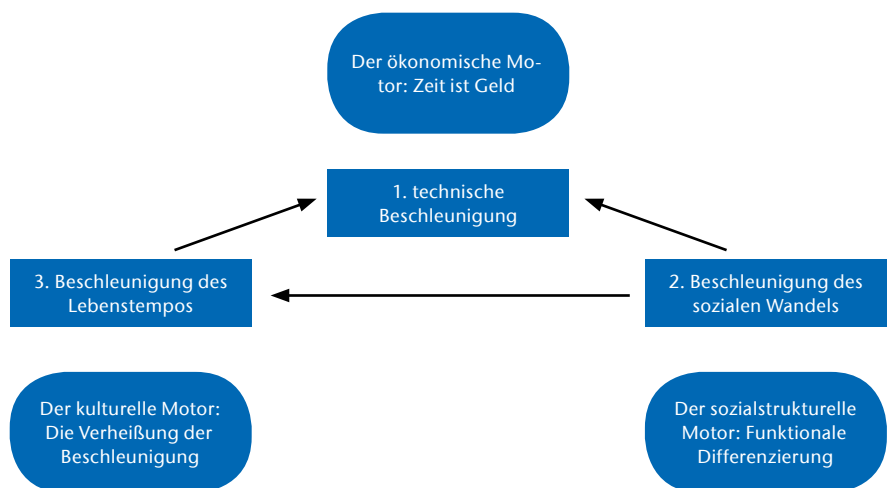


Abb. 1) Der Akzelerationszirkel der sozialen Beschleunigung und seine externen Triebkräfte (Eigene Darstellung in Anlehnung an Rosa 2012: 309).

irgendwem warten zu wollen, gegen null (Haack 2015: 253f.).

Für den in dieser von beschleunigtem technischem und sozialem Wandel geprägten Gesellschaft agierenden Mensch bedeuten die bisherigen Ergebnisse, dass er mit den Anforderungen dieser Gesellschaft nur mithalten kann, wenn er schnell genug ist, d. h., wenn er sein Lebenstempo durch schnelleres Handeln erhöht. Hier ist der Ruf nach besserer – gemeint ist insbesondere: schnellerer – Technik offenkundig (vgl. Rosa 2012: 244, Haack 2015: 258). Damit ist man aber wieder am Ausgangspunkt der ‚technischen Beschleunigung‘ angekommen. Man erkennt, dass die o. g. drei Dimensionen der sozialen Beschleunigung einen geschlossenen, sich selbst antreibenden und immer schneller werdenden „Akzelerationszirkel“ (Rosa 2012: 251) bilden: Die technische Beschleunigung führt zur Beschleunigung des sozialen Wandels, diese fordert wiederum die Beschleunigung des Lebenstempos, die sich grundsätzlich nur durch technische Beschleunigung realisieren lässt (s. Abb. 1). „Einmal in Bewegung gesetzt, kommt dieser Akzelerationszirkel nicht mehr zur Ruhe, sondern erzeugt stets und unvermeidlich mehr Beschleunigung bis hin zum rasenden Stillstand“ (Haack 2015: 267).

Ebenso wie die technische Beschleunigung besitzen auch die anderen beiden Dimensionen sozialer Beschleunigung eigene Antriebe, die zusätzliche Beschleunigungsimpulse für die jeweilige Dimension und damit für den Akzelerationszirkel liefern. Im Falle der Beschleunigung des sozialen Wandels handelt es sich um das Prinzip der funktionalen Differenzierung, d. h. um „Prozesse der zunehmenden Arbeitsteilung bzw. der wachsenden Ausdifferenzierung von Funktions- und Wertsphären: Die Wirtschaft, die Wissenschaft, die Kunst: sie alle folgen als solche ausdifferenzierten Sphären ihren eigenen Gesetzen und Logiken, ohne noch durch eine klare politische oder religiöse Steuerungsinstanz zusammengehalten zu werden“ (Rosa et al. 2013: 23). Bestand der Nutzen dieses Prinzips zunächst darin, dass der handelnde Mensch seine einzelnen Aufgaben in den jeweiligen Aufgabenbereichen weitgehend ungestört und

damit zügiger als ohne deren Ausdifferenzierung bearbeiten konnte, führt es nunmehr umgekehrt zu einer fortwährenden Verstetigung aller Prozesse in Richtung Non-Stopp-Gesellschaft (s. o.) und trägt damit zur Beschleunigung des sozialen Wandels bei. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch im Falle der Beschleunigung des Lebenstempos. Möchte man annehmen, dass die Beschleunigung des Lebenstempos grundsätzlich eher negativ gesehen wird, wirkt beispielsweise das Arbeiten unter Zeitdruck demgegenüber durchaus für viele Menschen wie eine Art Droge mit entsprechenden Abhängigkeitseffekten. Zufriedenheit (sofern dieser Begriff hier überhaupt gerechtfertigt ist) stellt sich bei ihnen nur ein, wenn sie dem Zeitdruck standhalten und alle Aufgaben erledigen können – ein Ziel, das ihnen durch immer schnelleres Handeln, also durch eine fortwährende Beschleunigung des Lebenstempos, realisierbar erscheint und das daher wie eine Verheißung der Beschleunigung wirkt (Haack 2015: 253ff.).

4. Die soziale Beschleunigung moderieren

Festzuhalten sind einige Aspekte, die aus dem Modell des Akzelerationszirkels der sozialen Beschleunigung resultieren:

- Die Zeitverdichtung nimmt offenbar zu bzw. ab, je nachdem, ob der Akzelerationszirkel mehr oder weniger Beschleunigung erzeugt.
- Es kann nicht darum gehen, dass der Akzelerationszirkel zum Stillstand kommt. Dies bedeutete nämlich beispielsweise, dass man sich der technischen Modernisierung verschlüsse – ein sicher nicht gewünschter Zustand.
- Es kann aber auch nicht darum gehen, den Akzelerationszirkel ungebremst laufen zu lassen. Dies bedeutete nämlich, ein Maß an sozialer Beschleunigung und damit ein Maß an Zeitverdichtung zuzulassen, dem Menschen auf Dauer garantiert nicht mehr gewachsen wären (vgl. Haack 2015: 267ff.).

Modernem Zeitmanagement muss es also in jeder gegebenen Situation darum gehen, den Akzelerationszirkel so zwischen den Status ‚Stillstand‘ und ‚ungebremst‘ zu steuern, dass er ähnlich wie ein Stromgenerator immer die angemessene, erforderliche Strommenge – nicht mehr und nicht weniger – und damit auch eine akzeptable Begründung für die jeweils zugehörige Zeitverdichtung bereitstellt. Dies bedeutet speziell, dass ‚Effizienz um der Effizienz willen‘ kein Argument für die Erhöhung des Arbeitstempos sein kann. Eine als erforderlich erachtete Veränderung des Arbeitstempos muss ihre Rechtfertigung stattdessen durch eine über den Effizienzgedanken hinausgehende Darlegung erfahren. Je nach Sachlage kann es also angebracht sein, das Tempo zur Erledigung anstehender Aufgaben gut fundiert mal bewusst zu verringern oder mal bewusst zu erhöhen.

Wie aber kann der Akzelerationszirkel jeweils passend gesteuert werden? Der Vorschlag dieses Beitrags lautet, ihn mittels geeigneter Moderatoren zu moderieren.

Zur Erläuterung soll auf das Bild des Stromgenerators zurückgegriffen werden. Man stelle sich den Akzelerationszirkel wie einen sogenannten moderierten Kernreaktor vor: indem die Brennstäbe des Reaktors mehr oder weniger tief in das als sogenannte Moderator eingesetzte schwere Wasser getaucht werden, wird die im Reaktor ablaufende Kettenreaktion immer auf das Level zwischen ‚Stillstand‘ und ‚ungebremst‘ (dem so genannten größten anzunehmenden Unfall – GAU) gebracht, auf dem dieser Stromgenerator gerade so viel Strom produziert, wie in einer gegebenen Situation erforderlich ist. Um dieses Bild auf den Akzelerationszirkel der sozialen Beschleunigung übertragen zu können, wird festgehalten, dass dieser „einschließlich seiner externen Motoren aus insgesamt neun Komponenten besteht, nämlich aus den drei externen Motoren, den drei Bereichen sozialer Beschleunigung und den drei Beziehungen („Verbindungen“) zwischen diesen Bereichen“ (Haack 2015: 271). Mithin sind analog zum Brennstab im Atomkraftwerk „neun ‚Angriffspunkte‘ der Moderatoren im Beschleunigungssystem denkbar“ (Abb. 2)

(Haack 2015: 271), und es sind Instrumente analog dem schweren Wasser im Atomkraftwerk als Moderatoren zu suchen, mit deren Hilfe der Akzelerationszirkel über diese Angriffspunkte gesteuert – moderiert – werden kann.

5. Agile Methoden als Moderatoren des Akzelerationszirkels

5.1 Ausgangspunkt ‚Technische Redaktion‘

Bei der anstehenden Suche nach Moderatoren des Akzelerationszirkels konzentrieren die Autoren sich zunächst ähnlich wie in wesentlichen Teilen der vorgehenden Überlegungen auf die Wirtschaft als Teilelement der Gesellschaft. Angesichts des vorliegenden Erfahrungshintergrundes und empirischen Materials (s. Abschnitt 5.2) wird konkret das durch Projekt- und Teamarbeit gekennzeichnete Arbeitsfeld Technischer Redakteurinnen und Redakteure fokussiert. Andere berufliche oder private Lebenszusammenhänge werden an dieser Stelle ausgeblendet. Anschließend kann wieder auf sie zurückgekommen werden, indem die gewonnenen Ergebnisse als Ausgangspunkt für einen Vorschlag zur Konstruktion von Moderatoren der sozialen Beschleunigung in allgemeinen Arbeits- und Lebenszusammenhängen genutzt werden (s. Abschnitt 5.3).

5.2 Agile Prinzipien als Paradigmenwechsel in Technischen Redaktionen

Zum Verständnis der Ansätze möglicher Moderatoren am Akzelerationszirkel der sozialen Beschleunigung bedarf es neuer Kriterien bei der Bemessung von Erfolg bei Projekt- und Teamarbeit, insbesondere in der Technischen Redaktion. Frei nach dem sokratischen Motto ‚Du weißt, dass du nichts weißt!‘ wird gerade bei der Entwicklung von Produkten sowie bei der Erstellung ihrer Dokumentation das schnelle Lernen in den Fokus gerückt. Sogenannte Multiparametersysteme, wie sie heute in Produktentwicklung und Dokumentation vorgefunden werden können, reagieren sehr empfindlich auf das Zusammenwirken von Technologie,

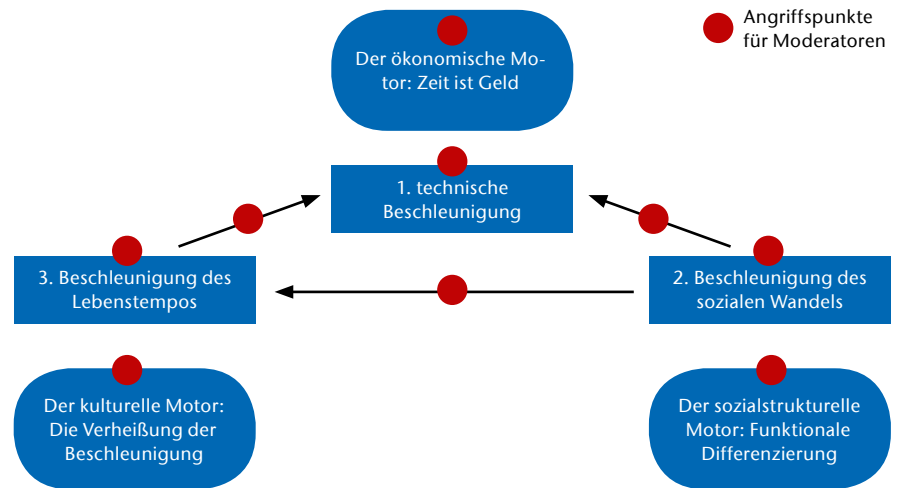


Abb. 2) Der moderierte Akzelerationszirkel der sozialen Beschleunigung (Haack & Müller-Trabucchi 2016: 20, angelehnt an Rosa 2012: 309).

Märkten und Beteiligten. Ausgehend von der Komplexitätstheorie, wonach eine Vorhersage über den Erfolg in frühen Projektphasen unmöglich ist, liegt der Fokus also nicht mehr auf dem Vermeiden von Fehlern, sondern darauf, Entscheidungen über ‚falsch‘ oder ‚richtig‘ vor dem Hintergrund der knappen Zeitressource zu einem möglichst frühen Zeitpunkt treffen zu können (vgl. Maurya 2012, Bartel & Barbarski 2015). Essentiell dabei ist die von nahezu wissenschaftlicher Neugier und Sorgfalt getriebene Bereitschaft, Fehler zu machen. Scheitern gilt – so es denn rechtzeitig geschieht und damit zu einer Kurskorrektur führen kann – sogar als erwünschte Erfahrung. Das Ziel nachhaltigen Zeitmanagements ist es also nicht mehr, Prozesse ausschließlich zu beschleunigen, sondern teilweise sogar innezuhalten und ‚Wege rückwärts aus der Sackgasse‘ rechtzeitig anzutreten (vgl. Bartel & Barbarski 2015).

Der notwendige Paradigmenwechsel in der Projekt- und Teamarbeit in Technischen Redaktionen besteht folglich darin, Probleme als lösbar zu betrachten, ohne den Lösungsweg und die Lösung bereits vorhersagen zu können. Gesucht sind also Rahmenbedingungen, die situationsgerechtes Handeln etwa im Sinne von Erkennen – Analysieren – Reagieren (antrainiertes Verhalten) oder im Sinne von Ausprobieren – Erkennen – Reagieren (lernendes Verhalten) erlauben (vgl. Haack & Müller-Trabucchi 2016: 22).

Auf genau diesem Verständnis beruhen die Ansätze agiler Methoden: Basierend auf der Erfahrung, dass komplexe Projekte zu einem überdurchschnittlichen Prozentsatz scheitern, schufen Softwareentwickler 2001 eine Agenda, welche einen Wertekanon in das Zentrum des Handelns aller Beteiligten stellt, auf dessen Basis einzelne Prinzipien zur Bewältigung komplexer Aufgaben abgeleitet werden sollten: das Agile Manifest (Beck et al. 2001).

Abgeleitet aus den Prinzipien des Agilen Manifests entstanden vor der ganz undogmatischen Grundhaltung ‚Agile is what works‘ in den vergangenen Jahren zahlreiche agile Methoden mit verschiedenen, über die Softwareentwicklung hinausgehenden, die Technischen Redaktionen bisher aber kaum berücksichtigenden Einsatzschwerpunkten. Allen Methoden gemein sind deren zugrundeliegende Werte hinsichtlich der Arbeit in interdisziplinären Teams sowie der Bereitschaft, auch auf unvorhergesehene Veränderungen kurzfristig reagieren zu können.

5.3 Zeitmanagement-Workshops mit Technischen Redakteuren

Vor diesem Hintergrund haben die Autoren dieses Beitrags im Frühjahr 2016 in insgesamt drei Workshops mit Technischen Redakteuren die Tauglichkeit agiler Methoden als Moderatoren für den o. g. Akzelerationszirkel diskutiert. Ziel war es, konkrete Maßnahmen auf der Basis agiler Me-

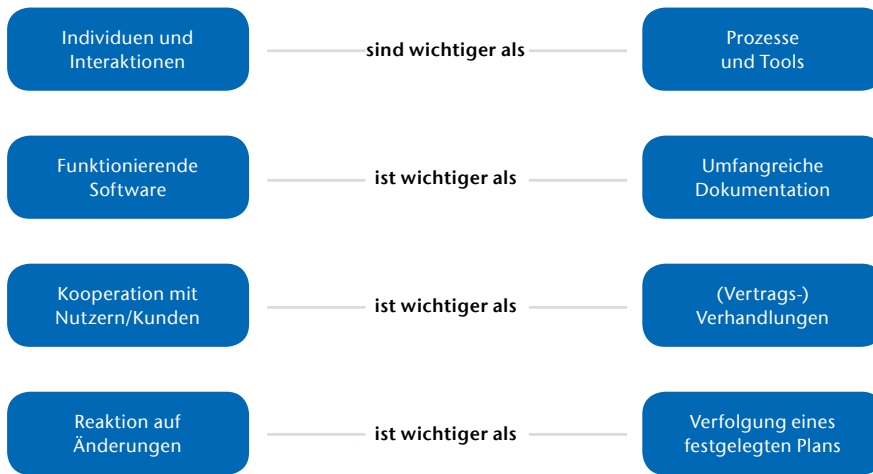


Abb. 3) Prinzipien des Agilen Manifests (Beck et al. 2001).

thoden zu erarbeiten, welche Potentiale zur Lösung der Zeitprobleme teaminterner und -übergreifender Zusammenarbeit in der Technischen Redaktion versprechen. Dazu wurden die Teilnehmerinnen und Teilnehmer der Workshops zunächst nach den aus ihrer Sicht wesentlichsten Ursachen für ihre Zeitprobleme befragt, um sie anschließend Lösungsansätze hierfür erarbeiten zu lassen.

Bemerkenswert ist, dass alle Workshops trotz der heterogenen Zusammensetzung der Teilnehmerinnen und Teilnehmer sowie trotz ihrer Unabhängigkeit voneinander nahezu identische Gründe für Zeitprobleme, aber auch überraschend übereinstimmende Bewertungen der Erfolgsquoten agiler Methoden als Moderatoren der sozialen Beschleunigung geliefert haben. Als bedeutendste Gründe für Zeitdruck und Zeitnot wurden das Multiprojektmanagement, mangelnde Priorisierung, unklare Aufgabendefinition, lückenhafte Informationsflüsse, spontane Zusatzaufgaben in späten Projektphasen und die wiederholt unzuverlässige Einschätzung von Arbeitsaufwänden genannt. Ebenso einhellig wurde die ‚Selbstorganisation‘ von Teams, eine grundlegende Gemeinsamkeit agiler Methoden, als moderierend und damit als potentielle Lösung bei Zeitproblemen eingeschätzt. Transparenz, Kommunikation und regelmäßiger Wissenstransfer bilden als wesentliche Prinzipien der Organisation von Zusammenarbeit die entscheidende Basis für ein besseres, agiles Zeitmanagement in

der Technischen Redaktion. Prominente Vertreter agiler Methoden zur Implementierung dieser Prinzipien sind Scrum und Kanban (vgl. Wolf & Andrezak 2012). Sie wurden von den Workshop-Teilnehmerinnen und -teilnehmern ebenso signifikant oft als Lösungsvorschläge bei Zeitproblemen vorgelegt wie die Visualisierung der Aufgaben aller Teammitglieder der Technischen Redaktion sowie die Atomisierung der Aufgaben als Prinzipien der Teamorganisation. Weiterhin wurden streng reglementierte regelmäßige Teammeetings genauso wie beispielsweise das Kanbanboard im Teamraum zur Darstellung sämtlicher Einzelaufgaben der Teammitglieder als moderierende Methoden für die Erfolgsgeschwindigkeit von Gruppenarbeit (der sogenannten ‚Teamvelocity‘) gesehen. Weiterhin wurde die Einbeziehung des gesamten Teams in die Planung anstehender Aufgaben bei Schätzklausuren und Sprint-Planungen (Pichler 2007: 57ff.) sowie in den permanenten Lernprozess (Retrospektiven) als agile Maßnahme gegen den Zeitdruck dargestellt. Die aus der agilen Produktentwicklung hervorgegangene Methode Customer Development stellt eher das Prinzip ‚Minimalismus statt Perfektionismus‘ sowie die absolute Orientierung an den Bedürfnissen der Anwender respektive ‚Kunden‘ in Monetarisierungskontexten in den Fokus (vgl. Bartel & Barbariski 2015), wurde in den Workshops aber ebenfalls als hilfreich aufgeführt.

5.4 Moderation der sozialen Beschleunigung mit agilen Methoden

Die vorgenannten Methoden basieren durchgehend auf agilen Prinzipien. Sie belegen einerseits, dass die Idee der Moderation des Akzelerationszirkels in der täglichen Arbeit Technischer Redaktionen anwendbar ist, dass sie also nicht im Rang eines rein theoretischen und damit für praktische Belange weniger nützlichen Konstrukts verbleibt. Andererseits zeigen die Befunde, dass es agile Methoden gibt, die als Moderatoren der sozialen Beschleunigung und damit zum Zeitmanagement in den betrachteten Arbeitszusammenhängen eingesetzt werden können.

Zusammenfassend liegen diesen agilen Methoden die gemeinsamen Werte ‚Kommunikation‘, ‚Ergebnisorientierung‘, ‚Kollaboration‘ und ‚Lernbereitschaft‘ zugrunde. Im Zusammenspiel mit den daraus abgeleiteten Prinzipien ‚Anwenderorientierung‘, ‚Interdisziplinarität‘, ‚Simplicity‘, ‚Visualisierung‘ und ‚Perfektionismusverzicht‘ entsteht so ein Baukasten an Maßnahmen, welche durchgehend eine moderierende Wirkung auf Beschleunigungsprozesse ausüben. Dabei steht nicht die Effizienzsteigerung oder der Zeitgewinn des Einzelnen im Fokus, sondern stets der Erfolg von Teamprojekten – eine vor der Komplexität aktueller Projekte unverzichtbare Grundvoraussetzung.

Entsprechend lässt sich vermuten, dass die Moderation der sozialen Beschleunigung allgemein in beruflichen und privaten Kontexten – also nicht nur in Technischen Redaktionen – mit Hilfe agiler Methoden möglich ist.

In jedwedem Fall von Zeitverdichtung erscheint die Suche nach agilen Methoden als Moderatoren der sozialen Beschleunigung mithin als aussichtsreicher Versuch, der Zeitnot Herr zu werden. Hierfür schlagen die Autoren folgendes Vorgehen vor:

1. Beschreibe und analysiere die vorliegende Situation unter Einbeziehung des Modells ‚Akzelerationszirkel‘.
2. Identifiziere die Angriffspunkte im Akzelerationszirkel, die sich für eine

Moderation der sozialen Beschleunigung in der gegebenen Situation eignen.

3. Wähle eine oder mehrere bekannte Arbeitsmethoden aus oder konstruiere eine oder mehrere neue Methoden, die als Moderatoren an den ermittelten Angriffspunkten wirken könnten.
4. Falls es sich nicht bereits um agile Methoden handelt, modifiziere die Methoden aus 3. nach Möglichkeit so, dass sie den agilen Werten genügen.
5. Wende die agilen Methoden aus 4. an.
6. Wenn die Anwendung der Agilen Methoden aus 4. erfolgreich ist (also den Zeitdruck vermindert), speichere sie als Moderatoren für spätere Einsätze. Wenn die Nutzung der Methoden aus 4. nicht erfolgreich ist, laufe das Schema vollständig (ab 1.) oder in Teilen erneut durch bzw. brich es ab, sofern das Vorgehen aus guten Gründen aussichtslos erscheint.

6. Fazit und Ausblick

Ausgehend vom täglichen Erleben haben die Autoren ein grundsätzliches Zeitproblem konstatiert. Mehr und mehr fühlen Menschen sich unter Zeitdruck. Die Zeitnot entsteht durch Zeitverdichtung, die nicht mittels klassischer Zeitmanagementmethoden beseitigt werden kann, sondern durch diese eher noch verstärkt wird. Entsprechend ist es erforderlich, über das bekannte Zeitmanagement hinauszugehen und Vorschläge für den angemesseneren Umgang mit der eigenen Zeit zu entwickeln. Dies gelingt mit Blick auf Hartmut Rosas Theorie der sozialen Beschleunigung (Rosa 2012). Sie führt zu dem Vorschlag, nicht die Zeit zu managen, sondern die soziale Beschleunigung mit Hilfe von Moderatoren analog zum schweren Wasser in Atomkraftwerken zur Steuerung der Leistung dieser Kraftwerke zu beeinflussen und so zu moderieren. Ergebnisse aus Zeitmanagement-Workshops mit Technischen Redakteurinnen und Redakteuren zeigen,

dass das theoretische Konstrukt der Moderatoren brauchbar und anwendbar ist. Es wird daher vermutet, dass agile Methoden auch als Moderatoren der sozialen Beschleunigung in Lebens- und Arbeitszusammenhängen jenseits der Technischen Redaktionen geeignet sein können. Konsequenz dieser Annahme ist ein aus sechs Schritten bestehendes Auswahl- und Konstruktionsschema für Moderatoren der sozialen Beschleunigung. Mit dessen Hilfe sollte es in der Zukunft gelingen, eine angemessene Zahl geeigneter Moderatoren für die soziale Beschleunigung zu entwickeln, so dass Zeitdruck und Zeitnot sowohl im Berufs- als auch im Arbeitsleben gemindert werden können. Insbesondere erlaubt das Schema, klassische Zeitmanagementmethoden beginnend mit Schritt 3 auf den Prüfstand zu stellen und, sofern möglich, im Sinne des Beyond-Zeitmanagement (Kapitel 2) zu Moderatoren für den Akzelerationszirkel auszuarbeiten (Schritte 4. bis 6.).

LITERATUR

- Bartel D, Barbarski K (2015) Mit Customer Development durchstarten. Nach dem Original von Kevin Dewalt. Gründer.Guide Edition
- Beck K, Beedle M, van Bennekum A, Cockburn A, Cunningham W, Fowler M, Grenning J, Highsmith J, Hunt A, Jeffries R, Kern J, Marick B, Martin RC, Mellor S, Schwaber K, Sutherland J, Thomas D (2001) Manifesto for Agile Software Development. <http://agilemanifesto.org/>. Accessed 19 Dec 2016
- Covey SR (2014) Die 7 Wege zur Effektivität. Prinzipien für persönlichen und beruflichen Erfolg. GABAL Verlag, Offenbach. ISBN: 9783956230813
- Haack B (2015) Beschleunigung moderieren statt Zeit managen. In: Biermann T (ed) Hochschulmanagement in Theorie und Praxis. Festschrift für László Ungvári. Wildau Verlag, Wildau, ISBN: 978-3-945560-03-7, pp 241–288
- Haack B, Müller-Trabucchi M (2016) Wege aus der Zeitfalle. *technische kommunikation* 38(2):18–26
- King V, Gerisch B (eds) (2009) Zeitgewinn und Selbstverlust. Folgen und Grenzen der Beschleunigung. Campus-Verl., Frankfurt, M., New York, NY. ISBN: 9783593390291
- Kodalle K-M, Rosa H (eds) (2008) Rasender Stillstand. Beschleunigung des Wirklichkeitswandels: Konsequenzen und Grenzen. *Kritisches Jahrbuch der Philosophie*, Bd. 12. Königshausen & Neumann, Würzburg. ISBN: 9783826038266
- Maurya A (2012) Running Lean. Iterate from Plan A to a Plan That Works, 1., neue Ausg. O'Reilly & Associates, Sebastopol, CA. ISBN: 1449305172
- Opitz F (2011) Speed. Auf der Suche nach der verlorenen Zeit, Orig.-Ausg., 1. Aufl. Riemann, München. ISBN: 9783570501283
- Pichler R (2007) Scrum. Agiles Projektmanagement erfolgreich einsetzen. dpunkt, Heidelberg. ISBN: 978-3-89864-478-5

Rosa H (2012) Beschleunigung. Die Veränderung der Zeitstrukturen in der Moderne, 9. Aufl. Suhrkamp-Taschenbuch Wissenschaft, vol 1760. Suhrkamp, Frankfurt am Main. ISBN: 978-3-518-29360-7

Rosa H (2014) Beschleunigung und Entfremdung. Entwurf einer kritischen Theorie spätmoderner Zeitlichkeit, 3. Aufl. Suhrkamp, Berlin. ISBN: 3-518-58596-7

Rosa H (2015) Verdichtete Zeit. In: Le Monde diplomatique (ed) Atlas der Globalisierung. Weniger wird mehr. Der Postwachstumsatlas. Le Monde diplomatique. Taz-Verl.-und-Vertriebs-GmbH, Berlin, ISBN: 9783937683577, pp 42–43

Rosa H, Strecker D, Kottmann A (2013) Soziologische Theorien, 2., überarb. Aufl. utb-studi-e-book, vol 2836. UVK Verl.-Ges, Konstanz. ISBN: 978-3-8252-3832-2

Seiwert L (2005) Wenn du es eilig hast, gehe langsam. Das neue Zeitmanagement in einer beschleunigten Welt. Sieben Schritte zur Zeitsouveränität und Effektivität, 9., kompl. überarb. Aufl. Campus-Verl., Frankfurt/Main u. a. ISBN: 3-593-37665-2

Seiwert L (2009) Noch mehr Zeit für das Wesentliche. Zeitmanagement neu entdecken, 1. Aufl., überarb. u. aktual. Taschenbuchausg. Mosaik bei Goldmann. Goldmann Verlag, München. ISBN: 978-3-442-17059-3

Seiwert L (2013) Lass los und du bist Meister deiner Zeit. [mit Konfuzius entschleunigen und Lebensqualität gewinnen], 1. Aufl. GU Lebensführung. Gräfe u. Unzer, München. ISBN: 9783833833908

Wolf H, Andrezak M (eds) (2012) Agile Projekte mit Scrum, XP und Kanban im Unternehmen durchführen. Erfahrungsberichte aus der Praxis, 1. Aufl. dpunkt.verl., Heidelberg. ISBN: 9783898647526

AUTOREN

Prof. Dr. Bertil Haack
Dekan Fachbereich Wirtschaft, Informatik, Recht
Technische Hochschule Wildau

Markus Müller-Trabucchi
Niederlassungsleiter
DMK E-Business

E-Mail für Korrespondenz:
bertil.haack@th-wildau.de



Formative E-Assessments als Unterstützung zum strukturierten Selbststudium: Ergebnisse eines Lehrexperiments im Studiengang Europäisches Management (BA)

Sandra Haas*, Xenia Valeska Jeremias, Christian Rabe

Zusammenfassung

Lebenslanges Lernen und berufliche Weiterbildung stellen heute ein fast unabdingbares Element in der Berufsweg- und Karriereplanung dar. Eine zentrale Voraussetzung für erfolgreiches lebenslanges Lernen ist u. a. die individuelle Selbstlernfähigkeit. Führt man sich dagegen die an deutschen Hochschulen (noch) dominierenden informativen kollektiven Lernphasen vor Augen, so ist kritisch zu hinterfragen, ob die Selbstlernfähigkeiten der Studierenden zur Vorbereitung auf ein lebenslanges Lernen in einem ausreichenden Maße gefördert und eingefordert werden. Der Beitrag stellt erste Ergebnisse eines Lehr-/Lernexperiments zur Intensivierung von Selbstlernphasen im BA-Studium vor. Ziel war es, die Möglichkeiten und Grenzen von Selbstlernphasen mit Unterstützung von E-Assessments als individuelle Lernfortschrittskontrolle auszuloten.

Abstract

Nowadays lifelong learning and professional training are essential elements in career planning. Hereby the ability to learn independently is one of the main prerequisite for lifelong learning. Looking at the prevalent form of informative collective learning phases at German universities, one must critically question, if we foster and demand the ability to learn independently to a sufficient degree. This paper presents initial results of a teaching/learning experiment, investigating a noticeable increase of self-study phases in a Bachelor's course. The aim was to assess possibilities and limitations of self-study phases in combination with E-Assessments as a form of monitoring of the progress of learning individually.

1. Einführung in die didaktische Problemstellung

Megatrends wie Globalisierung, steigender Wettbewerb, zunehmende Technisierung und die sich abzeichnende Wandlung von einer Industrie- zur Wissensgesellschaft fordern von (zukünftigen) Arbeitnehmern die Bereitschaft und Fähigkeit zum lebenslangen Lernen (Aulerich et al. 2005: 5, Pfeiffer & Heimer 2006). Dabei stellt die Selbstlernfähigkeit, d. h. die „Fähigkeit zur Entscheidungs- und Zielfindung und die Fähigkeit zur Weiterentwicklung eigener Lernstrategien“ (Aulerich et al. 2005: 7), eine zentrale individuelle Erfolgsvoraussetzung für lebenslanges Lernen dar (Arnold et al. 2003, Arnold 2015: 74). Auch neurowissenschaftliche Erkenntnisse unterstreichen die Bedeutsamkeit individu-

eller und flexibler Lehr-/Lernprozesse. Lernen ist ein individueller Prozess: Lernende besitzen unterschiedliches Vorwissen, verfügen über eigene „erprobte“ Lernmethoden und folgen einem eigenem Lerntempo (Beck 2003: 8, Roth 2012: 62 und Siebert 2006: 20 ff.). „Daher ist es zielführend, dem Lernenden einen selbstständigen Umgang mit dem Stoff zu ermöglichen und ihn eigene Problemlösungen erarbeiten zu lassen“ (Mayer & Brückner 2011: 13). Betrachtet man allerdings die Lehr-/Lernsituationen an deutschen Hochschulen, so dominieren immer noch lange informative kollektive Lernphasen (Wahl 2013). Aus Sicht der Lehrenden ist somit selbstkritisch zu hinterfragen, ob die Selbstlernfähigkeit der Studierenden im Präsenzstudium in einem ausreichenden Maße gefördert und eingefordert wird.

Der vorliegende Beitrag stellt erste Ergebnisse eines im Sommersemester 2016 (SoSe 2016) durchgeführten Lehrexperiments zur Intensivierung von Selbstlernphasen im BA-Studium (Europäisches Management) vor. Grundlegendes Ziel war es, im vorliegenden Kontext die Möglichkeiten und Grenzen von Selbstlernphasen mit Unterstützung von E-Assessments als individuelle Lernfortschrittskontrolle auszuloten.

Ausgangslage: Das Lehrexperiment wurde in den englischsprachigen Modulen *International Management in Europe* und *European Case Studies* durchgeführt. Beide Kurse fanden im sechsten Semester mit jeweils ca. 50 Teilnehmenden statt. Beim Modul *International Management in Europe* handelt es sich um einen zweisemestri-

* korrespondierende Autorin

gen Kurs, der theoretische und praktische Grundlagen zum Internationalen Handel vermittelt. Im Mittelpunkt des sechsten Semesters stehen internationale Marketingstrategien und ihre praktische Anwendung. Die Prüfungsleistungen umfassen (a) eine E-Prüfung und (b) eine lehrveranstaltungsbegleitende Projektarbeit (Entwicklung einer Markteintrittsstrategie für einen regionalen Praxispartner). Im Modul *European Case Studies* lernen die Studierenden unterschiedliche Lebenszyklusphasen eines Unternehmens mit Bezug auf verschiedene Disziplinen der Betriebswirtschaft kennen. Die Prüfungsleistungen charakterisieren ein Portfolio bestehend aus (a) gruppenbasierten Lösungen von Case Studies sowie (b) einer mündlichen Prüfung zum Theorieinhalt des Moduls. Insbesondere im Modul *International Management in Europe* kristallisierten sich aus Dozentensicht folgende zentrale Probleme heraus:

- Im vorangegangenen Semester zeigten die Teilnehmenden eine **unterdurchschnittliche Leistung in der E-Prüfung**. In einer Spannweite von [46 %; 87 %] lag die Durchschnittsnote bei 3,7. Im Nachgang des Tests äußerten die Studierenden den Bedarf, sich nicht nur inhaltlich, sondern auch **im Umgang mit E-Prüfungen besser vorzubereiten** zu wollen.
- Die Kursteilnehmer/-innen befinden sich in einem „**verkürzten Semester**“, wobei der volle Lehrumfang in sieben statt in 15 Wochen vermittelt wird. Sofern Studierende einer studienbegleitenden beruflichen Tätigkeit nachgehen, ist es schwer möglich, an allen Lehrveranstaltungen teilzunehmen. Gleichzeitig klagten Studierende vorheriger Kurse über zeitliche Engpässe, die eine optimale Vorbereitung auf/Mitwirkung am Kurs nicht mehr ermöglichen.
- Seit ca. sechs Jahren wird im Kurs ein – durchaus von BA-Studierenden beliebtes – **sehr gut strukturiertes und aufbereitetes amerikanisches Lehrbuch** (Peng 2014: Global business, 3. ed. South-Western Cengage Learning, Mason Ohio. ISBN: 1-133-58450-0) verwendet. Jedoch wird es von der Mehrheit nicht im wünschenswerten Maße zum freiwilligen Selbststudium oder zur Vor-/Nacharbeitung herangezogen.

- Insbesondere stellt sich aus Dozentensicht der Eindruck ein, dass die Kursteilnehmenden **die Lehrinhalte gerne noch „vorgekaut“ bekommen wollen**, anstatt sie sich eigenständig zu erarbeiten. Im Hinblick dessen, dass ein Großteil dieser Studierenden sich im Vorfeld eines Masterstudiums oder Arbeitseintritts befindet, wo ein höherer Anteil an selbstständigem Lernen erwartet wird (Arnold 2015: 25), stellt dies ein Problem dar.

Vor diesem Hintergrund wurden im SoSe 2016 in den genannten Modulen insgesamt drei Selbststudiumseinheiten im Form eines Lehrexperiments erprobt (wiederholende Beobachtung einer gleichen Teilnehmergruppe; Anwendung ungleicher didaktischer Selbststudiumskonzepte), womit folgende Ziele angestrebt wurden:

- (1) Erhöhung der Selbstverantwortlichkeit für den Lernerfolg und bessere Vorbereitung auf Anforderungen im Masterstudium/Arbeitsleben
- (2) Erhöhung des Anteils zeitlich flexiblen Lernens
- (3) Bessere Ergebnisse in der E-Prüfung.

Im Folgenden wird das Experiment bezüglich der konzeptionellen Gestaltung, Umsetzung sowie zentraler Ergebnisse der drei Selbststudiumseinheiten vorgestellt und reflektiert. Zum besseren Verständnis der vollzogenen Gestaltungs- und Untersuchungsschritte wird zunächst auf die theoretischen Grundlagen zum Selbststudium (Definition, Funktionen, Taxonomie-Modelle) und auf formative E-Assessments (Definition, Formen und Funktionen) eingegangen.

2. Didaktische Gestaltung der Selbststudiumseinheiten

2.1 Einführung in die didaktischen Grundlagen

Aus Studierendensicht stellt das Selbststudium eine Aufgabe dar, in dem „eine (oder mehrere) ergebnisorientierte und inhaltsbezogene Denk- und Handlungsaufforderung“ (Kleß 2013: 18) nachzukommen ist. Dabei können Studienaufgaben unterschiedliche Funktionen haben:

- (1) Aufgaben können dem selbstständigen Wissenserwerb und/oder der Wissenserweiterung dienen (Häfele 1995, Leisen 2006). Diesbezügliche Aufgaben umfassen „Übungs-, Wiederholungs-, Festigungs-, Vertiefungs-, Strukturierungs-, Vernetzungsaufgaben“ (Kleß 2013: 20). Da hier das Lernen als Prozess im Vordergrund steht, spricht man auch von *Lernaufgaben* (Büchter & Leuders 2005). Im Unterschied dazu stellen *Leistungsaufgaben* die Dokumentation einer individuellen Lernleistung (quasi als Produkt) in Form von Tests, Klausuren etc. in den Mittelpunkt (ebd.).
- (2) Des Weiteren können Aufgaben hinsichtlich ihrer *didaktischen Funktion* unterschieden werden. So können vom Lehrenden Einstiegs-, Übungs- und Wiederholungsaufgaben, Einzel- oder Gruppenaufgaben oder Hausaufgaben zur Strukturierung der Lehr-/Lernphasen eingesetzt werden (Häußler & Lind 1998, Rouss 2001, Friedrich & Oetken 2007 und Kulgemeyer & Schecker 2007).
- (3) Schließlich dienen Aufgaben unterschiedlichen *inhaltlichen Funktionen*, indem sie von Lehrenden mit einem bestimmten kognitiven Schwierigkeitsgrad ausgestaltet werden, der sich an den Lernvoraussetzungen der Lernenden und der Popularität des Themas orientiert. Um sicherzustellen, dass man hierbei vom Einfachen zum Schwierigen/Komplexeren vorgeht, sollten die didaktischen

Grundelemente, also Lernziele, Lernaufgaben und Leistungsprüfungen, systematisch bestimmten kognitiven Lernprozessen zugeordnet werden (Kleß 2013). Dabei unterstützen Taxonomie-Modelle wie etwa von Bloom (1964) oder Anderson & Krathwohl (2006) Lehrende bei der Lehr- und Prüfungsplanung. Wie in Tabelle 1 ersichtlich, umfasst die zweidimensionale Taxonomie von Anderson und Krathwohl eine horizontale Prozessdimension und eine vertikale Wissensdimension.

- In der horizontalen Dimension unterstützen die sechs kognitiven Prozessstufen (erinnern, verstehen, anwenden, analysieren, bewerten und entwickeln) Lehrende bei der Systematisierung der geforderten kognitiven Fähigkeiten, indem die didaktischen Grundelemente den Niveaustufen zugeordnet werden. Da das kognitive Anforderungsniveau mit jeder Stufe ansteigt, impliziert dieses Modell, dass eine höhere Prozessstufe nicht ohne das Bewältigen der vorangehenden Stufen erreicht werden kann (Anderson & Krathwohl 2006). Beispielsweise fallen Transferaufgaben, bei denen allgemeine Regeln auf konkrete Beispiele angewendet werden müssen, unter Fragestellungen auf Anwendungsebene, während Aufgaben auf Entwicklungsebene eigene Entwürfe und Lösungsansätze erfordern (Reinmann 2015).
- Die vertikale Dimension unterscheidet die Inhaltskomponenten

der didaktischen Grundelemente in vier Wissensarten (Faktenwissen, Begriffliches Wissen, Prozedurales Wissen und Metakognitives Wissen), wobei das Wissensniveau ebenfalls ansteigend angeordnet ist (Anderson & Krathwohl 2006). Dies betrifft insbesondere das Abstraktionsniveau (Schaper 2012: 23): Unter dem Begriff „Faktenwissen“ ist das Wissen um die zentralen Fachtermini und Basiselemente eines Fachgebiets, mit denen die Studierenden vertraut sein müssen, zusammengefasst. Das „Begriffliche Wissen“ beschreibt die Zusammenhänge der Basiselemente in Form von Klassifikationen, Verallgemeinerungen und Theorien. Als nächste Wissensart schließt sich das „Prozedurale Wissen“ an, mit welchem das Wissen über Methoden, Algorithmen und deren Anwendungsbedingungen gemeint ist. Das höchste Wissensniveau hat das „Metakognitive Wissen“, also das strategische Wissen über Wissen, insbesondere auch über das eigene Wissen (Krathwohl 2002).

Unter formativen¹ E-Assessments versteht man elektronische Tests, die während des Lernprozesses zur Feststellung des Lernfortschritts eingesetzt werden (Michel 2015). Hierbei ist es unerheblich, ob es sich um elektronische Assessments oder herkömmliche auf Papier handelt. An Fachhochschulen ohne akademischen Mittelbau sind formative Assessments allerdings vielfach nur in elektronischer Form möglich, weil andernfalls der Korrekturaufwand

zu groß wäre. Formative Assessments können freiwillig oder verpflichtend in ein Lehr-/Lernszenario eingebunden sein (Gruttmann & Usener 2011):

- Verpflichtende formative Assessments bringen die Studierenden im Laufe des Semesters dazu, sich intensiver mit dem Lernstoff auseinander zu setzen und geben Aufschluss darüber, was für das summative Assessment noch gelernt werden muss bzw. erzwingen durch die Mindestanforderung ein frühzeitiges Vorbereiten auf die Abschlussprüfung. Es hat sich gezeigt, dass Wissen und Fähigkeiten, die im Laufe des Lernprozesses durch (formative) Assessments geprüft werden, von den Lernenden später besser abgerufen werden können als andere Lerninhalte (Michel 2015).
- Formative Assessments, die nicht benotet werden, können zudem üblicherweise wiederholt durchgeführt werden, was bereits eine Leistungsverbesserung begünstigt (Handke & Schäfer 2012). Diese Erkenntnisse können sich Lehrende zunutze machen, indem sie für formative Assessments gezielt besonders wichtige Lerninhalte auswählen (Michel 2015). Studien haben diese Effekte auch für den Hochschulbereich gezeigt (Derr et. al 2016). Herauskrystallisiert hat sich, dass aussagekräftiges, sachbezogenes Feedback ein entscheidender Faktor für den Erfolg solcher Lehr-/Lernszenarios ist (Bücker et al. 2015, Handke & Schäfer 2012).

Tab. 1: Taxonomie-Modell von Anderson & Krathwohl (2006).

Wissensdimension	Dimension der kognitiven Prozesse					
	Erinnern	Verstehen	Anwenden	Analysieren	Bewerten	Entwickeln
Faktenwissen						
Begriffliches Wissen						
Prozedurales Wissen						
Metakognitives Wissen						

¹ Zudem können E-Assessments auch diagnostisch (zum Erkennen von Wissenslücken und Verständnisschwierigkeiten vor dem Lernprozess) und summativ (zur Überprüfung des Lernerfolgs nach dem Lernprozess) eingesetzt werden (Michel 2015: 12).

Zu den beschriebenen Effekten, die formative Assessments auf die Kontrolle des Lernfortschritts haben können, kommt hinzu, dass die Studierenden eine Orientierungshilfe erhalten, welche Anforderungen konkret an ihr Selbststudium gestellt werden. Das kann zu einer Verbesserung der Lernleistung führen. Setzt sich ein Lehr-/Lernszenario aus Präsenz- und Online-Anteilen zusammen, ist immer darauf zu achten, dass beide Bereiche sinnvoll miteinander verzahnt sind, damit der Mehrwert auch für die Studierenden deutlich wird. Andernfalls werden die Angebote üblicherweise nicht gut angenommen (Gruttmann & Usener 2011, Handke & Schäfer 2012).

2.2 Didaktisches Design der Selbststudiumseinheiten

Bei einer fast konstanten Teilnehmergruppe² umfasste das Lehrexperiment drei Selbststudiumseinheiten (SSE). Mit Bezug auf die Funktionen von Studienaufgaben wurden alle drei SSE als Leistungsaufgaben gestaltet, bei denen die Studierenden ihre individuelle Lernleistung in Form eines formativen E-Assessments dokumentieren sollten (Leutert 2005, Leisen 2006 und Kulgemeyer & Schecker 2007). Grundsätzliches Ziel der SSE war es, auf der Grundlage bereitgestellter Lernmaterialien ein vorgegebenes Thema selbstständig zu erarbeiten und zu

üben. Didaktisch konzeptionell wurden die einzelnen SSE unterschiedlich gestaltet (s. Abb. 1).

- **SSE 1:** Die erste Einheit im Kurs *International Management in Europe* diente einer Einführung in die internationale Marketingplanung und umfasste sowohl eine Auffrischung von Vorwissen als auch den Erwerb neuer Wissenstatbestände aus einem internationalen Kontext. Das Selbststudium war als Literaturstudium angelegt, wobei die Studierenden strukturiert angeleitet innerhalb von 21 Tagen ca. 16 Seiten aus zwei Englischsprachigen Büchern erarbei-

	SSE1	SSE2	SSE3
Kurs	International Management in EU (Engl.)	European Case Studies (Engl.)	International Management in EU (Engl.)
Dauer der SSE	23.3.–12.4.2016 (21 Tage)	25.3.–7.4.2016 (13 Tage)	6.4.–12.4.2016 (7 Tage)
Leistungsaufgabe	1. Textstudium aus 3 ausgewählten Büchern 2. Case Study (Text) 3. E-Assessment mit Mindestleistungsanforderung von 80%	1. Video „Go to Market Framework“ by Harvard i-lab (60 min.) 2. E-Assessment ohne Mindestleistungsanforderung	1. Textstudium aus dem zentralen Kurslehrbuch 2. E-Assessment mit Mindestleistungsanforderung von 80%
Inhaltliche Funktion (Wissendimension) 1 = Faktenwissen 2 = Konzeptionales Wissen 3 = Prozedurales Wissen 4 = Metakognitives Wissen	1, 2 - Wiederholung Grundlagen strategische Planung - Einführung in die internationale Strategische Marketingplanung	1, 2, 3 - Einführung in marketingstrategische Problem- und Handlungsfelder von Start-up-Unternehmen	1, 2 - Einführung in M&A als internationale Markteintrittsform
Inhaltliche Funktion (Dimension kognitiver Prozesse)	- Erinnern - Verstehen - Anwenden - Analysieren	- Erinnern - Verstehen - Anwenden - Analysieren - Bewerten & Entwickeln (in Form einer Projektarbeit)	- Erinnern - Verstehen
Prüfung (= langfristige Leistungsaufgabe)	- E-Prüfung (14.4.2016) - Gruppenbasierte Projektarbeit	- Transfer des erworbenen Wissens zur Lösung einer Projektarbeit (6./7.4.2016) - Mündliche Prüfung zur Erfassung des Wissensstands (4.5.2016)	- E-Prüfung (14.4.2016) - Gruppenbasierte Projektarbeit

Abb. 1) Darstellung ausgewählter didaktischer Elemente der Selbststudiumseinheiten (Quelle: Eigene Darstellung).

² Zum Stand SoSe 2016 umfassten die Kurse folgende Teilnehmerzahlen: International Management in EU: 51; European Case Studies: 50. In den computergestützten Selbstlernphasen traten leichte Diskrepanzen in der Teilnehmerzahl auf: SSE1: 51; SSE2: 48 und SSE3: 49. Dies begründete sich darin, dass nicht alle Studierenden beide Kurse belegten und/oder es zu krankheitsbedingten Ausfällen kam.

ten sollten. Das darauf basierende formative E-Assessment umfasste 33 Fragen mit geschlossenen Antwortvorgaben. Ergänzend musste eine Case Study erarbeitet und auf Moodle hochgeladen werden. Bei den Fragen wurden 14 Fragen einer Testdatenbank entnommen und 19 eigens für das Assessment entwickelt. Als Fragetypen wurden Multiple Choice, Multiple Response und Ranking verwendet.

- **SSE 2:** Dieses Selbststudium bezog sich auf eine Einführung in marketingstrategische Problem- und Handlungsfelder von Start-up Unternehmen. Zu diesem Zweck wurden die Studierenden mit einer 60 min. Vorlesungsaufzeichnung von Prof. Michael Skok vom Harvard i-lab zum Thema *Startup Secrets: Go to Market Strategies* (<http://www.startupsecrets.com/go-to-market>) konfrontiert. Ziel war es, die Studierenden in grundsätzliche strategische Entscheidungsfelder zum Markteintritt, zum Markenaufbau und zur Positionierung einzuführen sowie Do's und Don'ts im Marketing für Start-up Unternehmen eigenständig erarbeiten zu lassen. Basierend darauf sollten in Form einer gruppenbasierten Projektarbeit Markteintrittsstrategien für ein EXIST-Gründungsunternehmen an der TH Wildau erarbeitet werden. Für Selbststudium und Projektarbeit standen insgesamt 13 Tage zur Verfügung. Das formative E-Assessment beinhaltete 43 Fragen (eigens entwickelte Fragen vom Typ Multiple Choice, Ranking, Lückentext) ohne kommunizierte Mindestleistungsanforderungen.
- **SSE 3:** Wie die erste Selbststudiumseinheit war die dritte im Kurs *International Management in Europe* verortet und beinhaltete eine textbasierte Auseinandersetzung mit ausgewählten internationalen Markteintrittsformen (Begrifflichkeiten, Rahmenbedingungen nach den Ressourcen- und Institutionenökonomien, Vor-/Nachteile

sowie Ursachen für Fehlschläge). Hierzu wurde den Studierenden das Kapitel *Making Alliances & Acquisition work* aus dem im Kurs verwendeten Lehrbuch zu Verfügung gestellt. Das formative E-Assessment umfasste 20 Fragen (Multiple Choice), die einer Testdatenbank entnommen wurden. Zum Selbststudium standen den Studierenden sieben Tage zur Verfügung.

3. Umsetzung der Selbststudiumseinheiten

An der TH Wildau werden seit 2012 im Rahmen des Projekts *SOS – Strukturierung und Optimierung des Selbststudiums*³ E-Assessments erprobt und damit didaktische und technische Expertise beim Einsatz entsprechender Lernszenarien gesammelt. Unter anderem wurden ein Prozessablauf⁴ sowie umfangreiche didaktische Hilfestellungen entwickelt, um die stetig wachsende Nachfrage professionell begleiten zu können. Darauf wurde durch die frühzeitige Integration des SOS-Teams in die Planung und Durchführung des Lehr-/Lernexperiments zurückgegriffen. Für die technische Durchführung von E-Assessments wurde die an der TH Wildau verfügbare Software *Questionmark® Perception* eingesetzt. Sie ermöglicht Eingangstests ebenso wie formative Assessments und elektronische Prüfungen.

Ferner wurden die Studierenden bei der Durchführung ihrer SSE wie folgt unterstützt:

- Jede/r Studierende erhielt einen personalisierten Zugang zum E-Assessment-System, wodurch sichergestellt wurde, dass die Ergebnisse individuell zugeordnet und ausgewertet werden können. Der Zugriff auf die formativen E-Assessments erfolgte über Links, die in den veranstaltungsbegleitenden Moodle-Kursraum integriert waren.
- Für jede Einheit wurde ein *Self-Study Guide* erstellt, der die Studierenden zum strukturierten, systematischen Selbststudium anleiten

sollte. Dieser beinhaltete allgemeine Hinweise zum selbstständigen Lernen, technische Hinweise zur Durchführung der formativen E-Assessments und mit Lernzielen verknüpfte Arbeitspakete.

- Alle Lernmaterialien wie Texte, Videos, Fallstudien wurden etwa zwei Tage vor Beginn des SSE im Moodle-Kursraum bereitgestellt.
- Zur Sicherstellung der Effektivität der SSE wurden die Teilnehmenden angewiesen die E-Assessments innerhalb eines definierten Zeitfensters (zwischen 7 und 21 Tagen, vgl. Abb. 1) zu absolvieren. Damit sollte sowohl den Studierenden als auch der Dozentin die Möglichkeit einer Lernkontrolle geboten werden. Ferner wurden für die SSE1 und SSE3 Mindestleistungsanforderung (mind. 80 % richtige Antworten) formuliert, wobei die Studierenden zur Erreichung dieser Anforderungen innerhalb des Zeitraums den Test unbegrenzt häufig durchführen konnten. Im Falle falscher Antworten wurden die Studierenden zur Klärung/Lernstoffwiederholung auf die jeweiligen Arbeitspakete verwiesen. Alle SSE fanden ohne Unterstützung, wie etwa einem Teletutor, statt.

4. Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

Im Nachgang des durchgeführten Lehrexperiments wurden die SSE mit Fokus auf drei Untersuchungsfragen ausgewertet:

Frage 1:

Wie zweckmäßig sind formative E-Assessments zur Dokumentation von individuellen Lernleistungen im Selbststudium?

Frage 2:

Können formative E-Assessments langfristige Leistungsaufgaben (hier in Bezug auf Prüfungsleistungen) positiv beeinflussen?

³ Gefördert vom BMBF unter dem Förderkennzeichen 01PL11042 im Rahmen des Qualitätspakts Lehre

⁴ Zu finden unter www.th-wildau.de/eassessment

Frage 3:

Welche Rückschlüsse/Empfehlungen können aus der didaktischen Gestaltung der SSE im Lehrexperiment gezogen werden?

Die Beantwortung dieser Fragestellungen basiert auf den von *Questionmark® Perception* erhobenen Daten⁵ zu den einzelnen Testversuchen sowie Prüfungsergebnissen der Teilnehmenden in den beiden Modulen. Um die Zweckmäßigkeit der formativen E-Assessments zur Leistungsdokumentation zu bewerten, wurden die Testversuche und individuellen Lernfortschrittspfade untersucht (Abschn. 4.1). Darüber hinaus wurde mit Blick auf die Ziele des Lehrexperimentes beleuchtet, ob und wie die Studierenden die Möglichkeit des zeitlich flexiblen Lernens angenommen haben (Abschn. 4.2). Inwiefern die formativen E-Assessments die Prüfungsleistung positiv beeinflussen, wird in Abschn. 4.3 thematisiert. Abschließend werden die didaktischen Konzepte der SSE kritisch bewertet (Abschn. 4.4).

4.1 Formative E-Assessments zur eigenständigen Lernfortschrittskontrolle im Selbststudium

Betrachtet man die Anzahl der Versuche zum Bestehen der jeweiligen E-Assessments kann festgestellt werden, dass die Mehrheit der Teilnehmenden

nur einen Versuch zur Erreichung der Mindestanforderung von 80% richtiger Antworten benötigte (s. Tab. 2). Daraus kann geschlossen werden, dass die E-Assessments nicht spontan, sondern im Nachgang einer „ordnungsgemäßen“ Selbstlernphase absolviert wurden. Gleichsam steigt der Anteil bestandener Erstversuche von der ersten bis zur letzten SSE an. Auffällig ist dabei der hohe Anteil an bestandenen Erstversuchen in der SSE3 (43 von 49, ungefähr 88%, im Vergleich zu 61% beim SSE1 und 75% beim SSE2). Dieser Umstand kann grundsätzlich auf mehrere mögliche Ursachen zurückgeführt werden: (a) Die Studierenden könnten geübter im Umgang mit den Fragentypen sein. (b) Das Selbststudium könnte weniger anspruchsvoll gewesen sein. (c) Die Testfragen waren weniger schwierig. Da die Auswertungen sich rein auf quantitative Analysen der in *Questionmark® Perception* erfassten Daten stützen, versperrt sich an dieser Stelle eine fundierte Ursachenforschung. Aus Dozentensicht wird jedoch angenommen, dass die beiden letztgenannten Möglichkeiten dieses überdurchschnittlich positive Abschneiden verursachten.

Mit Ausnahme des dritten E-Assessments gibt es keine Hinweise darauf, dass die durchschnittlichen Testergebnisse mit steigender Anzahl an Versuchen kontinuierlich ansteigen.

Betrachtet man jedoch individuelle Lernfortschrittspfade der Studierenden mit überdurchschnittlich häufigen Testversuchen (s. Abb. 2), so kann durchaus ein Lernen aus Fehlversuchen festgestellt werden – wenngleich die Studierenden hier unterschiedlich vorgehen: So gibt es die „Klassischen Wiederholer“, die den kompletten Test bis zum erstmaligen Bestehen wiederholen. Kontrastierend existieren dazu die „Testtaktiker“ (s. Abb. 2 gestrichelte Linien). Diese widmen sich nach dem ersten Fehlversuch falsch beantworteten Fragen und suchen gezielt nach deren richtiger Beantwortung, um den Test mit abschließend überdurchschnittlichem Ergebnis zu beenden.

4.2 Organisation von Selbststudium und formativen E-Assessments

Basierend auf der Datengrundlage wurde untersucht, an welchen Tagen nach der Veröffentlichung der Selbststudiumsinhalte/des formativen E-Assessments die Testversuche (unabhängig vom Erfolgsgrad) vorgenommen wurden (s. Tab. 3).

Fasst man die Ergebnisse über die drei SSE zusammen, kann resultierend festgehalten werden, dass die Möglichkeit der zeitlich flexiblen Gestaltung von Lernphasen seitens der Studierenden ergriffen wurde. Sie nutzten überwiegend vorlesungsfreie Tage zum

Tab. 2: Ergebnistabelle zur Verteilung der Anzahl bestandener Versuche und durchschnittlicher Testresultate (Quelle: Eigene Darstellung).

		v1	v2	v3	v4	v5	v6–12	Σ Teilnehmende
SSE1	Teilnehmende	31*	12	5	1	1	1	51
	Ø Testresultat in %	83,4**	82,8	82,0	81,5	93,0	83,0	
SSE2	Teilnehmende	36	8	2	0	1	1	48
	Ø Testresultat in %	86,1	88,5	84,0	0	94,0	94,0	
SSE3	Teilnehmende	43	5	1	0	0	0	49
	Ø Testresultat in %	88,6	90,0	95,0	0	0	0	

Legende: v = abgeschlossene Testversuche; SSE = Selbststudiumseinheit

* In der SSE1 benötigen 31 Teilnehmende einen Versuch zum Bestehen des E-Assessments (mind. 80%).

** Das durchschnittliche Testergebnis im 1. Versuch des E-Assessments lag in der SSE1 bei 83,4%.

⁵ Im E-Assessment-System wird für jeden Teilnehmenden gespeichert, wann er/sie das Assessment aufruft und abschließt (auch wenn dies mehrfach geschieht), zudem das Gesamtergebnis und die Antworten auf die einzelnen Fragen. Die Untersuchungen der E-Assessments umfassen alle ordnungsgemäß beendeten Testversuche in den SSE 1–3. Testversuche mit 0% in einer Zeiteinheit von unter 0,5 min. wurden eliminiert, da es sich hierbei nicht um „ernsthafte“ Testversuche handelte.

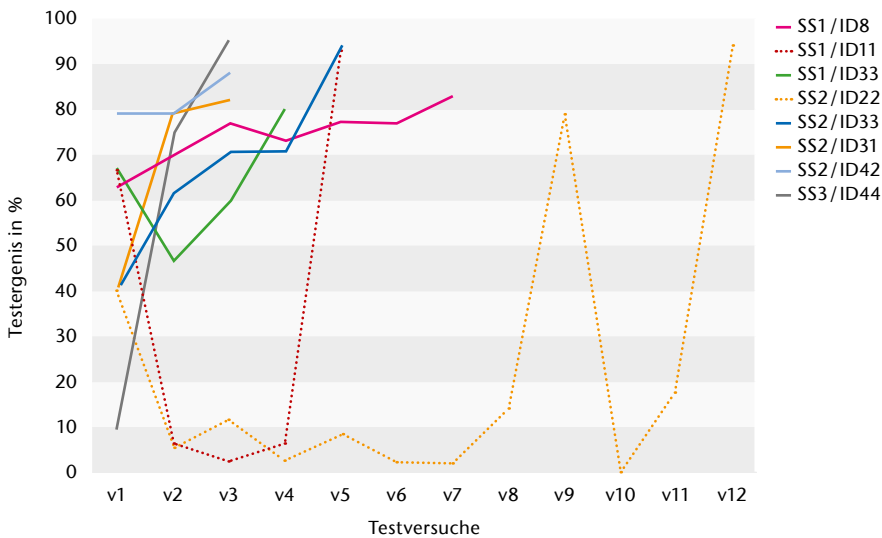


Abb. 2) Lernfortschrittspfade von Studierenden mit überdurchschnittlich häufigen Testversuchen (Quelle: Eigene Darstellung).

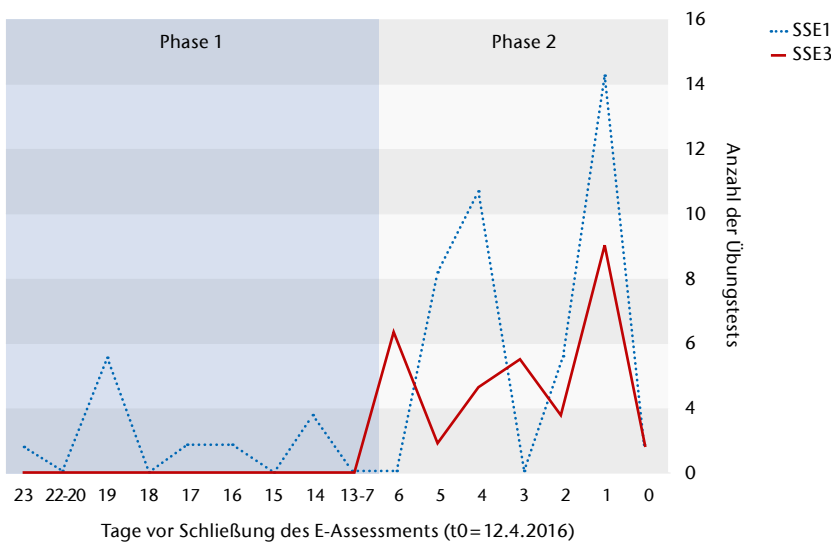


Abb. 3) Darstellung der Übungstests nach dem Zeitpunkt vor Schließung des E-Assessments. (Quelle: Eigene Darstellung).

Tab. 3: Ergebnisdarstellung der Testzeitpunkte.

SSE1	Rund 91 % der Testversuche waren Erst-, Zweit- und Drittversuche, wobei ein Drittel dieser Versuche an dem Tag vorgenommen wurden, der laut Kursplan als Selbststudium vorgegeben war (Ersatz für Präsenzveranstaltung). Darüber hinaus sind „kleinere Peaks“ an Ostern, am Tag einer folgenden Präsenzveranstaltung und am Wochenende vor der Deadline festzustellen.
SSE2	87 % der Testversuche waren Erst- und Zweitversuche, wobei für die Selbstlernphasen mehrheitlich vorlesungsfreie Tage gewählt wurden: Knapp 50% dieser Versuche fanden über die Osterfeiertage statt und 30 % am Wochenende oder an vorlesungsfreien Tagen.
SSE3	Es wurden 87 % der Testversuche erstmalig unternommen. Von diesen Versuchen wurden 45 % an dem Tag durchgeführt, der laut Kursplan als Selbststudium vorgegeben war (Ersatz für Präsenzveranstaltung). Ferner fanden 25 % der Erstversuche am Wochenende statt.

Selbststudium. Darüber hinaus handelte es sich in diesem Experiment um „disziplinierte“ Studierende, da ein signifikanter Anteil dem im Kursplan empfohlenen Tag für das Selbststudium folgte.

4.3 Formative E-Assessments als Instrument zur Prüfungsvorbereitung

Formative Assessments können nicht nur deswegen einen positiven Einfluss auf die Prüfungsleistung haben, weil sie die Auseinandersetzung mit dem relevanten Lerninhalten befördern, sondern auch weil die Studierenden eine Gelegenheit bekommen, sich mit der speziellen Prüfungssituation (der Art der Fragen, Fragenformulierung, Software etc.) vertraut zu machen (Schumann 2016: 198). Wie groß dieser Einfluss ist, hängt von der Intensität der Prüfungsvorbereitung ab. Zur Bewertung von formativen E-Assessments als Instrument zur Prüfungsvorbereitung (langfristige Leistungsaufgabe) wurde auf Basis der Datengrundlage (= Testversuche und Übungstest, d. h. durchgeführte E-Assessments nach erstmaligem Bestehen des E-Assessments) folgenden Fragen nachgegangen: Ob und wie intensiv übten Teilnehmende? Wann wurde geübt? Erreichten die Übenden bessere Ergebnisse im summativen E-Assessment?

Wie intensiv wurde mittels der E-Assessments geübt? Im Nachgang der SSE1 wurde mit insgesamt 45 Tests (ca. 35 % der Gesamtanzahl von E-Assessments) am intensivsten geübt. Rund ein Viertel der Teilnehmenden nahm die Möglichkeit der Leistungsverbesserung durch Übungstests wahr, wobei die Übenden durchschnittlich 3,5 Übungstests absolvierten. Ein ähnliches Bild zeigt sich für SSE3, wengleich die Übenden (25 % der Teilnehmenden) nur durchschnittlich 1,8 Übungstests durchführten (insg. 24 Übungstests). In der SSE2 wurde wenig geübt: Lediglich 10 % der Teilnehmenden übten – und wenn, dann nur einmal. Die unterschiedlichen Übungsintensitäten können auf die geforderte Prüfungsleistung zurückgeführt werden: Während der Kurs *International Management in EU* (SSE1 und SSE3) mit einem summati-

ven E-Assessment abschließt, sind im Kurs *European Case Studies* Projektberichte und mündliche Prüfungen zu erbringen. Dies spiegelt ein gezieltes Übungsverhalten wider, indem formative E-Assessments besonders dann zu Übungszwecken herangezogen wurden, wenn die Prüfungsleistung ebenfalls ein E-Assessment abfordert.

Wann wurde geübt? Wie in Kap. 2 dargestellt, standen den Studierenden unterschiedliche Zeiträume zu Durchführung der Übungstests zur Verfügung (vgl. Abb. 1). Es ist daher von Interesse, wann die Studierenden ihre Übungstests durchführten. Aufgrund der geringen Anzahl an Übungstests im SSE2, konzentrieren sich die Untersuchungen auf SSE1 und SSE3.

Betrachtet man diese 69 Übungstest in Abhängigkeit des Durchführungszeitpunkts (s. Abb. 3) – hier Tage vor Schließung des E-Assessments – kann folgendes festgestellt werden: Die Übungen zum 7-tägigen SSE3 wurden zu Beginn und etwas häufiger am Tag vor der Deadline durchgeführt. Im Hinblick auf das dreiwöchige SSE1 fanden zwei verschiedene Übungsphasen statt: Einerseits wurde während der „Kernphase“ des Selbststudiums (hier leicht häufiger direkt am Tag, der laut Kursplan als Selbststudium vorgegeben war) geübt. Andererseits nutzten die Teilnehmenden in der Woche vor der Deadline das formative E-Assessment auch zur Vorbereitung auf ihre E-Prüfung (s. Phase 2, Abb. 3).

Erreichten die Übenden bessere Ergebnisse im summativen E-Assessment? Zur Beantwortung dieser Frage wurden pro Student alle Übungen für die SSE1 und SSE3 addiert und den durchschnittlichen Leistungen aus dem summativen E-Assessment gegenübergestellt (vgl. Tab. 4). Es wird ersichtlich, dass die Nichtübenden mit einem durchschnittlichen Ergebnis von 67,5 % (= Note 3,0) eine schlechtere Leistung erbrachten als die Übenden (75,8 % = Note 2,3). Inwiefern eine steigende Anzahl von Übungen zu besseren Testergebnissen führte, konnte fallzahlenbedingt nicht untersucht werden.

Tab. 4: Anzahl der Übungen in Relation zum durchschnittlichen Ergebnis der E-Prüfung (Quelle: Eigene Darstellung).

Anzahl Übungen	Anzahl Teilnehmende	durchschnittliches Ergebnis in der E-Prüfung
0	32	67,5
1	6	77,7
2	1	76,0
3	3	74,0
4	2	77,5
5	1	68,0
7	1	66,0
8	1	76,0
11	1	78,0
19	1	85,0
1–19	17	75,8

4.4 Bewertung der didaktisch konzeptionellen Gestaltung der Selbststudiumseinheiten

Die Qualität von Lehre kann auf verschiedene Arten (z. B. Befragungen, Prüfungsleistungen, Bewertung durch externe Experten) unter Berücksichtigung vielzähliger Bewertungskriterien und Perspektiven gemessen werden. Im Rahmen der Untersuchung wurde die Qualität der SSE mit Blick auf die didaktisch konzeptionelle Gestaltung bewertet, wobei folgende Kriterien angelegt wurden:

1. Kohärenz von Lernziel, Lernaktivität und Leistungsprüfung gemäß dem *Constructive-Alignment*-Konzept von Biggs (2003)
2. Schwierigkeitsgrad der kurz- und langfristigen Leistungsaufgaben.

Kohärenz von Lernziel, Lernaktivität und Leistungsprüfung: Lernziele, Lernaktivitäten und Leistungsprüfungen (Inhalt und Methode) sind tragende Elemente in der Planung und Durchführung von Lehrveranstaltungen (Arbeitsstelle für Hochschuldidaktik der Universität Zürich

2010). Dabei ist zu berücksichtigen, dass Lehrende und Lernende unterschiedliche Orientierungspunkte in der Planung und Durchführung von Lehr-/Lernveranstaltungen wählen (Schaper & Hilkenmeier 2013). Während Lehrende die Gestaltung effektiver Lerneinheiten in den Mittelpunkt stellen, orientieren sich Lernende oftmals an den Prüfungsleistungen (ebd.). Prüfungen „bestimmen entscheidend darüber, was Studierende lernen und wie sie lernen“ (Arbeitsstelle für Hochschuldidaktik der Universität Zürich 2007: 5). Das *Constructive-Alignment*-Konzept (Biggs 2003) trägt dieser Tatsache Rechnung und fordert eine Kohärenz von Lernziel, Lernaktivität und Leistungsprüfung. Zur Überprüfung des *Constructive-Alignment* wird in der Literatur die von der Arbeitsstelle für Hochschuldidaktik der Universität Zürich entwickelte *Taxonomie-Matrix zur Analyse und Selbstevaluation von Hochschullehre (TAMAS)* (2010) diskutiert und von der HRK als praktisch handhabbares Instrument empfohlen (Schaper & Hilkenmeier 2013). Zur Bewertung der didaktischen Konzepte gemäß der TAMAS war es angezeigt, Lernziele, -aktivitäten und Leistungsprüfungen

der drei SSE in das Taxonomie-Modell von Anderson & Krathwohl (2006) einzuordnen und bezüglich ihrer Passung (Alignment) zu überprüfen. Eine idealtypische (und praktisch selten auftretende) Kohärenz würde vorliegen, wenn alle drei Elemente derselben Zelle zugeordnet werden (Arbeitsstelle für Hochschuldidaktik der Universität Zürich 2010: 15).

- **SSE1:** Mit wenigen Ausnahmen liegt eine Passung der Elemente vor, indem Lernziele, -aktivitäten und Leistungsprüfungen sich in jeweils angrenzenden Zellen (Wissensdimensionen und kognitive Stufen) befinden. Änderungsbedarf besteht hinsichtlich der mangelnden Verknüpfung zwischen den anwendungsorientierten Lernzielen und der Leistungsüberprüfung (E-Assessment). So ist etwa zu überlegen, verstärkt anwendungsbezogene Fragen in das Assessment zu integrieren.
- **SSE2:** Unter Anwendung der TAMAS-Systematik wird deutlich, dass hier stark unterschiedliche Leistungsniveaus verknüpft wurden: So umfasste die Veranstaltung einerseits weniger anspruchsvollere Elemente der Stufen „erinnern“ und „verstehen“ und andererseits komplexere Elemente der Stufen „analysieren“ und „entwickeln“. Dabei ist die Überprüfung komplexerer Leistungen zeitlich der Prüfung einfacherer Leistungen vorgelagert, was nicht stimmig ist. Darüber hinaus ist eine Nichtpassung hinsichtlich der Lern-Leistungsaufgaben zu konstatieren. So hat die Idee des Lernens anhand des Videomaterials für das zu absolvierende E-Assessment „gefruchtet“, aber für die Lösung der Projektaufgabe wurde es von den Studierenden weniger verwendet. Zielführender wäre es, wenn die Studierenden die Videoinhalte analysieren und mit Blick auf die Projektaufgabe bewerten würden (z. B. in Form eines Essays). Ferner sollte die Abfolge der Leistungsprüfungen gemäß des Schwierigkeitsgrades erfolgen: von einfachen zu komplexen Aufgaben.

Tab. 5: Schwierigkeitsniveau der SSE nach Bruder (2006).

	SSE1	SSE2	SSE3
(a) Komplexität der Aufgabe	mittel	hoch	niedrig
(b) Anforderungen an Vorwissen	mittel	hoch	mittel
(c) Anforderungen an das Lernprodukt	mittel	hoch	niedrig
Schwierigkeitsgrad in der Gesamtschau	mittel	hoch	eher niedrig

- **SSE3:** Diese Selbststudiumsphase erzielte eine gute Passung der Elemente, da Lernziele, -aktivitäten und Leistungsprüfungen sich in jeweils angrenzenden Zellen befinden. Gleichsam wird hier im Vergleich zu den anderen SSE ein niedriger Schwierigkeitsgrad deutlich (Ebenen „erinnern“ und „verstehen“), der den hohen Anteil an erstmalig bestandenen Testversuchen und der geringen Anzahl von Übungen erklärt (Arbeitsstelle für Hochschuldidaktik der Universität Zürich 2007: 7f.)

Schwierigkeitsgrad der Leistungsaufgaben: Lernaufgaben können motivierend, aber auch frustrierend wirken, wenn sie nicht am vorhandenen Wissensstand ansetzen und den Lernenden schlichtweg überfordern (Woest 2004). Gleichwohl können Unterforderungen zu Demotivation und Frustration führen. Die „(...) individuelle Erfolgswahrscheinlichkeit, bezogen auf die Anzahl von Erfolgen und Misserfolgen, die eine Person erlebt“ definiert nach Kloep (1982: 23) die Aufgabenschwierigkeit. Dabei wird das Schwierigkeitsniveau von der Komplexität der Anforderungen (= kognitive Anforderungen beim Lösen einer Aufgabe), den Anforderungen an das Vorwissen und den Anforderungen an das Lernprodukt bestimmt (Kleß 2013: 52ff., <http://lernen-in-vielfalt.bildung-rp.de>). Bewertet man die SSE hinsichtlich des Schwierigkeitsniveaus (Basis: Didaktisches Konzept; stichprobenhafte Erfassung von Feedbacks der Studierenden; Lehrerfahrung aus vorherigen Semestern), ist in Abstufung folgendes festzustellen: SSE2 (hoch); SSE1 (mittel) und SSE3 (eher niedrig) (s. Tab. 5). Folgt man der Empfehlung von Petschenka et al. (2004), nach welcher „Lernauf-

gaben so konstruiert sein sollten, dass 80 % der Lernenden diese erfolgreich bearbeiten können“ (Kleß 2013: 52) wurde SSE2 zu schwierig und SSE3 zu einfach konzeptioniert.

5. Empfehlungen und Fazit

In diesem Beitrag wurden unterschiedliche Möglichkeiten der Initiierung und Begleitung des Selbststudiums mittels E-Assessments analysiert und bewertet. Dabei wurde deutlich, welches Potential Selbstlernphasen hinsichtlich der Ausbildung von Selbstlernfähigkeiten im BA-Studium besitzen:

- Das Lehr-/Lernexperiment zeigte eine grundsätzlich hohe Bereitschaft der Studierenden, sich im Präsenzstudium Wissen eigenständig anzueignen. Die konzipierten SSE unter Anwendung formativer E-Assessments wurden akzeptiert und „diszipliniert“ ausgeübt. Insbesondere die Möglichkeit der zeitlich flexiblen Planung des Studiums wurde von den Teilnehmenden angenommen, da vor allem vorlesungsfreie Tage zum Selbststudium genutzt wurden. Rund ein Viertel der Studierenden nutzten die formativen E-Assessments zum Üben. Im Vergleich zu den Nichtübenden schnitten sie in der E-Prüfung durchschnittlich 0,7 Notenpunkte besser ab.
- Formative E-Assessments stellen ein praktikables Instrument zur Dokumentation und Kontrolle von individuellen Lernleistungen dar – und das sowohl aus Dozenten- als auch Studierendensicht. Der Aufwand für die Lehrenden wird vor allem in den Folgejahren überschaubar.

Hinsichtlich der didaktischen Gestaltung von SSE ist festzuhalten: Jede SSE sollte einem wohl durchdachten didaktischen Konzept folgen (Wiemer 2014). Gerade zu Beginn des Selbststudiums sind Hilfestellungen, wie etwa ein ausformulierter Lern- und Aufgabenplan anzubieten. Nur zu sagen „Ihr müsst auch selbstständig lernen“ wird nicht funktionieren (Arnold 2015: 75). Lernziele/-aktivitäten und Leistungsüberprüfungen müssen innerhalb des SSE zueinander passen und zu allen anderen Zielen/Aktivitäten/Prüfungen des Moduls eine logische Ergänzung darstellen. Mangelnde Passungen werden von den Studierenden erkannt und durch nicht zweckmäßige/zielgerechte Bearbeitung abgestraft. Die TAMAS stellt aus Autorensicht ein praktikables Instrument zur Gestaltung/Bewertung des didaktischen Designs dar. Mit Blick auf den Schwierigkeitsgrad empfiehlt sich ein mittleres Anspruchsniveau. Werden mehrere SSE im Kurs geplant, könnte die Aufgabenschwierigkeit auch ansteigen (Wiemer 2014). Die Verknüpfung von SSE mit formativen E-Assessments inkl. einer Mindestanforderung von 80 % hat sich im Experiment als vorteilhaft erwiesen. Hiermit ist es möglich, Wissenslücken (die die Studierenden u. U. nicht selbst erkennen) oder Fehlern in der Wissensaufnahme vorzubeugen (ebd.). Diesbezügliche Schwierigkeiten sollten dann in einer anschließenden Präsenzveranstaltung thematisiert werden. Insbesondere in Verbindung mit E-Prüfungen unterstützen formative E-Assessments eine realitätsnahe Vorbereitung auf die Prüfungssituation (Schumann 2016: 198). Der zeitliche Umfang von SSE kann/sollte breiter abgesteckt sein, so dass die Möglichkeiten des zeitlich flexiblen Lernens auch von den Studierenden genutzt werden können. Um die Bereitschaft und Akzeptanz für ein selbstständiges Lernen zu fördern, sollte bereits zu Semesterbeginn angekündigt werden, wann Selbstlerneinheiten eingeplant sind, wie diese ablaufen und welche Auswirkungen sie auf die Leistungsprüfungen haben. Zudem sollte den Teilnehmenden bei jedem Selbststudium eine Lernstruktur vorgegeben werden, die auch das Wiederholen von Vorwissen beinhaltet (Mayer & Brückner 2011).

Abschließend ist zu konstatieren, dass Konzepte dieser Art die Selbstlernfähigkeit von BA-Studierenden entwickeln und diese somit auf das eingangs erwähnte lebenslange Lernen oder aber auch für ein mögliches Masterstudium vorbereiten können. Ferner verdeutlichte das Experiment ebenso, dass auch im BA-Studium ein Umdenken in der Rolle als Lehrperson stattfinden kann/muss: Weg vom „Wissens-Eintrichter“ hin zum Wissensorganisator, der den Lernenden unterstützend bei der Bewältigung neuer Inhalte und Probleme zur Seite steht (Mayer & Brückner 2011). Damit eröffnen sich für Lehrende neue Möglichkeiten in der Planung und Gestaltung von Lehrveranstaltungen.

LITERATUR

Anderson LW, Krathwohl DR (eds) (2006) A taxonomy for learning, teaching, and assessing. A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives, Complete ed., [Nachdr.]. Longman, New York. ISBN: 080131903X

Arbeitsstelle für Hochschuldidaktik der Universität Zürich Taxonomie-Matrix zur Analyse und Selbstevaluation von Hochschullehre (TAMAS) (2010). Dossier Unididaktik 1/10

Arbeitsstelle für Hochschuldidaktik AfH der Universität Zürich (2007) Dossier Leistungsnachweise in modularisierten Studiengängen, Zürich

Arnold R (2015) Bildung nach Bologna! Die Anregungen der europäischen Hochschulreform. Springer VS, Wiesbaden. ISBN: 3658089776

Arnold R, Gómez Tutor C, Kammerer J (2003) Selbstlernkompetenzen als Voraussetzungen einer Ermöglichungsdidaktik – Anforderungen an Lehrende. In: Arnold R (ed) Ermöglichungsdidaktik. Erwachsenenpädagogische Grundlagen und Erfahrungen. Grundlagen der Berufs- und Erwachsenenbildung, Bd. 35. Schneider-Verl. Hohengehren, Baltmannsweiler, ISBN: 3-89676-717-8, pp 108–119

Aulerich G, Arndt K, Behlke K, Bölder B, Grube B, Heller P, Holtschmidt I, Kastner-Püschel J, Klein R, Klein-Dessoy K, Krause H, Wenzig A, Zisenis D (2005) Prozessbegleitende Lernberatung – Konzeption und Konzepte. QUEM-report

Beck H (2003) Neurodidaktik oder: Wie lernen wir? Erziehungswissenschaften und Beruf(3):323–330

Biggs J (2003) Aligning teaching and assessment to curriculum objectives.

Bloom BS (1964) Taxonomy of educational objectives. The classification of educational goals, 1st ed.]. Longmans, Green, New York. ISBN: 9780582280106

Bruder R (2006) Grundlagen des Lehrens und Lernens von Mathematik. Skript Wintersemester 2006/2007

Büchter A, Leuders T (2005) Mathematikaufgaben selbst entwickeln. Lernen fördern - Leistung überprüfen, 1. Aufl. Cornelsen Scriptor, Berlin. ISBN: 3-589-22122-4

Bücker S, Deimling M, Durduman J, Holzhäuser J, Schnieders S, Tietze M, Sayeed S, Schneider M (2015) Prüfung. In: Schneider M, Mustafić M (eds) Gute Hochschullehre: eine evidenzbasierte Orientierungshilfe. Wie man Vorlesungen, Seminare und Projekte effektiv gestaltet. Springer, Berlin-Heidelberg, ISBN: 3662450615, pp 119–152

Derr K, Jeremias XV, Schäfer M (2016) Optimierung von (E-)Brückenkursen Mathematik: Beispiele von drei Hochschulen. In: Lehren und Lernen von Mathematik in der Studieneingangsphase. Konzepte und Studien zur Hochschuldidaktik und Lehrerbildung Mathematik. Springer Fachmedien, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-10260-9, pp 115–129. doi: 10.1007/978-3-658-10261-6_8

Finke I, Heimer A, Kerlen C, Pfeiffer I, Wessels J, Zimmermann DA (2006) Lernen in der Arbeit. Selbstorganisation des Lernens. Wissensnutzung in Wertschöpfungsketten. QUEM-report

Friedrich J, Oetken M (2007) Chemie unterrichten. Neue Aufgabekultur - eine anregende Beispielsammlung. WEKA-Media, Kissing. ISBN: 978-3-8276-4864-8

Gruttmann S, Usener C (2011) Prüfen mit Computer und Internet. Didaktik, Methodik und Organisation von E-Assessment. In: Ebner M, Schön S (eds) Lehrbuch für Lernen und Lehren mit Technologien. epubli, Berlin, ISBN: 978-3-8442-0437-7, pp 183–192

Häfele G (1996) Lehrtexte im Selbststudium erarbeiten: Fördern Studienfragen den Wissenserwerb? Dissertation, Phillips-Universität

Handke J, Schäfer AM (2012) E-Learning, E-Teaching und E-Assessment in der Hochschullehre. Eine Anleitung. Oldenbourg, München. ISBN: 978-3-486-70800-4

Häußler P, Lind G (1998) Weiterentwicklung der Aufgabekultur im mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht. BLK-Programmförderung „Steigerung der Effizienz des mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterrichts“

Kleß E (2013) Selbstlernphasen im Studium gestalten. Grundlagen der Berufs- und Erwachsenenbildung, Bd. 75. Schneider-Verl. Hohengehren, Baltmannsweiler. ISBN: 978-3-8340-1266-1

Kloep M (1982) Zur Psychologie der Aufgabenschwierigkeit. Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1981 u.d.T.: Kloep, Marion: Untersuchungen und Theorien zum „optimalen Schwierigkeitsgrad“. Europäische Hochschulschriften : Reihe 11, Pädagogik, Bd. 139. Lang, Frankfurt am Main, Bern. ISBN: 3-8204-5833-6

Kulgemeyer C, Schlecker H (2007) Pisa 2000 bis 2006 - ein Vergleich anhand eines Strukturmodells für naturwissenschaftliche Aufgaben. Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften 13:199–220

Krathwohl DR (2002) A Revision of Bloom's Taxonomy. An Overview. Theory Into Practice 41(4):212–218. doi: 10.1207/s15430421tip4104_2

Leisen J (2006) Aufgabekultur im mathematisch-naturwissenschaftlichen Unterricht. Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 59(5):260–266

Leutert H (2005) Die Aufgabekultur entwickeln - Chancen für eine professionelle Unterrichtsarbeit. Grundschulunterricht 52(3):34–39

Mayer B, Brückner S (2011) Lebenslanges Lernen auf Basis Neurowissenschaftlicher Erkenntnisse. Schlussfolgerungen für Didaktik und Personalentwicklung. HAW im Dialog, No. 29. HAW, Weiden. ISBN: 978-3-937804-31-6

Michel LP (2015) Digitales Prüfen und Bewerten im Hochschulbereich. Im Auftrag der Themengruppe „Innovationen in Lern- und Prüfungsszenarien“ koordiniert vom CHE im Hochschulforum Digitalisierung

Peng MW (2014) Global business, 3. ed. South-Western Cengage Learning, Mason Ohio. ISBN: 1-133-58450-0

Petschenka A, Ojstersek N, Kerres M (2004) Lernaufgaben gestalten. In: Wilbers K, Hohenstein A (eds) Handbuch E-Learning. Dt. Wirtschaftsdienst, Köln, Kap. 4.19

Reinmann G (2015) Studententext Didaktisches Design, Hamburg

Roth G (2012) Möglichkeiten und Grenzen von Wissensvermittlung und Wissenserwerb. Erklärungsansätze aus Lernpsychologie und Hirnforschung. In: Caspary R (ed) Lernen und Gehirn, 7. Aufl. Nikol, Hamburg, ISBN: 978-3-86820-162-8, pp 54–69

Rouss H (2001) Mit offen(er)en Aufgaben zu mehr Effizienz im Physikunterricht. Ein Plädoyer für eine veränderte Aufgabekultur in der Physik

Schaper N (2012) Fachgutachten zur Kompetenzorientierung in Studium und Lehre. HRK - Fachgutachten ausgearbeitet für die HRK

Schaper N, Hilkenmeier F (2013) Umsetzungshilfen für kompetenzorientiertes Prüfen. HRK-Zusatzgutachten ausgearbeitet für die HRK

Schumann W (2016) Unter der Tarnkappe. E-Prüfungen aus psychologischer Sicht. Forschung & Lehre 16(3):198–199

Siebert H (2006) Didaktisches Handeln in der Erwachsenenbildung. Didaktik aus konstruktivistischer Sicht, 5., überarb. Aufl. Grundlagen der Weiterbildung. ZIEL, Augsburg. ISBN: 978-3-937210-76-6

Wahl D (2013) Lernumgebungen erfolgreich gestalten. Vom trägen Wissen zum kompetenten Handeln ; mit Methodensammlung, 3. Aufl. Klinkhardt, Bad Heilbrunn. ISBN: 978-378-15190-7-7

Wiemer M (2014) Studierende beim Lernen begleiten. Gute Praxis aus der Lehre. Deutsche Universitätszeitung 14(6)

Woest V (2004) Aufgabenformate. Naturwissenschaften im Unterricht. Chemie 82/83:7–13

AUTOREN

Prof. Dr. Sandra Haas
Dr. Xenia Valeska Jeremias
Christian Rabe
Internationales Marketing/Internationales Management
Technische Hochschule Wildau

E-Mail für Korrespondenz:
sandra.haas@th-wildau.de



Strategische Vorausschau bei der Multiwatt® GmbH

Dana Mietzner*, Frank Hartmann, Marcus Fahrenkrug und Kerstin Fahrenkrug

Zusammenfassung

Über die Notwendigkeit, die strategische Vorausschau, (engl. Strategic Foresight, Corporate Foresight) in Unternehmen zu etablieren, besteht angesichts zunehmender Unsicherheiten gesellschaftlicher und technologischer Entwicklungen sowohl in der Wissenschaft, als auch in Politik und Wirtschaft weitgehend Konsens.

Die bekannten Vorausschamethoden, wie die Szenario- oder Delphi-Analyse, werden in Großunternehmen und auch von Beratungsunternehmen im Auftrag von Verbänden und Politik (vgl. z. B. Foresight-Prozess des BMBF) regelmäßig angewandt und erfüllen wichtige sensibilisierende und orientierende Funktionen durch die Entwicklung und Aufbereitung von Orientierungswissen. Nach wie vor problematisch ist die Rückkopplung der Erkenntnisse aus komplexen und aufwändigen Vorausschauprozessen in die aktuelle gesellschaftliche oder unternehmerische Praxis. Dies trifft ganz besonders auf kleine und mittlere Unternehmen (KMU) zu, die meist nicht über die Ressourcen und Methodenkenntnis verfügen eine eigene systematische, strategische Vorausschau zu implementieren und Ergebnisse aus Vorausschauprozessen in die strategische Planung zu integrieren. Die Autoren stellen in diesem Beitrag einen Ansatz der strategischen Vorausschau vor, der sich für den Einsatz in KMU eignet.

1. Einführung

Angesichts zunehmender Komplexität und Dynamik in den Unternehmensumfeldern, die im Zusammenhang mit übergreifenden Entwicklungen, wie etwa der Digitalisierung oder der Transformation des Energie- und Produktionssystemen stehen und zu Unsicherheiten in strategischen Entscheidungsprozessen führen, sehen sich kleine und mittlere Unternehmen (KMU) vor der Herausforderung, diese Komplexität und Dynamik zu erfassen, zu reduzieren und in unternehmerischen Entscheidungen zu berücksichtigen.

Eine Möglichkeit, um mit Unsicherheiten in dynamischen Unternehmensumfeldern umzugehen, ist die strategische Vorausschau (Reger 2001b, Heger & Rohrbeck 2012, Mietzner 2009a, Rohrbeck 2014, Rohrbeck et al. 2015, Reger 2001a, Zott et al. 2011). Die im Zusammenhang mit der strategischen Vorausschau etablierten und in der Literatur diskutierten Ansätze, Prozesse und Methoden fokussieren jedoch noch immer häufig auf Großunternehmen, während für kleine und mittlere Unternehmen kaum Gestaltungsvorschläge vorliegen.

Die Autoren möchten mit diesem Artikel einen Beitrag dazu leisten, den Ansatz der strategischen Vorausschau für KMU zu erschließen. Sie erörtern im vorliegenden Beitrag zunächst Hintergrund und Methoden der strategischen Vorausschau im Zusammenhang mit der Entwicklung von Geschäftsmodellen. Darüber hinaus wird in einem nächsten Schritt, anhand einer Fallstudie, die Umsetzung der szenariobasierten Geschäftsmodellentwicklung expliziert.

Abstract

In the view of increasing uncertainties of social developments, there is a wide consensus for the necessity of strategic (or corporate) foresight in science and politics as well as in business.

Different widely used foresight methods like scenario analysis or Delphi analysis are implemented in large companies as well as by consultants on behalf of associations and policy makers (see, e.g., the BMBF foresight process). They fulfil important sensitizing and orientating functions by developing and preparing knowledge for orientation purposes. What still appears to be problematic is creating the linkages between the insights obtained by foresight methods and the current social and business practices. Especially small and medium-sized enterprises are confronted with a lack of resources and methodological knowledge to implement systematic, strategic foresight approaches. In this paper, the authors introduce a strategic foresight approach that is suitable for implementation in SMEs.

* korrespondierende Autorin

2. Strategische Vorausschau in Unternehmen

Weitgehender Konsens besteht in der Literatur darüber, dass die strategische Vorausschau ein kollaborativer Prozess ist, multiple Zukünfte und mögliche Wege zu antizipieren, um Unsicherheiten zu reduzieren und strategische Entscheidungen zu treffen (Vecchiato 2012, Rohrbeck 2014, Heger & Rohrbeck 2012, Krawczyk & Slaughter 2010). In diesem Prozess setzen sich unterschiedliche Akteure immer wieder mit Unsicherheiten technologischer und gesellschaftlicher Veränderungen auseinander und leisten damit auch einen Beitrag für das strategische Management. Hierbei ist Diversität erwünscht, die Vorausschau versteht sich nicht (mehr) als ein elitäres, rein wissenschaftliches Unterfangen (Saritas et al. 2014: 2). Die zum Einsatz kommenden Methoden müssen Grundanforderungen entsprechen. Hierbei werden insbesondere die Zukunftsorientierung, Partizipation, die Evidenzbasierung, Multidisziplinarität und Handlungsorientierung hervorgehoben (Saritas et al. 2014: 2).

Eine umfangreiche Analyse zu den eingesetzten Methoden der strategischen Vorausschau im Zeitraum 2004 bis 2006, wobei 2.000 Vorausschau-Projekte analysiert wurden (Popper 2009) zeigt, dass die am weitesten verbreiteten Methoden die Literaturanalyse, Expertenpanels und Szenarioanalysen sind, gefolgt von Trendanalysen, Interviews, Delphis und Key-Technology-Analysen (Popper 2009: 6). In geringerem Maße wurden Roadmappingansätze, Modellierung und Simulation, Bibliometrie, morphologische Analyse, Gaming sowie Multikriterienanalysen angewendet (Popper 2009: 6). Es konnte gezeigt werden, dass für den Untersuchungszeitraum integrative multiple Methoden dominierten, wobei am häufigsten Expertenpanels, Brainstorming, Delphi- und Szenarioanalysen mit anderen Methoden kombiniert wurden.

Die aktuelle Untersuchung zum Einsatz von Vorausschamethoden von Saritas et al. aus dem Jahr 2014, die sich auch auf die Analysen von Popper (2009) bezieht, beruhte auf der Untersuchung von 2.659 entsprechenden Publikationen im Web of Science

und führte zur Identifikation von 68 aktuell verwendeten Vorausschamethoden. Hierbei wurde gezeigt, dass Szenario- und Delphianalysen sowie Roadmaps immer noch die dominierenden Methoden der strategischen Vorausschau sind. Was sich abzeichnet ist eine Ergänzung dieser Methoden durch quantitative Methoden wie Textmining, Patentanalyse und Netzwerkanalyse. Andere quantitative Methoden, wie beispielsweise Simulation und agentenbasierte Modelle entwickeln sich hingegen eher eigenständig. Insgesamt ist eine zunehmende Verbindung von qualitativen und quantitativen methodischen Ansätzen beobachtbar und typisch für neuere Ansätze der strategischen Vorausschau (Saritas et al. 2014: 12). Diese und frühere Untersuchungen zeigen auch, dass es keinen Bedarf an tatsächlich neuen Methoden der strategischen Vorausschau gibt. Eine Lücke in der theoretischen Diskussion und unternehmerischen Praxis besteht in der systematischen Verknüpfung der Ergebnisse aus Vorausschauprozessen mit der strategischen Planung sowie einer tiefen Methodenkenntnis insbesondere in KMU im Hinblick auf deren Implikation und Kombination. Rohrbeck et al. veröffentlichten 2015 eine systematische Literaturanalyse im Themenfeld der strategischen Vorausschau für den Zeitraum 2005–2014, in der 102 Artikel inhaltlich analysiert und ausgewertet wurden, wobei sich 29 Artikel mit „Corporate Foresight“ (strategische Vorausschau auf der Ebene von Unternehmen) auseinandersetzen. Basierend auf ihren Analysen schlagen Rohrbeck et al. folgende Definition vor, die eine Brücke zur Wahrnehmung und Interpretation von Wertschöpfung schlagen soll: „Corporate foresight permits an organization to lay the foundation for future competitive advantage. Corporate Foresight is identifying, observing and interpreting factors that induce change, determining possible organization-specific implications, and triggering appropriate organizational responses. Corporate foresight involves multiple stakeholders and creates value through providing access to critical resources ahead of competition, preparing the organization for change, and permitting the

organization to steer proactively towards a desired future“ (Rohrbeck et al. 2015: 6).

Im Mittelpunkt der strategischen Vorausschau in Unternehmen steht die Unterstützung der unternehmensinternen strategischen Ressourcen im Umgang mit Veränderungen in den Unternehmensumfeldern. Dies bedeutet, dass die Vorausschau letztlich die Innovationsfähigkeit von Unternehmen unterstützen muss. Das betrifft die Fähigkeit zu inkrementellen und radikalen Innovationen (Rohrbeck & Gemünden 2011). Insbesondere drei Funktionen kann die strategische Vorausschau dabei haben: Es geht nach Rohrbeck und Gemünden (1) um eine strategische Funktion der strategischen Vorausschau, die die Ausrichtung der Innovationsaktivitäten auf eine zu entwickelnde Vision, die Konsolidierung von Optionen im Vorausschau-Prozess und die Bewertung und Ausrichtung des Innovationsportfolios sowie die Identifizierung neuer Geschäftsmodelle der Wettbewerber einschließt. Es geht (2) um die Funktion als Initiator von Innovationsprozessen. Vorausschau triggert Innovationsaktivitäten durch die Identifikation neuer Kundenbedürfnisse, Technologien und Produktkonzepte der Wettbewerber und es geht (3) schließlich um die Funktion als Opponent, als Herausforderer der Innovationsakteure, indem sie deren Grundannahmen hinterfragt, die Unternehmensumwelt nach disruptiven Ergebnissen scannt und dieses Wissen in den Innovationsprozess einspeist (Rohrbeck & Gemünden 2011: 237).

Thematisiert werden auch unternehmensinterne Barrieren. Winzer und Thom sehen hier beispielsweise Diskrepanzen zwischen Akteuren, die das Vorausschauwissen erzeugen, und den Entscheidern, die häufig nicht davon überzeugt sind, dass dieses Wissen relevant für die Profilierung des Unternehmens ist (Winzer & Thom 2014: 2). Diesen Autoren zufolge sind auch die Einbindung unterschiedlicher Unternehmensvertreter in die Vorausschauprozesse und die Integration der strategischen Vorausschau in die Innovations- und Strategiebildungsprozesse der Unternehmen wichtig (Winzer & Thom 2014: 7).

Hervorgehoben ist, dass sich die dar-

gestellten Positionen zur strategischen Vorausschau überwiegend auf große Unternehmen mit den entsprechenden Ressourcen und Strukturen beziehen. Weitgehend unberücksichtigt bleibt die Frage, ob das Potential der strategischen Vorausschau auch für kleine Unternehmen genutzt und erschlossen werden kann. In diesem Zusammenhang rückt die strategische Vorausschau in Netzwerken in den Fokus (Rohrbeck et al. 2015: 17). Dieser Ansatz der strategischen Vorausschau erlaubt letztendlich eine gemeinsame Ressourcennutzung und die Einbindung unterschiedlicher Stakeholder, die entsprechendes Wissen in Vorausschauprozesse einbringen. Die Öffnung der strategischen Vorausschau korrespondiert somit mit der zunehmenden Verbreitung offener und kollaborativer Innovationsprozesse (Enkel et al. 2011, Gassmann et al. 2010, McPhee & Deutsch 2013).

3. Geschäftsmodellinnovationen

In der umfangreichen und vielfältigen Diskussion zu Geschäftsmodellen hat sich gezeigt, dass Geschäftsmodelle als Abbilder der Geschäftstätigkeit von Unternehmen/Organisationen interpretiert werden, mit denen sich diese analysieren und gestalten lassen (vgl. Schweizer 2005, Shafer et al. 2005, Zott et al. 2011). Die umfangreiche Literatur zu Geschäftsmodellen zeigt, dass viele Geschäftsmodellansätze auf die beiden Elemente „Wertschöpfungskonzept“ und „Ertragskonzept“ fokussieren. Als wertbasierte Geschäftsmodelle beschreiben Bieger et al. einen universellen Geschäftsmodellansatz, der ganzheitlich und integrativ ist (Bieger & Reinhold 2011: 31). „Ein Geschäftsmodell beschreibt die Grundlogik, wie eine Organisation Werte schafft. Dabei bestimmt das Geschäftsmodell, (1) was eine Organisation anbietet, das von Wert für Kunden ist, (2) wie Werte in einem Organisationssystem geschaffen werden, (3) wie die geschaffenen Werte dem Kunden kommuniziert und übertragen werden, (4) wie die geschaffenen Werte in Form von Erträgen durch das Unternehmen „eingefangen“ werden, (5) wie die Werte in der Organisation und an Anspruchsgruppen verteilt werden und (6) wie die Grundlogik der Schaf-

fung von Wert weiterentwickelt wird, um die Nachhaltigkeit des Geschäftsmodells in der Zukunft sicherzustellen“ (Bieger & Reinhold 2011).

Unter dem Schlagwort „Value Development“ thematisieren Bieger und Reinhold die dynamischen Aspekte des Geschäftsmodells. „Es definiert zum einen, wie das Unternehmen die Schaffung von Wert im Rahmen des bestehenden Geschäftsmodells quantitativ wie qualitativ evolutionär weiterentwickelt. Zum anderen beschreibt es, wie das Geschäftsmodell angesichts veränderter Rahmenbedingungen revolutionär weiterentwickelt wird“ (Bieger & Reinhold 2011: 32f.).

Mit dem letztgenannten Aspekt rückt das Thema der Erneuerung von Geschäftsmodellen in den Fokus. Mittlerweile werden Geschäftsmodellinnovationen als eigenständiger Innovationstyp behandelt. Schallmo beispielsweise versteht die einzelnen Elemente bzw. ein gesamtes Geschäftsmodell als Innovationsobjekt. Wie bei anderen Innovationstypen auch, lassen sich bei Geschäftsmodellinnovationen unterschiedliche Neuheitsgrade bestimmen, wobei der Hauptbezugspunkt dafür der Kunde ist (Schallmo 2014: 8). Ebenso können eine Prozessdimension und eine Zielfunktion unterschieden werden, wobei Letztere darauf gerichtet ist, für Kunden auf neue Weise Nutzen zu stiften und Differenzierung gegenüber Wettbewerbern zu erreichen (Schallmo 2014: 8). Geschäftsmodellinnovationen werden in Kombinationsprozessen von externen und internen Ressourcen entwickelt und vermarktet und unterscheiden sich hierbei nicht von Produktinnovationen im traditionellen Innovationsverständnis.

Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang, dass sich unterschiedliche Ebenen für Geschäftsmodelle identifizieren lassen. Nach Wirtz gibt es Geschäftsmodelle auf der Ebene der Industrie (industrietypische Geschäftsmodelle), des Gesamtunternehmens (Unternehmensgeschäftsmodelle), sowie einzelner Geschäftseinheiten und Produkte (Produktgeschäftsmodelle) (Wirtz 2013: 70–73).

Die im Rahmen dieser Studie vorgestellte Fallstudie fokussiert auf die Ebene des Gesamtunternehmens, da

kleine Unternehmen häufig nicht über verschiedene Geschäftseinheiten verfügen. Es geht bei der strategischen Vorausschau für kleine Unternehmen folglich um die Frage, wie sie ihr Geschäftsmodell weiterentwickeln und welche Rolle die Antizipation eines neuen Geschäftsmodells, bzw. die Neukombination der Komponenten des vorhandenen Geschäftsmodells, unter Nutzung von Vorausschaumethoden, dabei spielen kann.

Ansätze, die hierbei zu berücksichtigen sind, bieten (1) Szenarioanalysen (vgl. Fink et al. 2001) als die prominente Methode der strategischen Vorausschau mit einem hohen Anwendungsgrad (Mietzner 2009b) sowie (2) die Verknüpfung der unter Nutzung von Szenarien umgesetzten strategischen Vorausschau mit der Überprüfung und Erneuerung des Geschäftsmodells (Mietzner & Schultz 2016).

4. Fallstudie Multiwatt® GmbH

Im Folgenden wird ein Prozess beschrieben, in dem Szenarien für die Weiterentwicklung des Geschäftsmodells eines ausgewählten Unternehmens (KMU) genutzt wurden, die szenariobasierte Geschäftsmodellentwicklung. Bei dem Unternehmen handelt es sich um ein Großhandelsunternehmen aus dem Bereich der Haustechnik, das insbesondere auf Energieversorgungstechnik spezialisiert ist. Die für das Unternehmen relevanten Umfeldler gehören zum Energiebereich. Das Unternehmen hat sich auf erneuerbare Energien spezialisiert. Bezogen auf die Transformation des Energieversorgungssystems wurden bereits im Jahr 2014 Szenarien entwickelt, die als Grundlage für den unternehmensbezogenen Vorausschauprozess dienen. Das entsprechende „Anwenderunternehmen“ Multiwatt® Energiesysteme GmbH war bereits an diesem Szenarioanalyseprozess beteiligt, indem der Geschäftsführer sein Expertenwissen in die Identifizierung und Bewertung der Einflussfaktoren sowie die Herausarbeitung von Schlüsselfaktoren als zentrale Schritte der Szenarioanalyse eingebracht hat und somit eine Affinität für die praktische Nutzung der Szenarien unterstellt werden kann.

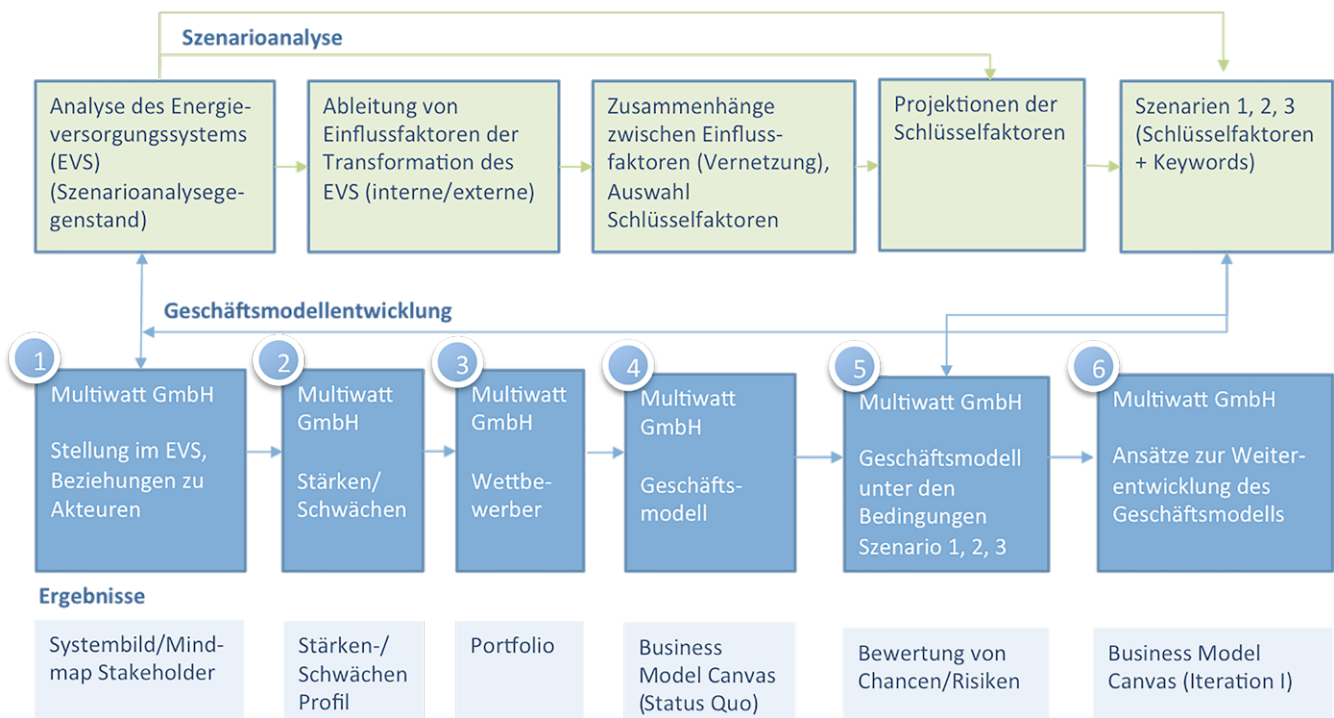


Abb. 1) Szenariobasierte Geschäftsmodellentwicklung am Beispiel des Unternehmens Multiwatt® Energiesysteme GmbH.

Die Abb. 1 zeigt den vorgeschalteten Prozess der Entwicklung von Szenarien und dessen Verknüpfung mit dem unternehmenszentrierten Vorausschauprozess, in dessen Mittelpunkt die Überprüfung und Entwicklung des Geschäftsmodells steht.

Szenarioanalyse

Im Rahmen der Szenarioanalyse wurden explorative, deskriptive Szenarien entwickelt, die auf Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge fokussieren und möglichst wenige Werturteile des Erstellers der Szenarien beinhalten. Im Prozess spielte die aufwendige Strukturierung und Beschreibung des Energieversorgungssystems entlang von Wertschöpfungsketten und unter Berücksichtigung entsprechender Akteurskonstellationen eine wichtige Rolle. Die Entwicklung des Energieversorgungssystems wiederum wurde in den Kontext der Transformationsforschung eingebettet. Die Entwicklung der Szenarien folgt einem Prozess, der sich aus fünf Phasen zusammensetzt. Er beginnt (1) mit der Strukturierung und Beschreibung des Szenariogegenstandes (Energieversorgungssystem). Dem schließt sich (2) die Identifikation von Einflussfaktoren der Transformation des Energieversorgungssystems an, wobei sowohl systeminterne als auch externe Einflussfaktoren iden-

tifiziert und analysiert werden. In diesem Arbeitsschritt wurden Expertenworkshops und schriftliche Befragungen als Methoden eingesetzt. (3) Die Ermittlung von Schlüsselfaktoren basierte auf der softwaregestützten Vernetzung der Einflussfaktoren und der Bestimmung des Charakters der Einflussfaktoren, je nach Stellung im vernetzten Systemzusammenhang. Es wurde insbesondere Wert darauf gelegt, die Zusammenhänge zwischen den Faktoren inhaltlich zu beschreiben. In der Phase (4) wurden auf einem mehrtägigen Szenarioworkshop in gemischten Teams Projektionen für die unterschiedlichen Sets von Schlüsselfaktoren für die Transformation des deutschen Energiesystems erarbeitet und diskutiert. Das Kernteam des Szenarioanalyseprozesses erstellte mit Hilfe einer Konsistenzanalyse Rohszenarien, wobei wiederum das Softwaretool ScenarioManager von SCMI (SCMI AG 2013) zum Einsatz kam. Die entstandenen Rohszenarien wurden (5) aufbereitet und ausformuliert (Hartmann & Mietzner 2016). Im Ergebnis wurden für Deutschland die drei Szenarien, „Deutschland auf dem schnellen Weg zur vollständigen Energiewende“, „Deutschland auf dem steinigen Weg der Energiewende“ und „Energiewende – Eingefrorener Traum vom Grün“ entwickelt.

Sie basieren auf Projektionen der Schlüsselfaktoren (1) Nachfrage nach erneuerbaren Energien, (2) Förderpolitik, (3) Energieeffizienz, (4) Grad der Selbstversorgung, (5) Grad der Dezentralisierung, (6) Akzeptanz, (7) Entwicklung von Energiespeichern, (8) Rechtliche Rahmenbedingungen und integrieren Inhalte aus der ausführlichen Analyse und Beschreibung des deutschen Energieversorgungssystems.

Für den unternehmensbezogenen Vorausschauprozess wurden die drei Szenarien anhand der ihnen zugrundeliegenden Einflussfaktoren aufbereitet. Die Einflussfaktoren wurden mit Schlüsselinformationen aus den ausführlichen Szenarien angereichert.

Stärken/Schwächen-Profil

Die Arbeit an der Entwicklung des Geschäftsmodells startete mit der Erarbeitung eines Stärken/Schwächen-Profiles des Unternehmens. Die Herausarbeitung der Stärken und Schwächen erbrachte für das Management eine zugespitzte und aktuelle Selbstvergewisserung über den erreichten Entwicklungsstand des Unternehmens. Die Entwicklung von Stärken/Schwächen-Profilen und die ehrliche Auseinandersetzung mit der aktuellen Unternehmenssituation bildet den Ausgangspunkt für die weitere Ana-

lyse. Auf die Darstellung der internen Stärken und Schwächen des Unternehmens wird an dieser Stelle aus Vertraulichkeitsgründen verzichtet.

Wettbewerbsanalyse

Ergänzt wurde das Stärken/Schwächen-Profil durch eine Wettbewerbsanalyse. Die Analyse zeigte einen hohen Wissensstand des Managements bezogen auf seine Mitbewerber in Deutschland. Was die Wettbewerbssituation im Ausland betrifft, konnte das Management allerdings keine differenzierteren Ausführungen machen, obwohl der Geschäftsanteil, der im Ausland generiert wird, sehr hoch ist. Der Grund hierfür ist die Intransparenz des Marktes aufgrund unterschiedlicher Strukturen und beteiligter Akteure. Auch ist der Aufwand für eine internationale Wettbewerbsanalyse, die, soll sie gut nutzbar sein, immer wieder aktualisiert werden muss, für ein einzelnes kleines Unternehmen sehr hoch.

Sowohl das Stärken-Schwächen-Profil als auch die Wettbewerbsanalyse bilden die Voraussetzung für die Analyse und Beschreibung des aktuellen Geschäftsmodells des Unternehmens.

Die Verortung der Multiwatt® GmbH im Energieversorgungssystem

Um für das Unternehmen relevante Akteure und Bedingungen aus dem Energieversorgungssystem (Hartmann & Mietzner 2016: 110) zu identifizieren, wurde dieses vorgestellt und diskutiert. Das Management ordnete sich anschließend in das entsprechende Modell ein. Auf der Wertschöpfungsstufe der Energieumwandlung wurden Beziehungen zu Solaranlagenbetreibern, Geothermieanlagenbetreibern sowie Haushalten gesehen. Auf der Wertschöpfungsebene des Energiehandels betraf dies die Börse, Netzbetreiber und Energieversorgungsunternehmen. Wichtig für das Unternehmen auf der Wertschöpfungsebene des Endenergieverbrauches sind Unternehmen, öffentliche Einrichtungen und private Haushalte. Die Diskussion des Energieversorgungssystems unterstützt somit die Diskussion des Unternehmens- und Branchenumfeldes.

Das aktuelle Geschäftsmodell der Multiwatt® GmbH

Für die Analyse des vorhandenen Geschäftsmodells wurde der anwendungsorientierte und weitverbreitete Ansatz von Osterwalder und Pigneur (2011: 7ff.) genutzt, der ein Geschäftsmodell anhand von neun Elementen definiert:

1. Wertangebote (Value Proposition) für Kunden, um deren Probleme zu lösen und Bedürfnisse zu befriedigen,
2. Kundensegmente (Customer Segments), spezifische oder ausdifferenzierte Kundengruppen für das Wertangebot
3. Kanäle (Channels), über die Wertangebote an Kunden kommuniziert, distribuiert und verkauft werden
4. Kundenbeziehungen (Customer Relationships), Herstellung und Pflege der Beziehungen zu Kunden
5. Einnahmequellen (Revenue Streams), Ergebnisse erfolgreicher Wertangebote
6. Schlüsselaktivitäten (Key Activities), Aktivitäten, die erforderlich sind, um das Wertangebot zu erbringen
7. Schlüsselressourcen (Key Resources), für die Bereitstellung der Wertangebote erforderliche Güter
8. Schlüsselpartnerschaften (Key Partnerships) für gemeinsame Aktivitäten mit externen Partnern
9. Kostenstruktur (Cost Structure), Kosten, die durch die Realisierung eines Geschäftsmodells anfallen

Der Business Model Canvas bietet Raum zur Darstellung der wesentlichen Eckpunkte eines Geschäftsmodells. Durch die Unterteilung in Elemente wird die Komplexität des Gesamtmodells überschaubar dargestellt, die Verbindungen und Wechselwirkungen zwischen den Elementen lassen sich gut herausarbeiten. Da-

durch wird das ganzheitliche Denken unterstützt. Da der Canvas übersichtlich ist, eignet er sich dazu, den aktuellen Entwicklungsstand zu kommunizieren und bietet eine gute Grundlage für die Diskussion (Köster 2014: 76). Abb. 2 zeigt den erarbeiteten aktuellen Business Model Canvas (Status quo) für das Unternehmen Multiwatt® Energiesysteme GmbH.

Szenarien als Hintergrund für die Entwicklung eines zukünftigen Geschäftsmodells

Im Anschluss an die Erarbeitung des Business Model Canvas (Status quo) erfolgte die Vorstellung und Diskussion der drei Szenarien. Für das Positivszenario und das Negativszenario wurde geprüft, welche Konsequenzen (Chancen und Risiken) sich mit der im Szenario dargestellten Situation für das Geschäftsmodell ergeben. Die Tab. 1 zeigt das Vorgehen am Beispiel des Szenarios 1. Der jeweilige Einflussfaktor wurde in seiner Projektion mit Schlüsselinformationen (Key Facts aus Szenario 1) untersetzt und mit der Geschäftstätigkeit des Unternehmens Multiwatt® Energiesysteme GmbH in Zusammenhang gebracht.

Ansätze für ein mögliches zukünftiges Geschäftsmodell

Insbesondere aus der Konsequenzanalyse des Negativszenarios „Eingefrorener Traum vom Grün“ ergaben sich wichtige Impulse für ein mögliches Geschäftsmodell der Zukunft. In diesem entwickelt sich das Unternehmen Multiwatt® Energiesysteme GmbH von einem Großhandelsunternehmen mit Planungs- und Handelskompetenz zu einem Energieversorgungsunternehmen (vgl. Abb. 3). Basierend auf einem hohen Strompreis (40 Cent) und angesichts neuer Möglichkeiten des Einsatzes der Brennstoffzelle, für deren Betankung Wasser aus dem eigenen Haushalt genutzt werden kann, ergibt sich großflächig die Möglichkeit autonomer Energieversorgung. Auch aufgrund des weitgehenden Wegfalls staatlicher Regulierung (z. B. Förderung und Netzzugang) wandelt sich das Unternehmen von einem Händler, der Photovoltaik-Anlagen verkauft, zu einem Unternehmen, das Strom und Wärme verkauft. Der Kunde, ausgerüstet mit Anlagen

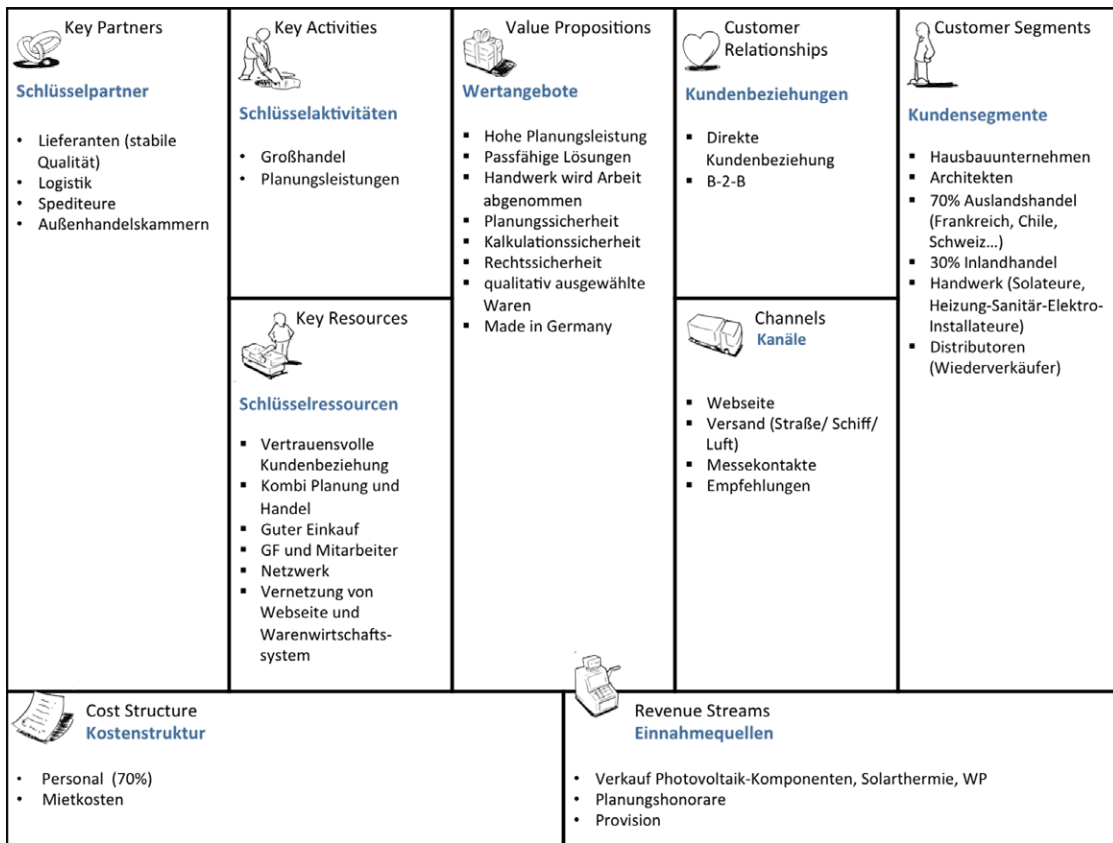


Abb. 2) Business Model Canvas Multiwatt GmbH (Status quo, Juni 2016).

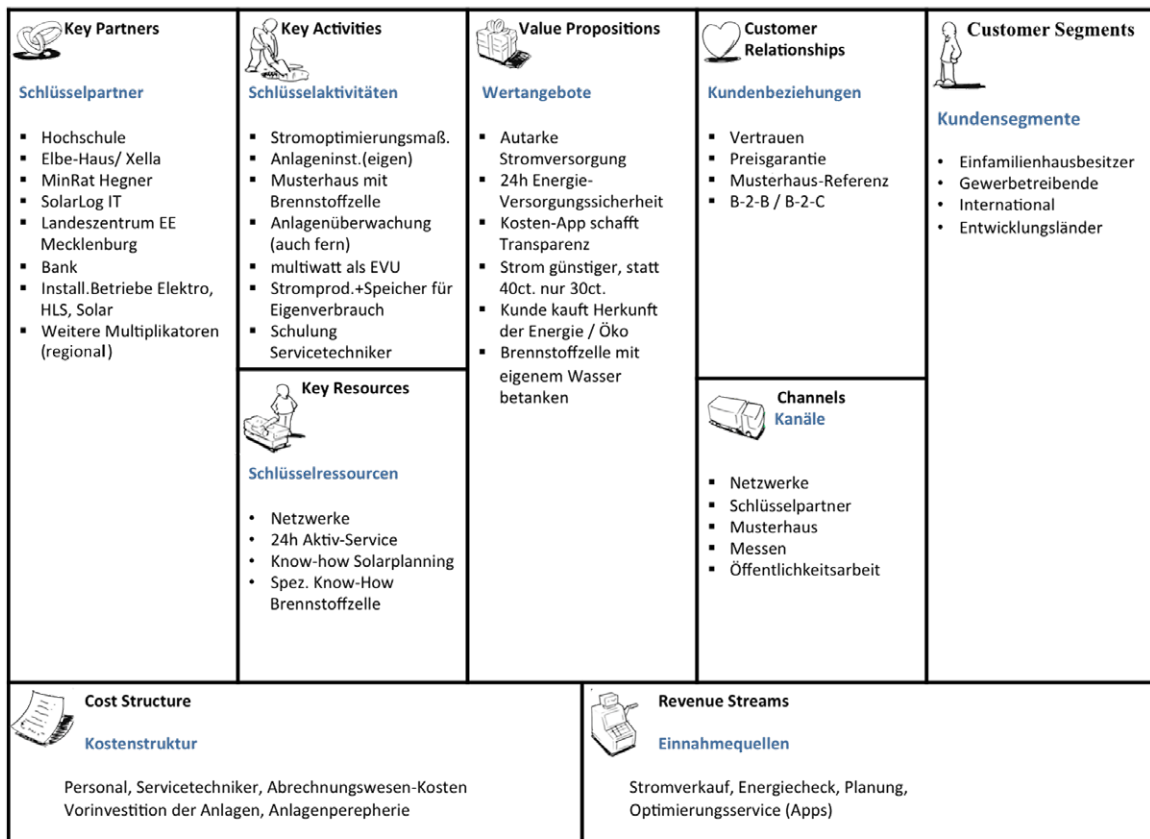


Abb. 3) Neues Geschäftsmodell im Business Model Canvas.

Tab. 1: Ableitung von Chancen und Risiken auf der Grundlage von Szenario 1 (Auszug)

Szenario 1: „Deutschland auf dem schnellen Weg zur vollständigen Energiewende“

Key Facts aus Szenario 1	Chancen/Risiken Bewertung Multiwatt® GmbH
<ul style="list-style-type: none"> Steigende Nachfrage nach erneuerbaren Energien 	++
<ul style="list-style-type: none"> Neue Wettbewerber drängen auf den Markt, da der Markt attraktiv ist 	+/- <ul style="list-style-type: none"> Hohe Wettbewerbsintensität Zwang zu Innovationen
<ul style="list-style-type: none"> Gestiegene Nachfrage nach Photovoltaik Anlagen kann nicht bedient werden (Ressourcenengpass) 	-
<ul style="list-style-type: none"> Je höher Ölpreis, desto höher Anfragen 	+
<ul style="list-style-type: none"> Zuschüsse/Förderungen führen zu erhöhter Nachfrage 	+
<ul style="list-style-type: none"> Förderprogramme wirken kontraproduktiv (Überförderung) 	- <ul style="list-style-type: none"> Umsatzrückgang
<ul style="list-style-type: none"> Rechtliche Rahmenbedingungen: Nutzung des vorhandenen Netzes ist Voraussetzung für Geschäftsmodell mit Photovoltaik 	+/-
<ul style="list-style-type: none"> Speichertechnologien 	++ <ul style="list-style-type: none"> Chance für ein mögliches neues Geschäftsmodell
<ul style="list-style-type: none"> Dezentrale Strukturen 	+ <ul style="list-style-type: none"> Unabhängiges Dorf wäre möglich (Wind/Energie/Sonne), jedoch abhängig von gesetzlichen Bestimmungen, (BNA)
<ul style="list-style-type: none"> Große Abhängigkeit von politischen Entscheidungen 	-/+ <ul style="list-style-type: none"> Lobby-Arbeit wichtig, z. B. Solarverband / Politik einbeziehen, um Beitrag zu leisten für Akzeptanz
<ul style="list-style-type: none"> ... 	<ul style="list-style-type: none"> ...

auf seinem Grundstück, gestellt vom Unternehmen Multiwatt®, hat Versorgungssicherheit rund um die Uhr, und zwar sowohl mit Wärme als auch mit Strom. Der Kunde kann davon ausgehen, dass er Ökostrom benutzt, da dies direkt überprüfbar ist.

Die Kombination mit fortgeschrittener Smart-Grid-Technologie ermöglicht eine Versorgung auch größerer Einheiten wie Gewerbegebiete oder Siedlungen. Dieses Wertangebot richtet sich insbesondere an Einfamilienhausbesitzer und Gewerbetreibende.

Autarke Lösungen spielen aber auch in Schwellen-, und Entwicklungsländern, mit instabiler und sinnvoller autarker Energieversorgung eine wichtige Rolle (Kundensegmente). Die Kundenbeziehungen erweitern sich von B2B im alten

Geschäftsmodell auf B2C im neuen Modellansatz.

Wichtig sind für die Kunden eine Preisgarantie und das Vertrauen in die Versorgungssicherheit. Dem dient der Aufbau eines Musterhauses durch das Unternehmen Multiwatt® Energiesysteme GmbH, gemeinsam mit Partnern. Auch die anderen Elemente des Geschäftsmodells wären von erheblichen Veränderungen betroffen. Multiwatt® würde Strom produzieren und speichern und damit zum Energieversorgungsunternehmen. Es würde Anlagen planen, installieren und betreiben sowie Optimierungsmaßnahmen als Dienstleistung anbieten (etwa im Bereich der Anlagenfernüberwachung). Erforderlich wären der Aufbau eines Services und die Schulung der Servi-

cemitarbeiter (Schlüsselaktivitäten). Als Schlüsselressourcen könnte das Unternehmen seine breiten Netzwerke, sein Know-How der Planung von Solaranlagen sowie speziell erworbenes Brennstoffzellen-Know-how einbringen. Für diesen Fall sind neue Schlüsselpartner zu gewinnen, etwa eine Hochschule mit Kompetenzen auf dem Gebiet von Brennstoffzellen, Multiplikatoren in Verwaltung und Politik, Geldgeber und unterschiedliche Installationsbetriebe. Kanäle zur Kommunikation und zum Vertrieb wären die Netzwerke und Schlüsselpartner, Messen, das neue Musterhaus sowie weitere Formen von Öffentlichkeitsarbeit. Die Kostenstruktur des Unternehmens würde sich deutlich verändern. Eine zunehmende Rolle würden Kosten für die Vorinves-

tion in Anlagen und Anlagenperipherie spielen. Hinzu kämen Kosten für ein aufwendiges Abrechnungswesen, für Personal und Servicetechniker. Einnahmequellen wären der Stromverkauf, Energiechecks und Optimierungsservices (Apps) als ergänzende Dienstleistung sowie die Planung.

Vor dem Hintergrund des Negativszenarios wären somit neun Elemente des aktuellen Geschäftsmodells von Veränderungen betroffen und neu aufeinander abzustimmen

5. Schlussfolgerungen

Der skizzierte Ansatz der strategischen Vorausschau hat zu einer Schärfung der Sicht auf die Zukunft und entsprechende Positionierungsoptionen des Unternehmens geführt und gezeigt, dass das Potenzial der strategischen Vorausschau auch von kleinen Unternehmen erschlossen werden kann. Der Vorausschauprozess hat eine Überprüfung des vorhandenen Geschäftsmodells initiiert und strategische Optionen aufgezeigt. Dies ist aus Sicht der Autoren allerdings an einige Voraussetzungen gebunden: (1) Erforderlich ist eine bereits relativ hohe Innovationskompetenz des Unternehmens, wobei insbesondere die Innovationsfähigkeit, hier das Innovations-Know-how, die Innovationsbereitschaft und die Fähigkeit zum offenen und kooperativen Umgang mit Akteuren aus dem Unternehmensumfeld hervorzuheben sind. (2) Zu beachten ist eine möglichst große Passfähigkeit extern erarbeiteten Wissens, z. B. in Form von Szenarien oder im Rahmen von Delphi-Studien zu der Geschäftstätigkeit des Unternehmens. Diese Bedingung wirkt stark einschränkend, wenn die Übertragung der Methode auf andere kleine Unternehmen gelingen soll. (3) Voraussetzung für eine erfolgreiche, gemeinsame strategische Vorausschau ist die Entwicklung einer gemeinsamen Sprache und der Aufbau von Vertrauen zwischen dem Unternehmen und beteiligten Partnern. (4) Das gewählte Vorgehen der strategischen Vorausschau muss auf die Bedingungen und Möglichkeiten des Unternehmens zugeschnitten werden („design to context“). Das betrifft ressourcenseitige und zeitmäßige Möglichkeiten des Unternehmens und darauf ausgerichtete Methoden.

LITERATUR

- Bieger T, Reinhold S (2011) Das wertbasierte Geschäftsmodell – Ein aktualisierter Strukturierungsansatz. In: Bieger T, Knyphausen-Aufseß D zu, Krys C (eds) *Innovative Geschäftsmodelle*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, ISBN: 9783642180682, pp 13–70
- Enkel E, Bell J, Hogenkamp H (2011) Open Innovation Maturity Framework. *Int. J. Innov. Mgt.* 15(06):1161–1189. doi: 10.1142/S1363919611003696
- Fink A, Schlake O, Siebe A (2001) *Erfolg durch Szenario-Management. Prinzip und Werkzeuge der strategischen Vorausschau*. Campus-Verl., Frankfurt/Main u. a. ISBN: 3-593-36714-9
- Gassmann O, Enkel E, Chesbrough H (2010) The future of open innovation. *R&D Management* 40(3):213–221. doi: 10.1111/j.1467-9310.2010.00605.x
- Hartmann F, Mietzner D (2016) Szenarien zur Transformation von Energieversorgungssystemen als Voraussetzung für die Ableitung von Anforderungen an zukünftige Kompetenzen. Technische Hochschule Wildau [FH]. doi: 10.15771/0949-8214_2016_1_14
- Heger T, Rohrbeck R (2012) Strategic foresight for collaborative exploration of new business fields. *Technological Forecasting and Social Change* 79(5):819–831. doi: 10.1016/j.techfore.2011.11.003
- Köster O (2014) Systematik zur Entwicklung von Geschäftsmodellen in der Produktentstehung. HNI-Verlagschriftenreihe, vol 326. Heinz-Nixdorf-Inst, Paderborn. ISBN: 3942647451
- Krawczyk E, Slaughter R (2010) New generations of futures methods. *Futures* 42(1):75–82. doi: 10.1016/j.futures.2009.08.011
- McPhee C, Deutsch C (2013) Editorial: Local Open Innovation. *Technology Innovation Management Review* 3(3)
- Mietzner D (2009a) Strategische Vorausschau und Szenarioanalysen. Methodenevaluation und neue Ansätze. Gabler, Wiesbaden. ISBN: 978-3-8349-1687-7. doi: 10.1007/978-3-8349-8382-4
- Mietzner D (2009b) Entwicklung neuer Geschäftsmodelle mit Szenarien. 3. Potsdamer Gründertag, Potsdam
- Mietzner D, Schultz C (2016) Nachgründungsphase – Mit systematischen Methoden strategische Entscheidungen treffen und Wachstum sichern. In: Siemon C, Müller K-D (eds) *Methoden für die Gründungsqualifizierung*. Update international: Bewährtes und Neues. tredition GmbH, Hamburg, ISBN: 978-3-7345-1865-2, pp 151–170
- Osterwalder A, Pigneur Y (2011) *Business Model Generation. Ein Handbuch für Visionäre, Spielveränderer und Herausforderer*, 1. Aufl. Business 2011. Campus Verl., Frankfurt am Main. ISBN: 9783593394749
- Popper R (2009) Mapping foresight. Revealing how Europe and other world regions navigate into the future. *European Research Area. Research Policy*, vol 24041. EUR-OP, Luxembourg. ISBN: 978-92-79-13110-3
- Reger G (2001a) Risikoreduzierung durch Technologie-Früherkennung. In: Gassmann O, Kobe C, Voit E (eds) *High-Risk-Projekte. Quantensprünge in der Entwicklung erfolgreich managen*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg-s.l., ISBN: 9783662077696, pp 251–277
- Reger G (2001b) Technology Foresight in Companies. From an Indicator to a Network and Process Perspective. *Technology Analysis & Strategic Management* 13(4):533–553. doi: 10.1080/09537320127286
- Rohrbeck R (2014) Trend Scanning, Scouting and Foresight Techniques. In: Gassmann O, Schweitzer F (eds) *Management of the fuzzy front end of innovation*. Springer Internat. Publ, Cham, ISBN: 978-3-319-01055-7, pp 59–73. doi: 10.1007/978-3-319-01056-4_5
- Rohrbeck R, Battistella C, Huizingh E (2015) Corporate foresight. An emerging field with a rich tradition. *Technological Forecasting and Social Change* 101:1–9. doi: 10.1016/j.techfore.2015.11.002
- Rohrbeck R, Gemünden HG (2011) Corporate foresight. Its three roles in enhancing the innovation capacity of a firm. *Technological Forecasting and Social Change* 78(2):231–243. doi: 10.1016/j.techfore.2010.06.019
- Saritas O, Burmaoglu S, Tabak A (2014) The evolution of the use of foresight methods. A bibliometric analysis of global research output for cutting-edge FTA approaches. 5th International Conference on Future-Oriented Technology Analysis (FTA), Brussels
- Schallmo D (2014) Theoretische Grundlagen der Geschäftsmodell-Innovationen. Definitionen, Ansätze, Beschreibungsraster und Leitfragen. In: Schallmo D (ed) *Kompodium Geschäftsmodell-Innovation*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-04458-9, pp 1–30
- Schweizer L (2005) Concept and evolution of business models 31(2):37–56
- SCMI AG (2013) *Scenario-Manager*. Scenario Management International AG, Paderborn
- Shafer SM, Smith HJ, Linder JC (2005) The power of business models. *Business Horizons* 48(3):199–207. doi: 10.1016/j.bushor.2004.10.014
- Vecchiato R (2012) Environmental uncertainty, foresight and strategic decision making. An integrated study. *Technological Forecasting and Social Change* 79(3):436–447. doi: 10.1016/j.techfore.2011.07.010
- Winzer A, Thom N (2014) Embedding FTA in a Corporation through Infiltration. 5th International Conference on Future-Oriented Technology Analysis (FTA), Brussels
- Wirtz BW (2013) *Business Model Management. Design - Instrumente - Erfolgsfaktoren von Geschäftsmodellen*, 3., aktuelle und überarb. Aufl. Springer Gabler, Wiesbaden. ISBN: 3834946354
- Zott C, Amit R, Massa L (2011) The Business Model. Recent Developments and Future Research. *Journal of Management* 37(4):1019–1042. doi: 10.1177/0149206311406265


AUTOREN

Prof. Dr. rer. pol. Dana Mietzner
Dr. phil. Frank Hartmann
 Technische Hochschule Wildau
 Forschungsgruppe Innovations- und Regionalforschung

Marcus Fahrenkrug
Kerstin Fahrenkrug
 Multiwatt GmbH

E-Mail für Korrespondenz:
 dana.mietzner@th-wildau.de





**Technische Hochschule
Wildau**
*Technical University
of Applied Sciences*

Hochschulring 1
15745 Wildau
Germany

www.th-wildau.de