



**Wissenschaftliche Beiträge
TH Wildau**

2019

IMPRESSUM

HERAUSGEBER

Die Präsidentin der Technischen Hochschule Wildau

Prof. Dr. rer. nat. Ulrike Tippe
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. iur. Peter Hantel
Prof. Dr.-Ing. Michael Hendrix
Prof. Dr. rer. nat. Michael Herzog
Prof. Dr.-Ing. Stefan Kubica
Prof. Dr. rer. pol. Christian Lendewig
Prof. Dr.-Ing. Thomas Masurat
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

Design pur GmbH

Dieffenbachstraße 19
10967 Berlin

Telefon (030) 69 81 19 30
info@designpur.de
www.designpur.de

Titelfoto: Colin Ingham (Hoekmine BV)

ISSN 0949-8214

23. Jahrgang

Nachdruck einzelner Artikel und Beiträge bei Quellenangabe frei.



Hier finden Sie die Artikel des **23. Jahrgangs** zum kostenlosen Download.

<https://www.th-wildau.de/forschung-transfer/projekte-publikationen-und-patente/wissenschaftliche-beitraege/>

WISSENSCHAFTLICHE BEITRÄGE 2019

INHALTSVERZEICHNIS

Wissenschaftliche Beiträge 2019

ANGEWANDTE BIOWISSENSCHAFTEN

- 7 Optimierung des Rekonstruktions-Tools TSNI für genregulatorische Netzwerke mittels Parallelisierung und ein Vergleich mit Time Delay ARACNE
*Marco Schäfer, Christian Jetschni, Chong Wang und Heike Pospisil**
- 11 Quantum Dot-modifizierte TiO₂-Strukturen für die Licht-gesteuerte Bioelektrokatalyse
*Marc Riedel, Daniel Schäfer, Wolfgang J. Parak, Adrian Ruff, Wolfgang Schuhmann und Fred Lisdat**

INFORMATIK/TELEMATIK

- 19 Sensitizing students to information security and privacy awareness with analogue gamification
*Margit Scholl**
- 27 Erweiterung eines landmarkenbasierten Innenraumortungsverfahrens für Mobilgeräte mit ARCore
*Jan Handrich und Ralf Vandenhouten**

OPTISCHE TECHNOLOGIEN/PHOTONIK

- 33 Impact of the plasma power on plasma-induced increase in absorption of fused silica
Christoph Gerhard, Emilie Letien, Thomas Cressent and Mandy Hofmann*

PRODUKTION UND MATERIAL

- 39 Erwärmung von Materialien und Werkstoffen durch Anwendung von Mikrowellentechnologien
*Lutz Hartmann, Tiberiu-Mihai Tatai, Mario Kaiser und Christian Dreyer**

VERKEHR UND LOGISTIK

- 49 Betrachtung von neuartigen Antriebs- und Kraftstoffkonzepten mit dem Ziel der Konzeption einer Hybridtankstelle für den Flugplatz Schönhagen für die Versorgung von Luftfahrzeugen mit nachhaltigen Kraftstoffen
Andreas G. Hotes, Klaus-Jürgen Schwahn und Henrike Fabienke*
- 57 Untersuchungen zu Mensch-Maschine-Schnittstellen eines Pilotenassistenzsystems zur Begegnung potentieller Gefahrensituationen der Allgemeinen Luftfahrt
Cheryl Nicoletta Schwahn, Sven Angermann und Wolfgang Rüter-Kindel*
- 63 Vergleichende akustische Untersuchung von Drohnen-Propellern
Konrad Oeckel, Jan Heimann, Sven Angermann, Michael Kerscher, Andreas Frahm, Gunnar Heilmann und Wolfgang Rüter-Kindel*

- 71 Richterwahl und Richteramt in einem künftigen Multilateralen Investitionsgericht: zentrale Regelungsfragen
*Christian Hederer**
- 79 Mit Kollaboration zu individuellen Kompetenzziele – Der Maker Space als neuer Lernort
*Eva Ismer und Dana Mietzner**
- 87 Die Entwicklung eines Technologie Radars für den IT-Mittelstand
*Marko Berndt und Dana Mietzner**
- 95 Technology and Institutions in neo-Schumpeterian and Original Institutional Thinking
*Iciar Dominguez Lacasa**
- 103 Decision-Making Process of Prospective International Students: a Proposed Generic Complementary Model
Sandra Haas and Florence Terryn*

VORWORT

ZU DEN WISSENSCHAFTLICHEN BEITRÄGEN 2019

An unserer Hochschule studieren aktuell ca. 3.700 Studierende, die sich auf zwei Fachbereiche verteilen. Als größte Fachhochschule im Land Brandenburg konnten wir im akademischen Jahr 2017/2018 730 Bachelor- und Masterabsolventinnen und -absolventen feierlich verabschieden, so dass seit der Gründung der TH Wildau im Jahr 1991 bereits insgesamt 12.830 Studierende ihr Studium an der TH Wildau erfolgreich abgeschlossen haben.

Unser Qualitätsanspruch der Hochschule spiegelt sich nicht nur in dem Bereich der Lehre wider, sondern leitet in demselben Maße unsere Forschungs- und Transferaktivitäten. Mit unterschiedlichen Projekten können wir unsere Transferaktivitäten und -strukturen weiter stärken, nachhaltige Impulse in der Region – und darüber hinaus – setzen sowie Wandlungsprozesse begleiten und unterstützen. Im Zentrum unserer gemeinsamen Arbeit steht insbesondere der Ausbau der Kooperationsbeziehungen mit wichtigen Akteuren aus Wirtschaft, Forschung, Politik und Gesellschaft.

Dieser Erfolg kommt nicht von ungefähr: Bereits seit vielen Jahren ist die TH Wildau eine gute Adresse für angewandte Forschung in Kooperation mit externen Partnern. Dabei sind das Wildauer Know-how und unsere langjährigen Erfahrungen bei Großunternehmen ebenso gefragt wie bei regionalen kleinen und mittleren Unternehmen.

Ein wichtiger Teil der wissenschaftlichen Arbeit an einer Hochschule besteht in der Veröffentlichung der Ergebnisse von Forschungs- und Entwicklungsprojekten. Unsere Kolleginnen und Kollegen publizieren in international renommierten Journalen nutzen aber auch immer wieder gerne „unsere“ Wissenschaftlichen Beiträge, die sich mittlerweile als wichtiges Medium für die Präsentation wissenschaftlicher Arbeiten etabliert hat.

In diesem Sinne wünsche ich Ihnen eine anregende Lektüre der Wissenschaftlichen Beiträge 2019. Sie enthalten eine große Bandbreite von Themen und spiegeln so das weit gefächerte Forschungsspektrum unserer Hochschule wider.

Ihre



Prof. Dr. rer. nat. Ulrike Tippe
Präsidentin der TH Wildau



Die Artikel sind auch als PDF über das Internet abrufbar. Hierfür besuchen Sie bitte die Internetseite

<https://www.th-wildau.de/forschung-transfer/projekte-publikationen-und-patente/wissenschaftliche-beitraege/>

Optimierung des Rekonstruktions-Tools TSNI für genregulatorische Netzwerke mittels Parallelisierung und ein Vergleich mit Time Delay ARACNE

Marco Schäfer, Christian Jetschni, Chong Wang und Heike Pospisil*

Zusammenfassung

Gegenstand dieser Veröffentlichung ist eine Reimplementierung des TSNI (Time Series Network Identification)-Tools zur Rekonstruktion von genregulatorischen Netzwerken aus Zeitserien von Gen-Expressionsprofilen. Das auf gewöhnlichen Differentialgleichungen basierende Tool wurde algorithmisch verbessert und an die Verarbeitung großer Datensätze angepasst. Durch Ausschöpfung des Potentials moderner Multi-CPU und GPU-Architekturen wurden die erforderlichen Berechnungen erheblich beschleunigt. Bei der Überführung des mit Matlab implementierten Tools in die Programmiersprache C wurde zudem die Bedienbarkeit verbessert.

Durch Einsatz der GPU-beschleunigten Mathematik-Bibliothek MAGMA konnten unter Verwendung eines normalen Desktop-Rechners Leistungssteigerungen um das 18,7-fache bei 11.000 Genen verzeichnet werden. Darüber hinaus rekonstruierte das verbesserte TSNI weitaus mehr biologisch richtige Beziehungen als vergleichbare Anwendungen.

Abstract

The purpose of this work was to optimize a tool for analyzing biological high-throughput data and to generate gene regulatory networks, which are based on ordinary differential equations. For this task the Time Series Network Identification (TSNI) - tool has been selected. The TSNI-algorithm has been optimized and transferred into the programming language C. Computationally intensive sections were parallelized using modern multi-core CPU and GPU architectures as well as functions from the MAGMA-library for the solution and parallelization of more complex mathematical problems. The performance of the algorithm was significantly increased (e.g. the calculation of a network of more than 11.000 genes was 18.7-fold faster with the improved tool compared to the original algorithm). So, large regulatory networks can now be analysed in a moderate time.

Additionally, more true positive network connections were predicted using the adjusted TSNI - tool.

1. Einleitung

Biologische Systeme wie Gewebe oder Zellen sind über viele Ebenen (metabolische Netzwerke, Signalwege, genregulatorische Netzwerke) miteinander eng verknüpft und hoch organisiert (Karr et al. 2012). Für ein umfassendes Verständnis dieser Organisation, ist eine ganzheitliche Betrachtung aller Ebenen erforderlich; dies ist Gegenstand der Systembiologie (Reiß 2002), welche derzeit durch die Fortschritte in den Sequenzieretechniken zunehmend an Bedeutung gewinnt. Aus diesem Grund und im Zusammenhang mit der

sich ebenfalls schnell entwickelnden Computertechnik steht heute weniger die Generierung der Daten, sondern vielmehr die Bewältigung ihrer Auswertung und die Schaffung neuen Wissens im Vordergrund (Jia et al. 2017).

Eine große Herausforderung besteht darin, schnelle und effiziente Algorithmen für die Rekonstruktion von genregulatorischen Netzwerken aus Genexpressionsdaten zu unterschiedlichen Zeitpunkten (Reverse Engineering) zu entwickeln, um Hochdurchsatzdaten in akzeptabler Zeit zu analysieren. Dies ermöglicht eine deutlich schnellere Gene-

rierung von neuen Erkenntnissen nicht nur in der Systembiologie, sondern auch in Medizin, Pharmazie und Biotechnologie. Besonders aus medizinischer Sicht ist die Kenntnis molekularer und genetischer Mechanismen wichtig, um Krankheiten mit deregulierten Genen als Ursache besser zu verstehen. Dies kann wiederum neue Angriffsziele für therapeutische Ansätze liefern (Reiß 2002; Jia et al. 2017). Die Kosten der Forschung in den genannten Bereichen können durch das Modellieren von genregulatorischen Netzwerken gesenkt werden, da beispielsweise nicht getestete laborexperimentelle Ansätze

kostengünstig simuliert und zumindest teilweise ersetzt werden (Reiß 2002; Karlebach & Shamir 2008).

Ein Software-Werkzeug, das die komplexe Aufgabe der Rekonstruktion von genregulatorischen Netzwerken aus Zeitserien von Genexpressionsdaten realisiert, ist das TSNI (Time Series Network Identification)-Tool (Bansal et al. 2006; Jia et al. 2017). Es modelliert genregulatorische Netzwerke mittels eines Ansatzes, welcher auf Differenzialgleichungssystemen beruht. So wird nicht nur die Topologie eines Netzwerks ermittelt, sondern auch dessen Dynamik (d.h. die durch genregulatorische Beeinflussung hervorgerufenen zeitlichen Konzentrationsveränderungen von Genprodukten) – und dies sogar im zeitkontinuierlichen Raum (Bansal et al. 2006). Damit bildet dieses Tools die biologische Realität deutlich besser ab als beispielsweise Boolesche Netzwerke oder Bayessche Netzwerke.

2. Methoden und Algorithmen

2.1 Algorithmen

Der Kern von TSNI besteht aus dem Differentialgleichungssystem, welches in Gleichung 1 dargestellt ist. Dieser Ausdruck beschreibt die Rate \dot{x}_i der Synthese eines Gens zu einem Zeitpunkt t_k in Abhängigkeit von der Konzentration aller anderen Transkripte einer Zelle bzw. des Systems. Die Rate eines Gens hängt von der Art des Einflusses (inhibierend, verstärkend, oder keiner) jeden Gens j ($1 \leq j \leq N$, wobei N die Anzahl der Gene bezeichnet) und dessen Konzentration x_j zum Zeitpunkt t_k ab. Hinzu kommt der Einfluss b_{il} der Perturbationen P . Die Variable u_l repräsentiert die l -te Perturbation zu einem Zeitpunkt t_k (Bansal et al. 2006).

$$\dot{x}_i(t_k) = \sum_{j=1}^N a_{ij} \cdot x_j(t_k) + \sum_{l=1}^P b_{il} \cdot u_l(t_k) \quad (1)$$

Gleichung 1 lässt sich mit Hilfe der Matrizen Schreibweise wie in Formel 2 kompakter darstellen. Dabei steht M für die Anzahl der Zeitpunkte (Bansal et al. 2006).

$$\dot{X}(t_k) = A \cdot X(t_k) + B \cdot U(t_k) \quad k = 1 \dots M \quad (2)$$

Anschließend wird der Ausdruck vom zeitkontinuierlichen Raum in den disk-

reten überführt (vgl. Gleichung 3). Die Ausgangsdaten zur Lösung des Gleichungssystem sind dabei ebenfalls diskret (Bansal et al. 2006).

$$\dot{X}(t_{k+1}) = A_d \cdot X(t_k) + B_d \cdot U(t_k) \quad (3)$$

Da das Gleichungssystem nur für den Fall $M \geq N + P$ gelöst werden kann, wird zum einen mittels Hauptkomponentenanalyse (engl. *Principle Component Analysis*; PCA) eine Dimensionsreduzierung von N und P durchgeführt. Zum anderen erfolgt mittels kubischer Spline-Interpolation eine künstliche Vervielfältigung der Zeitpunkte M . Nach der PCA wird das Gleichungssystem durch Bildung einer Pseudoinversen gelöst und abschließend das Ergebnis mittels der bilinearen Transformation wieder in den zeitkontinuierlichen Raum überführt (Bansal et al. 2006).

2.2 Methoden

Für eine effektivere Berechnung wurde der ursprünglich für Matlab implementierte Algorithmus in die performante und hardwarenähere Programmiersprache C überführt. Zur weiteren Steigerung der Berechnungsgeschwindigkeit kam parallele Programmierung zum Einsatz; dafür wurde die Schnittstelle OpenMP (Dagum & Menon 1998) verwendet. OpenMP stellt die nötigen Funktionen der Parallelisierung als Erweiterung von C bereit. Dies umfasst das Zerlegen von Problemen in Teilprobleme, die Synchronisation von Threads sowie die Deklaration von gemeinsamen und verteiltem Speicher. Mit Hilfe von OpenMP konnten die Routinen für kleinere Matrix-Multiplikationen parallelisiert werden.

Größere Operationen wurden mittels der MAGMA- (*Matrix Algebra on GPU and Multicore Architectures*) Bibliothek auf der Grafikkarte (engl. *Graphics Processing Unit*; GPU) gelöst (Dongarra et al. 2014). Sie basiert auf der CUDA¹-Schnittstelle, die die Verwendung einer GPU über ihren ursprünglichen Verwendungszweck hinaus ermöglicht und somit die GPU mit ihren hunderten bis tausenden Kernen für massive Parallelisierung bereitstellt (Rauber & Rün-

ger 2012). Zusätzlich greift MAGMA auf die Pakete LAPACK (*Linear Algebra PACKage*) und OpenBLAS (*Basic Linear Algebra Subprograms*) zurück (Dongarra et al. 2014). Die hybriden Algorithmen der MAGMA-Bibliothek nutzen durch intelligente Zerlegung von Problemen in Tasks variierender Granularität den Leistungsumfang von modernen Multi-CPU und GPU-Architekturen aus (Rauber & Rün-

2.3 Daten

Die für die Weiterentwicklung und Testung des Analyse-Tools genutzten Daten stammen von dem gut erforschten Modellorganismus *Arabidopsis thaliana*. Im Detail sind es Daten einer Studie zum Übergang vom vegetativem Wachstum zur Blütenbildung. Dabei wurden die Genexpressionsprofile während der Entwicklung von *Arabidopsis thaliana* in einem Zeitraum von 7 bis 16 Tagen nach der Keimung täglich aufgenommen (Klepikova et al. 2015), so dass die Expressionsdaten von 10 Zeitpunkten im Abstand von einem Tag vorlagen. Um die Vorhersagequalität der biologischen Zusammenhänge abschätzen zu können, wird die Anwendung TD ARACNE (*Time Delay Algorithm for the Reconstruction of Accurate Cellular Networks*) (Zoppoli et al. 2010) vergleichend herangezogen. TD ARACNE ist ein etabliertes und weit genutztes Tool zur Rekonstruktion von genregulatorischen Netzwerken aus Zeitserien von Genexpressionsprofilen; es verwendet allerdings das Konzept der Transinformation (engl. *Mutual Information*).

Für die Abschätzung der Vorhersagequalität der gefundenen Interaktionen wurde mit einem Datensatz bereits beschriebener Proteininteraktionen der Datenbank ATPIN („Arabidopsis thaliana protein interaction network“, <https://atpin.bioinfoguy.net/cgi-bin/atpin.pl>) verglichen. Release 9 enthält 96.276 Proteininteraktionen.

¹ CUDA ermöglicht die parallele Berechnung auf NVIDIA-Grafikkarten

2.4 Intrapolation

Da die Zahl der untersuchten Gene deutlich die Zahl der Messzeitpunkte übersteigt, ist die Zahl der Freiheitsgrade, die sich aus der Differenz zwischen Genen (N) und Messzeitpunkten (M) ergibt, zu hoch, um verlässliche Aussagen treffen zu können (vgl. Abschnitt 2.1). Aus diesem Grund wird die Zahl der Messzeitpunkte mittels Intrapolation künstlich vergrößert. Eine äquidistante Intrapolation teilt den Zeitbereich zwischen zwei Messpunkten gleichmäßig auf. Liegen jedoch Messwerte zu Zeitpunkten vor, die nicht paarweise jeweils denselben Abstand zueinander aufweisen, muss eine nicht äquidistante Intrapolation durchgeführt werden.

3. Ergebnisse

Der ursprüngliche Algorithmus wurde bezüglich des Rechenaufwands deutlich optimiert. Dabei wurde OpenMP zur Parallelisierung von Routinen für kleinere Matrix-Matrix-Operationen genutzt, bei denen der Kopiervorgang auf die GPU keinen Zeitvorteil bringt. Bei der Bewältigung der Parallelisierung mehrerer rechenintensiverer Abschnitte wurde die MAGMA-Bibliothek zur Matrix-Matrix-Multiplikation, für die Bildung großer Inversen und zur Singulärwertzerlegung (engl. *Singular Value Decomposition*; SVD) eingesetzt, wobei letztere den Kern der PCA und der Bildung der Pseudoinversen darstellt.

3.1 Verbesserung der Algorithmen-Performance

Das Ergebnis der Reimplementierung des TSNI-Algorithmus in C ist in Abb. 1 dargestellt. Wie zu erkennen ist wird mit steigender Datenmenge der Gewinn an Berechnungszeit deutlich vergrößert: Bei 7.000 Genen ist das verbesserte TSNI 14,4-mal schneller als der ursprüngliche Algorithmus; bei 11.000 Genen konnte bereits ein 18,7-facher Gewinn an Rechenzeit ermittelt werden. Die Grafik zeigt die Zeit für bis zu 11.000 Gene, da Matlab bei Datensätzen >12.000 abbricht.

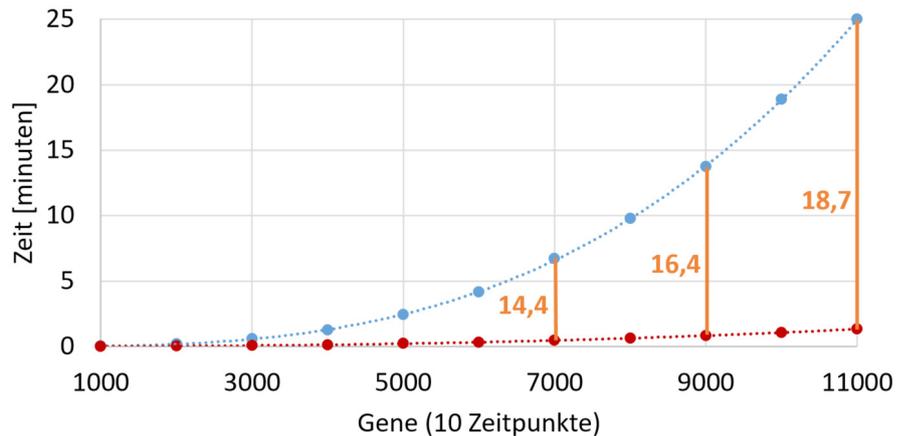


Abb. 1) Berechnungsdauer in Minuten gegen Zahl der Gene. In blau ist die Rechenzeit des ursprünglichen Matlab-Programms und in rot die des optimierten TSNI-Programms dargestellt. In orange sind die Vielfachen der Leistungszuwächse eingezeichnet. [Testsystem: CPU Xeon 1231 V3 (8x3.7 GHz); GPU GM204-GTX 970 (4 GB, 1664x1.2 GHz); RAM (16 GB, 1.6 GHz)].

3.2 Qualität der biologischen Vorhersage

Beim Vergleich der biologischen Korrektheit der gefundenen Beziehungen zwischen Genen lässt sich erkennen, dass es bei Datensätzen mit 800 oder weniger Genen kaum Unterschiede zwischen den Ergebnissen mit dem hier vorgestellten Ansatz und dem Referenztool TD ARACNE gibt (vgl. Abb. 2).

Enthält der Datensatz jedoch 1.600 Gene oder mehr, werden deutlich mehr korrekte Beziehungen mit Hilfe des auf Differenzialgleichungssystemen basierenden Ansatzes von TSNI gefunden. Dabei konnte eine bis zu 79-fach höhere Anzahl an korrekt vorhergesagten Beziehungen beobachtet werden.

4. Diskussion

Das Tool TSNI (*Time Series Network Identification*) konnte erfolgreich an die Bearbeitung von großen Datensätzen mit über 11.000 Genen angepasst werden. Gezeigt ist die Auswertung für 12.800 Gene, um einen Vergleich mit dem klassischen TSNI-Tool, welches in der Zahl der zu verarbeitenden Gene begrenzt ist, zu ermöglichen. Herkömmliche Tools, wie z.B. TD ARACNE und das ursprüngliche TSNI, sind jedoch nicht in der Lage, solche großen Datenmengen für höhere Organismen (Pflanzen, Tieren und Menschen) mit 20.000 bis 40.000 Genen zu verarbeiten. Um neue Erkenntnisse für die Medizin, Biotechnologie oder Systembiologie zu erlangen, ist es erforderlich, die genregulatorischen Netzwerke, die aus mehreren zehntausend Genen

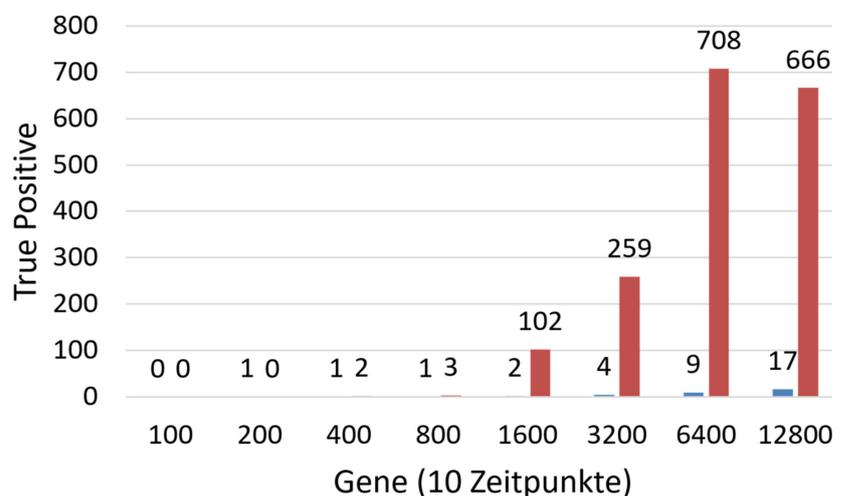


Abb. 2) Anzahl der biologisch tatsächlich korrekten (True Positive) Beziehungen zwischen Genen gegen die Anzahl der Gene, die für die Rekonstruktion genutzt wurden. Dabei ist in blau TD ARACNE und in rot TSNI dargestellt. [TSNI (PCA=2, tol=0.2, threshold=0.05); TD ARACNE (tol=0.2, threshold=0.05)].

bestehen, untersuchen zu können, was mit dem hier vorgestellten Ansatz nun möglich ist. Auch eine Analyse des kompletten Genoms von *Arabidopsis thaliana* (mit ca. 42.000 Genen) ist mit der neu entwickelten Software möglich. Weiterhin wurde die Intrapolation dahingehend verbessert, dass nun auch nicht äquidistante Zeitpunkte berücksichtigt werden können. Dies bedeutet, dass zwischen zwei Zeitpunkten mehr Zwischenpunkte intrapoliert werden, wenn der Abstand dieser zwei Zeitpunkte, im Vergleich zu den übrigen Zeitabständen eines Datensatzes größer ist.

Darüber hinaus ist die Qualität der biologischen Vorhersage der genregulatorischen Netzwerke bei TSNI erheblich besser. Jedoch waren mit dem hier vorgestellten Ansatz viele der Interaktionen der ATPIN-Datenbank nicht ermittelbar, da jeweils nur ein Ausschnitt des Gesamtnetzwerks betrachtet wurde. Desweiteren sind viele der beschriebenen Interaktionen nicht in jedem Zustand der Organismen vorhanden; es kommt beispielsweise nach Störungen oder in verschiedenen Zellzyklusstadien, unter verschiedenen klimatischen Bedingungen, bei Befall mit Krankheitserregern etc. zu speziellen funktionellen Wechselwirkungen, die nicht in einem einzigen Experiment beobachtet werden können. Die Verbesserung durch das beschriebene Software-Werkzeug wird anhand der erhöhten Zahl an Interaktionen im Vergleich zu denen, die das Tools ARACNE liefert, deutlich.

Die Verbesserungen des Algorithmus und die Parallelisierung haben erhebliche Leistungsverbesserungen ergeben, und die Benutzerfreundlichkeit wurde erhöht. Es bedarf allerdings noch einiger weiterführender Optimierungen, da die Anzahl der korrekten Netzwerkverbindungen noch zu gering ist, was jedoch an der Qualität der verwendeten Daten liegen kann. Wegen der beschriebenen Effizienzsteigerung kann nun aber die Berechnung mit weiteren Datensätzen ohne Einschränkungen realisiert werden, so dass eine weitere Verbesserung der Vorhersagequalität in den nächsten Schritten in Angriff genommen werden kann. Der hier vorgestellte Ansatz unter Nutzung von Hochdurchsatzdaten stellt einen

weiteren wichtigen Schritt zum ganzheitlichen Verständnis biologischer Systeme dar.

LITERATUR

- Bansal M, Della Gatta G, Di Bernardo D (2006) Inference of gene regulatory networks and compound mode of action from time course gene expression profiles. *Bioinformatics* 22(7):815–822. doi: 10.1093/bioinformatics/btl003
- Dagum L, Menon R (1998) OpenMP: an industry standard API for shared-memory programming. *Computational Science & Engineering, IEEE* 5(1):46–55
- Dongarra J, Gates M, Haidar A, Kurzak J, Luszczek P, Tomov S, Yamazaki I (2014) Accelerating Numerical Dense Linear Algebra Calculations with GPUs. *Numerical Computations with GPUs*:1–26
- Jia B, Xu S, Xiao G, Lamba V, Liang F (2017) Learning gene regulatory networks from next generation sequencing data. *Biometrics*. doi: 10.1111/biom.12682
- Karlebach G, Shamir R (2008) Modelling and analysis of gene regulatory networks. *Nature reviews. Molecular cell biology* 9(10):770–780. doi: 10.1038/nrm2503
- Karr JR, Sanghvi JC, Macklin DN, Gutschow MV, Jacobs JM, Bolival B, Assad-Garcia N, Glass JL, Covert MW (2012) A Whole-Cell Computational Model Predicts Phenotype from Genotype. *Cell* 150(2):389–401. doi: 10.1016/j.cell.2012.05.044
- Klepikova AV, Logacheva MD, Dmitriev SE, Penin AA (2015) RNA-seq analysis of an apical meristem time series reveals a critical point in *Arabidopsis thaliana* flower initiation. *BMC Genomics* 16:466. doi: 10.1186/s12864-015-1688-9
- Rauber T, Rüniger G (2012) *Parallele Programmierung*, 3. Aufl. 2013. eXamen.press. Springer, Berlin and Heidelberg. ISBN: 978-3-642-13603-0. doi: 10.1007/978-3-642-13604-7
- Reiß T (2002) *Systembiologie: Systeme des Lebens*. Bundesministerium für Bildung und Forschung
- Zoppoli P, Morganella S, Ceccarelli M (2010) TimeDelay-ARACNE: Reverse engineering of gene networks from time-course data by an information theoretic approach. *BMC Bioinformatics* 11:154. doi: 10.1186/1471-2105-11-154

AUTOREN

Marco Schäfer
Christian Jetschni
Dr. Chong Wang
Prof. Dr. Heike Pospisil
Professur für Life Science Informatics
Arbeitsgruppe "High Performance Computing
in Life Sciences"
Technische Hochschule Wildau

E-Mail für Korrespondenz:
heike.pospisil@th-wildau.de



Quantum Dot-modifizierte TiO_2 -Strukturen für die Licht-gesteuerte Bioelektrokatalyse

Marc Riedel, Daniel Schäfer, Wolfgang J. Parak, Adrian Ruff, Wolfgang Schuhmann und Fred Lisdat*

Zusammenfassung

Die funktionale Kopplung von photoaktiven Nanostrukturen mit Enzymen stellt eine neue Strategie zum Aufbau lichtgesteuerter biohybrider Systeme dar. Hier sind Untersuchungen zusammengefasst, welche die effiziente Kontaktierung der FAD-abhängigen Glukosedehydrogenase (FAD-GDH) mit Hilfe eines Osmium-Redoxpolymers (P_{Os}) an PbS-Quantum Dots (PbS QDs) zeigen, welche direkt auf dreidimensionalen TiO_2 -Elektrodenstrukturen synthetisiert wurden. Diese biohybriden Strukturen erlauben die Licht-induzierte Oxidation von Glukose. Dazu wird zunächst ein Verfahren vorgestellt, bei welchem durch den Aufbau invers-opaler TiO_2 (IO- TiO_2) Strukturen hohe Bindungskapazitäten für die Integration von QDs, Redoxpolymer und Enzym erreicht werden. In Folge wird gezeigt wie elektrochemische Signalketten durch Licht gesteuert werden können, indem Ladungsträger in den QDs unter Beleuchtung erzeugt werden. Diese Aktivierung ermöglicht dann die Ausbildung einer Elektronentransferkaskade vom Enzym über das Redoxpolymer zu den QDs und final zur IO- TiO_2 -Elektrode. Die resultierenden anodischen Photoströme können durch das Potential, die Lichtintensität und die Glukosekonzentration moduliert werden. So können in Anwesenheit von Glukose Photoströme von bis zu $207 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ und erste Oxidationssignale bereits bei einem Potential von $-540 \text{ mV vs Ag/AgCl}$, 1 M KCl erhalten werden. Dies entspricht einem Potentialgewinn von über 500 mV im Vergleich zu nicht lichtsensitiven Elektroden. Das vorgestellte biohybride System kombiniert Vorteile einer großen Oberfläche (durch IO- TiO_2 -Struktur), die effiziente Ladungsträgergenerierung und -trennung an der QD/ TiO_2 -Schnittstelle sowie die effiziente Kontaktierung von FAD-GDH mit den QDs mit Hilfe eines Redoxpolymers. Die Ergebnisse verdeutlichen das Potential dieser leistungsfähigen Photobioanode für die Sensorik und die Erzeugung von Energie aus Licht und Glukose.

Abstract

The combination of photoactive nanostructures with enzymes represents a new strategy for the construction of light-directed biohybrid systems. The study demonstrates the efficient linkage of FAD-dependent glucose dehydrogenase (FAD-GDH) to PbS quantum dot (QD)-sensitized inverse opal TiO_2 (IO- TiO_2) electrodes using an osmium redox polymer (P_{Os}). How these biohybrid structures can oxidize glucose in a light-directed fashion is highlighted in detail. For this purpose, firstly a method for the construction of IO- TiO_2 electrodes is presented, which gives rise to high binding capacities for the integration of QDs, redox polymer and enzyme. It can be shown how electrochemical signal chains can be controlled with light, resulting in a generation of charge carriers within the QDs. The activation of the electron transfer cascade then allows for an electron transfer from the enzyme via the redox polymer to the QDs and finally to the IO- TiO_2 electrode. The resulting anodic photocurrents can be modulated by potential, light intensity and glucose concentration. In the presence of glucose, photocurrents of up to $207 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ can be generated and first electron withdrawal from the biocatalytic sugar oxidation already proceeds at a potential of $-540 \text{ mV vs Ag/AgCl}$ (1 M KCl). This corresponds to a potential gain of over 500 mV compared to light-insensitive electrodes. The proposed biohybrid system combines the advantages of a large surface area (IO- TiO_2), efficient charge carrier generation (PbS QDs) and separation at the TiO_2 /QDs interface and the efficient linkage of FAD-GDH to the QDs using a redox polymer. This illustrates the potential of this powerful photobioanode for sensing and power supply.

1. Einführung

Photosynthetische Proteinkomplexe, die in der Lage sind katalytische Reaktionen unter Verwendung von Lichtenergie durchzuführen, gewinnen in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung in der interdisziplinären Forschung. Dabei stellt die Kopplung von nicht-Licht-sensitiven Enzymen mit künstlichen, Licht-sensitiven Materialien eine Strategie für den Aufbau funktioneller biohybrider Systeme dar, welche die biokatalytische Aktivität mit photophysikalischen Eigenschaften kombinieren (Efrati et al. 2016, Riedel et al. 2017b). Anwendungen solcher Systeme sind inzwischen für die Sensorik (Zhao et al. 2017), die Licht/Strom-Wandlung (Efrati et al. 2016, Sokol et al. 2016) oder für Licht-induzierte Transformationen chemischer Stoffe gezeigt worden (Mersch et al. 2015).

Die Einführung der Lichtempfindlichkeit bietet die Möglichkeit enzymatische Reaktionen Licht-gesteuert ein- und auszuschalten und somit Elektronentransferreaktionen an Elektroden-schnittstellen zu manipulieren. Dabei werden Elektronen-Loch-Paare in Licht-sensitiven Materialien durch die Beleuchtung mit geeigneter Energie erzeugt, wodurch Elektronentransferreaktionen vom Enzym über das Licht-sensitive Element zur Elektrode (anodische Richtung) oder umgekehrt in kathodischer Richtung induziert werden können. Ein interessanter Aspekt von Licht-induzierten Reaktionen stellt dabei die Möglichkeit dar, Reaktionen ortsaufgelöst zu kontrollieren und somit auch die Analyse mehrerer Analyte auf einer Elektrode zu ermöglichen (Lisdat et al. 2013).

Der Aufbau von photoaktiven biohybriden Strukturen erfordert zunächst die Kontaktierung eines Licht-sensitiven Materials mit der Elektrodenoberfläche. Hierfür sind verschiedene Methoden bekannt, welche auf elektrostatischen Wechselwirkungen, Chemisorption oder kovalenten Bindungen beruhen (Yue et al. 2013). Neben Farbstoffen (Tel-Vered et al. 2010), Goldnanopartikeln (Zhang et al. 2015), Polymeren (Riedel & Lisdat 2018) oder Biomolekülen wie Photosystem I (Efrati et al. 2016, Ciornii et al. 2017), wer-

den meist Halbleiternanostrukturen wie Quantum Dots (QDs) (Riedel et al. 2017b) als photoaktive Materialien verwendet. Für QD-basierte Ansätze ergeben sich jedoch teilweise Limitationen hinsichtlich der Anwendung, welche auf Partikelaggregation (Aldana et al. 2001) und die Interaktionen von Enzymen mit strukturstabilisierenden Liganden zurückzuführen sind (Khalid et al. 2011). Ein Ausweg kann in der direkten Synthese der QDs auf dem Elektrodenmaterial gesehen werden, wie z.B. durch das „successive ionic layer adsorption and reaction“ (SILAR)-Verfahren (Pathan & Lokhande 2004). Hierbei kann auf stabilisierende Oberflächenliganden verzichtet und das QD Wachstum durch die Anzahl der Synthesesyklen leicht kontrolliert werden.

Für die Kontaktierung des biokatalytischen Elements (Enzym) mit dem Licht-schaltbaren Material (bspw. QDs) nutzten erste Ansätze die intrinsische katalytische Aktivität des photoaktiven Elements gegenüber enzymatischen Co-Substraten oder Produkten für den Nachweis von Enzymen oder Enzymsubstraten aus (Pardo-Yissar et al. 2003, Riedel et al. 2017a). Hingegen sind bisher nur wenige Beispiele bekannt, bei denen ein direkter oder Mediator-vermittelter Elektronentransfer zwischen dem Enzym und dem Licht-schaltbaren Material gezeigt werden konnte (Efrati et al. 2016, Riedel et al. 2017b, Riedel & Lisdat 2018, Tel-Vered et al. 2010). Die meisten dieser Ansätze zeichnen sich durch Limitationen wie bspw. einen begrenzten Wellenlängenbereich für die Anregung, geringe Licht/Strom-Wandlungseffizienz oder durch die Notwendigkeit frei diffundierender Mediatoren, aus.

Die Effizienz ist häufig auch durch eine unzureichende Ladungsträgerseparierung limitiert. In natürlichen Prozessen ist die Elektron-Loch-Trennung durch eine Kaskade an Elektronentransferschritten optimiert. Solche Signalwege zu imitieren ist Gegenstand nicht zuletzt auch dieser Publikation. Eine Strategie liegt in der Kombination verschiedener Halbleitermaterialien. So konnte bereits gezeigt werden, dass das Leitungsband von TiO_2 (Halbleiter mit großer Bandlücke) als Elektronen Falle für angeregte Elektronen eines zweiten Halbleiterma-

terials (QDs, Farbstoffe oder Polymere) dienen kann und somit eine Anwendung in Solarzellen oder photokatalytischen Systemen ermöglicht (Grätzel 2001).

Weitere Ansatzpunkte für eine Optimierung der Effizienz sind die Überwindung einer oftmals beobachteten inhomogenen Enzymorientierung so-wie die Begrenzung der Enzymassemblierung auf eine Monoschicht. Verbesserungen können dabei durch die Einbettung des Enzyms in Redoxpolymere sowie im Weiteren durch deren Überführung in 3D-Elektrodenstrukturen erreicht werden (Sokol et al. 2016).

Die hier vorgestellte Arbeit zeigt eine neuartige, leistungsstarke Photobioanode für die Oxidation von Glukose, welche die Vorteile einer Multikomponenten-Halbleiterelektrode und die effiziente Kontaktierung der FAD-GDH mit QDs über ein Redoxpolymer (P_{Os}) in einer 3D Elektrode vereint. Es wird ein neues Verfahren zur Herstellung hierarchischer invers-opaler TiO_2 -Strukturen (IO-TiO_2) vorgestellt. Die Sensitivität für sichtbares Licht wird durch das Aufwachsen von PbS QDs auf der IO-TiO_2 Elektrode mit Hilfe eines SILAR Verfahrens sichergestellt. Abschließend wird FAD-GDH und das Redoxpolymer in die $\text{IO-TiO}_2|\text{PbS}$ Struktur integriert und das Potential der neuartigen Elektrodenarchitektur für den Licht-gesteuerten Elektronentransfer und die Oxidation von Glukose aufgezeigt.

2. Ergebnisse und Diskussion

Die artifizielle Signalkette besteht aus drei Hauptkomponenten: (1) Licht-aktive Komponente (TiO_2 Elektrode und PbS QDs), (2) elektronenleitende Komponente (Osmium-basiertes Redoxpolymer, P_{Os}) und (3) die biokatalytische Komponente (FAD-abhängige Glukosedehydrogenase, FAD-GDH). Unter Beleuchtung mit sichtbarem Licht wird die Signalkette aktiviert und Elektronen aus der enzymatischen Glukoseoxidation über P_{Os} auf die QDs und final zur TiO_2 -Elektrode transferiert, wodurch ein anodischer Photostrom erzeugt wird (siehe Abb. 1). Die TiO_2 /QD-Interaktion ist von entscheidender Bedeutung für die Funktionalität des gesamten Systems. In den QDs werden

zunächst Elektronen-Loch-Paare unter Beleuchtung generiert, woraufhin angeregte Elektronen der QDs in das Leitungsband der TiO_2 -Elektrode injiziert und damit effizient von den Löchern separiert werden. Die Löcher wiederum können durch das vom Enzym reduzierte Polymer aufgefüllt werden. Somit fließt ein Glukose-abhängiger Photostrom. Wird die Lichtquelle abgeschaltet, sind keine freien Ladungsträger im Halbleiter vorhanden und die Signalkette ist unterbrochen. Somit ist das gesamte System durch die Bestrahlung mit Licht schaltbar.

2.1 Synthese und Charakterisierung der Licht-sensitiven Einheit

Die Licht-sensitive Einheit besteht aus TiO_2 und PbS QDs, welche nacheinander auf transparenten FTO Elektroden synthetisiert wurden (FTO – Fluor-dotiertes Zinnoxid). Dazu ist eine neue Methode etabliert worden, TiO_2 in makroporöser, invers-opaler Form herzustellen. TiO_2 wurde aufgrund seiner vorteilhaften energetischen Eigenschaften ausgewählt (Kamat, 2008). Des Weiteren wird angenommen, dass die makroporöse Struktur vorteilhaft für die Integration von größeren Mengen an Polymer und Enzym ist.

Die IO- TiO_2 -Elektroden wurden mittels eines Templat-Verfahrens erzeugt, bei welchem durch ein „spin coating“-Prozess eine Mischung aus Latex beads und TTIP (Titaniumtetrakisopropoxide) auf planarem FTO schichtweise aufgetragen wird. In einem nachfolgenden Sinterschritt bei 450°C werden die Latex beads verbrannt, so dass ein invers-opales TiO_2 Netzwerk entsteht. Die Morphologie der Strukturen wurde mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskops untersucht (siehe Abb. 1). Die Kavitäten besitzen einen Durchmesser von $\sim 650\text{nm}$ und sind untereinander mit Kanälen unterschiedlicher Größe verbunden. Die etablierte Methode ermöglicht zudem die Einstellung der Strukturhöhe durch aufeinanderfolgende Abscheidungsschritte, gefolgt von einem abschließenden Sinterprozess. Bis zu 8 Schichten mit einer einheitlichen Morphologie und einer Höhe von maximal $9 \pm 0,7\ \mu\text{m}$ konnten auf diese Weise präpariert werden. Dabei erfolgt der Schichtzuwachs im Bereich

zwischen 2 und 8 Schichten nahezu linear ($1,2 \pm 0,1\ \mu\text{m}$ pro Schicht) ohne Anzeichen einer Limitierung. Untersuchungen der optischen Eigenschaften der Strukturen mittels UV/Vis Spektroskopie zeigen eine hohe Transparenz, welche ebenfalls linear mit der Anzahl der Schichten abnimmt.

(Jasieniak et al. 2011). Dem folgend ist der Energieeintrag durch Bestrahlung mit sichtbarem Licht groß genug um die Anregung von Elektronen ins Leitungsband des Halbleiters zu bewirken (Hyun et al. 2008). Chronoamperometrische Untersuchungen bestätigen den erfolgreichen Aufbau der IO- $\text{TiO}_2|\text{PbS}$

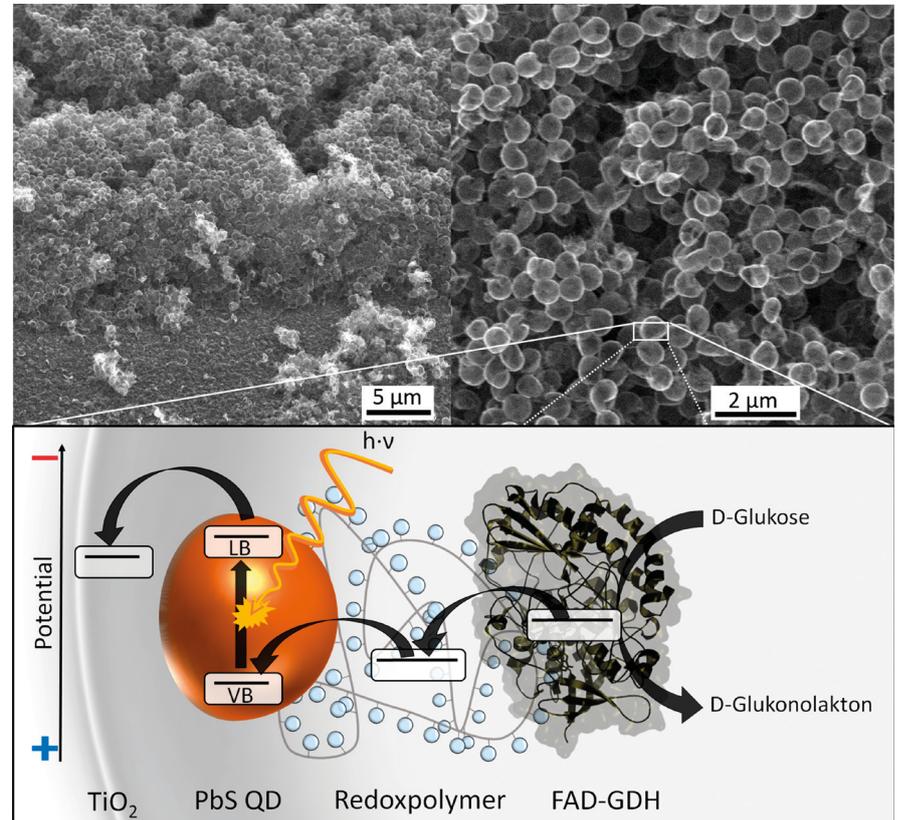


Abb. 1) REM-Aufnahme einer IO- TiO_2 -Elektrode Links: Winkel 45° , $2500\times$, 30 kV , rechts: Draufsicht, $8000\times$, 30 kV) sowie schematische Darstellung der Elektronentransferschritte in der Licht-gesteuerten Signalkaskade und der energetischen Niveaus von TiO_2 , PbS QDs, dem Redoxpolymer P_{ox} und FAD-GDH. (VB = Valenzband, LB = Leitungsband).

Die Abscheidung von PbS QDs mittels eines SILAR-Verfahrens wurde anschließend untersucht. Das Halbleitermaterial PbS wurde dabei aufgrund seiner Sensitivität für Licht sichtbarer Wellenlängen gewählt. Zur Abscheidung wird die Elektrode abwechselnd in Lösungen mit Pb^{2+} sowie S^{2-} Ionen getaucht. Dieser Zyklus wird 4-fach wiederholt, wobei die Anzahl der Zyklen das Wachstum der QDs bestimmt und damit die Größe der Partikel steuert. Eine erfolgreiche Synthese ist zunächst an der Kolorierung der Struktur von weiß zu braun zu erkennen. HR-TEM Messungen bestätigen das Wachstum von QDs mit einer Größe zwischen 3 und 4 nm. Gemäß Jasieniak et al. sind damit Bandlücken in der Größenordnung zwischen 1,92 bis 1,47 eV zu erwarten

Elektrode durch die Ausbildung eines anodischen Photostroms unter Bestrahlung mit sichtbarem Licht ($>400\text{ nm}$).

2.2 Integration der biokatalytischen Komponente

Als Enzym dient FAD-GDH von *Aspergillus sp.* welche die Oxidation von D-Glukose zu D-Glukonolaktone katalysiert. Die Kontaktierung des Enzyms erfolgt mit einem Poly(1-vinylimidazole-co-allylamine)-Os(bipy)₂Cl-Redoxpolymer (P_{ox}), welches bereits mehrfach eine gute Interaktion mit verschiedenen Biokatalysatoren gezeigt hat (Efrati et al. 2016, Sokol et al. 2016). Weitere vorteilhafte Eigenschaften von P_{ox} sind das für diese Anwendung günstige Redoxpotential und seine chemischen

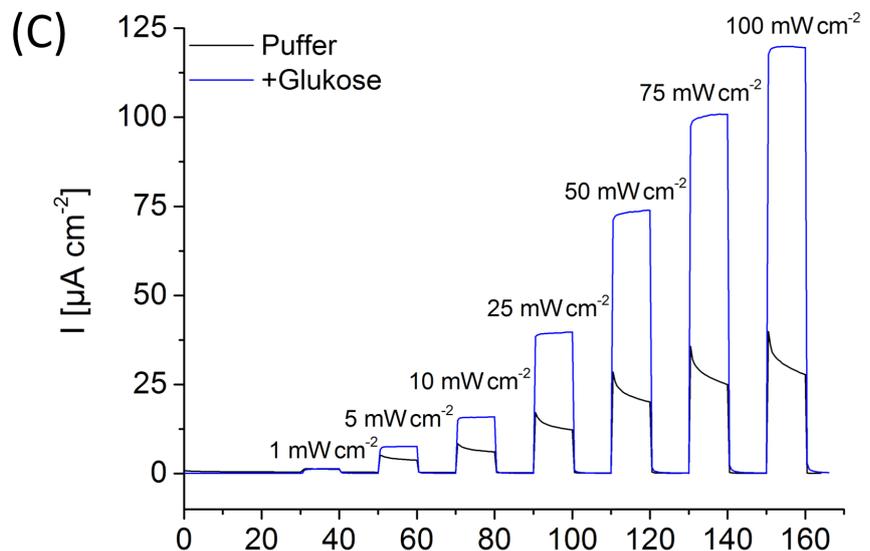
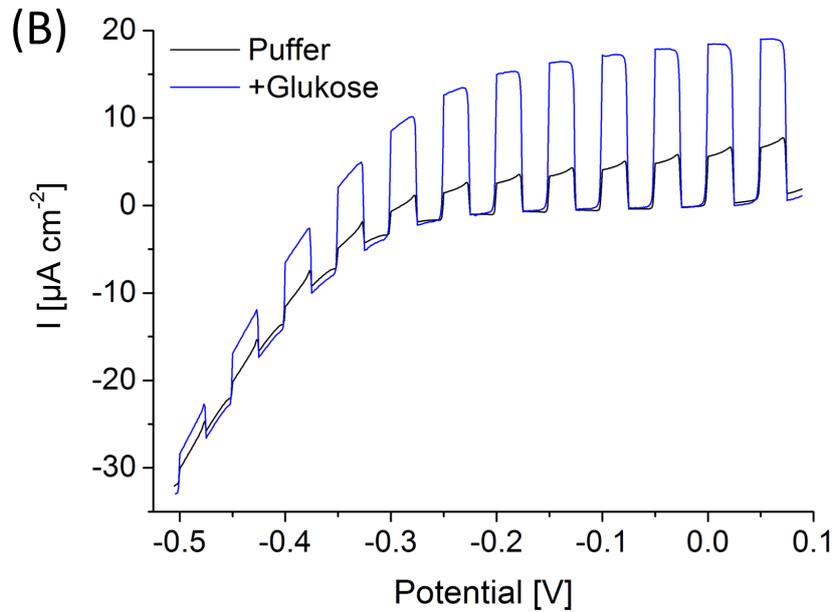
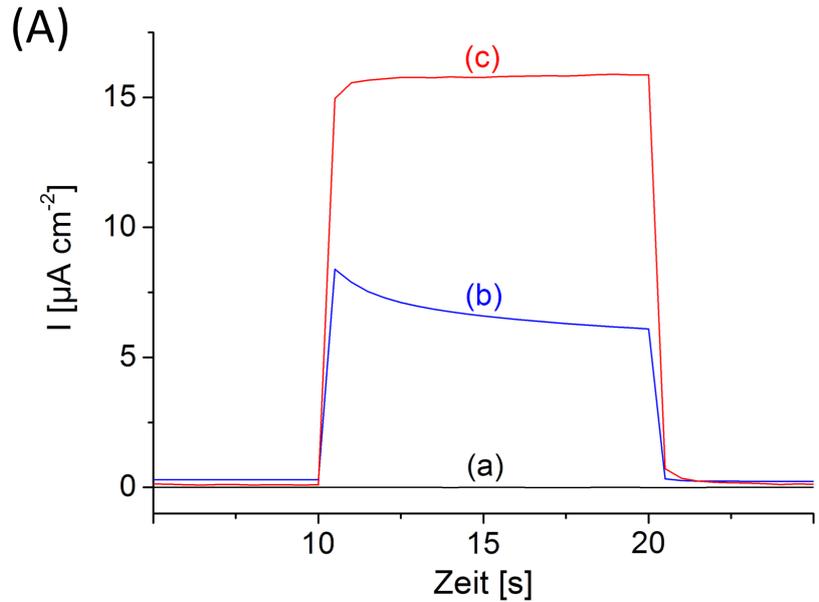
Eigenschaften. So ist P_{Os} bei neutralen pH positiv geladen (Amino- und Imidazolgruppen) und kann so gut mit dem negativ geladenen Enzym (pI 4.4) elektrostatisch wechselwirken. Der Elektronentransport innerhalb des Polymers funktioniert über einen *Hopping*-Mechanismus zwischen den Os-Redoxzentren.

Für die Integration des Polymers und Enzyms wird eine P_{Os} /FAD-GDH-Mischung auf IO-TiO₂|PbS Elektroden unter Lichtausschluss assembliert. In Abb. 2A sind die Photoströme einer solchen IO-TiO₂|PbS| P_{Os} |FAD-GDH Elektrode mit und ohne Glukose gezeigt. Während im Puffer anodische Ströme von $8,2 \pm 2 \mu A/cm^2$ gemessen werden, ist in Anwesenheit von 10 mM Glukose eine annähernde Verdopplung des Stroms auf $17 \pm 2,4 \mu A/cm^2$ zu beobachten. Es werden keine Dunkelströme festgestellt, was die blockierende Wirkung der TiO₂-Schicht unter Lichtausschluss zeigt. Alle Kontrollmessungen unterstützen die in Abb. 1 aufgezeigten Elektronentransferschritte. Die Analyse von IO-TiO₂ Elektroden ohne QDs, Polymer und Enzym zeigt, dass keine direkte Oxidation von Glukose an der Elektrode stattfindet. Des Weiteren geben weder IO-TiO₂|PbS| P_{Os} Elektroden ohne Enzym noch IO-TiO₂|PbS|FAD-GDH Elektroden ohne Polymer ein Signal nach Zugabe von Glukose. Dies bestätigt die Annahme, dass die QDs Glukose nicht direkt oxidieren können, sondern FAD-GDH und P_{Os} notwendig sind, um die katalytischen Aktivität bereitzustellen und die effiziente Kontaktierung mit der IO-TiO₂|PbS Elektrode zu garantieren.

Abb. 2) (A) Photochromoamperometrische Messung 4-schichtiger IO-TiO₂-Elektroden: (a) blanke IO-TiO₂-Elektrode; (b) IO-TiO₂|PbS| P_{Os} |FAD-GDH Elektrode in Puffer; (c) IO-TiO₂|PbS| P_{Os} |FAD-GDH Elektrode nach Zugabe von 10 mM Glukose (Beleuchtung/Weißlichtquelle: 10 s bis 20 s; 10 mW/cm²; 0 mV vs Ag/AgCl (1 M KCl); 5 mM HEPES pH 7).

(B) Chopped-Light-Voltammetrie einer 4-schichtigen IO-TiO₂|PbS| P_{Os} |FAD-GDH Elektrode mit und ohne 10 mM Glukose. (Weißlichtquelle; 10 mW/cm²; Potential vs Ag/AgCl (1 M KCl); 5 mV/s; 5 mM HEPES pH 7).

(C) Photochromoamperometrische Messung einer 4-schichtigen IO-TiO₂|PbS| P_{Os} |FAD-GDH Elektrode bei unterschiedlichen Lichtintensitäten mit und ohne 10 mM Glukose. (0 mV vs Ag/AgCl (1 M KCl); 5 mM HEPES pH 7).



Im Weiteren zeigen sogenannte *chopped-light* Messungen einen anodischen Photostrom im gesamten untersuchten Potentialbereich zwischen -500 mV bis 0 mV (vs Ag/AgCl, 1 M KCl). Unter allen Potentialbedingungen ist eine signifikante Zunahme des Photostroms bei Zugabe von 10 mM Glukose zu beobachten (Abb. 2B). Eine deutliche Abhängigkeit des Photostroms von der Lichtintensität ist gleichfalls zu beobachten. Im Bereich zwischen 1 auf 100 mW/cm² nimmt der Photostrom mit steigender Lichtintensität zu und erreicht maximale Signale von 40,1 ± 6,4 μA/cm² in Puffer und 114,5 ± 3,7 μA/cm² in Anwesenheit von Glukose (Abb. 2C). Wellenlängenabhängige Untersuchungen zeigen im gesamten sichtbaren Wellenlängenbereich zwischen 400 und 700 nm signifikante Glukose-abhängige Photoströme.

Bei Langzeitmessungen unter Substratzusatz zeigt sich die exzellente Stabilität der biohybriden Strukturen, welche innerhalb von 30 min keinen signifikanten Signalabfall verzeichnen. Wie angestrebt, ist durch das Einbetten des Enzyms im Redoxpolymer ein stabilisierender Zustand eingetreten, der das Ablösen des Enzyms während der Messung verhindert.

2.3 Leistungscharakterisierung der IO-TiO₂|PbS|P_{Os}|FAD-GDH Elektroden

Um die Leistungsfähigkeit der biohybriden Strukturen eingehender zu untersuchen, sind zunächst konzentrationsabhängige Messungen durchgeführt worden. In Abb. 3 ist der Verlauf des Photostroms in Abhängigkeit von der Glukosekonzentration dargestellt. Die IO-TiO₂|PbS|P_{Os}|FAD-GDH Elektroden weisen ein erstes sichtbares Signal von 0,61 ± 0,19 μA/cm² bei einer Konzentration von 10 μM Glukose auf, welches bis auf 29,2 ± 2,8 μA/cm² bei einer Konzentration von 100 mM Glukose ansteigt. Der Photostrom erhöht sich linear im Bereich zwischen 10 und 200 μM Glukose und erreicht dabei eine Sensitivität von 31 μA/mM·cm². Die Konzentrationsabhängigkeit folgt der Michaelis-Menten-Kinetik und es kann ein apparenter K_m-Wert von 2,9 ± 0,5 mM bestimmt werden. Dieser ist kleiner als der vom Enzym in Lösung, jedoch vergleichbar

zu früheren elektrochemischen Untersuchungen mit immobilisiertem Enzym (Zafar et al. 2012, Milton et al. 2015). Verglichen mit anderen photoelektrochemischen Sensoren für Glukose ist die hier vorgestellte IO-TiO₂|PbS|P_{Os}|FAD-GDH Elektrode sensitiver, hat einen größeren dynamischen Messbereich und verzichtet auf frei diffundierende Co-Substrate oder Redoxmediatoren (Metzger et al. 2016, Riedel et al. 2017b, Tel-Vered et al. 2010).

Um die Anwendbarkeit der hier entwickelten biohybriden Struktur in Photobiobrennstoffzellen zu untersuchen, wurde die maximale Leistung in Anwesenheit von 100 mM Glukose bestimmt. Die Aufzeichnung der Strom-Spannungskurve unter kontinuierlicher Beleuchtung führt zu einer maximalen Stromdichte von 207 ± 17 μA/cm² und einem Open-Circuit-Potential (OCP) von -540 ± 14 mV vs Ag/AgCl (1 M KCl). Die maximale Leistungsdichte

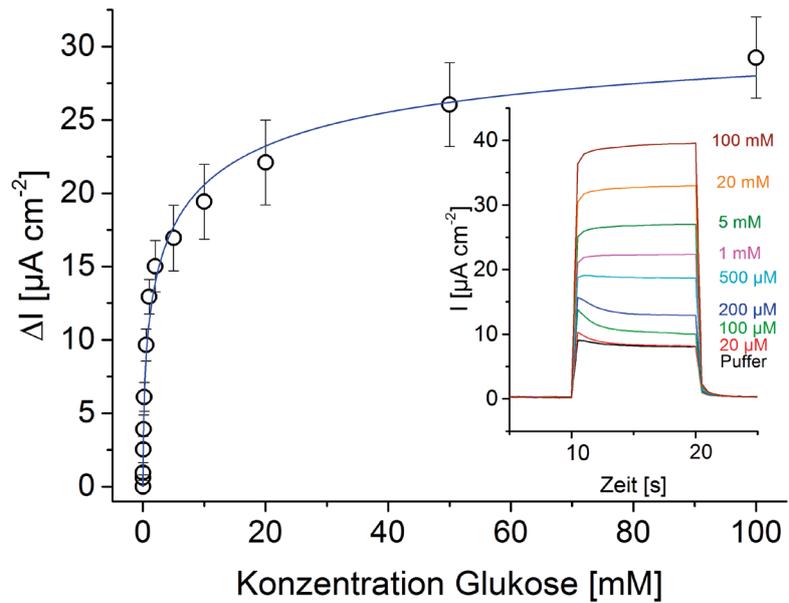


Abb. 3) Änderung der Photostromdichte ΔI bzw. photochronoamperometrische Messung (Einschub) von 8-schichtigen IO-TiO₂|PbS|P_{Os}|FAD-GDH Elektroden bei Zugabe verschiedener Glukosekonzentrationen. (Weißlichtquelle 10 s Intervall; 10 mW/cm²; 0 mV vs Ag/AgCl (1 M KCl); 5 mM HEPES pH 7).

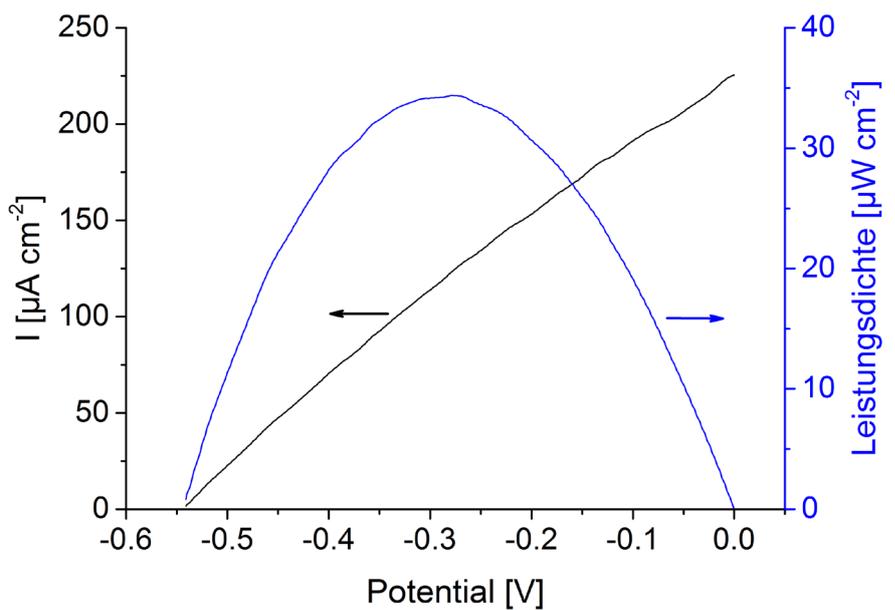


Abb. 4) Strom- und Leistungsdichte einer 8-schichtigen IO-TiO₂|PbS|P_{Os}|FAD-GDH Elektrode in Abhängigkeit vom Potential und unter kontinuierlicher Beleuchtung mit 100 mW/cm² in Gegenwart von 100 mM Glukose. (Arbeits Elektrode: biohybride Elektrode, Gegenelektrode: Platindraht, Referenzelektrode: Ag/AgCl (1 M KCl); Weißlichtquelle; 100 mW/cm²; Potential vs Ag/AgCl (1 M KCl); 5 mV/s; 5 mM HEPES pH 7).

von $31,3 \pm 2,7 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ist bei $-287 \pm 80 \text{ mV vs Ag/AgCl (1 M KCl)}$ zu verzeichnen (Abb. 4). Diese Ergebnisse zeigen die hohe Leistungsfähigkeit der Photobioanode für die Oxidation von Glukose, was der vorteilhaften Kombination der Licht-sensitiven Entität mit der hohen biokatalytischen Aktivität des Enzyms zuzuschreiben ist. Es ist als außerordentlicher Erfolg zu bewerten, dass es erstmalig gelungen ist, bei einem so niedrigen Potential Elektronen von der biokatalytischen Reaktion zu gewinnen. Im Gegensatz dazu zeigen planare $\text{FTO}|\text{P}_{\text{O}_2}|\text{FAD-GDH}$ Elektroden (ohne TiO_2 und PbS QDs, d.h. ohne Lichtsensitivität) erst ab einem Potential von $+50 \text{ mV vs Ag/AgCl (1 M KCl)}$ einen biokatalytischen Stromfluss. Es ist also eine gravierende Verbesserung der Potentialbedingungen durch die $\text{IO-TiO}_2|\text{PbS}|\text{P}_{\text{O}_2}|\text{FAD-GDH}$ Elektrodenarchitektur und die Licht-gesteuerte Arbeitsweise der Elektrode erreicht worden. Langzeitexperimente mit Glukose in Lösung und unter Beleuchtung mit $100 \text{ mW}/\text{cm}^2$ zeigen, dass eine Ladung von $220 \text{ mC}/\text{cm}^2$ innerhalb von 30 min übertragen wird. Der kumulative Photostrom ist unter diesen Bedingungen in Anwesenheit von Glukose um mehr als das 70-fache größer als in früheren Studien mit Licht-sensitiven Komponenten und Enzymen auf planaren Elektroden (Efrati et al. 2016, Riedel et al. 2017b, Tel-Vered et al. 2010), und 5-fach größer als im Fall von 3D-Elektroden (Riedel & Lisdat 2018). Dies kann der gesteigerten Oberfläche der IO-TiO_2 Strukturen, der effizienten Ladungsträgergenerierung und -trennung an der $\text{IO-TiO}_2|\text{PbS}$ Grenzfläche sowie der effektiven Kontaktierung des Enzyms mit den QDs über das Redoxpolymer zugeschrieben werden. Somit ermöglicht die in dieser Arbeit entwickelte Architektur den Zugang zu einer insgesamt verbesserten Photobioanode und stellt einen Fortschritt hinsichtlich der Entwicklung Licht-gesteuerter Biosensoren sowie von Licht/Strom- und Licht/Chemikalien-wandelnder biohybrider Systeme dar.

3. Fazit

Zusammenfassend konnte hier ein neues Konzept für die Kontaktierung biokatalytischer Reaktionen mit einer Licht-gesteuerten QD-Elektroden-Struktur

vorgestellt werden. Dabei wurde zunächst eine Methode zum Aufbau von invers-opalen TiO_2 Strukturen etabliert, welche die Steuerung der Schichtdicke ermöglicht und im Weiteren die Integration von PbS QDs, eines Redoxpolymers sowie FAD-GDH erlaubt. Unter Beleuchtung werden Elektronen-Loch-Paare innerhalb der PbS QDs erzeugt und die Elektronen am TiO_2 -Interface separiert. Die zurückgelassenen Löcher werden durch die Oxidation des Redoxpolymers aufgefüllt. Durch den biokatalytischen Umsatz von Glukose wird P_{O_2} regeneriert, so dass die photoelektrochemische Reaktion mit Ladungsträgern versorgt wird und es zur Ausbildung eines erhöhten Photostroms kommt. Das biohybride System kann dabei durch die Modulation des Potentials, der Lichtintensität und der Glukosekonzentration kontrolliert werden. Ein Glukose-abhängiger Photostrom ist im Bereich zwischen $10 \mu\text{M}$ und 100 mM Glukose zu beobachten. Bereits bei einem negativen Potential von $-540 \text{ mV vs Ag/AgCl, 1 M KCl}$ konnten Elektronen aus der biokatalytischen Reaktion gewonnen werden, was den Weg für den Aufbau einer hochleistungsfähigen photobioelektrochemischen Zelle mit Glukose als Brennstoff ebnet. Da hier die photophysikalischen Eigenschaften der $\text{IO-TiO}_2|\text{PbS}$ Elektrode zur Ladungsträgerzeugung und -trennung mit der effizienten Kontaktierung einer spezifischen enzymatischen Reaktion über ein Redoxpolymer so gewinnbringend kombiniert werden können, liefert dieser Ansatz die Grundlage für die effiziente Kontaktierung anderer Biokatalysatoren für die Licht-gesteuerte Detektion bzw. die Energiegewinnung aus Licht und enzymatischen Substraten.

4. Methoden

4.1 Materialien

[N-(2-hydroxyethyl)piperazine-N-(2-ethansulfonic acid)] (99.5%; HEPES), D-Glukose, Fluor-dotiertes Zinnoxid-beschichtete Glassträger ($7 \Omega \text{ cm}^{-1}$; FTO), Blei(II)nitrat (99.999%; $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$), Ammoniumsulfidlösung (20% in H_2O ; $(\text{NH}_4)_2\text{S}$), Polystyrenlatexpartikel (LBs, Durchmesser $0,8 \mu\text{m}$) and Titanium-tetraisopropoxid (97%; TTIP) wurden von Sigma Aldrich (Steinheim,

Germany) bezogen. Poly(1-vinylimidazole-co-allylamine)-Os(bipy)₂Cl-Redoxpolymer wurde wie zuvor publiziert selbst synthetisiert (Badura et al. 2008). Die FAD-abhängige Glukosedehydrogenase (*Aspergillus sp.*) wurde bei SEKISUI CHEMICAL erworben.

4.2 Aufbau von IO-TiO_2 -Elektroden

Zuerst wurden FTO-beschichtete Glasobjektträger nacheinander in entionisiertem Wasser, Isopropanol und Aceton für jeweils 15 Minuten unter Ultraschallbehandlung gereinigt und vor der weiteren Verwendung getrocknet. Eine Mischung aus $100 \text{ mg}/\text{ml}$ Latex Beads (LB; $0,8 \mu\text{m}$ Durchmesser) und $100 \text{ mg}/\text{ml}$ Titan-tetraisopropoxid (TTIP) wurde in Isopropanol hergestellt. Dafür wurden $200 \mu\text{L}$ wässrige $100 \text{ mg}/\text{ml}$ LB Dispersion mit $800 \mu\text{L}$ Ethanol gemischt und bei 25.000 g für 8 min zentrifugiert (um das Wasser zu entfernen). Der Überstand wurde verworfen und das LB-Pellet wurde in 1 ml Ethanol resuspendiert, gefolgt von einem zweiten Zentrifugationsschritt bei 25.000 g für 8 min. Nach Entfernen des Überstandes wurde das Pellet in einem Ultraschallbad für 5 min in $180 \mu\text{L}$ Isopropanol suspendiert. Anschließend wurden $20 \mu\text{L}$ TTIP schnell zu der LB-Suspension gegeben und erneut für 5 min mit Ultraschall behandelt. $6 \mu\text{L}$ der LB/TTIP-Mischung (pro Schicht) wurden auf den gereinigten FTO-Objektträger über ein „spin coating“-Verfahren mit einer Rotationsgeschwindigkeit von 80 rps aufgebracht. Die Elektrodenfläche wurde dann auf $0,071 \text{ cm}^2$ begrenzt, indem das überflüssige Material weggewischt wurde. Die vorbereiteten Elektroden wurden bei 450°C unter Raumluft für 2h gesintert, was zu den finalen IO-TiO_2 -Elektroden führte.

4.3 Synthese von PbS Quantum Dots

Die PbS-QDs wurden direkt auf den IO-TiO_2 -Elektroden mit einem SILAR-Ansatz synthetisiert (Pathan & Lokhande 2004). Dazu wurden die Elektroden abwechselnd für jeweils 1 min in wässrigem $0,02 \text{ M}$ Bleinitrat bzw. wässrigem $0,02 \text{ M}$ Ammoniumsulfid getaucht. Um ungebundene Ionen zu entfernen, wurden die Elektroden zwischen den Abscheidungsschritten sorgfältig mit entionisiertem Wasser und Ethanol

gespült. Es wurden IO-TiO₂|PbS Elektroden mit 4 Zyklen (4x Pb²⁺ und 4x S²⁻) nach diesem Verfahren hergestellt.

4.4 Assemblierung von Redoxpolymer und Enzym

Es wurden 4 µl einer Mischung aus 5 mg/ml Poly(1-vinylimidazol-co-allylamin)-Os-(bipy)₂Cl-Redoxpolymer und 5 mg/ml FAD-GDH in 5 mM HEPES Puffer (pH 7) auf eine IO-TiO₂|PbS-Elektrode gegeben und für 15 min bei RT im Dunkeln inkubiert. Anschließend wurde die modifizierte Elektrode intensiv mit Puffer gespült, um ungebundenes Material zu entfernen.

4.5 REM und HR-TEM Experimente

Rasterelektronenmikroskopische (REM) Messungen wurden mit einem JSM-6510 von JEOL bei einer Beschleunigungsspannung von 30 kV mit einer 2.500-fachen und 8.000-fachen Vergrößerung durchgeführt. Die Schichthöhe der IO-TiO₂-Elektrode wurde durch Abkratzen eines Teils der Struktur und Aufzeichnen des IO-Films unter einem Winkel von 45° mit einer 2.500-fachen Vergrößerung bestimmt. HR-TEM-Messungen wurden mit einem FEI TITAN 80-300 Transmissionselektronenmikroskop (TEM) durchgeführt.

4.6 Photoelektrochemische Experimente

Photoelektrochemische Messungen wurden mit einer integrierten photoelektrochemischen Arbeitsstation von Zahner (Deutschland) durchgeführt, welche sich aus einem Potentiostaten für die Lichtsteuerung und einem zweiten Potentiostaten (Zennium) für die elektrochemische Kontrolle zusammensetzt. Für die Beleuchtung wurde, sofern nicht anders angegeben, eine Weißlichtquelle (410-800 nm) verwendet. Alle elektrochemischen Experimente wurden in einer selbstgebauten elektrochemischen Zelle in einer Drei-Elektroden-Anordnung durchgeführt (IO-TiO₂-Arbeitselektrode, Platindraht als Gegenelektrode und Ag/AgCl, (1 M KCl) Referenzelektrode).

5. Danksagung

Wir bedanken uns für die Unterstützung dieser Forschung durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG Li 706/8-1 und Pa 794/15-1).

LITERATUR

Aldana J, Wang YA, Peng X (2001) Photochemical Instability of CdSe Nanocrystals Coated by Hydrophilic Thiols. *J. Am. Chem. Soc.* 123: 8844–8850. doi:10.1021/ja016424q

Badura A, Guschin D, Esper B, Kothe T, Neugebauer S, Schuhmann W, Rögner M (2008) Photo-Induced Electron Transfer Between Photosystem 2 via Cross-linked Redox Hydrogels. *Electroanalysis* 20: 1043–1047. doi:10.1002/elan.200804191

Ciornii D, Riedel M, Stieger KR, Feifel SC, Hejazi M, Lokstein H, Zouni A, Lisdat F (2017) Bioelectronic Circuit on a 3D Electrode Architecture: Enzymatic Catalysis Interconnected with Photosystem I. *J. Am. Chem. Soc.* 139: 16478–16481. doi:10.1021/jacs.7b10161

Efrati A, Lu CH, Michaeli D, Nechushtai R, Alsaoub S, Schuhmann W, Willner I (2016) Assembly of photo-bioelectrochemical cells using photosystem I-functionalized electrodes. *Nat. Energy* 1: 15021. doi:10.1038/nenergy.2015.21

Grätzel M (2001) Photoelectrochemical cells. *Nature* 414: 338–344. doi:10.1038/35104607

Hyun BR, Zhong YW, Bartnik AC, Sun L, Abruña HD, Wise FW, Goodreau JD, Matthews JR, Leslie TM, Borrelli NF (2008) Electron Injection from Colloidal PbS Quantum Dots into Titanium Dioxide Nanoparticles. *ACS Nano* 2: 2206–2212. doi:10.1021/nn800336b

Jasieniak J, Califano M, Watkins SE (2011) Size-Dependent Valence and Conduction Band-Edge Energies of Semiconductor Nanocrystals. *ACS Nano* 5: 5888–5902. doi:10.1021/nn201681s

Kamat PV (2008) Quantum Dot Solar Cells. Semiconductor Nanocrystals as Light Harvesters. *J. Phys. Chem. C* 112: 18737–18753. doi:10.1021/jp806791s

Khalid W, El Helou M, Murböck T, Yue Z, Montenegro JM, Schubert K, Göbel G, Lisdat F, Witte G, Parak WJ (2011) Immobilization of Quantum Dots via Conjugated Self-Assembled Monolayers and Their Application as a Light-Controlled Sensor for the Detection of Hydrogen Peroxide. *ACS Nano* 5: 9870–9876. doi:10.1021/nn2035582

Lisdat F, Schäfer D, Kapp A (2013) Quantum dots on electrodes – new tools for bioelectroanalysis. *Anal. Bioanal. Chem.* 405: 3739–3752. doi:10.1007/s00216-013-6789-1

Mersch D, Lee C-Y, Zhang J-Z, Brinkert K, Fontecilla-Camps J-C, Rutherford A-W, Reisman E, 2015. Wiring of Photosystem II to Hydrogenase for Photoelectrochemical Water Splitting. *J. Am. Chem. Soc.* 137: 8541–8549. <https://doi.org/10.1021/jacs.5b03737>

Metzger TS, Chandaluri CG, Tel-Vered R, Shenhar R, Willner I (2016) Donor/Acceptor-Modified Electrodes for Photoelectrochemical and Photobioelectrochemical Applications. *Adv. Funct. Mater.* 26: 7148–7155. doi:10.1002/adfm.201602790

Milton RD, Hickey DP, Abdellaoui S, Lim K, Wu F, Tan B, Minter SD (2015) Rational design of quinones for high power density biofuel cells. *Chem. Sci.* 6: 4867–4875. doi:10.1039/C5SC01538C

Pardo-Yissar V, Katz E, Wasserman J, Willner I (2003) Acetylcholine Esterase-Labeled CdS Nanoparticles on Electrodes: Photoelectrochemical Sensing of the Enzyme Inhibitors. *J. Am. Chem. Soc.* 125: 622–623. doi:10.1021/ja028922k

Pathan HM, Lokhande CD (2004) Deposition of metal chalcogenide thin films by successive ionic layer adsorption and reaction (SILAR) method. *Bull. Mater. Sci.* 27: 85–111. doi:10.1007/BF02708491

Sokol KP, Mersch D, Hartmann V, Zhang JZ, Nowaczyk M, Rögner M, Ruff A, Schuhmann W, Plumeré N, Reisman E (2016) Rational wiring of photosystem II to hierarchical indium tin oxide electrodes using redox polymers. *Energy Environ. Sci.* 9: 3698–3709. doi:10.1039/C6EE01363E

Riedel M, Hölzel S, Hille P, Schörmann J, Eickhoff M, Lisdat F, 2017a. InGaN/GaN nanowires as a new platform for photoelectrochemical sensors – detection of NADH. *Biosens. Bioelectron.* 94: 298–304. doi:10.1016/j.bios.2017.03.022

Riedel M, Sabir N, Scheller FW, Parak WJ, Lisdat F (2017b) Connecting quantum dots with enzymes: mediator-based approaches for the light-directed read-out of glucose and fructose oxidation. *Nanoscale* 9: 2814–2823. doi:10.1039/C7NR00091J

Riedel M, Lisdat F (2018) Integration of Enzymes in Poly-aniline-Sensitized 3D Inverse Opal TiO₂ Architectures for Light-Driven Biocatalysis and Light-to-Current Conversion. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 10: 267–277. doi:10.1021/acsami.7b15966

Tel-Vered R, Yildiz HB, Yan YM, Willner I (2010) Plugging into Enzymes with Light: Photonic “Wiring” of Enzymes with Electrodes for Photobiofuel Cells. *Small* 6: 1593–1597. doi:10.1002/smll.201000296

Yue Z, Lisdat F, Parak WJ, Hickey SG, Tu L, Sabir N, Dorfs D, Bigall NC (2013) Quantum-Dot-Based Photoelectrochemical Sensors for Chemical and Biological Detection. *ACS Appl. Mater. Interfaces* 5: 2800–2814. doi:10.1021/am3028662

Zafar MN, Beden N, Leech D, Sygmund C, Ludwig R, Gorton L (2012) Characterization of different FAD-dependent glucose dehydrogenases for possible use in glucose-based biosensors and biofuel cells. *Anal. Bioanal. Chem.* 402: 2069–2077. doi:10.1007/s00216-011-5650-7

Zhang J, Tu L, Zhao S, Liu G, Wang Y, Wang Y, Yue Z (2015) Fluorescent gold nanoclusters based photoelectrochemical sensors for detection of H₂O₂ and glucose. *Biosens. Bioelectron. Special Issue: BIOSENSORS 2014* (67): 296–302. doi:10.1016/j.bios.2014.08.037

Zhao WW, Xu JJ, Chen HY (2017) Photoelectrochemical enzymatic biosensors. *Biosens. Bioelectron.* 92: 294–304. doi:10.1016/j.bios.2016.11.009

AUTOREN

Dr. Marc Riedel
Dipl. Ing. (FH) Daniel Schäfer
Prof. Dr. Fred Lisdat
Biosystemtechnik
Technische Hochschule Wildau

Prof. Dr. Wolfgang J. Parak
Universität Hamburg

Dr. Adrian Ruff
Prof. Dr. Wolfgang Schuhmann
Ruhr-Universität Bochum

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



Sensitizing students to information security and privacy awareness with analogue gamification

Margit Scholl*

Zusammenfassung

Viele Studien und Untersuchungen im Bereich der Informationssicherheit zeigen einen nachlässigen Umgang mit sensiblen Daten und ein unzureichendes Bewusstsein der Menschen für die Informationssicherheit. Trotz der zunehmenden Digitalisierung, die die Gesellschaft insgesamt stark beeinflusst, neigen wir dazu, den damit verbundenen Risiken nicht genügend Aufmerksamkeit zu schenken. Sensibilisierung der Menschen ist nötig und soll zu ihren Verhaltensänderungen in der IT-Sicherheit führen. Untersuchungen zeigen jedoch, dass der bloße Wissenstransfer nicht ausreicht, um Verhaltensänderungen zu bewirken. Vielmehr ist ein systemischer Ansatz hilfreich, der durch analoges, spielbasiertes Lernen die notwendige Emotionalisierung für Austausch von Erfahrung und eine Reflexion der Menschen herbeiführen kann. Digitales, spielbasiertes Lernen in der IT-Sicherheit sollte ebenfalls die Emotionalisierung der Menschen adressieren.

Schlüsselwörter: Digitalisierung, digitale Transformation, IT-Sicherheit, Datenschutz, Sensibilisierung für Informationssicherheit, spielbasiertes Lernen und Simulation

Abstract

Many studies and investigations in the area of information security reveal a careless handling of sensitive data and insufficient information security awareness. Despite increasing digitization, which has a huge impact on society as a whole, we tend not to pay enough attention to the risks associated with it. But research shows that the mere transfer of knowledge is not enough to cause behavioural changes. Rather, a systemic approach that can bring about the necessary emotionalization and reflection through analogue game-based learning is helpful.

Keywords: Digitization, digital transformation, information security, privacy, information security awareness, information security awareness trainings, game-based learning, simulation games, security sensitization

1. Introduction

Digitalization aims to modernize our society and keep the world of work competitive in the future. The associated use of cutting-edge digital information and communication technology (ICT) has changed institutional work structures, rationalizing old jobs and creating new ones, not only changing communications and social behaviour, creating virtual communities, and so on but also creating a digital divide (Gesellschaft für Informatik 2018: 8). As a technical university, we are faced with the question of how students can be prepared for non-technical study programmes for the new age and sensitized to information security.

Moreover, as the German Informatics Society (GI) points out in article 7 of its Ethical Guidelines, the design and implementation of ICT systems, including any control and monitoring techniques, should be combined with user involvement (Gesellschaft für Informatik 2018: 6). More specifically, the personal data that is constantly being collected is “a gold donkey for cyber criminals” (Kaspersky Lab 2018).

The use of new media and social networks has become a matter of course for many people and it is impossible to forget these in our everyday lives. Against this background, the General Data Protection Regulation (GDPR) of the European Union (EU) and the work

of data protection officers is becoming increasingly important (Bundesakademie für öffentliche Verwaltung im Bundesministerium des Innern 2018). Privacy covers the protection of personality rights and consumer protection. However, according to a recent survey published by Thales, around one-third of the consumers surveyed in Germany (35 per cent) said they do not trust anyone when it comes to personal data protection, and in terms of digital privacy, 45 per cent of respondents believe that businesses are largely indifferent to digital privacy (Thales 2018).

Digitization requires us to live with digital threats that can damage key assets such as our wealth, knowledge,

* corresponding author

or health (Bundesakademie für öffentliche Verwaltung im Bundesministerium des Innern 2016). Vulnerabilities are everywhere: the gaps in the security of a system or software or of an organization that can be exploited by specific and real attacks. In many cases attempts have been made to use technology to close these security loopholes. But the well-informed and sensitized individual remains an important element in defending against attacks (Dark 2006). In addition, there are forms of attack such as social engineering (SE) that are aimed directly at people, using false pretences to obtain important information: such targets are increasingly focused on in the run-up to technical cyberattacks. In SE attacks, the individual is, depending on the perspective you take, both perpetrator and victim (Haucke & Pokoyski 2018: 4): perpetrator, in that they have committed a mistake that violated the security policy of their own organization, and victim, in that they have disclosed such information as a result of deception and manipulation.

New safeguards must be implemented in the form of continuous information security (IS) and legally compliant data protection. IS and IT security incidents can have far-reaching, cost-intensive repercussions that harm business or interfere with the performance of tasks (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnologie 2008). The digital transformation (DT) is not only changing all the business processes in the individual institutions but is also having an increasing impact on our entire (knowledge) society. DT is an ongoing process of modifying people's communication and their behaviour when dealing with modern technology. According to the Federal Office for Information Security in Germany (BSI), all employees need to know the security objectives of the institution, understand the security measures, and be willing to support them effectively. For this they must be trained. In particular, they must know what is expected of them in terms of IS and how they should respond in security-critical situations (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnologie 2018).

Section 2 summarizes the main scientific knowledge relating to the human

side of IS and information security awareness trainings (ISAT) as well as some of the ethical responsibilities of informatics. Section 3 discusses several examples of analogue game-based learning scenarios for practice, because Serious Games have great potential in the field of ISAT. Section 4 outlines the conclusions of our experience with students and looks at the prospects for further projects.

2. The Human Side of Information Security and Ethics

Information security (IS) and information technology (IT) are about more than technology (Kruger et al. 2007). ICT systems involve human actors, yet users do not always behave as they should (Aytes & Connolly 2004). Nevertheless, people should not necessarily be labelled the weakest link in the chain of vulnerability when many studies show that there are often basic IS deficiencies in the institutions themselves. The negative characterization of people in the area of IS should now be reconsidered (Scholl et al. 2018).

Threats and vulnerabilities need to be understood (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnologie 2018). Well-informed and sensitized people have developed an awareness of information security (ISA), know appropriate rules for dealing with (sensitive) information, and accept the organizational regulations. Information Security Awareness Trainings (ISAT) are necessary. However, Tsohou et al. (2012) conclude from current global security surveys that ISAT is currently not working. The reasons for this are described in the scientific literature—in terms, for example, of a more “technocratic” view of risk communication (Stewart & Lacey 2012) and/or as long lists of commandments and prohibitions (Kirlappos et al. 2013). In addition, adhering to a safety culture cannot be achieved through training that merely aims to eliminate security vulnerabilities (Fagade & Tryfonas 2016).

ISAT needs a “methodology 3.0” (Scholl et al. 2016), which, in addition to imparting knowledge of the abstract topic, focuses primarily on the emotional involvement of humans and on

a collaborative team process as a key component required for the development of consciousness. It is important to distinguish between sensitization as a first step towards more awareness of information security and in-depth training. Psychological research has shown that, in addition to the classical theoretical approach of knowledge transfer and the marketing-oriented approach of emotionalizing, a systemic approach to team-based communication is required (Pokoyski 2009, Khan et al. 2011, Beyer et al. 2015) to successfully train people in the field of information security.

The DT that accompanies digitization requires new competencies, skills that extend beyond the realms of information technology. It is not enough for programming lessons to be implemented from Year Three on. Rather, the constantly changing technologies and their impact on society, the extremely abstract topics of computer science, and the complex relationships of information security have to be made clear and comprehensible for, and together with, the people involved. Here, politics and computer science also have an ethical responsibility in relation to digital transformation within society as a whole. The Society of Informatics' (GI) Ethics Guidelines seek to do this by expecting GI members to extend their personal expertise to understand the rights and interests of different stakeholders (Gesellschaft für Informatik 2018: 4). The willingness to participate in interdisciplinary discussions and the process of informing learners about their individual and shared responsibilities and their own position as role models are just as much part of this as the realization that acting together requires both individual and group reflection (Gesellschaft für Informatik 2018: 4ff., 14).

Serious games are an interesting tool in the process of sensitization—in particular with regard to the emotionalizing necessary for the development of an information security awareness and the concomitant exchange of experience, expectations, and reflections. Our experiences in research and teaching are discussed in the next section.

3. Analogue Gamification for a Digitally Based Life

Game-based learning is receiving increasing recognition as an effective teaching and learning method that improves motivation and triggers behavioural changes (Bösche & Kattner 2011). It is described as an entertaining and motivating form of learning (Albert & Linek 2009). Another term that is often used in this context is “gamification”. Serious Games have great potential to make valuable contributions to socially relevant areas such as education, health, and society (Göbel 2017, Institute of Play 2018). Gamification implies the application of game elements in non-playful contexts such as work processes or teaching (Huotari & Hamari 2017). Some of the classic game elements are points, leader boards, game results, levels, challenges, rewards (e.g. awards), progress indicators (Codish & Ravid 2017), competitions, etc. Based on what we have learned at the Technical University of Applied Sciences Wildau (TH Wildau), gamification will become even more effective, the more realistic the learning scenarios are in real life. Simulation games (*Planspiele*), which can be time-consuming and complex in terms of content, are one possible manifestation of gamification. In simulation games, participants are supposed to gain the most realistic and practice-oriented insight into specific problems and relationships by simulating a practical situation and through joint reflection, making their own decisions and experiencing the consequences of their actions (see http://methodenpool.uni-koeln.de/planspiel/frameset_planspiel.html).

ISA learning methods should clarify threats, vulnerabilities, attacks, and possible damage as well as the main values of IS and data protection. The three basic values are confidentiality, integrity, and availability. Additional values include authentication, commitment, and reliability (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnologie 2008). In many organizations, ISA and the training of relevant competences (ISAT) are often limited to knowledge-transfer measures. Based on psychologically based research

(Pokoyski 2009, Helisch & Pokoyski 2009, Haucke & Pokoyski 2018) on creating lasting sensitization and promoting security-related behaviours (Albrechtsen 2007, Helisch & Pokoyski 2009, Khan et al. 2011), the game-based learning (GBL) methodology is becoming more important for ISA. The so-called “3.0 Systemic Approaches” of Scholl et al. (2016) were implemented as a “Security Arena” and tested with different target groups at the TH Wildau (Fuhrmann et al. 2017). Major campaigns for large companies like T-Systems, Alliance, BMW, and HP were also completed with an analogue “Security Parcours” (see <https://web.eco.de/news/unterwegs-auf-dem-security-parcours/>) by the firm known_sense or individually organized, as was the case with Deutsche Post (Take Aware 2018).

To raise awareness as a first step in building an individual’s information security awareness and a security culture in the organization, in our experience, the game-based learning scenarios must greatly reduce the complexity of the topics to attract attention in a short time to the selected theme or problem or question. Emotionalizing must address people’s specific concerns. Psychological studies (Haucke & Pokoyski 2018) show that people need to “understand”—through emotional engagement—that they are themselves affected. Analogue GBL is especially effective as a means of stimulating motivation and should be explicitly used for ISAT, because learners can directly see the consequences of their actions and get a sense of their knowledge level in dialogue.

3.1 Example 1: Security Arena for Different Aspects of IS

The two-year research project SecAware4job, which was funded by the Horst Görtz Foundation from 2015 to 2017, aimed to develop, visualize, and examine as many creative learning and teaching methods as possible so that students, staff, and guests can appreciate the information security complex, and all the different facets (regulatory framework, norms and standards, protective measures) can be understood more easily (see: [\[secaware4job.wildau.biz\]\(http://secaware4job.wildau.biz\)\). The themes of the analogue GBL scenarios of the “Security Arena” from the TH Wildau project “SecAware4job”, which were also developed in English, include “Clear desk”, “Phishing”, “Password Hacking”, “Social Media”, “Social Engineering”, “Security on the Go”, “Incident Management”, “Internet Services & Apps” \(Fuhrmann et al. 2017, Scholl 2018\).](http://</p></div><div data-bbox=)

The applied methodological framework is a learning station format (*Stationenlernen*) that goes back to circuit training in sports. Each learning station is presented in a playful manner and consists of a five-minute introduction to a special topic that also integrates a dialogue between participants. There follows a phase of authentic learning in which the participants as a team solve real problems from everyday (professional) life. The teams of about ten people each receive points and discuss the solution, enabling immediate learning within a maximum of five minutes. All in all, one learning station needs approximately fifteen minutes. Playing four stations in parallel as a competition, it takes only one hour to sensitize about forty people. The completion of the learning stations is the prelude to addressing a topic in greater depth, involving as many interactive methods as possible. By way of repetition, these analogue learning stations can be complemented by digital learning games in blended learning formats. In the SecAware4job project, a number of topics (for example, phishing and social engineering) were also developed as digital game versions under the creative commons licence—these can be accessed on the project website.

3.2 Example 2: Data Security Protection

In addition to the learning stations from the Security Arena for Privacy, a self-contained board game for teams has been developed, which takes 30–50 minutes, depending on the luck of the dice (see Tab. 1). All the players start with fifteen data points. In the course of the game, the players are confronted with scenarios from different areas of life, which each require a decision about what information is disclosed. The decisions are made easier for the players by the specification of decision alternatives.

The players choose the alternative that best matches their real behaviour. The gameplay is influenced by event fields. These relate to decisions previously made by the players. For example, data

may have been stolen by a hacker attack. Depending on how sensitive the information is, the players lose data points. However, with a bit of luck, players may also gain points based on the security measures taken (e.g. password change, deletion of Facebook profile) or through a protective measure (e.g. use of a firewall, backup). These reward and protection cards are given to the players in the “security specialist” field. Players who have lost five data points move inward. The players can rescue themselves from the penultimate circle with a lucky throw (shamrock symbol on the dice) and move back to the outside. However, anyone who reaches the innermost circle loses all their data points and thus also the game.

3.3 Examples 3–6: Student ideas for game-based learning of data protection

Example 3: Project No. 83

The first student team in the European Management master's programme (EMM17) to participate in the project management course in winter semester 2017/2018 (WS1718) developed a game-based scenario called No. 83. The task was to develop a game that would explain chapter 8 of the GDPR with emphasis on articles 83 and 84, which deal with the general conditions for imposing administrative fines and penalties. The team needed around twelve weeks to complete the project. The game is coordinated by a quizmaster and played by two participants guided by common rules that are spelt out before the beginning of

Tab. 1) Learning scenario, task, and goals of the game “Keep your data private. Everyday.” developed in the project “SecAware4job” (Fuhrmann et al. 2017).

Learning scenario	Learning task	Learning goals
“Keep your data private. Everyday.”	Deal with impactful decisions relating to individual and work-related IS or privacy	Explore security-relevant decisions and possible consequences and protective measures



the game. A contestant advances one field for a correct answer and moves back one field for a false answer (see Fig. 1, A). The idea of the game is to give a practical feel of the relevant regulations, while providing fun for both the participants and observers. The team believes that the game would serve to raise awareness for both participants and audience about the concept of the regulations and the consequences of breaching them.

Example 4: Questions

Another team created a board game in which three players (or teams) and one moderator can participate. After long discussions about the board design (snake, single fields, circle), they choose a square with rectangular fields. (see Fig. 1, B). The aim of this game is to obtain as many points as possible. The players can gain points in the six question fields by answering

Fig. 1) Analogue game on the new EU GDPR developed by students (EMM17 in WS1718; see Scholl 2018).

a question correctly. The game ends when all the question cards with the scenarios are gone. The moderator plays an important part, leading the players through the game and reading out the questions, while also ensuring the proper conduct of the game. Here are some examples of the questions involved: Is consent given immediately when you willingly provide your data? If the data and consent are only given orally, is it legal for the controller to process the data? Can a ten-year-old object to having their data processed if their parents have given consent?

Example 5: Responsibilities

Another student team developed an analogue GBL scenario for the GDPR called “Responsibilities in data protection activities” (see Fig. 1, C). The aim of this game is to extend or reinforce the knowledge acquired about data security processes and identify the responsible people in each part of the process. Playing the game relies on knowing certain things in advance. In the data protection process described in the regulation, many different players are involved—for this game, the responsibilities of five key people have to be understood: the processor, the con-

troller, joint controllers, data protection officer, and the supervisory authority.

Example 6: Individual repetition

For the purposes of repetition and to monitor individual progress, simple digital GBL scenarios are also useful, e.g. the quiz app that was developed with twelve questions based on three main topics from the EU’s GDPR chapter 3, art. 12–23. This will be used to explain data protection to pupils between Years 7 and 13 using smartphones or tablets (see Fig. 1, D). The EMM project team has used a free app called “Kahoot” to create the digital GBL scenario, i.e. the quiz. Using the result slide, the presenter will have the chance to explain the answers in more detail if many pupils had the wrong answer. However, digital GBL scenarios were not the focus of this paper.

Example 7: e-Akte and Risk Management

A student team from the public administration and law course (VR15) developed an analogue game-based scenario for “e-Akte” based on current e-Government law in Germany. The game deals with files stored electron-

ically in the document-management systems of public administrations—a new tool of E-Government (Fig. 2). Here, it is important that the users of this electronic medium are also familiar with and able to cope with the risks and dangers associated with e-Akte. The goal of the game is to sensitize the players (also referred to as users) to risks. Players should also learn how to assess these risks and apply appropriate measures and safety precautions. The goal is to ensure the safe and responsible use of the new e-Akte technology. It is also important to the inventors of the game that the users constructively discuss the content in order to arrive at a common solution. The aim is to create a connection that is as close to reality as possible, which players can later integrate into their daily routines. They should gain basic knowledge which they can apply in their professional activity in appropriate situations. All student product developments still need to be comprehensively tested with other student and target groups and then improved in terms of the learning scenario, complexity reduction, task formulation, and goal definition.

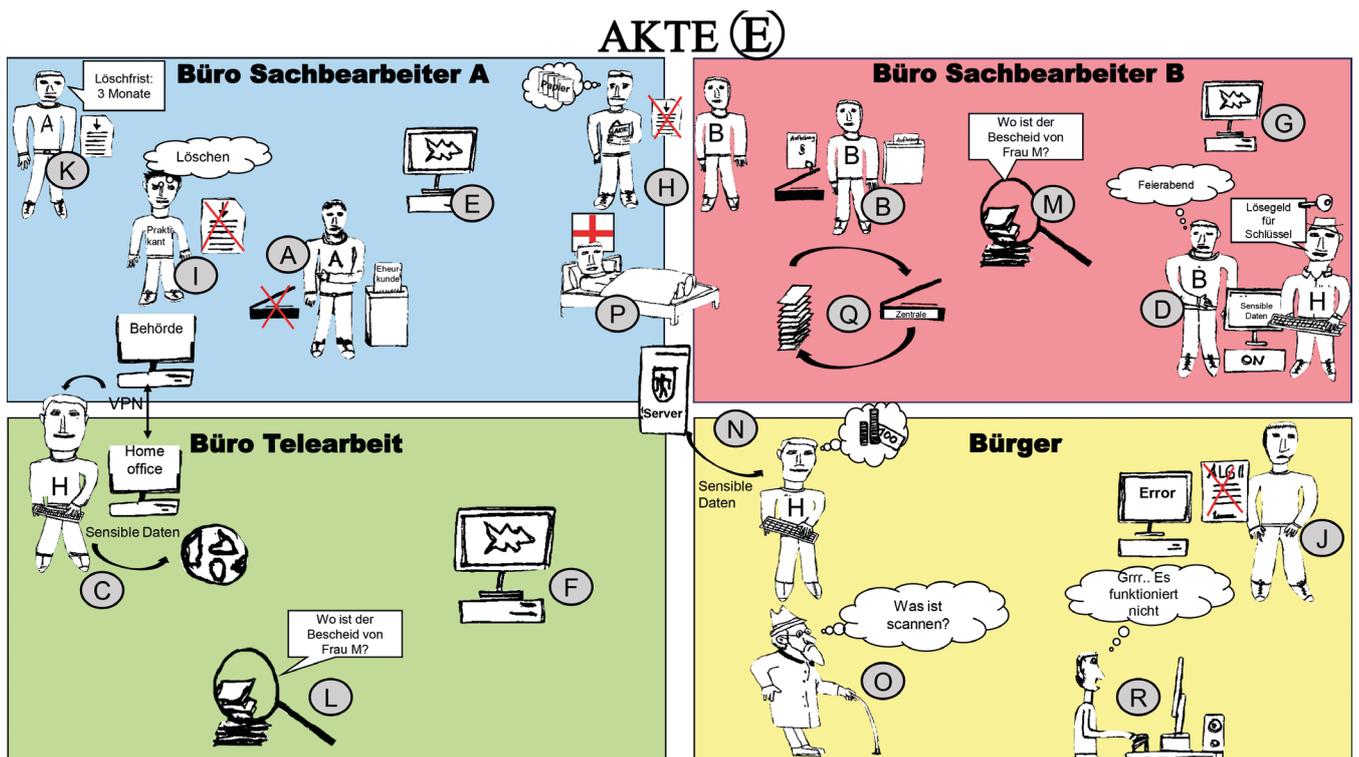


Fig. 2) Analogue game-based scenario (in German) for e-Akte and possible risks created by a VR15 student project team in WS1718.

Example 8: Emergency Management

Emergency management is concerned with continuing business processes in emergency situations and, if necessary, rapid recovery after damage has occurred. This is also referred to as business continuity management. A first step towards understanding emergency preparedness and emergency response is the distinction of terminology. How can an emergency be distinguished from a disorder? What characterizes a crisis as compared to an emergency? What are the characteristic features of a catastrophe? What is meant by normal operation? Such questions from the BSI standard 100-4 were the starting point for the game idea “Black Out”, originally developed by a student group from VR15 in WS1718 as a pilot and in the following semester by a part-time student from BFG14 (Business Administration).

3.4 Example 9: Social Engineering

The Social Engineering Role-Playing Game aims to raise awareness of the often-unknown methods of social engineering attacks, whereby criminals use fraud and manipulation to gather sensitive information (e.g. business secrets, passwords) from companies, employees, or private individuals. Social engineers use the traits of their contact persons (also called “social impact gateways”) to access sensitive information (Haucke & Pokoyski 2018). Through the role play, participants get to know and recognize their own “gateways” (e.g. curiosity, helpfulness, stress, etc.) and how they are targeted by social engineers. The players’ powers of observation are also trained to help detect incongruent behaviour in social engineers (see Tab. 2).

The role-playing participants (see Fig. 4) can either take an active part and, for example, play the role of a social engineer or victim or opt for an observer

position and try to find out as much information as possible. There are three independent rounds: the first round simulates a situation on public transport where the active players act out smartphone “quirks” (e.g. loud phone calls in public, the constant taking of photos, and posting to social media) and the people watching the game are required to identify them. In the second round, the observers witness the social engineering situation. For example, an alleged bank client tries to find out a bank employee’s private address during a consultation. The task of the observing gamers is to find out the social impact gateways being played, the techniques of the social engineers, and the secret information that the social engineer is trying to obtain. In the third round, all the players are invited to enter and browse a Social Network “Placebook” to guess which social gateway the six people presented are vulnerable to. Based on this, a social engineer can choose his method for spying on sensitive information.

The active players are given cards with a role description and game tips. The observing players note their findings on a specially created website using a tablet. This allows quick and timely evaluation. Screenshots of the webpage, maps, and placebook profiles are shown in Fig. 3. This game is a prototype and still in progress and requires further funding (Fuhrmann et al. 2017).

4. Conclusion and Outlook

The aim of this paper is to show that concepts for analogue game-based scenarios can be used to sensitize students. Within the framework of course projects, students can intensively exchange information on individual topics of information security and even develop game-based learning scenarios



Fig. 3) An analogue game improvement (in German) by a female student of the Business Administration course (BFG14) in SoS18 relating to terms in Emergency Management. The original idea came from a student project group from the degree programme Administration and Law (VR15) in WS1718.

Tab. 2) Learning scenario, task, and goals of the “Social Engineering Role Play” developed in the project “SecAware4job” (Fuhrmann et al. 2017).

Learning scenario	Learning task	Learning goals
Social engineering role play	Identify social impact gates, social engineering techniques	Know and internalize “social gateways” and the techniques of social engineers. Sensitize and encourage observation.

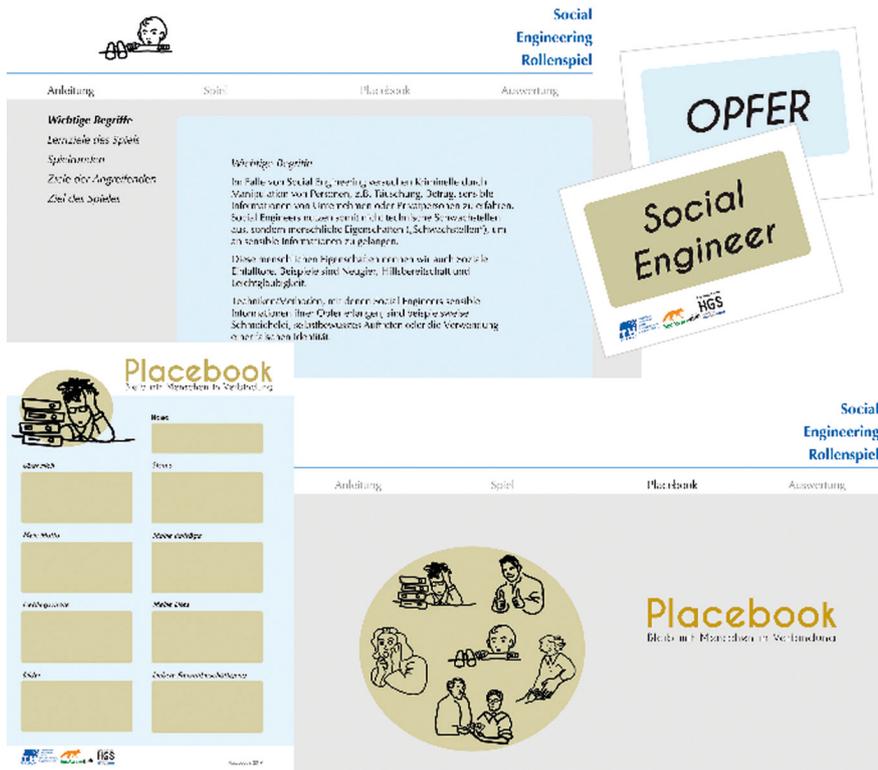


Fig. 4) Components of the social engineering role play in German developed in the project “SecAware4job” (Fuhrmann et al. 2017).

again funded by the Horst Görtz Foundation, students, teachers, and parents should be supplied with the current state of knowledge on information security issues in everyday school life at three different levels of difficulty and sensitized to the topics by using analogue and digital serious games. In addition, by 2020, pupils will be trained as youth security advisers to achieve sustainability in the use and development of game-based learning scenarios even after the project ends (see <http://secaware4school.wildau.biz>). Moreover, analogue and digital serious games should be used in combination to raise awareness as part of further ongoing research projects relating to small and medium-sized enterprises.

for other groups. Designing ISAT with analogue scenarios, emotionalizing, and team-based exchange—as mentioned above—is extremely important for the motivation and successful sensitization of human actors in the field of IS. Depth-psychological studies show that emotionalization and motivation are important factors in creating short-term scenarios in real-life situations using authentic learning (AL) and problem-based learning (PBL). Our own extensive experience with such learning materials and methods in projects and events suggests that ISA and the knowledge associated with it could be improved in almost all participants and behavioural changes triggered.

Nevertheless, there is no simple linear cause-and-effect relationship between institutional safeguards and knowledge, attitudes, and real behaviour. ISA remains a critical issue. Therefore, ISA trainings and programmes must be developed as a user-centred approach. Moreover, a clear set of IS principles needs to be identified and communicated (Kirlappos et al. 2013). Learning in IS should be developed by integrating target-oriented, interactive

analogue/digital GBL scenarios and team-oriented methods as an ongoing process (Göbel 2017, Institute of Play 2018).

The research project “Gender-Sensitive Study and Vocational Orientation for the Occupation Security Specialist (Security)” aims to make the occupational field of information security better known among female students and thus to make courses of study related to computer science more attractive to young women. Through an appealing and gender-sensitive presentation of the profession of security specialist, through portraits of female role models working in the field of information security, and through an interactive and experience-oriented pilot measure, female students in the vocational orientation phase (Year 9) learn that the information security profession is very versatile (see <http://www.security.wildau.biz>). The two-year Security project will be funded from 2017 to 2019 by the Federal Ministry of Education and Research (BMBF).

In the current, two-year research project SecAware4school, which is once

REFERENCES

- Albert D, Linek SB (2009) Game-based learning: Gender-specific aspects of parasocial interaction and identification. In: Gómez Chova L, Martí Belenguer D, Candel Torres I (eds) INTED 2009. Proceedings. International Association of Technology, Education and Development, Valencia, ISBN: 8461275780, pp 1155–1164
- 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
- Aytes K, Connolly T (2004) Computer Security and Risky Computing Practices. *Journal of Organizational and End User Computing* 16(3):22–40. doi: 10.4018/joeuc.2004070102
- Beyer M, Ahmed S, Doerlemann K, Arnell S, Parkin S, Sasse A, Passingham N (2015) Awareness is only the first step. A framework for progressive engagement of staff in cyber security
- Bösche W, Kattner F (2011) Fear of (Serious) Digital Games and Game-Based Learning? *International Journal of Game-Based Learning* 1(3):1–15. doi: 10.4018/ijglb.2011070101
- Bundesakademie für öffentliche Verwaltung im Bundesministerium des Innern (2016) Handbuch IT-Sicherheitsbeauftragte in der öffentlichen Verwaltung. Fortbildungslehrgang mit Zertifikat, Brühl
- Bundesakademie für öffentliche Verwaltung im Bundesministerium des Innern (2018) Handbuch Behördlicher Datenschutzbeauftragte in der Bundesverwaltung. Fortbildungslehrgang mit Zertifikat, Brühl
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnologie (2018) ORP.3 Sensibilisierung und Schulung. https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/ITGrundschutz/ITGrundschutzKompodium/bausteine/ORP/ORP_3_Sensibilisierung_und_Schulung.html. Accessed 06 Nov 2018
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnologie (2008) BSI-Standard 100-1: Information Security Management System (ISMS). https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/EN/BSI/Publications/BSI-Standards/standard_100-1_e_pdf.pdf?sessionid=FCA7C-FACS90FCD5F4421EDB1B50A6CCE.2_cid341?__blob=publicationFile&v=1. Accessed 12 Nov 2018
- Codish D, Ravid G (2017) Gender Moderation in Gamification: Does One Size Fit All? In: Proceedings of the 50th Hawaii International Conference on System Sciences (2017). Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii International Conference on System Sciences. doi: 10.24251/HICSS.2017.244
- Dark MJ (2006) Security Education, Training and Awareness from a Human Performance Technology Point of View. In: Whitman ME, Mattord HJ (eds) Readings and cases in the management of information security. Thomson Course Technology, Boston, Mass.-Canada, ISBN: 9780619216276, pp 86–104
- Fagade T, Tryfonas T (2016) Security by Compliance? A Study of Insider Threat Implications for Nigerian Banks. In: Tryfonas T (ed) Human aspects of information security, privacy, and trust. 4th International Conference, HAS 2016, held as part of HCI International 2016, Toronto, ON, Canada, July 17–22, 2016 : proceedings, vol 9750. Lecture notes in computer science Information systems and applications, incl. Internet/Web, and HCI, vol 9750. Springer, Cham-Heidelberg, ISBN: 978-3-319-39380-3, pp 128–139. doi: 10.1007/978-3-319-39381-0_12
- Fuhrmann F, Scholl M, Edich D, Koppatz P, Scholl LR, Leiner KB, Ehrlich P (2017) Informationssicherheitsbewusstsein für den Berufseinstieg. Shaker, Aachen. ISBN: 978-3-8440-5466-8. doi: 10.2370/9783844054668
- Gesellschaft für Informatik (2018) Unsere ethischen Leitlinien, Bonn
- Göbel S (2017) Autorenumgebung für Serious Games. StoryTec: Eine Autorenumgebung und narrative Objekte für personalisierte Serious Games. Habilitationsschrift, TU Darmstadt
- Haucke A, Pokoyski D (2018) Mea culpa. Schuld, Scham und Opferrolle bei Social Engineering. <kes> Zeitschrift für Informationssicherheit(1):6–8
- Helisch M, Pokoyski D (eds) (2009) Security awareness. Neue Wege zur erfolgreichen Mitarbeiter-Sensibilisierung, 1. Aufl. Edition kes. Vieweg + Teubner, Wiesbaden. ISBN: 978-3834806680
- Huotari K, Hamari J (2017) A definition for gamification: Anchoring gamification in the service marketing literature. *Electron Markets* 27(1):21–31. doi: 10.1007/s12525-015-0212-z
- Institute of Play (2018) <https://learncloud.rumie.org/collection/view/4801/institute-of-play>. Accessed 14 Feb 2019
- Kaspersky Lab (2018) Die DSGVO – mehr als nur ein Kontrollkästchen.
- Khan B, Alghathbar KS, Nabi SI, Khan MK (2011) Effectiveness of information security awareness methods based on psychological theories. *African Journal Business Management* 5(26). doi: 10.5897/AJBM11.067
- Kirlappos I, Beutement A, Sasse MA (2013) “Comply or Die” Is Dead: Long Live Security-Aware Principal Agents. In: Adams AA, Brenner M, Smith M (eds) Financial Cryptography and Data Security. FC 2013 Workshops, USEC and WAHC 2013, Okinawa, Japan, April 1, 2013, Revised Selected Papers, vol 7862. Lecture Notes in Computer Science / Security and Cryptology, v.7862. Springer Berlin Heidelberg, Berlin/Heidelberg, ISBN: 978-3-642-41319-3, pp 70–82. doi: 10.1007/978-3-642-41320-9_5
- Kruger H, Drevin L, Steyn T (2007) Email Security Awareness - A Practical Assessment of Employee Behaviour. In: Fitcher L, Dodge R (eds) Fifth World Conference on Information Security Education, vol 237. Springer US, Boston, MA, ISBN: 978-0-387-73268-8, pp 33–40
- Pokoyski D (2009) Security Awareness: Von der Oldschool in die Next Generation – eine Einführung. In: Helisch M, Pokoyski D (eds) Security awareness. Neue Wege zur erfolgreichen Mitarbeiter-Sensibilisierung, 1. Aufl. Edition kes. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, ISBN: 978-3834806680, pp 1–8
- Scholl M (2018) Information Security Awareness in Public Administrations. In: Comite U (ed) Public Management and Administration. InTech, ISBN: 978-1-78923-638-5. doi: 10.5772/intechopen.74572
- Scholl M, Fuhrmann F, Pokoyski D (2016) Information Security Awareness 3.0 for Job Beginners. In: Quintela Varajão JE (ed). Proceedings of Conference on ENTERprise Information Systems/International Conference on Project MANagement/Conference on Health and Social Care Information Systems and Technologies, Porto, Portugal, ISBN: 978-989-97433-7-3, pp 433–436
- Scholl M, Fuhrmann F, Scholl LR (2018) Scientific Knowledge of the Human Side of Information Security as a Basis for Sustainable Trainings in Organizational Practices. In: Bui T (ed) Proceedings of the 51st Hawaii International Conference on System Sciences. Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii International Conference on System Sciences. doi: 10.24251/HICSS.2018.280
- Stewart G, Lacey D (2012) Death by a thousand facts. *Information Management & Computer Security* 20(1):29–38. doi: 10.1108/09685221211219182
- Take Aware (2018) Take Aware. Die Security Awareness-Konferenz. <https://www.take-aware.com/>. Accessed 27 Nov 2018
- Thales (2018) Schutz personenbezogener Daten - Warum die DSGVO nicht nur Geldbußen mit sich bringt. <https://go.thalessecurity.com/DE-GDPR-Survey-Protecting-private-personal-data-Why-there-is-more-to-the-GDPR-than-just-fines.html>. Accessed 27 Nov 2018
- Tsohou A, Karyda M, Kokolakis S, Kiountouzis E (2012) Analyzing trajectories of information security awareness. *Info Technology & People* 25(3):327–352. doi: 10.1108/09593841211254358

AUTHOR

Prof. Dr. Margit Scholl
Business Informatics and Administration IT
Department Business, Computing, Law
Technische Hochschule Wildau

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



Erweiterung eines landmarkenbasierten Innenraumortungsverfahrens für Mobilgeräte mit ARCore

Jan Handrich und Ralf Vandenhoueten*

Zusammenfassung

Die Lokalisierung in Innenräumen, die sich nicht auf Satellitennavigation wie GPS verlassen kann, ist nach wie vor eine Herausforderung. Viele Methoden zur Lokalisierung in Innenräumen beruhen auf Funksignalen oder anderen Sendern (z.B. Infrarot), die eine kostenintensive Infrastruktur erfordern, die in einem Gebäude installiert werden muss. Außerdem sind diese Techniken ungenau, wenn Reflexionen der Signale in einem Gebäude auftreten. Die Forschungsgruppe Telematik der TH Wildau hat für diese Problemstellung ein optisches Verfahren zur Innenraumlokalisierung entwickelt, das die Kamera eines mobilen Geräts verwendet. Dieser Ansatz erfordert nur die Verfügbarkeit von mehreren identifizierbaren Landmarken, die kostengünstig in einem Gebäude installiert werden können. In diesem Beitrag soll eine Möglichkeit vorgestellt werden, dieses landmarkenbasierte Verfahren mit der Augmented Reality-Bibliothek ARCore von Google zu erweitern, um eine kontinuierliche Positionsermittlung zu ermöglichen, auch wenn vorübergehend keine Landmarken durch die Gerätekamera erfasst werden können.

Abstract

Indoor localization, which cannot rely on satellite navigation such as GPS, remains a challenge. Many indoor localization methods depend on radio signals or other transmitters (e.g. infrared) that require a costly infrastructure to be installed in a building. In addition, these techniques are inaccurate when reflections of the signals occur in a building. The telematics research group at TH Wildau has developed an optical method for indoor localization for this problem that uses the camera of a mobile device. This approach only requires the availability of several identifiable landmarks that can be installed cost-effectively in a building. In this article, a way is presented to extend this landmark based method with Google's Augmented Reality library ARCore to enable continuous position tracking even if no landmarks can be captured by the device camera temporarily.

1. Einführung

1.1 Motivation

Ortung und Navigation sind seit vielen Jahrhunderten essentielle Bestandteile des Lebens und aus der Gesellschaft nicht mehr wegzudenken. Nutzte man früher die Sterne zum Navigieren, vertraut man heute primär auf weltumspannende Satellitennetze wie GPS oder Galileo für verschiedene Lokalisierungsanwendungen rund um den Globus. Durch die Beschleunigung von Prozessen bei gleichzeitiger Qualitätssteigerung sind sie als wesentlicher Teil von Wertschöpfungsketten verschiedenster Branchen unabdingbar.

Satellitengestützte Ortungssysteme ermöglichen weltweit eine metergenaue Ortung eines entsprechenden Empfängers, haben jedoch auch einen großen Nachteil: Im Innenraum oder an Orten, wo keine direkte Sichtverbindung zu den Satelliten besteht, können diese Systeme nicht eingesetzt werden. Die Signale der Satelliten können hier nicht auf direktem Wege empfangen werden, was dazu führt, dass keine zuverlässige Position ermittelt werden kann. Daher ist es nötig für den Innenraum auf alternative Ortungssysteme zurückzugreifen.

Nach wie vor gibt es heute aber noch kein Pendant zu GPS als allgemeingültige Lösung für alle Anwendungsberei-

che der Innenraumortung. So haben einige Ansätze Probleme, die hohen Anforderungen an die Präzision, Zuverlässigkeit oder Robustheit für spezielle Anwendungsfälle zu erfüllen, wie beispielsweise der zentimetergenauen Steuerung eines fahrerlosen Transportfahrzeuges, da keine ausreichende Ortungsgenauigkeit bereitgestellt werden kann (Lane et al. 2010, Kárník & Streit 2016). Andere Systeme bringen teilweise hohe Kosten für die nötige Infrastruktur mit sich.

Ein weiterer Lösungsansatz sieht die Nutzung von Bild- und Kameradaten vor, um Subjekte in einem entsprechenden Raum zu orten. Dabei können, je nach Verfahren, Subjekte durch

* korrespondierender Autor

fest installierte Kameras in einer definierten Umgebung erkannt und geortet werden oder mithilfe einer Kamera, die sie mit sich führen, ihre eigene Pose bestimmen.

Nach dem Beginn des Siegeszuges des Smartphones vor nicht einmal 10 Jahren sind sie heute zu einem Gegenstand geworden, der aus dem Alltag nicht mehr wegzudenken ist. Moderne Smartphones sind mit Kameras, Kommunikationstechnik (z. B. WLAN- und Mobilfunkempfänger) und vielerlei anderen Sensoren ausgestattet. Durch immer fortschreitende Prozessortechnik werden die Mobilgeräte immer leistungsfähiger und sind in der Lage aufwendige Berechnungen, wie sie für Bildverarbeitungsprozesse nötig sind, in Echtzeit durchzuführen. Dank ihrer umfangreichen Ausstattung bieten sie aber auch die ideale Plattform zur Erprobung und Nutzung alternativer Innenraum-Ortungsmethoden. Dieser Beitrag widmet sich daher dem Thema optischer Ortungsverfahren auf mobilen Endgeräten. Dabei soll dargestellt werden, inwiefern ein bestehendes optisches Ortungsverfahren durch zusätzliche Bildverarbeitungsverfahren sowie zusätzlichen Sensordaten erweitert und verbessert werden kann.

1.2 Codeloc

Die Forschungsgruppe Telematik der Technischen Hochschule Wildau um Prof. Dr. Vandenhoueten hat ein markerbasiertes, optisches Ortungsverfahren entwickelt, das verspricht, ohne hohe Infrastrukturkosten, eine Ortungs- und Navigationslösung zu realisieren, die sowohl außerhalb als auch innerhalb von Gebäuden eine Genauigkeit im Zentimeterbereich liefern (Vandenhoueten et al. 2014). Dieses als *Codeloc* bezeichnete innovative Verfahren nutzt eine Kamera um bekannte, eindeutige Markierungen (hier Landmarken genannt) zu erfassen und ermittelt durch die Abbildung dieser Landmarken im Kamerabild die Position im betrachteten Ortungsgebiet. Hierfür muss das Areal, in dem *Codeloc* verwendet werden soll, mit entsprechenden Landmarken ausgestattet werden. Die Form der Landmarken ist dabei relativ frei wählbar. So sind sowohl zweidimensionale (z. B. Vierecke oder Kreise) als auch

dreidimensionale Formen (z. B. Quader oder Kugeln) als Landmarken möglich. Die Landmarken sollten gut sichtbar im Areal positioniert und nicht verdeckt werden. Weiterhin kann durch ein farblches Hervorheben der Landmarken von der Umgebung ihre Erkennung verbessert und beschleunigt werden. Essentiell für das Design der Landmarken ist, dass sie eindeutig voneinander unterschieden werden können. Hierfür bietet es sich an, eine optische Kodierung der Marken zu verwenden. So können u. a. Barcodes, QR-Codes oder Datamatrix-Codes für eine solche Identifizierung der Marken verwendet werden.

Zur Lokalisierung des Mobilgerätes wird dessen Kamera für die Aufnahme der Umgebung verwendet. Mittels Bildverarbeitungsalgorithmen werden die Landmarken im Kamerabild erkannt und anhand ihrer eindeutigen Markierungen identifiziert. Die Relativposition und Orientierung der Kamera werden darauffolgend anhand der Größe der sichtbaren Landmarken, ihrer Positionen im Bild sowie ihrer perspektivischen Verzeichnung ermittelt. Dies geschieht durch Schätzen der Kamerapose aus 3D-2D-Punktkorrespondenzen (Levenberg 1944, Marquardt 1963, Lepetit et al. 2009). Durch die Relativposition des Mobilgerätes zu den Landmarken sowie dem Wissen über die Position und Ausrichtung der Landmarken im Ortungsareal, kann die gesuchte absolute Position und Orientierung des Mobilgerätes errechnet werden. Mit der Positions- und Lagebestimmung des Mobilgerätes kann das *Codeloc*-Verfahren für das Bereitstellen von *Location-Based-Services* genutzt werden. Anhand der Absolutposition des Gerätes kann der Nutzer mit positionsbezüglichen Benachrichtigungen versorgt werden. Da mittels *Codeloc* aber auch die Pose des Mobilgerätes bestimmt wird, kann diese auch genutzt werden um Zusatzinformationen direkt im Kamerabild mittels *Augmented Reality* darzustellen.

Zur Validierung der Ortungsmethode wurde durch die Forschungsgruppe Telematik ein Versuchsaufbau mit drei Landmarken an festen, bekannten Positionen im Raum erstellt und Messungen an unterschiedlichen

Positionen im 3D-Raum getätigt. Die ermittelte Position der Software wurde mit der tatsächlichen, manuell ausgemessenen Position verglichen. Um die Genauigkeit der Methode zu quantifizieren wurden der durchschnittliche Messfehler zwischen der berechneten und tatsächlichen Position bestimmt. Zur Darstellung der Präzision wurde die Standardabweichung über alle Messungen ermittelt. Der Test zeigt, dass das Verfahren relativ stabile Werte für die Position ermittelt, mit einer Genauigkeit von 10–12 cm und einer Präzision von ungefähr 2,2 cm Abweichung.

Das *Codeloc*-Verfahren ist ein leistungsstarkes Verfahren zum Orten mobiler Endgeräte im Innenraumbereich. Verglichen zu anderen Ansätzen ist die Methode sehr präzise und robust gegenüber Veränderungen in der Umgebung. Ein großer Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass, abgesehen von den kostengünstigen Landmarken, keine zusätzlichen Bauteile oder Komponenten benötigt werden und es auf jedem aktuellen Smartphone oder Tabletcomputer implementiert werden kann.

Im Rahmen des Forschungsprojektes *INNOMAP* (Vandenhoueten 2018a) soll dieses Lokalisierungsverfahren nun verbessert und für die Bereitstellung von *Location-Based-Services* weiterentwickelt werden. Der Nachteil des *Codeloc*-Verfahrens besteht darin, dass eine Lokalisierung der Kamera bzw. des Endgerätes nur dann möglich ist, wenn mindestens eine Landmarke im Kamerabild erfasst und identifiziert werden kann. Daher gilt es *Codeloc* um zusätzliche Verfahren zu erweitern, um die Position des Gerätes in diesen Situationen mit hinreichender Genauigkeit kontinuierlich weiterverfolgen zu können.

In diesem Beitrag wird dabei dargestellt, wie *Codeloc* für Android-Geräte durch die neue Augmented Reality-Bibliothek *ARCore* von Google erweitert werden kann, um die Bestimmung der Position und Ausrichtung eines Smartphones auch dann zu ermöglichen, wenn keine optischen Marker erkannt werden können.

1.3 ARCore

Bei *ARCore* (Google Inc. 2018a) handelt es sich um eine Highlevel-API für Android Geräte, die es dem Anwender ermöglicht virtuelle 3D-Objekte in das Kamerabild des Smartphones zu integrieren. Um 3D-Objekte perspektivisch korrekt im Kamerabild einblenden zu können, wird das Koordinatensystem der Kamera mit realweltlichen Koordinaten überlagert und die relative Pose der Kamera kontinuierlich verfolgt. *ARCore* verwendet hierfür einen Prozess namens *Concurrent Odometry and Mapping* bzw. *COM* (Nerurkar et al. 2017), um zu verstehen, wie sich das Gerät, relativ zur Welt um es herum, bewegt. *ARCore* erkennt, ähnlich wie Feature-basierte *SLAM*-Verfahren, Feature-Punkte im aufgenommenen Kamerabild und verwendet diese zur Berechnung der Ortsveränderung. Die visuellen Informationen werden mit den Daten der inertialen Messeinheit (IMU), bestehend aus Beschleunigungs- und Lagesensorik, des Geräts kombiniert, um die Pose der Kamera relativ zur Welt über die Zeit abzuschätzen.

Zur Verfolgung der Gerätepose wird versucht, die Translations- und Rotations-schätzung der Kamera voneinander zu entkoppeln und sie stattdessen als eigenständige Optimierungsprobleme zu behandeln. Zunächst wird die 3D-Kamerabewegung ausschließlich aus dem visuellen Signal der Kamera ermittelt. Hierzu wird die 2D-Translation und der relative Maßstab einer Zielregion über mehrere Bilder hinweg beobachtet. Durch ein Lochkameramodell wird diese Translation sowie die Maßstabsänderungen in der Bildebene mit der 3D-Translation der Kamera in Verbindung gesetzt (Wei & Mullen 2018). Da das Kameramodell jedoch nicht von der Brennweite des Kameraobjektivs ausgeht, ist nicht bekannt, wie groß die tatsächliche Entfernung bzw. die Tiefe der nachgeführten Ebene ist. Um dies zu berücksichtigen, wird eine Skalenschätzung sowie eine Regionsverfolgung außerhalb des Sichtfeldes der Kamera eingesetzt. Anschließend wird die 3D-Orientierung des Geräts mit dem eingebauten Gyroskop bestimmt und die geschätzte 3D-Translation mit der 3D-Rotation kombiniert.

ARCore versucht weiterhin kontinuierlich sein Verständnis der Umgebung durch die Erkennung von Merkmalspunkten und Ebenen zu verbessern. Hierfür wird nach Gruppen von Feature-Punkten gesucht, die auf gemeinsamen horizontalen oder vertikalen Flächen, wie Tischen oder Wänden liegen. Die erkannten Features werden weiterhin in einer digitalen Karte gespeichert, um, ähnlich wie in einem *SLAM*-Verfahren, die Position in einer bereits bekannten Umgebung wieder zu finden (Sturm 2017).

Für die Erweiterung von *Codeloc* können die Funktionen von *ARCore*

Idee für die Kombination stellt daher eine Initialisierung der Position mittels *Codeloc* und ein anschließendes Verfolgen der Position durch *ARCore* dar. Da *ARCore* keine explizite Startpose vorgegeben werden kann, muss durch ein *Middleware*-Modul zunächst die Landmarkensuche und Posenbestimmung von *Codeloc* ausgeführt werden. Beim Erfassen einer stabilen Pose muss darauffolgend der Start von *ARCore* ausgelöst und die *ARCore*-Posen mit der *Codeloc*-Pose verrechnet werden.

Dies wird in Abb. 1 vereinfacht dargestellt:

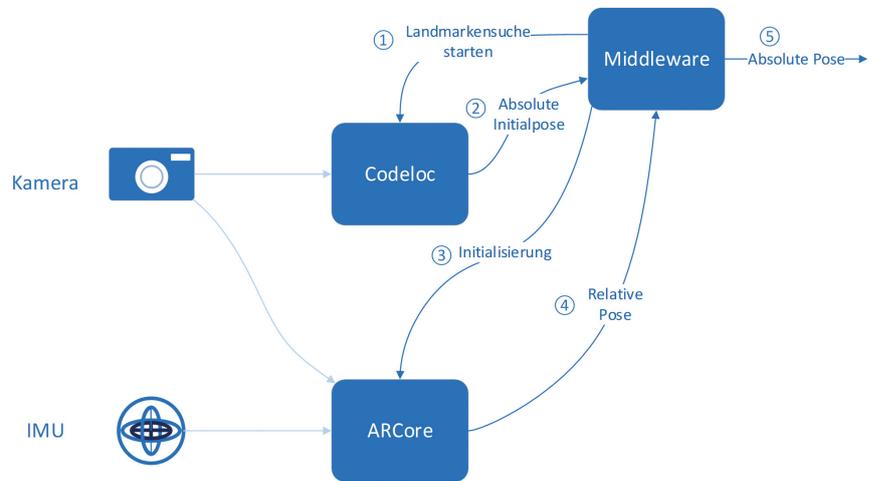


Abb. 1) Integration Codeloc und ARCore.

zur Darstellung virtueller Inhalte im Kamerabild eher als nebensächlich betrachtet werden, da hier die Bewegungsverfolgung benötigt wird, um die Kamerapose zu bestimmen. Für die Implementierung stellt *Google ARCore-SDKs* für Android, Android NDK, iOS, Unity sowie Unreal zur Verfügung.

2. Methodik

2.1 Integrationskonzept

Codeloc und *ARCore* stellen zunächst autark arbeitende Systeme dar. Während *Codeloc* in der Lage ist, die absolute Kamerapose im Bezugssystem zu bestimmen, wenn sich eine Landmarke im Kamerabild befindet, kann *ARCore* kontinuierlich Bewegungen verfolgen. *ARCore* ermittelt dabei immer die relative Position zum jeweiligen Initialisierungsort, der als der Ursprung (0, 0, 0) definiert wird. Die grundlegende

- Durch die *Middleware* wird *Codeloc* initialisiert und sucht kontinuierlich nach einer Landmarke im Kamerabild
- Bei einer erfassten Landmarke liefert *Codeloc* die absolute Kamerapose an die *Middleware*. Wird über einen definierten Zeitraum (bis 3 s) eine stabile Pose durch *Codeloc* ermittelt, wird diese Pose als Initialpose gesetzt und die Landmarkensuche in *Codeloc* gestoppt.
- *ARCore* wird initialisiert. Bis dies abgeschlossen ist, darf die Pose des Gerätes nicht verändert werden.
- *ARCore* liefert nun kontinuierlich die relativen Posen, ausgehend von der Initialpose.
- Die relativen Posen werden mit der Initialpose in der *Middleware*

verrechnet um die aktuelle Absolutpose zu bestimmen. Diese wird an die jeweilige Applikation weitergeleitet.

Der entscheidende Schritt in diesem Ablauf stellt dabei die Bestimmung der Initialpose dar. Um in Schritt 2 einzelne Messfehler von *CodeLoc* ausschließen zu können, wird die Pose über einen kurzen Zeitraum bestimmt. Verändert sich diese nur in einem geringen Maß, kann davon ausgegangen werden, dass das Smartphone augenblicklich nicht bewegt wird. Da *ARCore* in seiner aktuellen Version nicht die Möglichkeit bietet eine explizite Pose von außen zu setzen, kann dieses erst nach dem Bestimmen der Initialpose gestartet werden. Dabei muss sichergestellt werden, dass der Ursprung des *ARCore*-Koordinatensystems und die aktuelle Kameraausrichtung mit der ermittelten *CodeLoc*-Pose übereinstimmen, indem das Smartphone nicht bewegt wird. Der vollständige Initialisierungsprozess von *ARCore* dauert auf einem aktuellen Smartphone ca. 2–3 s. *ARCore* benötigt weiterhin während der Laufzeit den vollständigen Zugriff auf die Gerätekamera. Da das Android-System jedoch nur den Zugriff auf die Kamera durch einen Prozess ermöglicht, muss bereits vor dieser Initialisierung *CodeLoc* gestoppt werden.

Die Gleichausrichtung der Kamera und Position bei der Übergabe von *CodeLoc* zu *ARCore* ist wichtig, damit eine Verrechnung der absoluten Initialpose mit der relativen *ARCore*-Pose vorgenommen werden kann. Hierfür muss die Relativpose aus dem *ARCore*-Koordinatensystem in das *CodeLoc*-Koordinatensystem transformiert werden. Bezüglich der Skalierung der Positionen ist diese Transformation eher unkritisch zu betrachten, da beide Ortungsverfahren Translationswerte im metrischen System liefern. Entscheidend ist jedoch die Transformation der Raum-Achsen. Während bei *CodeLoc* die Ausrichtung der Koordinatenachsen vorhergehend beim Einmessen der Landmarken festgelegt werden, spannt *ARCore* bei jeder Initialisierung ein neues Koordinatensystem auf. Dieses ist dabei von der Lage des Gerätes abhängig.

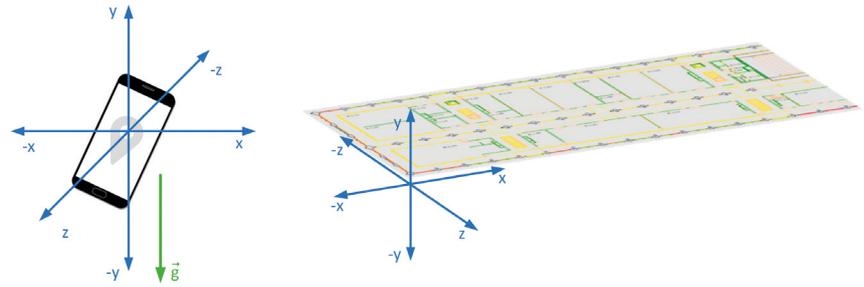


Abb. 2) Ausrichtung der Koordinatenachsen von *ARCore* und *CodeLoc*.

Wie in Abb. 2 dargestellt, wird unabhängig von der Lage des Smartphones die Ausrichtung der y-Achse des Koordinatensystems durch die Erdbeschleunigung g bestimmt. Diese wird durch die Beschleunigungssensoren des Gerätes ermittelt. Die x- und z-Achse werden jeweils orthogonal zu dieser als rechtshändiges Koordinatensystem definiert. Dabei zeigt die z-Achse in Richtung des Bildschirms des Gerätes. Die Ausrichtung des Koordinatensystems von *CodeLoc* kann beim Einmessen der Landmarken theoretisch frei gewählt werden. Vorgesehen ist hier jedoch, dass die y-Achse als Höhe verwendet wird, während die x- und z-Achse durch eine Karte oder den Grundriss des Gebäudes ausgerichtet werden. *CodeLoc* spannt dabei auch ein rechtshändiges Koordinatensystem auf. Somit kann per Definition davon ausgegangen werden, dass die y-Achsen beider Systeme gleich ausgerichtet sind. Um das *ARCore*-Koordinatensystem in das *CodeLoc*-Koordinatensystem projizieren zu können, muss dieses um seine y-Achse rotiert werden, bis die x- und z-Achsen beider Systeme gleich ausgerichtet sind. Nach dieser Rotation muss die relative Pose aus dem *ARCore*-System lediglich mit der vorhergehend bestimmten Initialpose verrechnet werden.

Um die x- und z-Achse gleich auszurichten, gilt es, den Winkel α in der x-z-Ebene zu ermitteln, mit dem um die y-Achse rotiert werden muss. Um diesen zu bestimmen, wird die Rotationsmatrix R_i der Initialpose verwendet. Zunächst wird der Einheitsvektor der z-Achse \vec{k} mit R_i multipliziert um die gedrehte z-Achse durch \vec{k}_r zu bestimmen. Dieser Vektor stellt gleichzeitig die aktuelle Blickrichtung der Kamera im *CodeLoc*-Koordinatensystem dar.

$$R_i \cdot \vec{k} = \begin{pmatrix} r_{i11} & r_{i12} & r_{i13} \\ r_{i21} & r_{i22} & r_{i23} \\ r_{i31} & r_{i32} & r_{i33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \vec{k}_r = \begin{pmatrix} k_{rx} \\ k_{ry} \\ k_{rz} \end{pmatrix}$$

Anschließend wird der Vektor \vec{k}_r in die x-z-Ebene projiziert, indem seine y-Komponente gleich 0 gesetzt wird.

$$\vec{k}_r = \begin{pmatrix} k_{rx} \\ k_{ry} \\ k_{rz} \end{pmatrix} \rightarrow \vec{k}_r' = \begin{pmatrix} k_{rx} \\ 0 \\ k_{rz} \end{pmatrix}$$

Nun wird durch das Skalarprodukt der Vektoren \vec{k}_r' und \vec{k} der Drehwinkel α in der x-z-Ebene bestimmt.

$$\cos(\alpha) = \frac{\vec{k}_r' \cdot \vec{k}}{|\vec{k}_r'| \cdot |\vec{k}|}$$

Mit dem Winkel α kann zuletzt eine Drehmatrix R_y erstellt werden, welche für die Drehtransformation um die y-Achse eingesetzt werden kann.

$$R_y = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

Die durch *ARCore* ermittelte Pose mit der Rotationsmatrix R_{ar} und dem Translationsvektor \vec{t}_{ar} kann nun durch die Rotationsmatrix R_y und dem Translationsvektor \vec{t}_i der Initialpose in das *CodeLoc*-Koordinatensystem überführt werden.

$$R_{pose} = R_y \cdot R_{arcore}$$

$$\vec{t}_{pose} = \vec{t}_i + R_y \cdot \vec{t}_{ar}$$

Bei diesem Integrationskonzept kommt *CodeLoc* lediglich zur Initialisierung der Ortung zum Einsatz, um eine möglichst genaue Ausgangspose für die Relativortung von *ARCore* zu ermitteln. Während der Laufzeit von *ARCore*

könnte weiterhin nach Landmarken im Bild gesucht werden, um die Absolutpose durch *Codeloc* zu bestimmen. Jedoch kann während der Laufzeit von *ARCore* dessen interne Pose nicht durch äußeren Zugriff verändert werden. Eine Veränderung der Initialpose, die mit den Relativbewegungen verrechnet wird, wäre zwar denkbar, bei einer internen Korrektur des aktuellen Drifts durch ein *Loop-Closing* von *ARCore* würde dabei jedoch wiederum ein Positionsfehler entstehen.

2.2 Evaluation

Nach der Implementierung des Integrationskonzeptes in einer Android-Applikation gilt es, die Ortungsgenauigkeit und Präzision des Verfahrens zu bestimmen. Hierzu soll nach der Initialisierung mit *Codeloc* ein Smartphone an Positionen mit bekannten Koordinaten bewegt werden. Abb. 3 zeigt den schematischen Aufbau des Experiments.

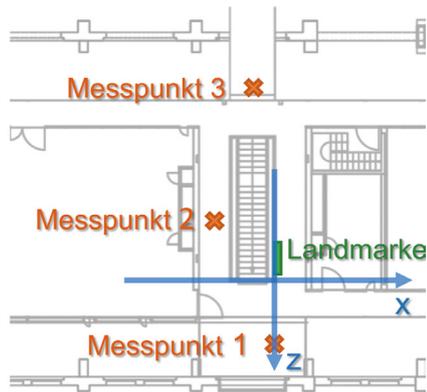


Abb. 3) Schematischer Aufbau des Experiments.

Anhand eines vorhandenen Grundrisses wird ein Koordinatensystem im Inneren eines Gebäudes angelegt. Dargestellt sind hier lediglich die Ausrichtungen der x- und z-Achsen. Die y-Achse bildet per Definition die Höhe ab. Zur Vereinfachung des Einmessvorganges, wird der Ursprung an eine, in der Nähe befindliche, Raumecke verschoben. Nahe dem Koordinatenursprung wird an einer Wand eine *Codeloc*-Landmarke angebracht und eingemessen (grüne Markierung). Ausgehend vom Koordinatenursprung werden drei Messpunkte auf dem Boden angebracht. Die Positionen der Landmarke und der Messpunkte sind dabei so gewählt, dass Messpunkt 1, je nach

Blickrichtung bei der Initialisierung, auf direktem Weg erreicht werden kann, während für Messpunkt 2 mindestens eine 90°-Kurve und für Messpunkt 3 mindestens eine 45°-Kurve zurückgelegt werden muss. Damit soll verhindert werden, dass *ARCore* lediglich geradlinige Bewegungen erkennen muss. Das Testgerät wird nach der Initialisierung durch Erfassen der *Codeloc*-Landmarke von Hand zu den einzelnen Messpunkten getragen. Da nicht gewährleistet werden kann, dass das Gerät beim Erfassen der Ergebnisse an den Messpunkten immer auf der gleichen Höhe gehalten wird, werden nur die x- und z-Koordinaten ausgewertet. Jeder Messpunkt wird bei diesem Experiment zehnmal erfasst. Nach jedem Erreichen eines Messpunktes und Aufnehmen der ermittelten Koordinaten, wird das Ortungsverfahren neu durch die Landmarke initialisiert. Die Initialisierung findet dabei von unterschiedlichen Startpositionen und Winkeln statt.

Um die Genauigkeit und Präzision der *Codeloc*-initialisierten *ARCore*-Ortung zu quantifizieren, werden zunächst für jede getätigte Messung die x-z-Abweichung zum Sollwert des jeweiligen Messpunktes als Messfehler bestimmt. Anhand dieser wird der durchschnittliche Messfehler als Maß für die Genauigkeit ermittelt. Zur Darstellung der Präzision wird die Standardabweichung der Messfehler berechnet, um die Streuung um den Mittelwert zu erhalten. Tab. 1 stellt die ermittelten Ergebnisse dar.

Die Ergebnisse des Experiments zeigen, dass das Verfahren für kurze Distanzen gute, reproduzierbare Werte liefert. Der

durchschnittliche Fehler zu Messpunkt 1 liegt bei 8 cm mit einer Abweichung von 3,5 cm. Die weiter entfernten und nicht direkt erreichbaren Messpunkte 2 und 3 sind mit einem höheren Messfehler von ca. 12 cm und 19 cm versehen, wobei sich die Präzision bei Messpunkt 2 stark verschlechtert. Anhand der schlechter werdenden Genauigkeit lässt sich gut der Drift der relativen *ARCore*-Ortung erkennen: Je größer die zurückgelegte Distanz zum Messpunkt, desto größer der ermittelte Messfehler.

Die Genauigkeit von 18,8 cm bei Messpunkt 3 zeigt, dass das Verfahren nach ca. 10 m zurückgelegtem Weg auf eine neue Initialpose gestützt werden sollte, damit der Drift nicht zu stark anwächst. Weiterhin beträgt die Präzision zu Messpunkt 2 lediglich 7,7 cm, womit die Messfehler doppelt so stark streuen, wie zu den anderen Messpunkten. Im Vergleich zu den anderen Messpunkten gab es bei Messpunkt 2 aufgrund des Sonnenstandes, sehr stark wechselnde Lichtverhältnisse. Daher muss während der Bewegungserfassung durch *ARCore* die Belichtungszeiten der Kamera stetig angepasst werden, was das Feature-Tracking entsprechend einschränkt. Im Vergleich zu reinen optischen Verfahren kann *ARCore* jedoch mit den Daten der IMU die Bewegungen weiterverfolgen, auch wenn diese stärker fehlerbehaftet sind.

Tab. 1) Genauigkeit und Präzision des Verfahrens.

	Durchschnittlicher Messfehler in cm	Standardabweichung der Messfehler in cm
Messpunkt 1	8,0	3,5
Messpunkt 2	12,4	7,7
Messpunkt 3	18,8	3,0
Gesamt	12,7	6,8

3. Zusammenfassung

Das *Codeloc*-initialisierte Verfahren stellt eine leistungsstarke Kombination von absoluter und relativer Ortung dar. Es ist in der Lage, die absolute Pose des Gerätes im Bezugssystem mit einer Frequenz von 30 Hz zu bestimmen und liefert dabei zunächst eine Genauigkeit im Dezimeterbereich, unabhängig von erkannten Landmarken.

Ein Problem stellt der größerwerdende Drift der *ARCore*-Ortung dar. Aufbauend muss daher ein Konzept bzw. Verfahren entwickelt werden, um die Ortung bei Sichtung einer Landmarke neu zu initialisieren, ohne dass die aktuelle Bewegung des Gerätes gestoppt werden muss. Nach aktuellem Entwicklungsstand müsste die *ARCore*-Sitzung hierfür gänzlich neu gestartet werden, was jedoch zu viel Zeit in Anspruch nimmt. Dabei sollte auch untersucht werden, wie die IMU-Daten bei dem Übergabe-Prozess von *Codeloc* zu *ARCore* eingebunden werden können, um Bewegungen vor der vollständigen Initialisierung von *ARCore* zu erfassen und dem Nutzer mitzuteilen, dass die Initialisierung ungültig ist und wiederholt werden sollte.

Das präzise Verfolgen der Kamerapose hat sich in den vergangenen Jahren zu einem Schwerpunkt in Wissenschaft und Forschung entwickelt. Gerade das Aufleben der Augmented Reality im Consumer-Bereich stellt einen starken Antrieb für dieses Thema dar. Das hier vorgestellte Verfahren ermöglicht es dabei, nicht nur die relativen Bewegungen des Gerätes zu ermitteln, sondern diese auch in einen absoluten Kontext für das Bezugssystem zu setzen, ohne dabei Leistung in Form der Ortungsfrequenz einzubüßen. Damit bietet es einen großen Mehrwert für die Bereitstellung von Location-Based-Services.

LITERATUR

- Google Inc. (2018a) ARCore, Fundamental Concepts. <https://developers.google.com/ar/discover/concepts>. Accessed 18 Jul 2018
- Google Inc. (2018b) Github | arccore-android-sdk. <https://github.com/google-ar/arccore-android-sdk>. Accessed 14 Sep 2018
- Handrich J (2018) Entwicklung einer Softwarebibliothek für Mobilgeräte zur Innenraumortung mittels Bildverarbeitung und Bewegungssensorik. Masterarbeit, Wildau
- Kárník J, Streit J (2016) Summary of available indoor location techniques. IFAC-PapersOnLine 49:311–317. doi:10.1016/j.ifacol.2016.12.055
- Lane N, Miluzzo E, Lu H, Peebles D, Choudhury T, Campbell A (2010) A survey of mobile phone sensing. IEEE Commun. Mag. 48:140–150. doi:10.1109/MCOM.2010.5560598
- Lepetit V, Moreno-Noguer F, Fua P (2009) EPnP; An Accurate O(n) Solution to the PnP Problem. International Journal of Computer Vision 81:155–166. doi:10.1007/s11263-008-0152-6
- Levenberg K (1944) A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. Quart. Appl. Math. 2:164–168. doi:10.1090/qam/10666
- Marquardt DW (1963) An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics 11:431–441. doi:10.1137/0111030
- Nerurkar E, Lynen S, Zhao S (2017) System and method for concurrent odometry and mapping. Patent US15595617
- OpenCV (2018) OpenCV; Open Source Computer Vision Library. <https://opencv.org/>. Accessed 14 Sep 2018
- Sturm J (2017) The Computer Vision Technology Underlying ARCore, München
- Vandenhouten R (2018a) INNOMAP; Innenbereichs-Ortungssystem auf der Basis einer Bildanalyse markanter Punkte. Forschungsbericht 2017 2018:32. doi:10.15771/FB_2018_1
- Vandenhouten R (2018b) Orten eines mobilen Endgeräts unter Nutzung von optisch detektierbaren Landmarken. Patent DE 10 2012 221 921
- Vandenhouten R, Kistel T, Wendlandt O (2014) A method for optical indoor localization of mobile devices using multiple identifiable landmarks. Paper, Wildau
- Wei J, Mullen T (2018) The Instant Motion Tracking Behind Motion Stills AR. <https://ai.googleblog.com/2018/02/the-instant-motion-tracking-behind.html>. Accessed 10 Aug 2018

AUTOREN

Jan Handrich, M. Eng.
Prof. Dr. rer. nat. Ralf Vandenhouten
Forschungsgruppe Telematik
Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften
Technische Hochschule Wildau

E-Mail für Korrespondenz:
ralf.vandenhouten@th-wildau.de



Impact of the plasma power on plasma-induced increase in absorption of fused silica

Christoph Gerhard*, Emilie Letien, Thomas Cressent and Mandy Hofmann

Zusammenfassung

Die Laserbearbeitung von Quarzglas hat in den letzten Jahrzehnten an Bedeutung gewonnen. Dabei besteht die Herausforderung darin, die hohe Transmission dieses Mediums zu überwinden. Hierzu stellt eine Plasmabehandlung mittels wasserstoffhaltigen Prozessgasen einen Ansatz dar. Dabei wird eine oberflächennahe Glasschicht durch Entfernung von Sauerstoff und Implantation von Wasserstoff chemisch modifiziert, woraus die Ausbildung optisch aktiver Defekte und ein Anstieg der Absorption resultieren. Vor diesem Hintergrund wurde in dieser Arbeit der Einfluss der Plasmaleistung auf die plasmainduzierte Absorptionssteigerung untersucht. Die höchste Effizienz der Plasmabehandlung wurde bei der geringsten applizierten Leistung erzielt, wohingegen bei höheren Plasmaleistungen nennenswert geringere Absorptionssteigerungen beobachtet wurden. Dieser Effekt wird auf den Zerfall von Plasmaspezies, die für eine Ausbildung optisch aktiver Defekte benötigt werden, zurückgeführt, welcher mit ansteigender Leistung und dem damit einhergehenden Anstieg der elektrischen Feldstärke im Plasma anwächst. Diese Erkenntnis ist von hohem Interesse für ein umfassendes Verständnis von Plasma-Glas-Wechselwirkungen.

Abstract

In the last decades, laser machining of fused silica has gained in importance where the main challenge is to overcome the high transmission of this medium in order to achieve surface absorption. One approach is plasma treatment using hydrogenous process gases. In doing so, a near-surface glass layer is chemically modified by a removal of oxygen and an implantation of hydrogen, resulting in the formation of optically active defects and an increase in absorption. Against this background, the impact of the plasma power on plasma-induced increase in absorption of fused silica was investigated in the present work. Here, the highest efficiency of the plasma treatment process was found at the lowest applied plasma power whereas for higher plasma powers, a notably lower increase in absorption was observed. This effect is attributed to the decomposition of plasma species required for initiating the formation of optically active defects within the glass. Such decomposition increases with rising power due to the corresponding increase in electric field strength within the plasma. This finding is of substantial interest for an extensive understanding of plasma-glass interactions.

Résumé

Ces dernières décennies, les applications laser en usine composées de silice fondue ont gagné en importance, l'enjeu consistant à surmonter le problème de la transmission élevée de ce milieu dans le but d'obtenir l'absorption de surface. Une façon d'aborder le problème est d'appliquer le traitement au plasma en utilisant des procédés au gaz de dihydrogène. En agissant ainsi, une couche de verre proche de la surface est modifiée chimiquement par l'ablation d'oxygène et l'implantation d'hydrogène, ce qui provoque la formation de défauts optiquement actifs et l'augmentation de l'absorption. Dans ce contexte, l'impact de la puissance du plasma sur l'augmentation de l'absorption de silice fondue induite par le plasma a été étudié dans cet article. Ici, la meilleure efficacité du traitement au plasma a été constatée à la puissance de plasma la plus faible tandis que pour de plus fortes puissances, une augmentation bien plus faible en absorption a été observée. Cet effet est attribué à la décomposition des espèces de plasma requises dans la formation de défauts optiquement actifs à l'intérieur du verre. Une telle décomposition augmente avec la montée de puissance due à l'augmentation de force du champ électrique dans le plasma. Cette découverte est d'un intérêt considérable pour une compréhension plus poussée des interactions plasma-verre.

1. Introduction

Due to its unique properties, fused silica is one of the most important glasses in modern optical technology. From a manufacture-related point of view, laser-based free form structuring of this medium is of great interest for a number of different fields of application in optics and photonics as for example for the generation of micro lens arrays or diffractive micro optical elements. In the context of laser materials processing, the main advantage of fused silica – its high transparency in the ultraviolet (UV) wavelength range – becomes a challenging task; the dominating bulk absorption gives rise to poor machinability of fused silica surfaces. Quite different approaches were developed in the last few decades in order to overcome this issue and to achieve sufficient near-surface absorption for coupling the energy of incident laser light into the material lattice. Apart from the use of ultrashort laser pulses with pulse durations in the pico- or femtosecond range (Utéza et al. 2011), combined techniques based on the application of absorbing coatings on fused silica surfaces are in hand. Here, laser etching at a surface adsorbed layer (LESAL) (Böhme & Zimmer 2004), laser-induced backside wet etching (LIBWE) (Wang et al. 1999), and laser-induced backside dry etching (LIBDE) (Hopp et al. 2006) shall be mentioned.

The latter technique is normally based on the deposition of solid absorbing layers, e.g. made of metal or silicon monoxide. However, increasing surface absorption can also be achieved by another novel approach which was presented in previous work (Brückner et al. 2012, Hoffmeister et al. 2012). Here, a near-surface layer of the glass network is modified by atmospheric pressure plasma treatment due to a chemical reduction of the glass-forming silicon dioxide and the additional implantation of hydrogen (Gerhard et al. 2012, Tasche et al. 2014)¹. The resulting optically active defects within the glass such as oxygen deficiency centres, E⁺-centres or hydrogen

centres feature high absorption in the ultraviolet wavelength range, mainly from approximately 170 to 350 nm (Skuja 1998). In order to initiate such defects and an accompanying increase in absorption, the application of low-temperature plasmas and the use of hydrogenous process gases has turned out to be a suitable and powerful method (Gerhard et al. 2013).

The performance of such plasma treat-

on and a pump periphery for evacuating the chamber. The plasma source is driven by a direct current (DC) power supply where the electrode distance, i.e. the discharge gap, is 120 mm. For plasma treatment, the generator was operated at three different voltages and corresponding currents, resulting in three different powers dissipated in the plasma as listed in Tab. 1.

In the course of the plasma treatment, the pressure was kept constant at

Tab. 1) Operating voltage and corresponding current including the resulting power dissipated in the plasma.

Voltage U in V	Current I in mA	Power $P = U \cdot I$ in W
320	12	3.84
420	24	10.08
520	37	19.24

ment notably depends on the type of the plasma source and discharge, respectively, and the corresponding particular operating factors. At fix plasma parameters, this approach features high efficiency and repeatability; moreover, the basic underlying effects and mechanisms are well understood. However, technical plasmas are well-known to respond sensitively to slight changes in the operation parameters (e.g. operating voltage, pressure etc.) and the impact of variations in such parameters on the above-described glass modification was not yet investigated extensively. Against this background, the impact of the plasma power on the increase in absorption of plasma treated fused silica was investigated systematically in this work.

2. Material and Methods

In the present work, glass plates made of synthetic fused silica were examined. In order to achieve plasma-induced modification of the optical properties, the glass samples were treated in a homemade plasma generator. This plasma generator consists of a cylindrical vacuum chamber made of stainless steel, a plasma source given by two opposite electrodes for plasma igniti-

$p = 70$ Pa in all cases². The plasma process gas was pure hydrogen (H₂) and treatment was performed in successive steps of 5 minutes each up to a total treatment duration of 30 minutes. In order to detect the treatment duration-dependency of the plasma-induced increase in absorption, the transmission of the samples was measured after each step using an UV/VIS/NIR spectrometer (Lambda 1050 from PerkinElmer, Inc.).

Moreover, a further series of plasma treatment was performed where samples were exposed to the plasma for 30 minutes without any interruption. In the course of this treatment, the composition of the plasma within the vacuum chamber was monitored via emission spectroscopy employing an UV/VIS spectrometer (USB 2000 from Ocean Optics, Inc.). Here, spectra were taken at the beginning ($t = 0$ min.) and at the end of the plasma treatment ($t = 30$ min). Finally, the particular difference spectrum of both spectra was calculated in order to visualise and identify significant changes in plasma

² At this pressure, a medium vacuum is formed in the vacuum chamber. Since the mean free length of path of such a vacuum amounts to some millimetres, the number of collisions within the plasma volume and the accompanying de-excitation of plasma species are reduced.

¹ Such plasma-induced modification of glass and the accompanying increase in near-surface absorption allows a reduction in laser energy required for ablation by a factor of 4.6.

composition via comparing the line intensities of spectral lines of interest at the beginning and the end of the treatment process.

3. Results and Discussion

The plasma treatment procedure as described in Section 2 leads to notable increase in absorption as shown in Fig. 1. Here, the increase in absorption is visualised by the difference in transmission spectra of fused silica taken after and before plasma treatment for 30 minutes. Generally, an increase in absorption

is found in the ultraviolet wavelength range from approximately 200 to 400 nm for the lowest applied plasma power whereas this effect does not occur for higher plasma powers. This can be explained by a certain impact of the plasma power on the nature of the plasma as discussed below.

The drastic increase in absorption for the lowest plasma power shown in Fig. 1 can be attributed to a plasma-induced chemical reduction of silicon dioxide to substoichiometric oxygen-oxide compounds and an additional implantation of hydrogen into the glass network as

nisms lead to the formation of optically active defects such as oxygen deficiency centres, E'-centres or hydrogen centres which feature high absorption in the wavelength range concerned.

UV-absorbing oxygen deficiency centres are given by (i) simple and neutral oxygen vacancies or oxygen divacancies (Nishikawa et al. 1994), (ii) dicoordinated silicon (Skuja et al. 1984), and (iii) E'-centres (see Fig. 2), which are generally speaking unpaired electrons in silicon dioxide tetrahedrons³ due to oxygen vacancies, thus also referred to as positively charged oxygen vacancies (O'Reilly & Robertson 1983). Finally, hydrogen centres or H(I)-centres are formed by single hydrogen atoms attached to a silicon atom of a tetrahedron (Radtsig & Bobyshev 1986), thus replacing an oxygen atom as shown in Fig. 2.

A chemical reduction in terms of a release of oxygen from the fused silica can easily be induced by hydrogenous

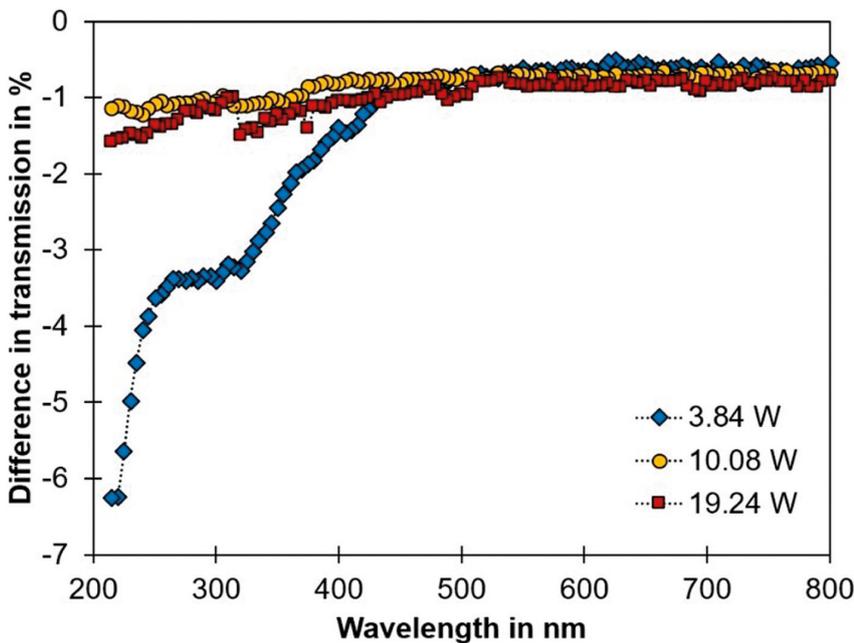
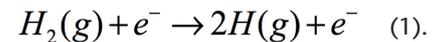


Fig. 1) Plasma-induced difference in transmission after plasma treatment for 30 minutes vs. wavelength for three different plasma powers.

in the visible wavelength range by approximately 1% can be observed after plasma treatment. It further turns out

already confirmed via secondary ion mass spectroscopy (SIMS) in previous work (Gerhard et al. 2012, Tasche et al.

plasma. By the plasma discharge, the process gas hydrogen (H₂) is dissociated by electron (e⁻) impact according to



This process is quite easy to induce at low power since the hydrogen molecule features a low dissociation energy of merely 4.5 eV. Plasma-induced dissociation thus leads to the formation of atomic hydrogen (H) which features an extremely high chemical reactivity (Shirai et al. 2002). When getting in contact with the fused silica (SiO₂) surface, a

Tab. 2) Optically active defects in fused silica related to the deficiency of oxygen (data taken from (Skuja 1998)).

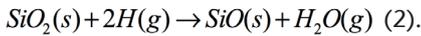
Defect	Absorption peak positions in nm
Oxygen deficiency centres	229.60-243.11, 393.60
E'-centres	196.80-206.64, 213.77-217.52
Hydrogen centres	206.64-258.30

that a significant increase in absorption

2014). As listed in Tab. 2, these mecha-

³ The basic structural element of silicon dioxide and fused silica is a tetrahedron consisting of one silicon atom and four oxygen atoms where each oxygen atom appertains to two silicon atoms.

possible reaction is the formation of silicon monoxide (SiO) and water (H₂O), following from



Consequently, oxygen is removed from the glass matrix and the absorption in the ultraviolet wavelength range is increased. In the present case, such chemical reduction was confirmed by emission spectroscopic diagnostic of the plasma during the treatment process. For this purpose, difference spectra were calculated as described in Section 2. As shown in Fig. 3, a notable increase in the line intensity of two characteristic oxygen species, i.e. singly ionised oxygen (OII) at an emission wavelength of 376.25 nm (Wenåker 1990) and doubly ionised oxygen (OIII) at an emission wavelength of 745.54 nm (Luo et al. 1989), can be observed in the course of the plasma treatment process.

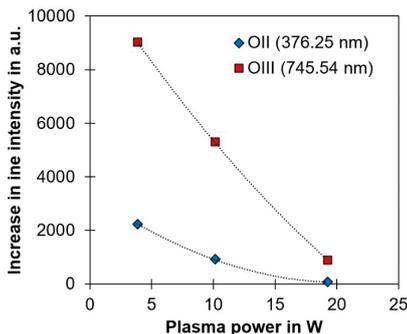


Fig. 3) Increase in line intensity of two selected oxygen species, OII and OIII, given by the difference of the particular line intensities at the end and the beginning of the treatment process vs. plasma power.

It can be stated that in any case, an increase in oxygen concentration in the plasma volume within the vacuum chamber was detected where the oxygen most likely originates from the glass network forming silicon dioxide. It can further be seen that the oxygen concentration increases with decreasing plasma power. This behaviour correlates well with the plasma-induced decrease in transmission where the highest increase is found for the lowest plasma power as shown in Fig. 4a). Here, the dependency of the glass transmission on the plasma treatment duration for the three applied plasma powers is shown at a discrete wavelength of 248 nm. This wavelength

was chosen since the corresponding laser source, the krypton fluoride (KrF) excimer laser, is well-established and commonly used in lasers materials processing.

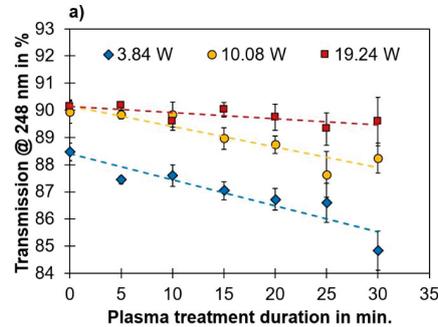
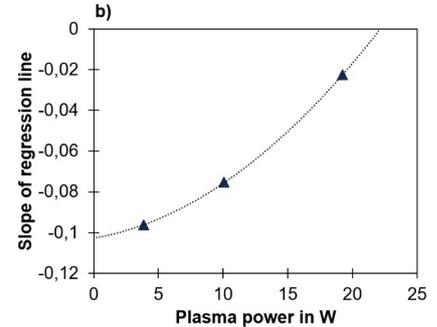


Fig. 4) Transmission at 248 nm vs. plasma treatment duration for three different plasma powers (a) and slope of the particular linear regression lines vs. plasma power (b).

increased as well⁵. Thus, the amount of atomic hydrogen is decreased whereas the amount of ionised hydrogen is increased. Consequently, the concentration of the actually needed species



When taking a closer look on the trend as indicated by the particular linear regression lines⁴, it turns out that the slope of these lines directly represents the differences in plasma treatment efficiency where the highest steepness is found for the lowest plasma power, see Fig. 4b). This obvious decrease in plasma treatment efficiency with increasing plasma power is an interesting point and should be taken into account in practice. It confirms the well-known fact that for plasma-based processes the ideal working range is strongly power-dependent and that the application of high plasma powers or energies may even lead to contrary and unwanted effects and results.

From a physical point of view, the behaviour observed in the present case can be explained by a reduction of the plasma species needed for inducing optically active defects with increasing plasma power due to two different and interacting main effects: First, the by-product of the underlying chemical reaction is water as expressed by Eq. 2. This molecule is based on a covalent binding, a.k.a. atomic bond, where electrons are shared by the involved atoms, oxygen and water. When increasing the plasma power, the ionisation degree of the plasma is

for hydrogen-induced chemical reduction, the electrically neutral hydrogen atom (Gerhard et al. 2014), is reduced and the treatment efficiency decreases. Second, increasing the discharge voltage and plasma power, respectively, leads to an increase in the electric field strength E within the plasma volume. This may lead to an increase in losses of electrons at walls due to drift and diffusion as described by the drift-diffusion-approximation (Becker & Loffhagen 2013), given by

$$J_e = -n_e \cdot \mu_e \cdot E - D \cdot \Delta c_e \quad (3).$$

According to this model, the electron flux J_e depends on the number of electrons n_e , the electron mobility μ_e , the electric field strength E , the diffusion coefficient D and the electron concentration gradient Δc_e . Here, the expression $n_e \cdot \mu_e \cdot E$ denotes the drift component and the second term, $D \cdot \Delta c_e$, represents diffusion. The mechanisms of drift and diffusion finally lead to ambipolar diffusion of negatively and positively charged plasma species, i.e. electrons and ions, towards the wall of the vacuum chamber of the plasma generator. In case of hydrogen, this process is approximately 43-times faster for electrons than for ions⁶. Thus, electrons are preferentially removed from the plasma volume (Phelps 1990) and cannot

⁵ For comparison, the ionisation energy (13.6 eV) of hydrogen is approximately 3 times higher than its dissociation energy (4.5 eV).

⁶ The minimum value of the ion-electron velocity ratio is given by the square root of the ratio of the ion mass (1.67x10⁻²⁷ kg) and the electron mass (9.11x10⁻³¹ kg).

⁴ The approach of linear regression was chosen due to the fact that a hydrogen plasma-induced change in transmission and the plasma treatment duration feature a linear interrelationship (Gerhard et al. 2013).

contribute to the dissociation of hydrogen molecules via electron impact. An effect, which further contributes to the observed decrease in efficiency by reducing the number of hydrogen atoms within the plasma when increasing the plasma power.

4. Conclusions

As shown by the results of the present work, the electrical power dissipated in a plasma has a significant impact on the efficiency of plasma treatment for increasing the absorption of fused silica. It was shown that absorption can be increased efficiently when applying plasma treatment at comparatively low power whereas the application of high powers leads to poor results in terms of decrease in transmission. This effect is most likely due to a reduction in concentration of plasma species required for initiating the wanted effect, i.e. the formation of optically active glass defects such as oxygen vacancies as well as the formation of E'- and H(I)-centres by atomic hydrogen provided by the plasma. The resulting plasma-induced increase in absorption allows improving the quality and efficiency of laser-based glass structuring and machining methods and is thus an advantageous effect in this context. Even though this approach was already investigated and reported in previous work the present contribution is the first study on the impact of the plasma power on the plasma treatment process. It is thus a valuable and important basis for further detailed investigations of the underlying mechanisms and effects which occur during plasma-induced modification of optical properties of glasses.

REFERENCES

- Becker MM, Loffhagen D (2013) Enhanced reliability of drift-diffusion approximation for electrons in fluid models for nonthermal plasmas. *AIP Advances* 3(1):12108. doi: 10.1063/1.4775771
- Böhme R, Zimmer K (2004) Low roughness laser etching of fused silica using an adsorbed layer. *Appl Surf Sci* 239(1):109–116. doi: 10.1016/j.apsusc.2004.05.095
- Brückner S, Hoffmeister J, Ihlemann J, Gerhard C, Wieneke S, Viöl W (2012) Hybrid Laser-Plasma Micro-Structuring of Fused Silica Based on Surface Reduction by a Low-Temperature Atmospheric Pressure Plasma. *JLMN* 7(1):73–76. doi: 10.2961/jlmn.2012.01.0014
- Gerhard C, Dammann M, Wieneke S, Viöl W (2014) Sequential Atmospheric Pressure Plasma-Assisted Laser Ablation of Photovoltaic Cover Glass for Improved Contour Accuracy. *Micromachines* 5(3):408–419. doi: 10.3390/mi5030408
- Gerhard C, Tasche D, Brückner S, Wieneke S, Viöl W (2012) Near-surface modification of optical properties of fused silica by low-temperature hydrogenous atmospheric pressure plasma. *Opt Lett* 37(4):566–568. doi: 10.1364/OL.37.000566
- Gerhard C, Weihs T, Tasche D, Brückner S, Wieneke S, Viöl W (2013) Atmospheric Pressure Plasma Treatment of Fused Silica, Related Surface and Near-Surface Effects and Applications. *Plasma Chem Plasma Process* 33(5):895–905. doi: 10.1007/s11090-013-9471-7
- Hoffmeister J, Gerhard C, Brückner S, Ihlemann J, Wieneke S, Viöl W (2012) Laser Micro-Structuring of Fused Silica Subsequent to Plasma-Induced Silicon Suboxide Generation and Hydrogen Implantation. *Physics Procedia* 39:613–620. doi: 10.1016/j.phpro.2012.10.080
- Hopp B, Vass C, Smausz T, Bor Z (2006) Production of submicrometre fused silica gratings using laser-induced backside dry etching technique. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 39(22):4843–4847. doi: 10.1088/0022-3727/39/22/015
- Luo D, Pradhan AK, Saraph HE, Storey PJ, Yu Y (1989) Atomic data for opacity calculations. X. Oscillator strengths and photoionisation cross sections for O III. *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 22(3):389–406. doi: 10.1088/0953-4075/22/3/006
- Nishikawa H, Watanabe E, Ito D, Ohki Y (1994) Decay kinetics of the 4.4-eV photoluminescence associated with the two states of oxygen-deficient-type defect in amorphous SiO₂. *Phys Rev Lett* 72(13):2101–2104. doi: 10.1103/PhysRevLett.72.2101
- O'Reilly EP, Robertson J (1983) Theory of defects in vitreous silicon dioxide. *Phys. Rev. B* 27(6):3780–3795. doi: 10.1103/PhysRevB.27.3780
- Phelps AV (1990) The Diffusion of Charged Particles in Collisional Plasmas: Free and Ambipolar Diffusion at Low and Moderate Pressures. *J Res Natl Inst Stand Technol* 95(4):407–431. doi: 10.6028/jres.095.035
- Radtzig VA, Bobyshev AA (1986) Twofold coordinated Si and Ge atoms and "hydrogen" paramagnetic centers in amorphous SiO₂ and GeO₂. *phys. stat. sol.* (b) 133(2):621–627. doi: 10.1002/pssb.2221330223
- Shirai H, Fujimura Y, Jung S (2002) Formation of nanocrystalline silicon dots from chlorinated materials by RF plasma-enhanced chemical vapor deposition. *Thin Solid Films* 407(1-2):12–17. doi: 10.1016/S0040-6090(02)00005-6
- Skuja L (1998) Optically active oxygen-deficiency-related centers in amorphous silicon dioxide. *J Non-Crystalline Solids* 239(1-3):16–48. doi: 10.1016/S0022-3093(98)00720-0
- Skuja LN, Streletsky AN, Pakovich AB (1984) A new intrinsic defect in amorphous SiO₂: Twofold coordinated silicon. *Solid State Communications* 50(12):1069–1072. doi: 10.1016/0038-1098(84)90290-4

Tasche D, Gerhard C, Ihlemann J, Wieneke S, Viöl W (2014) The impact of O/Si ratio and hydrogen content on ArF excimer laser ablation of fused silica. *JEOS:RP* 9. doi: 10.2971/jeos.2014.14026

Utéza O, Sanner N, Chimier B, Brocas A, Varkentina N, Sentis M, Lassonde P, Légaré F, Kieffer JC (2011) Control of material removal of fused silica with single pulses of few optical cycles to sub-picosecond duration. *Appl Phys A Mater Sci Process* 105(1):131–141. doi: 10.1007/s00339-011-6469-y

Wang J, Niino H, Yabe A (1999) One-step microfabrication of fused silica by laser ablation of an organic solution. *Appl Phys A Mater Sci Process* 68(1):111–113. doi: 10.1007/s003390050863

Wenäker I (1990) The spectrum of singly ionized oxygen, O II. *Phys. Scr.* 42(6):667–684. doi: 10.1088/0031-8949/42/6/008

AUTHORS

Prof. Dr. rer. nat. Christoph Gerhard
Dr. rer. nat. Mandy Hofmann
 Fachbereich Ingenieur- und Naturwissenschaften
 Technische Hochschule Wildau

Emilie Letien
 Institut Universitaire de Technologie A de Lille
 Département Mesures Physiques

Thomas Cressent
 Institut Universitaire de Technologie A de Lille
 Département Chimie

E-Mail for correspondence :
 christoph.gerhard@th-wildau.de



Erwärmung von Materialien und Werkstoffen durch Anwendung von Mikrowellentechnologien

Lutz Hartmann, Tiberiu-Mihai Tatai, Mario Kaiser und Christian Dreyer*

Zusammenfassung

Die Erwärmung unterschiedlicher Materialien im Kontext verschiedener Anwendungen kann anhand der Bestrahlung mit Mikrowellen in geeignet konstruierten Öfen erfolgen. Der vorliegende Beitrag beginnt mit einer Vorstellung der mikroskopischen Mechanismen der Erwärmung von Materie mittels Mikrowellen sowie einem Abriss ihrer theoretischen Beschreibung. Im Folgenden werden die breitbandige dielektrische Spektroskopie und die Simulation elektromagnetischer Felder als Hilfsmittel eingeführt, die Effizienz des mikrowellenbasierten Heizens für bestimmte Materialien vorab einschätzen zu können. Nach der Vorstellung zweier unterschiedlicher Mikrowellenanlagen, namentlich eines Kammer- und eines Durchlaufmikrowellenofens, wird die thermische Behandlung unterschiedlicher Materialien mittels Mikrowellen an drei Beispielen illustriert.

Abstract

The heating of various materials in the context of different applications can be achieved by irradiation with microwaves in properly constructed microwave ovens. This article starts with an introduction to the microscopic mechanisms of heating of matter followed by a survey of their theoretical description. Both, broadband dielectric spectroscopy and the simulation of electromagnetic fields will be presented as convenient tools to estimate the efficiency of microwave-based heating of certain materials prior to any experiment. In addition to an introduction of two different microwave ovens, namely a chamber oven and a throughput oven, the thermal treatment of different materials is illustrated by three examples.

1. Einführung

Neben der konventionellen thermischen Behandlung von Materialien, wie etwa das Härten von faserverstärkten Kunststoffen in Öfen, haben in den letzten Jahren alternative Heizverfahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Eine besondere Rolle nimmt hierbei die Erwärmung von Materialien mittels Mikrowellen ein, die auf der Umwandlung elektromagnetischer Feldenergie in Wärme beruht. Die mikroskopischen Mechanismen, die diesem Erwärmungsprozess zugrunde liegen, sind die dissipative Reorientierung permanenter Dipolmomente und die dissipative Bewegung von Ladungsträgern in der Probe unter dem Einfluss des äußeren elektromagnetischen Feldes. Die Effizienz dieser Energiewandlung ist durch die komplexe dielektrische Funktion und ihre Temperatur- bzw. Frequenzabhängigkeit bestimmt, die

in einem ausreichend weiten Temperatur- und Frequenzfenster mittels der breitbandigen dielektrischen Spektroskopie gemessen werden kann. Mit diesen Messungen eröffnet sich auch die Möglichkeit, die elektromagnetischen Felder und, daraus abgeleitet, die Verteilungen der Leistungsverlustdichte in Mikrowellenöfen zu simulieren. Im vorliegenden Beitrag wird nach einer Darlegung der Grundlagen des Heizens mittels Mikrowellen das Zusammenspiel zwischen dielektrischen Messungen und Simulationen diskutiert. Darüber hinaus werden praktische Beispiele für die Erwärmung unterschiedlicher Materialien mittels Mikrowellen angegeben und diskutiert.

2. Erwärmung von Materialien mittels Mikrowellen

Es werden im Folgenden für die beiden maßgeblichen Mechanismen der Erwärmung von Materialien mittels Mikrowellen die jeweils grundlegenden Zusammenhänge dargelegt. Dabei handelt es sich um das für Dielektrika relevante sog. dielektrische Heizen, das aufgrund einer materialabhängigen Eindringtiefe als volumetrisches Heizen angesehen werden kann. Im Falle elektrisch leitender Materialien ist hingegen das sog. Wirbelstrom-Heizen relevant, das aufgrund vergleichsweise geringer Eindringtiefen als ein Heizprozess nur oberflächennaher Bereiche anzusehen ist. Für eine ausführliche Ableitung und Diskussion beider Mechanismen sei auf die Literatur verwiesen (Feher 2009, Imenokhoyev et al. 2012, Meredith 2007, Perelaer et al. 2006, Zhang et al. 2017).

* korrespondierender Autor

2.1 Dielektrisches Heizen

Das dielektrische Heizen basiert auf der Absorption elektromagnetischer Wellen in Dielektrika, die permanente molekulare Dipolmomente aufweisen. Deren durch das äußere elektromagnetische Feld induzierte Fluktuationen sind dissipativ infolge mikroskopischer Reibung, so dass sich ein äußeres Mikrowellenfeld in eine Erwärmung des Materials übersetzt. Im Unterschied zu konventionellen Öfen, bei denen der Wärmetransport stets durch die Materialoberfläche erfolgt, findet beim dielektrischen Heizen der Wärmeeintrag in das Material im Wesentlichen innerhalb einer Eindringtiefe d_p statt, für die gilt: $d_p \sim \sqrt{\frac{\epsilon''}{f\epsilon''}}$ (Meredith 2007). Dabei sind ϵ' sowie ϵ'' der frequenz- und temperaturabhängige Real- bzw. Imaginärteil der komplexen dielektrischen Funktion bzw. Permittivität $\epsilon^*(f, T) = \epsilon'(f, T) - i\epsilon''(f, T)$ und f die Frequenz des elektromagnetischen Feldes (bei Mikrowellenöfen typischerweise 2,45 GHz). Für die innerhalb der Eindringtiefe dissipierte Leistungsdichte p gilt $p \sim f \epsilon'' E_i^2$ (Imenokhoyev et al. 2012), wobei E_i die Feldstärke im Inneren des Materials ist. Aus den Formeln zur Eindringtiefe und zur Leistungsverlustdichte ergibt sich unmittelbar die Bedeutung der in Abschnitt 3.1 dargestellten Messung der komplexen dielektrischen Funktion $\epsilon^*(f, T)$ im relevanten Frequenz- bzw. Temperaturbereich, um die Effizienz der Erwärmung von Dielektrika vorab abschätzen oder simulieren zu können.

Die hauptsächlichen Vorteile des dielektrischen Heizens gegenüber konventionellen Heizprozessen sind der direkte Energieeintrag in das Material und die daraus resultierende kürzere Aufheizzeit. Dem steht die Beschränkung auf Materialien gegenüber, die aufgrund ihrer dielektrischen Permittivität eine effektive Wandlung von elektromagnetischen Wellen in Wärme zulassen. Dieser Punkt lässt sich bei der Härtung von Reaktivharzen und daraus hergestellten Composites durch die Zugabe von Partikeln, die ihrerseits die dielektrischen Kennwerte modifizieren, entscheidend verbessern (Akhtar et al. 2009, Link 2011, Link 2015).

2.2 Wirbelstrom-Heizen

Wirbelströme werden in einem elektrischen Leiter mit einem elektrischen Widerstand in einem sich zeitlich ändernden Magnetfeld induziert und führen in der Folge zu einer Erwärmung des Leiters. Die Heiz-Leistung des Wirbelstromheizens ist gegeben zu $P \sim I^2 \sqrt{\mu f / \sigma}$ mit der magnetischen Permeabilität μ , der elektrischen Leitfähigkeit σ des Leiters und der Frequenz f des äußeren elektromagnetischen Feldes (Zhang et al. 2017). Die Wirbelströme erzeugen wiederum ein Magnetfeld, das gemäß der Lenzschen Regel seiner Ursache entgegenwirkt und zu einer Verdrängung des Stromflusses aus der Leitermitte führt (Skin-Effekt). Die daraus resultierende sog. Leitschichtdicke δ ist gegeben zu $\delta = 1/\sqrt{\pi\mu\sigma f}$ (Zhang et al. 2017). Diese Dicke nimmt mit steigender Frequenz ab und beträgt 1 bis 2 μm bei Metallen und Frequenzen $f \approx 1 \text{ GHz}$ (Perelaer et al. 2006).

Aufgrund seiner intrinsischen Eigenschaften, insbesondere der Begrenzung auf elektrisch leitende Materialien und der Beschränkung auf die Erwärmung nur oberflächennaher Bereiche, deren Dicke durch die Eindringtiefe des Skin-Effektes gegeben ist, erscheint das Wirbelstrom-Heizen im Vergleich zum dielektrischen Heizen für praktische Anwendungen weniger relevant. Gegenwärtig untersucht wird jedoch zum einen das mikrowellen-basierte Sintern gedruckter leitfähiger Strukturen zur Einstellung ihrer endgültigen Leitfähigkeit, wobei der mikrowellen-basierte Ansatz insbesondere bei temperaturempfindlichen und gleichzeitig mikrowellentransparenten Substraten herkömmlichen Verfahren überlegen ist (Perelaer et al. 2006, Perelaer et al. 2009). Bei der Mikrowellenbestrahlung von Composites – mit leitfähigen Carbonfasern als Verstärkungsmaterial – ist zum anderen eine vorsichtige Prozessführung zwingend erforderlich, um ein zu starkes Erwärmen des Materials infolge des Wirbelstrom-Heizens der Carbonfasern zu verhindern.

3. Breitbandige dielektrische Spektroskopie und numerische Simulation elektromagnetischer Felder

Aus Abschnitt 2 wird ersichtlich, dass die Kenntnis der komplexen dielektrischen Funktion $\epsilon^*(f, T)$ wie auch der Leitfähigkeit in ihrer Frequenz- und Temperaturabhängigkeit zwingend erforderlich ist, um die o. g. Mechanismen des Heizens mittels Mikrowellen in ihrer Wirkung abschätzen zu können bzw. zu simulieren. Beide Aspekte, die Messung der dielektrischen Kennwerte und die Simulation elektromagnetischer Felder in den Mikrowellenöfen, werden im Folgenden dargelegt.

3.1 Breitbandige dielektrische Spektroskopie

3.1.1 Grundlagen

Gegenstand der dielektrischen Spektroskopie ist die Untersuchung der Reaktion von Materie auf ein äußeres elektrisches Feld E (Kremer & Schönhalz 2002). Ausgehend von den Maxwell'schen Gleichungen lässt sich das elektrische Feld E mit der dielektrischen Verschiebung D im Dielektrikum verknüpfen über $D = \epsilon_0 E + P$, wobei $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ AsV}^{-1} \text{ m}^{-1}$ die Permittivität des Vakuums ist. Die Polarisation P ist die Summe aller N mikroskopischen Dipolmomente p_i , die sich in einem Volumen V befinden: $P = 1/V \sum_{i=1}^N p_i$, wobei die Dipolmomente p_i entweder permanent sind oder durch das elektrische Feld E induziert werden. Schließlich lässt sich die dielektrische Funktion bzw. Permittivität $\epsilon^*(f, T)$ als Verknüpfung zwischen elektrischer Feldstärke E und dielektrischer Verschiebung D einführen: $D = \epsilon_0 E + P = \epsilon^*(f, T) \epsilon_0 E$.

Wird die stationäre Antwort eines Dielektrikums auf ein harmonisches elektrisches Feld $E(t) = E_0 e^{-i\omega t}$ mit der Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ betrachtet, so folgt die Antwort des Dielektrikums dem äußeren Feld mit zeitlicher Verzögerung und es kommt zu einer Phasenverschiebung zwischen elektrischer Feldstärke $E(t)$ und dielektrischer Verschiebung $D(t)$. Die dielektrische Funktion $\epsilon^*(f, T)$ wird dann zweckmäßig als komplexe Größe definiert: $\epsilon^*(f, T) = \epsilon'(f, T) - i\epsilon''(f, T)$. Sie wird durch die Messung der Kapazität eines leeren bzw. mit Dielektrikum

gefüllten Kondensators experimentell zugänglich. Infolge eines äußeren elektrischen Feldes werden in einem Dielektrikum durch die Verschiebung von Ladungsschwerpunkten gegeneinander Dipolmomente erzeugt. Diese tragen gemäß den folgenden Mechanismen zur Verschiebungspolarisation bei:

- Elektronische Polarisation: Die Ladungsschwerpunkte von Elektronenhülle und Kern verschieben sich gegeneinander mit einer Zeitkonstante von $\approx 10^{-14}$ s.
- Ionische Polarisation: Die Verschiebung von Ionen in einem Kristallgitter ist aufgrund der größeren Teilchenmasse um etwa zwei Größenordnungen langsamer.
- Maxwell-Wagner- oder Elektrodenpolarisation: Bewegliche Ladungsträger in der Probe driften aufgrund eines äußeren elektrischen Feldes. Diese Drift wird durch innere Oberflächen oder die Elektroden blockiert und es tritt eine zusätzliche Polarisation auf.

Der bisher diskutierte Prozess der dielektrischen Relaxation setzte ideal isolierende Dielektrika voraus. Er ist oft durch eine elektrische Leitfähigkeit aufgrund beweglicher Ladungsträger in einer realen Probe überlagert. Diese Leitfähigkeit führt zu einer Stromdichte j im Material, für die sich schreiben lässt $j = \sigma^*(f, T)E$ mit $\sigma^*(f, T) = \sigma'(f, T) - i\sigma''(f, T)$ als komplexer Leitfähigkeit (Ohmsches Gesetz). Im Falle einer rein ohmschen Gleichstromleitfähigkeit σ_0 erhält man einen Beitrag zum dielektrischen Verlust ϵ'' von $\sigma_0 \omega^{-s} a/\epsilon_0$. Hierbei ist s ein Exponent mit $0 < s < 1$ und a ist ein Korrekturfaktor.

Eine Beschreibung des vollständigen Spektrums $\epsilon^*(f, T)$ erfolgt zumeist mittels der verallgemeinerten Relaxationsfunktion von Havriliak und Negami (Kremer et al. 2002), die in der Frequenzdomäne gegeben ist zu

$$\epsilon_{HN}^*(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{i\sigma_0 a}{\epsilon_0 \omega^s} + \frac{\Delta\epsilon}{(1 + (i\omega\tau_{HN})^\alpha)^\gamma}$$

mit $\Delta\epsilon$ als Relaxationsstärke und τ_{HN} als Relaxationszeit. Als Zusammenfassung dieses Abschnittes zeigt Abb. 1

exemplarisch die zeitliche Entwicklung des Real- bzw. Imaginärteils der dielektrischen Funktion während der thermischen Härtung eines Phenolharz-Prepregs samt Anpassungen der Havriliak-Negami-Funktion an die Daten.

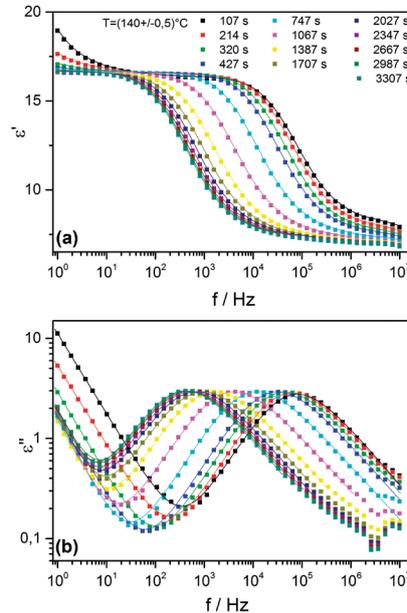


Abb. 1) Dielektrische Spektren ((a) Realteil ϵ' ; (b) Imaginärteil ϵ'') gemessen während der isothermen Härtung eines Phenolharz/Glasfaser-Prepregs: Die Symbole repräsentieren Messwerte, die Linien stellen Anpassungen der HN-Funktion an die Daten dar. Alle Spektren sind durch einen Relaxationsprozess und einen Leitfähigkeitsbeitrag bei niedrigen Frequenzen charakterisiert.

Ein weiteres Beispiel ist in Abb. 2 angegeben: Hier wird gezeigt, wie sich die effektiven dielektrischen Kennwerte eines kommerziellen Cyanatester-Reinharzes (L 10) durch die Zugabe von Partikeln, in diesem Falle Siliziumcarbid SiC, in Konzentrationen von 1 Ma-% und 3 Ma-% modifizieren lassen. Die Daten gelten für eine Frequenz des elektrischen Feldes von 1 GHz und können daher als relevant für die Bestrahlung mit Mikrowellen bei 2,45 GHz angesehen werden.

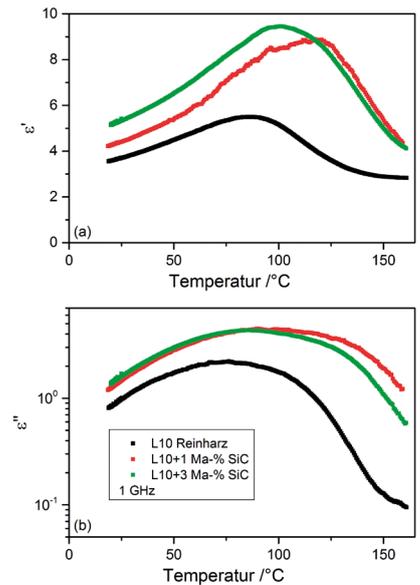


Abb. 2) Dielektrische Spektren ((a) Realteil ϵ' ; (b) Imaginärteil ϵ'') bei 1 GHz in Abhängigkeit von der Temperatur für ein kommerzielles reines Cyanatesterharz (L 10) sowie für zwei Modifizierungen des Harzes mit 1 Ma-% bzw. 3 Ma-% Siliziumcarbid (SiC).

3.1.2 Messtechnische Aspekte

Durch Kombination verschiedener Messprinzipien ist mit der am Fraunhofer IAP, Forschungsbereich Polymermaterialien und Composite PYCO, zur Verfügung stehenden Messtechnik die dielektrische Funktion $\epsilon^*(f, T)$ in einem Frequenzbereich von 10^{-6} Hz bis $3 \cdot 10^9$ Hz sowie in einem Temperaturbereich von -160°C bis 400°C zugänglich (Kremer et al. 2002). Zu ihrer Bestimmung werden zwei verschiedene Messsysteme eingesetzt. Im Frequenzbereich bis zu 10 MHz wird die Probe als Dielektrikum in einem Kondensator realisiert, da die Einflüsse und Verluste durch die Zuleitungen nicht ins Gewicht fallen bzw. kompensiert werden können. Die Leerkapazität C_0 eines Plattenkondensators mit der Fläche A und dem Plattenabstand d ist $C_0 = \epsilon_0 A/d$. Die dielektrische Funktion $\epsilon^*(f)$ erhält man aus der gemessenen komplexen Impedanz $Z^*(f)$ des Systems zu $\epsilon^*(f) = \frac{1}{i2\pi f C_0 Z^*(f)}$.

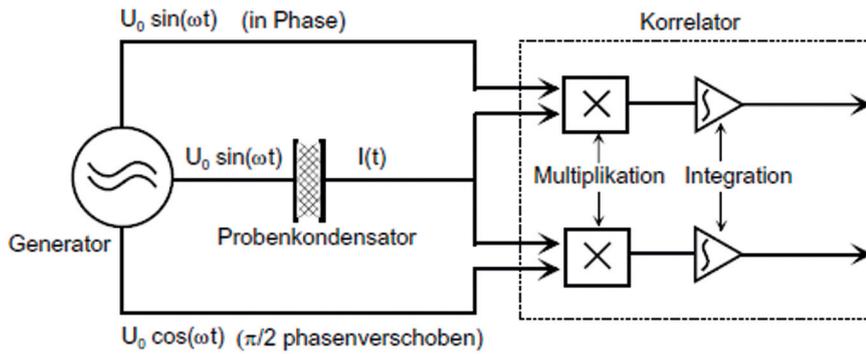


Abb. 3) Funktionsprinzip eines Frequenzganganalysators nach Kremer et al. 2002.

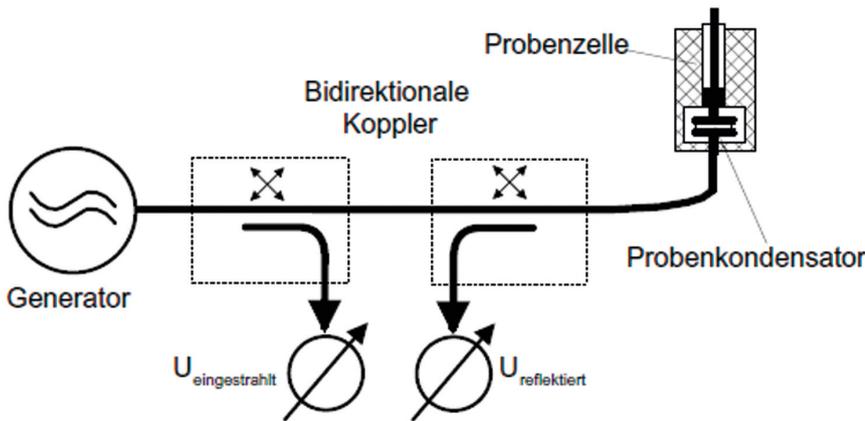


Abb. 4) Funktionsprinzip eines koaxialen Reflektometers nach Kremer et al. 2002.

Im Frequenzbereich bis 10 MHz wird die Impedanz mit Hilfe des in Abb. 3 gezeigten Frequenzganganalysators gemessen. An den Probenkondensator wird eine sinusförmige Spannung angelegt. Der resultierende Strom $I(t)$ wird jeweils mit zwei Signalen korreliert, die in Phase und um 90° phasenverschoben zur Generatorspannung sind. Nach Integration über eine bestimmte Anzahl von Perioden erhält man die fouriertransformierte Antwort des Systems. Daraus lässt sich die komplexe Impedanz und die dielektrische Funktion errechnen. Die Messungen werden mit einem Alpha-Analyser der Firma Novocontrol vorgenommen, mit dem Impedanzen von $10^{-1} \Omega$ bis $10^{14} \Omega$ mit einer Auflösung in $\tan \delta = \epsilon''/\epsilon'$ von weniger als 10^{-5} im gesamten Frequenzbereich gemessen werden können.

Für den Frequenzbereich von 10^6 Hz bis $3 \cdot 10^9$ Hz wird ein koaxiales Reflektometer des Typs E4991A der Firma Agilent eingesetzt, dessen Funktionsprinzip in Abb. 4 skizziert ist. Die Probe befindet sich am Ende eines koaxialen

Hohlleiters. Am Innenleiter wird die Generatorspannung angelegt. Die Spannungen der eingestrahnten und der reflektierten Welle werden mit zwei bidirektionalen Kopplern gemessen. Der komplexe Reflexionskoeffizient r^* ist $r^* = U_{\text{reflektiert}} / U_{\text{eingestrahlt}}$. Ist die Impedanz Z_0 des Koaxialleiters bekannt, dann kann die Impedanz Z^* der Probe

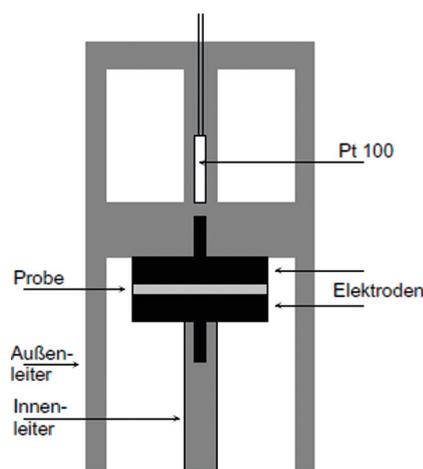


Abb. 5) Probenhalterung des koaxialen Reflektometers nach Kremer et al. 2002.

bestimmt werden zu: $Z^* = Z_0 \frac{1+r^*}{1-r^*}$. Die Auflösung in $\tan \delta$ ist im gesamten Bereich besser als 10^{-2} . Die verwendete Probenzelle ist in Abb. 5 gezeigt.

Die Thermostatisierung der Probe im o. g. Temperaturbereich wird für beide Messsysteme durch eine Stickstoff-Gasstrom-Heizung realisiert. Flüssiger Stickstoff wird verdampft und erwärmt, bevor er den Probenhalter erreicht. Gas- und Proben temperatur werden jeweils mit einem Pt-100-Element gemessen, wobei der Sensor von einer Bohrung im Probenhalter aufgenommen wird. Die Heizung wird von einer Vierkreis-Regel einheit gesteuert, mit der eine minimale Temperaturdrift von $0,05 \text{ K min}^{-1}$ und eine Genauigkeit von $0,05 \text{ K}$ in der absoluten Temperatur erreicht werden können.

3.2 Numerische Simulation elektromagnetischer Felder in Mikrowellenöfen

Neben ihrer Verwendung für die Charakterisierung dielektrischer Materialien im Allgemeinen dienen die dielektrischen Kennwerte auch zur Abschätzung (vgl. Abschnitt 2) bzw. zur Simulation der Erwärmung von Materialien in Mikrowellenöfen. Letzteres wird im Folgenden beispielhaft für die Erwärmung eines modifizierten Harzes im Monomode-Mikrowellenofen (vgl. Abschnitt 4.2) demonstriert, wobei für die Simulation der elektromagnetischen Felder die CST Microwave Studio Suite® verwendet wurde. Grundsätzlich erfordern die Simulationen ein geometrisches Modell des jeweiligen Mikrowellenofens samt des darin befindlichen Werkstückes, wobei den einzelnen Komponenten ihre jeweiligen Materialeigenschaften wie Leitfähigkeit oder dielektrische Permittivität zuzuweisen sind. Da es sich bei den Mikrowellenöfen um „elektrisch große“ Objekte handelt mit Abmessungen typischerweise größer als die Wellenlänge des elektromagnetischen Feldes (ca. 12 cm für eine Mikrowellenfrequenz von 2,45 GHz), ist eine vereinfachte geometrische Modellierung ausreichend. Ferner sind die Quellen des elektromagnetischen Feldes (im Falle der Mikrowellenöfen die Magnetrons) in ihrer Leistung und Abstrahlungscharakteristik zu modellieren. Die Simulation der

elektromagnetischen Felder bedeutet nun, für das jeweilige Modell die Maxwell'schen Gleichungen in Integralform sowie die elektromagnetischen Materialgleichungen unter den durch das Modell vorgegebenen Randbedingungen zu lösen. In der o. g. Software ist hierfür die Finite-Integral-Methode implementiert, mittels derer die Lösung des genannten Systems von Differentialgleichungen auf ein algebraisches Gleichungssystem zurückgeführt wird. Hierfür wird das Volumen des gesamten Modells in ein Gitter hinreichend kleiner quaderförmiger Zellen zerlegt. Indem die Maxwell'schen Gleichungen unter Beachtung der Stetigkeitsbedingungen für jede Zelle angesetzt werden, lassen sich ihre Integrale durch Produkte ersetzen und es gelingt somit der Übergang zu einem algebraischen Gleichungssystem.

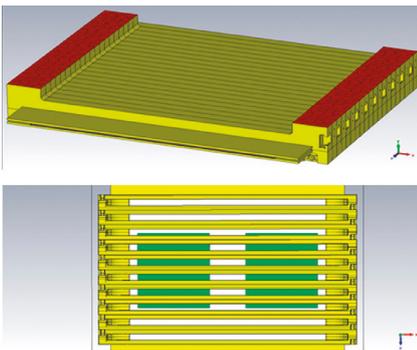


Abb. 6) Gesamtes Modell des Monomode-Mikrowellenofens in der Außenansicht (oben) und in Schnittansicht (unten, die Schnittebene verläuft durch den oberen Teil der Wellenleiter). Die grünen Komponenten sind exemplarische Proben, die im Monomode-ofen bestrahlt werden.

In Abb. 6 ist exemplarisch das gesamte Modell des Monomode-Ofens (vgl. Abschnitt 4.2) in der Außenansicht sowie ein Schnitt durch den oberen Teil der Wellenleiter gezeigt. Die grünen Komponenten in Abb. 6 sind exemplarische Proben auf dem Transportband des Ofens.

Für das Zusammenspiel von breitbandiger dielektrischer Spektroskopie und Simulation der elektromagnetischen Felder im Monomode-Ofen sei auf die Abb. 7 bis 9 verwiesen, in denen der Einfluss der Modifizierung eines reinen Cyanatesterharzes (kommerziell erhältliches L 10) mit Mikrowellenszeptoren (Siliziumcarbid-Körner, Graphen-Flocken und zwei Ruß-Sorten)

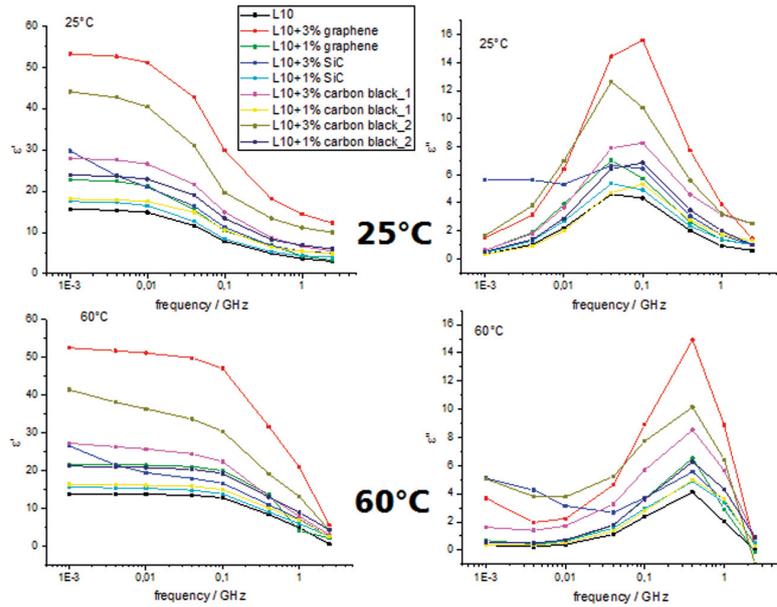


Abb. 7) Dielektrische Spektren des reinen Cyanatesterharzes L10 sowie von Modifizierungen mit Siliziumcarbid, Graphen und zwei Arten Ruß bei 25 °C und 60 °C.

auf das Eindringen des elektrischen Feldes in eine „Harz-Platte“ sowie auf die resultierende Leistungsverlustdichte untersucht wird. Die Abmessungen der Probe sind so gewählt, dass sie den Innenraum des Monomode-Ofens ausfüllen.

Zunächst zeigt Abb. 7, dass bereits im Falle des Reinharzes für Temperaturen zwischen 25 °C und 60 °C der Frequenzbereich zwischen 1 MHz und 3 GHz bestimmt ist durch einen molekularen Relaxationsprozess, dessen Maximumlage in ϵ'' sich mit steigender Temperatur zu höheren Frequenzen verschiebt. Allein aufgrund dieser intrinsischen Frequenz- und Temperaturabhängigkeit der dielektrischen Kennwerte zeigt sich das dielektrische Heizen als ein sich selbst verstärkender (oder u. U. auch abschwächender) Prozess: Die Absorption der Mikrowellen in der Probe bewirkt eine initiale Erwärmung, infolge derer sich die dielektrischen Kennwerte ändern, was wiederum zu einer veränderten Leistungsverlustdichte bzw. Eindringtiefe führt. Die Mikrowellenszeptoren bewirken eine weitere Erhöhung der dielektrischen Kennwerte, deren Ausmaß vom jeweiligen Suszeptor abhängt. Die Daten in Abb. 7 wurden direkt für die elektromagnetischen Simulationen verwendet, indem ein Debye-Relaxationsprozess angenommen und die

Daten auf Frequenzen von 2,45 GHz extrapoliert wurden.

Abb. 8 zeigt exemplarisch für Temperaturen von 25 °C und 60 °C die Simulationsergebnisse für die elektrische Feldstärke E und die Leistungsverlustdichte in der Probe des reinen Cyanatesterharzes L 10. Die Ergebnisse sind in einer Ebene bei der halben Probendicke gezeigt; für die Darstellung der Ergebnisse beider Temperaturen wurde jeweils die gleiche Skala verwendet. Bei Raumtemperatur sind die elektrische Feldstärke und die Leistungsverlustdichte durch stehende Wellen bestimmt, die aus den Wellenleitern des Monomode-Ofens direkt in die Probe einkoppeln. Bei 60 °C führt die Zunahme der dielektrischen Kennwerte offensichtlich zu einer verringerten Eindringtiefe des elektrischen Feldes in das Innere der Harzplatte und folglich auch zu einer Reduktion der Leistungsverlustdichte.

Abb. 9 zeigt für Temperaturen von 25 °C und 60 °C die simulierte Leistungsverlustdichte im reinen Cyanatesterharz L 10 sowie in Formulierungen mit jeweils 3 Ma-% Siliziumcarbid bzw. Graphen. Die markantesten Ergebnisse sind zum einen der Abfall der Leistungsverlustdichte im Inneren der Probe für die Graphen-Formulierung bei 60 °C gegenüber dem reinen Harz sowie zum anderen der moderate

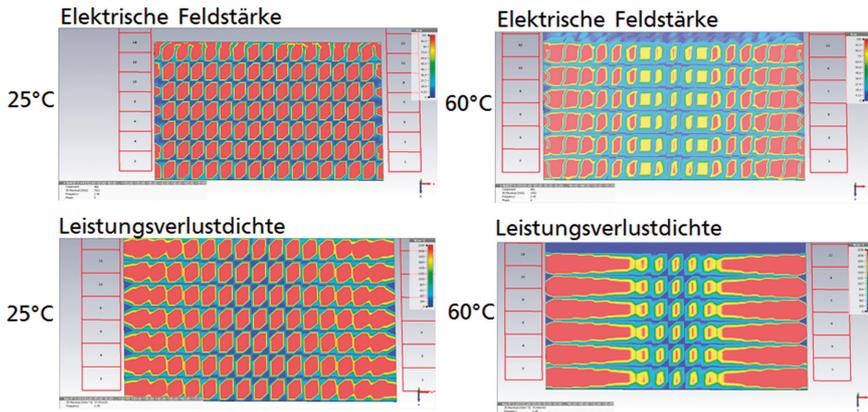


Abb. 8) Simulationsergebnisse der elektrischen Feldstärke (obere Zeile) und der Leistungsverlustdichte (untere Zeile) des reinen Cyanatesterharzes L10 bei 25 °C (linke Spalte) und 60 °C (rechte Spalte).

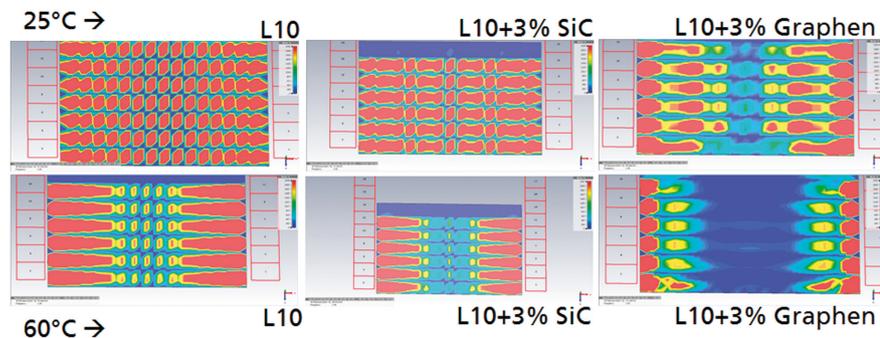


Abb. 9) Leistungsverlustdichte des reinen und modifizierten Cyanatesterharzes L10 bei 25 °C (obere Zeile) und 60 °C (untere Zeile).

Anstieg der Leistungsverlustdichte bei 25 °C für die mit Siliziumcarbid modifizierte Probe. Indem sie den komplexen Zusammenhang zwischen einer Modifizierung des Harzes und der in ihm auftretenden Leistungsverlustdichte bei Mikrowellenbestrahlung aufzeigen, bestätigen die elektromagnetischen Simulationen im Zusammenspiel mit der breitbandigen dielektrischen Spektroskopie ihren Wert für Untersuchungen zur Erwärmung von Materialien mittels Mikrowellenbestrahlung.

4. Mikrowellentechnik – Kammeröfen und Banddurchlauföfen

Die in der Forschungsgruppe *Thermosets im Leichtbau* im Rahmen der Kooperation zwischen der TH Wildau und dem Fraunhofer IAP, Forschungsbereich Polymermaterialien und Composite PYCO, zur Verfügung stehende Mikrowellentechnik umfasst sowohl einen Mikrowellenkammerofen vom Typ Hephais-tos als auch zwei eigens entwickelte Banddurchlauföfen, einen Multimode- und einen Monomode-Applikator, die

im Folgenden eingehender vorgestellt werden. Grundsätzlich ist damit sowohl die Mikrowellenbehandlung großer Bauteile mit Abmessungen im Metermaßstab im Batch-Betrieb als auch dünner Materialien wie Folien, Prepregs und Platten sowie kleiner Bauteilen in einem kontinuierlichen Betrieb möglich.



Abb. 10) Mikrowellenkammerofen Hephais-tos des Herstellers Vötsch.

4.1 Mikrowellen-Kammeröfen Hephais-tos

Abb. 10 zeigt einen Mikrowellenkammerofen vom Typ *Hephais-tos* des Herstellers Vötsch, der auf umfangreichen Vorentwicklungen am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) beruht (Feher & Thumm 2004). Durch den hexagonalen Kammerquerschnitt wird ein homogenes elektromagnetisches Feld in der Probenkammer erreicht. Die Tiefe der Probenkammer beträgt 3 m und der Durchmesser des Hexagon-Umkreises 1,8 m, woraus sich ein maximales Volumen zu behandelnder Proben von ca. 8 m³ ergibt. Entlang der sechs Seitenflächen des die Kammer begrenzenden Hexagons sind insgesamt 36 Magnetrons als Quellen der Mikrowellen platziert (pro Seitenfläche gibt es zwei Reihen mit je drei hintereinander platzierten Magnetrons). Über Schlitzantennen in den außen an den Seitenflächen des Hexagons angebrachten Wellenleitern werden die Mikrowellen in das Innere des Hexagons eingekoppelt. Alle Magnetrons erzeugen elektromagnetische Wellen der Frequenz 2,45 GHz mit einer Leistung von jeweils 0,85 kW.

Die Messung der Materialtemperatur erfolgt in Kontakt mit dem Material über 12 faseroptische Sensoren der Firma Optocon, denen die Temperaturabhängigkeit der Lage der Bandkante eines Halbleiters zugrunde liegt. Das Messprinzip ist insbesondere unempfindlich gegen elektromagnetische

Felder in der Einsatzumgebung und die Sensoren leiten die Felder auch nicht aus dem Mikrowellenofen heraus. Die Leistung aller aktivierten Magnetrons kann durch einen PID-Regler so geregelt werden, dass sich für einen beliebig auswählbaren faseroptischen Sensor ein vorgegebener Sollwert einstellt. Für eine Bewertung der Temperaturverteilung auf der Materialoberfläche ist in der Decke des Hexagons eine Infrarot-Kamera installiert.

4.2 Mikrowellen-Banddurchlauföfen: Monomode- und Multimode- Applikator

Abb. 11 zeigt den aus einem Multimode- und einem Monomode-Applikator bestehenden Mikrowellen-Banddurchlaufofen, wie er als Versuchsanlage zur Mikrowellenbestrahlung flacher Materialien in einem kontinuierlichen Betrieb der Forschungsgruppe am Fraunhofer IAP zur Verfügung steht (Dreyer et al. 2015). Im Monomode-Applikator werden die zu bestrahlenden Proben auf einem glasfaserverstärkten Teflon-Transportband direkt durch die seitlich geschlitzten, insgesamt sechs Wellenleiter geführt, in die jeweils ein Magnetron mit einer Frequenz von 2,45 GHz und einer maximalen Leistung von 1,3 kW einkoppelt. Diese Bauform ermöglicht hohe Feldstärken bei der 1. Harmonischen der eingekoppelten Mikrowellen, begrenzt jedoch die Dicke zu bestrahlender Proben auf 8 mm.

Im Multimode-Applikator werden die in den Magnetrons generierten Mikrowellen analog zum *Hephaistos*-Kammerofen über Schlitzantennen aus außen angebrachten Wellenleitern in das Innere der Kammer eingekoppelt. In diesem Fall sind Dicken des zu bestrahlenden Materials von bis zu ca. 80 mm möglich. Es sind ober- und unterhalb der Kammer jeweils neun Magnetrons angebracht, von denen 16 bei 2,45 GHz laufen und eine Leistung von maximal 1,3 kW bereitstellen. Zwei Magnetrons laufen hingegen bei 5,8 GHz mit einer Leistung von maximal 0,8 kW. Bezogen auf die Standardfrequenz von 2,45 GHz erlaubt die Verwendung der ca. doppelt so großen Frequenz eine Bestrahlung, die bei sonst gleichen Bedingungen gegenüber 2,45 GHz eine verminderte Eindringtiefe und eine

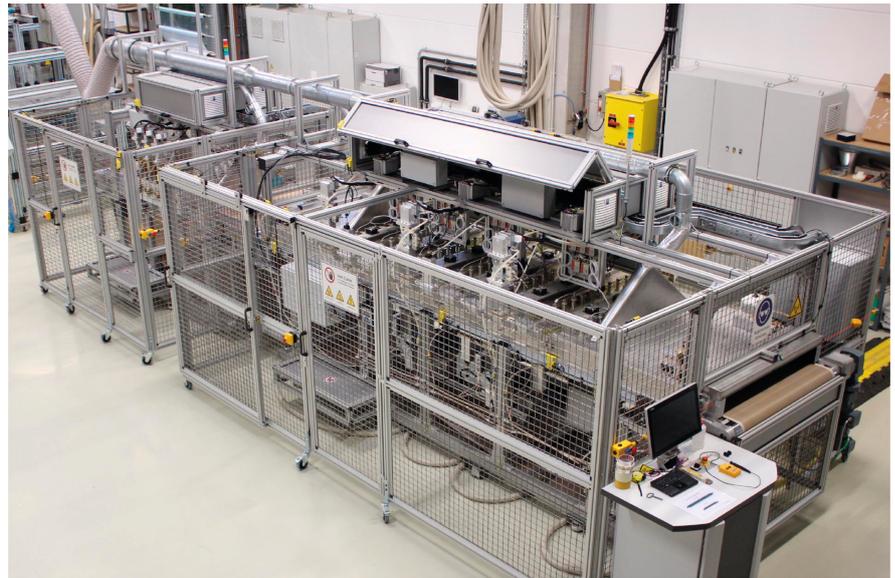


Abb. 11) Zweigeteilter Mikrowellen-Banddurchlaufofen des Fraunhofer IAP bestehend aus einem Monomode-Applikator (hinten) und einem Multimode-Applikator (vorn).

Erhöhung der Leistungsverlustdichte gemäß Abschnitt 2.1 aufweist. Zusätzlich zu der beschriebenen Mikrowelleneinheit ist der Multimode-Applikator mit insgesamt 6 Infrarot-Strahlern einer Leistung von jeweils 6 kW bestückt, die neben der reinen Bestrahlung mittels Mikrowellen auch einen klassischen Ofenbetrieb bzw. einen kombinierten Betrieb zulassen. Analog zum Monomode-Applikator erfolgt der Transport des zu bestrahlenden Materials mittels eines glasfaserverstärkten Teflon-Transportbandes, das im Langzeitbetrieb mit Temperaturen von bis zu 200 °C belastbar ist.

Die Messung der Materialtemperatur in Kontakt kann in beiden Applikatoren mittels der oben beschriebenen faseroptischen Sensoren erfolgen. Darüber hinaus wird die Temperatur im Inneren beider Kammern kontaktlos über eine Matrix von Pyrometern überwacht, die jeweils in der Oberseite der Kammern angebracht sind. Im Unterschied zum *Hephaistos*-Ofen ist bei beiden Banddurchlauföfen derzeit nur ein unregelmäßiger Betrieb möglich.

5. Beispiele zur Mikrowellenbehandlung von Materialien

Im Folgenden werden drei Beispiele für die thermische Behandlung unterschiedlicher Materialien mittels Mikrowellen vorgestellt, wobei jeweils einer der zuvor vorgestellten Mikrowellenöfen mit seinen spezifischen Eigenschaften zum Einsatz kommt. Die Anwendungsfälle umfassen das Tempern, das Trocknen sowie die Initiierung einer chemischen Reaktion mittels Mikrowellen.

5.1 Einsatz des Monomode-Applikators für die Herstellung von Prepregs

Es wurde untersucht, inwieweit ein mit einem Epoxidharz imprägniertes Carbonfasergewebe nach kurzer konventioneller Vorhärtung in dem Monomode-Applikator auf Temperaturen von 150 °C bis 200 °C gebracht werden kann, die für die Prepreg-Herstellung relevant sind. Bei Prepregs (von *preimpregnated fibers*) handelt es sich um Halbzeuge faserverstärkter Kunststoffe, bei denen die Harzmatrix durch teilweises Vorhärten mechanisch stabilisiert ist, die endgültige Formgebung und Härtung jedoch abschließend während eines Produktionsprozesses erfolgen. Gelingt die angestrebte Temperierung des imprägnierten Gewebes, so eröffnet sich die Möglichkeit, die horizontale Imprägnieranlage des Fraunhofer IAP mit der Mikrowelle zu kombinieren:

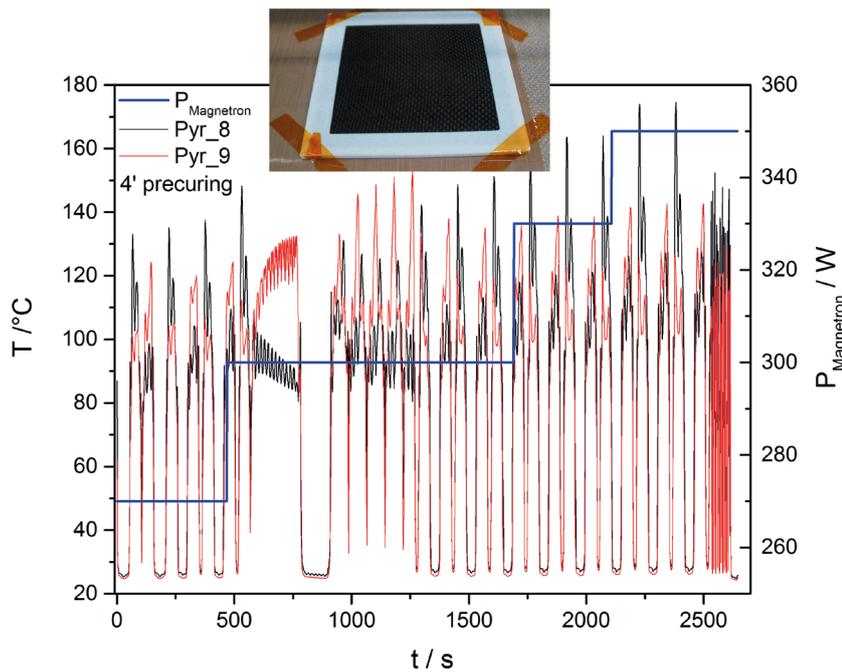


Abb. 12) Zeitlicher Verlauf von Magnetron-Leistung und Probentemperatur eines Epoxidharz-impregnierten Kohlefaserwebes (Foto) während der Bestrahlung im Monomode-Applikator.

Die herkömmliche Herstellung der Prepregs, basierend auf Kontakt- oder Umlufttrocknern zur thermischen Behandlung der Materialien, kann ersetzt werden durch einen mikrowellen-basierten Prozess, der gegenüber dem konventionellen Herstellungsprozess schneller ist und einen geringeren Energieeinsatz erfordert.

Abb. 12 zeigt den zeitlichen Verlauf der Leistung aller Magnetrons des Monomode-Applikators sowie der aus der Bestrahlung resultierenden Probentemperatur. Diese wurde mit zwei Pyrometern oberhalb der Probe gemessen, unter denen die auf dem Transportband fixierte Probe während der Bestrahlung hin und her bewegt wurde. Das Foto in Abb. 12 vermittelt einen Eindruck der Probe: Für den hier vorgestellten Versuch wurde ein Stück Carbonfasergewebe einer Fläche von ca. 15 cm x 15 cm gewählt, mit einem Epoxidharz imprägniert und anschließend bei 160 °C für 4 min in einem Trockenschrank vorvernetzt. Um die aus Spitzenentladungen an den Kohlefaserenden resultierende Funkenbildung zu unterbinden, wurden die Ränder der Probe mit einem Teflon-Rahmen ummantelt. In den ersten Versuchen wurde die Leistung sukzessive erhöht, um einen zu heftigen Reaktionsverlauf der Harzmatrix zu vermei-

den. Mittels dieser Prozessführung wurde mit einer einheitlichen Leistung aller Magnetrons von 350 W eine stabile Endtemperatur der Probe von ca. 160 °C erreicht, was für eine spätere Prepreg-Herstellung für die meisten verwendeten Harzsysteme ausreichend ist, zumal hinsichtlich der Magnetron-Leistung noch Spielraum für eine weitere Temperaturerhöhung besteht.

5.2 Trocknung von Dichtungsmaterialien im Multimode-Applikator

Strang-Materialien für Hochtemperatur-Dichtungen mit einem Anwendungsbereich von 800 °C bis 900 °C werden hergestellt, indem diese während der Herstellung mit wässrigen Dispersionen getränkt und anschließend getrocknet werden. Diese Trocknung erfolgt bei 30 °C über mehrere Tage hinweg. Im vorliegenden Anwendungsbeispiel wurde untersucht, inwieweit dieser Trocknungsprozess durch den Einsatz des Multimode-Applikators des Banddurchlaufofens signifikant beschleunigt werden kann.

Wie in Abb. 13 gezeigt, wurden hierzu Abschnitte des unbehandelten Strang-Materials (Referenz) wie auch verschieden getränkte Abschnitte auf dem Transportband des Multimode-Applikators fixiert und anschließend

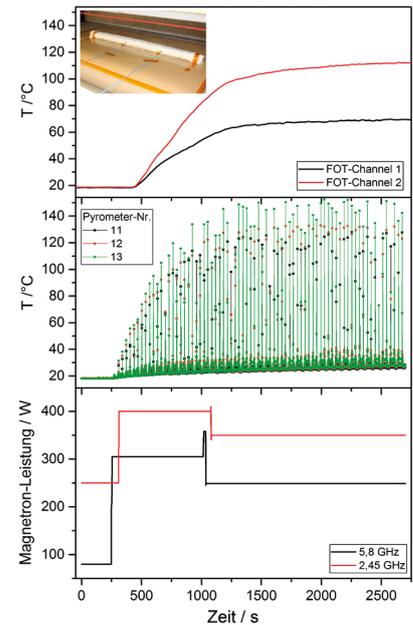


Fig. 13) Zeitlicher Verlauf von Magnetron-Leistung (unten) und Probentemperatur (Mitte, oben) eines Strangmaterials für Hochtemperaturdichtungen (hier: Referenz, s. Foto) während seiner Trocknung durch Bestrahlung im Multimode-Applikator. Die Temperaturmessung erfolgte sowohl durch faseroptische Sensoren (FOT, oben) als auch mittels der integrierten Pyrometer (Mitte).

unter Verwendung des Oszillationsmodus des Transportbandes im Multimode-Applikator bestrahlt. Die Temperaturmessungen erfolgten sowohl mittels der Pyrometer (Messung der Oberflächentemperatur) als auch mittels der faseroptischen Sensoren, die so fixiert wurden, dass ihre Messspitzen die Temperatur im Inneren des Strangmaterials erfassen.

Abb. 13 zeigt exemplarisch für die Referenz, wie sich infolge der simultanen Bestrahlung mit beiden zur Verfügung stehenden Frequenzen bei Leistungen im unteren Bereich nach ca. 15 min eine Oberflächentemperatur von ca. 120 °C einstellt, während sich das Stranginnere dem gegenüber verzögert auf niedrigere Temperaturen zwischen 60 °C und 100 °C erwärmt. Die Ursache für die inhomogene Erwärmung ist noch nicht verstanden, allerdings stimmt der Abschnitt des Strangmaterials mit der höchsten gemessenen Oberflächentemperatur (bis 140 °C durch Pyrometer 13) mit dem der höchsten Temperatur im Stranginneren (bis 100 °C durch den faseroptischen Sensor FOT 2) überein.

Im Ergebnis zeigte sich für eine solcherart durchgeführte mikrowellenbasierte

Trocknung über jeweils ca. 1 h für das Referenzmaterial erwartungsgemäß ein vernachlässigbarer Masseverlust von nur 1 bis 2 Ma-%, während für unterschiedlich getränkte Stränge in der gleichen Zeit ein Massenverlust zwischen 28 Ma-% und 35 Ma-% erreicht wurde. Ungeachtet des noch ausstehenden Vergleiches mit den entsprechenden Werten der herkömmlichen Trocknung zeichnet sich bereits ab, dass die mikrowellenbasierte Trocknung deutlich schneller und damit auch energiesparender ablaufen würde als der herkömmliche Trocknungsprozess.

5.3 Tempern eines harzgebundenen Reibbelags im Hephaistos-Ofen

Bei der Herstellung von harzgebundenen Reibbelägen für unterschiedliche Anwendungen ist ein essentieller Prozessschritt ein der eigentlichen Herstellung nachgelagertes Tempern bei Temperaturen zwischen 150 °C und 200 °C, um das endgültige Eigenschaftsprofil der Beläge einzustellen.

Abb. 14 zeigt die Erwärmung eines harzgebundenen Reibbelags, dessen Vorbereitung für das Tempern im eingesetzten Foto der Abbildung dargestellt ist: Auf der konkaven Seite

des Reibbelags wurden insgesamt drei Bohrungen angebracht. Jede der Bohrungen wurde mit einem faseroptischen Temperatursensor (FOT) nach folgendem Schema ausgestattet:

- FOT 1: rechte Bohrung bis $\frac{3}{4}$ der Belagdicke;
- FOT 2: linke Bohrung bis $\frac{1}{4}$ der Belagdicke;
- FOT 3: mittlere Bohrung bis $\frac{1}{2}$ der Belagdicke
- FOT 5: Anbringung mittig an der konkaven Belagoberfläche

Der Belag wurde anschließend im Zentrum des in drei Segmente unterteilten Hephaistos-Ofens auf dem zugehörigen Probenwagen auf einer Teflon-Platte platziert, wobei nur die 12 Magnetrons des mittleren Segments aktiviert wurden. In einem ersten Abschnitt (bis ca. 1 h 50 min ab Beginn des Bestrahleins) wurde die Regelung auf eine Solltemperatur von 160 °C für FOT 1 untersucht. Diese wird nach ca. 35 min erreicht, wobei zu beachten ist, dass die Leistung der Mikrowelle (d.h. der 12 verwendeten mittleren Magnetrons) zunächst auf 25 % der Maximalleistung begrenzt wurde.“

Es bleibt daher noch zu untersuchen, inwieweit sich mit höheren Magnetronleistungen bzw. durch Einbeziehung weiterer Magnetrons kürzere Heizzeiten erzielen lassen. Nach dem Ende des ersten Abschnittes wurde für einen zweiten Abschnitt (bis ca. 2 h 25 min) die Solltemperatur für FOT 1 auf 180 °C gesetzt; für das Erwärmen um weitere 20 K werden etwa 15 min benötigt, bis die Regelung greift. Bereits nach 7 min wird der Sollwert erstmals erreicht. In einem dritten Abschnitt (ab 2 h 25 min) wird die Solltemperatur auf 170 °C für FOT 3 im Zentrum des Belages gesetzt. Die Solltemperatur wird nach ca. 12 min erreicht, wobei auffällt, dass die Regelung, vermutlich aufgrund der größeren thermischen Masse, besser „greift“, d. h. es gibt keine Oszillation der Ist-Temperatur um den Sollwert. Die in Abb. 14 gezeigten Daten geben auch einen Einblick in die Temperaturverteilung innerhalb des Belags während der Erwärmung

mittels Mikrowellen. Im Gegensatz zu einem herkömmlichen Ofen bleibt der Belag an der Oberfläche am kältesten, während die stärkste Erwärmung für die beiden Enden des Belags registriert wird und das Zentrum des Belags eine Mittelstellung zwischen diesen Extremen einnimmt. Während das Tempern von Reibbelägen im Hephaistos-Ofen hinsichtlich der erreichten Temperatur gelingt, ist eine Verbesserung der Homogenität der Materialtemperatur wünschenswert. Hierfür soll eine periodische Bewegung des Belags während der Bestrahlung untersucht werden, wofür der Multimode-Durchlauföfen eingesetzt werden soll. Dahinter steht die Annahme, dass es durch Mittelung über das in der Ofenkammer variierende elektrische Feld letztlich zu einer homogenen Erwärmung der Reibbeläge kommt.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag werden sowohl grundlegende Aspekte der Erwärmung von Materialien durch Bestrahlung mit Mikrowellen erläutert, als auch konkrete Anwendungsbeispiele diskutiert. Hinsichtlich der Grundlagen werden zunächst das dielektrische Heizen als auch das Wirbelstrom-Heizen als die beiden Mechanismen beschrieben, die für die Wandlung elektromagnetischer Feldenergie in Wärme verantwortlich sind. Dabei wird deutlich, dass für eine gegebene Konfiguration eines Mikrowellenofens die Effizienz des Heizens mittels Mikrowellen abhängig ist von der dielektrischen Funktion und der Leitfähigkeit des zu erwärmenden Materials. Beide Materialparameter sind mittels der im Beitrag beschriebenen breitbandigen dielektrischen Spektroskopie in einem ausreichend weiten Temperatur- und Frequenzbereich zugänglich und können insbesondere auch für die Modellierung und Simulation der elektromagnetischen Felder und der Leistungsverlustdichte in Materialien in einem Mikrowellenofen herangezogen werden. Mit derartigen Simulationen lassen sich zum einen Feldüberhöhungen und daraus resultierende Bereiche übermäßig starker Erwärmung (*hot spots*) vorhersagen. Darüber hinaus können Konzepte für Materialmodifizierungen mit dem Ziel einer effizienteren

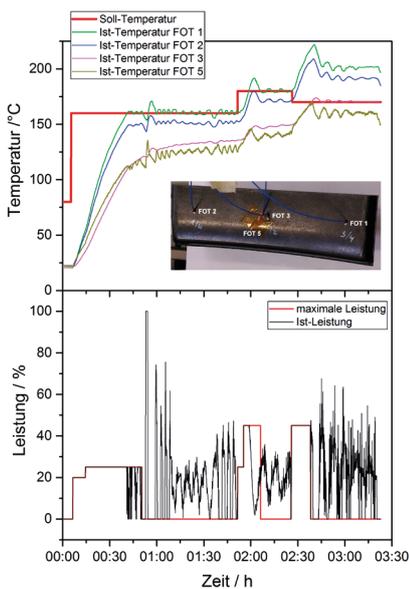


Fig. 14) Zeitlicher Verlauf von Magnetron-Leistung (unten) und Proben-Temperatur (oben, gemessen mit faseroptischen Sensoren, s. Foto) für das Nach-Tempen eines harzgebundenen Reibbelags im Hephaistos-Mikrowellenofen. Der Ofen wird dabei im geregelten Modus betrieben.

Mikrowellenerwärmung relativ schnell in ihrer Wirkung getestet werden. Im konkreten Fall wurde die Modifizierung eines Cyanatesterharzes mit verschiedenen kohlenstoffbasierten Partikeln untersucht und gezeigt, wie sich diese Partikel auf die Eindringtiefe des elektrischen Feldes und auf die Leistungsverlustdichte auswirken. Im zweiten Teil des Beitrages wurde neben einer Beschreibung der der Forschungsgruppe *Thermosets im Leichtbau* im Rahmen der FH-Kooperation zwischen der TH Wildau und dem Fraunhofer IAP, Forschungsbereich PYCO, zur Verfügung stehenden Mikrowellentechnik an drei Beispielen gezeigt, wie für unterschiedliche Anwendungen die dafür erforderlichen Materialien (Carbonfaser-Prepreg, Dichtungsmaterial und Reibbelag) mittels der verschiedenen Mikrowellen-Öfen thermisch prozessiert werden können.

Ein Schwerpunkt künftiger Arbeiten wird es sein, die mikrowellenbasierte Herstellung von Prepregs auf Glasfasergewebe auszudehnen. Da die Glasfasern selbst als „Wärmesenke“ wirken, muss die Erwärmung der Harzkomponente effizienter gestaltet werden. Hierzu soll vor allem die im Beitrag beschriebene Harzmodifizierung mittels Mikrowellensensoren auf ihre Eignung hin untersucht werden.

7. Danksagung

Die vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des Kooperationsprogrammes zwischen der Fraunhofer-Gesellschaft und der TH Wildau gefördert und in der Forschungsgruppe *Thermosets im Leichtbau* am Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung IAP, Forschungsbereich Polymermaterialien und Composite gemeinsam mit der Professur *Faserverbund-Materialtechnologien* der TH Wildau durchgeführt.

LITERATUR

Akhtar MJ, Feher LE, Thumm MK (2009) Effects of Hardeners, Catalysts and Accelerators on Dielectric Properties of Different Resin Systems for Microwave Material Processing Applications. In: Feher LE (eds), 7.-10. September 2009, Karlsruhe, Germany. Proc. 12th Int. Conf. on Microwave and High Frequency Heating (AMPERE).

Dreyer C, Bauer M, Söthje D, Fischer R (2015) Anordnung zu Behandlung von Materialien mit Mikrowellen. Patent DE102015111555B3, 29 Sep 2016

Feher LE (2009) *Energy Efficient Microwave Systems*. Springer, Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-540-92121-9

Feher LE, Thumm MK (2004) Microwave innovation for industrial composite fabrication - The HEPHAISTOS technology. *IEEE Transactions on Plasma Science* 32(1):73-79. doi: 10.1109/TPS.2004.823983

Imenokhoyev I, Windsheimer H, Waitz R, Kintsel N, Linn H (2012) Mikrowellenerwärmungstechnik: Potentiale und Grenzen. *cfi/Ber. DKG 89(11-12):D 19-D 27*. ISSN: 01739913

Kremer F, Schönhals A (2002) *Broadband Dielectric Spectroscopy*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. ISBN: 3-540-43407-0

Link G (2011) Innovative, modulare Mikrowellentechnologie zur Herstellung von Faserverbundstrukturen. *Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek, Karlsruhe*. doi: 10.2314/GBV:717448614

Link G (2015) *Faserverbund-Leichtbau mit Automatisierter Mikrowellenprozessertechnik hoher Energieeffizienz (FLAME)*. KIT Scientific Publishing, Karlsruhe. doi: 10.5445/KSP/1000047509

Meredith R (2007) *Engineer's Handbook of Industrial Microwave Heating*. IET Power Series 25, Exeter. ISBN: 978-0-85296-916-8

Perelaer J, de Gans B-J, Schubert US (2006) Ink-jet printing and microwave sintering of conductive silver tracks. *Adv. Mat.* 18(16):2101-2104. doi: 10.1002/adma.200502422

Perelaer J, Klokkenburg M, Hendriks CE, Schubert US (2009) Microwave Flash Sintering of Inkjet-Printed Silver Tracks on Polymer Substrates. *Adv. Mat.* 21(47):4830-4834. doi: 10.1002/adma.200901081

Zhang H, Yang R, He Y, Foudazi A, Cheng L, Tian G (2017) A review of microwave thermography nondestructive testing and evaluation. *Sensors* 17(5):1-33. doi: 10.3390/s17051123

AUTOREN

Dr. Lutz Hartmann
Tiberiu-Mihai Tatai
Mario Kaiser

Prof. Dr. Christian Dreyer*

Forschungsbereich Polymermaterialien und Composite PYCO
Forschungsgruppe Thermosets im Leichtbau
Fraunhofer Institut für Angewandte Polymerforschung IAP

* Professur Faserverbund-Materialtechnologien
Technische Hochschule Wildau

E-Mail für Korrespondenz:
christian.dreyer@th-wildau.de



Betrachtung von neuartigen Antriebs- und Kraftstoffkonzepten mit dem Ziel der Konzeption einer Hybridtankstelle für den Flugplatz Schönhagen für die Versorgung von Luftfahrzeugen mit nachhaltigen Kraftstoffen

Andreas G. Hotes*, Klaus-Jürgen Schwahn und Henrike Fabienke

Zusammenfassung

Dieser wissenschaftliche Beitrag befasst sich zunächst mit der Betrachtung von neuartigen und nachhaltigen Antriebs- und Kraftstoffkonzepten für den Einsatz in der Luftfahrt, die zum Erreichen der hochgesteckten Klimaschutzziele auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene beitragen sollen. Um die Energieversorgung dieser Luftfahrzeuge gewährleisten zu können, wurde ein Tankstellensystem beispielhaft für den Flugplatz Schönhagen konzipiert, welches Strom, Wasserstoff und Power-to-Liquid-Kraftstoff für Elektro-, Wasserstoff- und Luftfahrzeuge mit konventionellem Verbrennungsmotor sowie für Hybridflugzeuge zur Verfügung stellen soll. Ziel dieses Konzeptes ist die komplette Eigenproduktion der Kraftstoffe auf dem Flugplatz. Hierzu wurden rechtliche, wirtschaftliche und vor allem technische Voraussetzungen untersucht und ausgewertet sowie Berechnungen bezüglich der benötigten Kraftstoff- und Stromkapazitäten durchgeführt.

Abstract

This paper will initially focus on novel and sustainable propulsion and fuel concepts for use in aviation, which should contribute to the achievement of ambitious climate protection goals at national, European and international level. To ensure the energy supply of these aircrafts, a filling station system was designed as an example for the Schönhagen airfield, which provides electricity, hydrogen and power-to-liquid-fuel for electric and hydrogen driven aircrafts, aircrafts with conventional combustion engines as well as for hybrid aircrafts. The aim of this concept is the complete in-house production of fuels on the airfield. For this purpose, legal, economic, and above all technical requirements, were examined and evaluated and calculations were carried out regarding the required fuel and power capacities.

1. Nachhaltigkeit in der zivilen Luftfahrt

Die Nutzung eines Flugzeuges ist heutzutage nicht mehr aus unserem Alltag wegzudenken. Im Jahr 2017 wurden weltweit 4,1 Mrd. Passagiere (aero.de & dpa-AFX 2018) innerhalb der kommerziellen Luftfahrt befördert. Doch Beachtung sollte man nicht nur dem rasanten Wachstum des Passagieraufkommens schenken, sondern auch dem Anteil der Luftfahrt am weltweiten CO₂-Ausstoß. Dieser liegt bei 2% (International Air Transport Association IATA 2018: 2), wobei allerdings die

negativen Auswirkungen auf die Umwelt durch die Höhenwirkung des Ausstoßes der Luftschadstoffe verstärkt werden (vgl. Pompl 2007: 57). Mit wachsendem Passagieraufkommen steigen darüber hinaus auch die luftverkehrsbezogenen Emissionen, sowohl was den Fluglärm als auch den Ausstoß von CO₂ und Stickoxiden, etc. umfasst.

Um gerade diesem Wachstum der Schadstoffemissionen entgegenzuwirken und sie zu reduzieren, gibt es auf verschiedenen Ebenen unterschiedliche Ziele, Vorgaben und Projekte,

die den Klimaschutz in der Luftfahrt vorantreiben sollen. Die International Civil Aviation Organization (ICAO) beschloss in einem Abkommen den sogenannten „Carbon neutral growth 2020“, das CO₂-neutrale Wachstum der zivilen Luftfahrt ab dem Jahr 2020 (vgl. International Civil Aviation Organization IATA 2018). Um dieses Ziel umsetzen zu können, soll ab dem Jahr 2021 das Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, kurz CORSIA, eingeführt werden. In diesem Handelssystem erwerben u.a. die Fluggesellschaften, je nach Höhe ihres CO₂-Ausstoßes, sogenannte

* korrespondierender Autor

Offsetting-Zertifikate, die wiederum Klimaschutzprojekte (vor allem in Entwicklungsländern) finanzieren, die in anderen Sektoren den CO₂-Ausstoß verringern oder vermeiden und so einen Ausgleich schaffen (vgl. Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft BDL 2017: 11). Sowohl die Beteiligung in der Pilotphase als auch in Phase 1 des Offsetting-Handelssystems sind freiwillig.

Auch die Europäische Union (EU) hat sich hohe Klimaschutzziele gesteckt. Im „Flightpath 2050“ wird eine Reduktion von CO₂ um 75%, von Stickstoff und Stickoxiden um 90% und von Lärmemissionen um 65% angestrebt (vgl. Europäische Kommission 2011: 15). Innerhalb der EU ist bereits ein Handelssystem aktiv, das seit 2012 auch den Luftverkehr einschließt und bei dem Luftverkehrsunternehmen „European Union Allowances“ (EUA) kaufen müssen. Pro EUA wird es dem Unternehmen gestattet eine Tonne CO₂ auszustoßen. Das europäische Emissionshandelssystem schließt allerdings Interkontinentalflüge aus (vgl. Fabienke 2018: 1), es wird nur für Flüge innerhalb der EU zur Anwendung gebracht.

Um die teils sehr ehrgeizigen Ziele auf internationaler und europäischer Ebene umsetzen zu können, reichen Emissions- und Offsetting-Handelssysteme allerdings nicht aus. Es muss mittelfristig auch eine Weiterentwicklung seitens der angewandten Technologien geben, die in der Luftfahrt eingesetzt werden. Hierzu gehören u.a. neuartige Antriebe für Luftfahrzeuge und moderne, weniger klimawirksame Kraftstoffe. Der Fokus der weiteren Betrachtung wird dabei auf die General Aviation (GA) gelegt, da der Einsatz von neuartiger Antriebstechnologie vor allem bei kleineren Luftfahrzeugen aus der GA zu finden ist und der Auf- und Ausbau der benötigten Infrastruktur für die Energieversorgung dieser Luftfahrzeuge dementsprechend auf kleineren Regionalflughäfen und Verkehrslandeplätzen schneller zu realisieren ist.

2. Neuartige Antriebstechnologien

Wie in Abb. 1 zu erkennen ist, liegt bei der Technologieentwicklung von Luftfahrzeugantrieben die Konzentration vor allem auf drei verschiedenen, neuartigen Antriebsmodellen. Eines ist der Antrieb durch einen Elektromotor mit Hilfe eines Akkusystems. Wird ein Luftfahrzeug mit ihm angetrieben, so wird die benötigte elektrische Energie in ein an Bord befindliches Akkusystem geleitet und in diesem gesammelt (vgl. Fabienke 2018: 7). Nachteilig ist hier aber vor allem die geringe Reichweite durch die geringe Energiedichte und das hohe Gewicht der Akkusysteme, die in der Luftfahrt vorrangig aus Lithium-Ionen- bzw. Lithium-Polymer-Akkus bestehen. Zusätzlich existiert ein großer Nachteil in den verhältnismäßig langen Ladezeiten, die je nach Größe und Kapazität des Akkusystems variieren. Durch eine leicht mögliche operationelle Fehlbehandlung besteht eine relativ hohe Gefahr der Zerstörung des Akkusystems mit einer daraus resultierenden Brandgefahr. Wird als Energiequelle Strom aus erneuerbaren Energien wie Windkraft oder Solarenergie verwendet, ist es jedoch möglich, dass das Luftfahrzeug, lässt man die Emissionen während der Produktion z.B. der Solarzellen außen vor, emissionsfrei fliegen kann. Luftfahrzeuge mit Elektroantrieb sind bis jetzt nur vereinzelt in der General Aviation zu finden.

Wasserstoff entweder in gasförmiger oder flüssiger Form als Kraftstoff verwendet werden. Auch bei diesem neuartigen Antriebssystem besteht ein Gewichtsproblem. Obwohl Wasserstoff an sich leichter ist und eine höhere Energiedichte als z.B. Jet A1, umgangssprachlich Kerosin genannt, aufweist, benötigt er bis zu viermal mehr Rauminhalt. Durch zusätzlich benötigte Spezifikationen, wie ein spezielles Kühlsystem bei flüssigem und ein Drucktank bei gasförmigem Wasserstoff, tritt auch hier ein Gewichtsproblem auf, das allerdings durch die hohe Energiedichte und somit die große Reichweite größtenteils aufgehoben wird. Für das Modell eines Wasserstoffantriebes gibt es zwei mögliche Konfigurationen, die bis jetzt in der Luftfahrt betrachtet wurden bzw. aktuell betrachtet werden. In einem Mehrstofftriebwerk können entweder Jet A1 oder aber auch Wasserstoff konventionell verbrannt werden (vgl. KLS Publishing 2007: 8). Durch die hohe chemische Reinheit des neuartigen Kraftstoffs entstehen bei der Verbrennung keine Verbrennungsrückstände und nur geringe Mengen Stickoxide. Auch der Antrieb durch eine Brennstoffzelle ist möglich. Hierbei reagiert der Wasserstoff in der Zelle mit Sauerstoff zu Wasser. Dabei wird die chemische Reaktionsenergie in elektrische Energie umgewandelt, die anschließend einen Elektromotor antreibt und somit in mechanische Energie um-

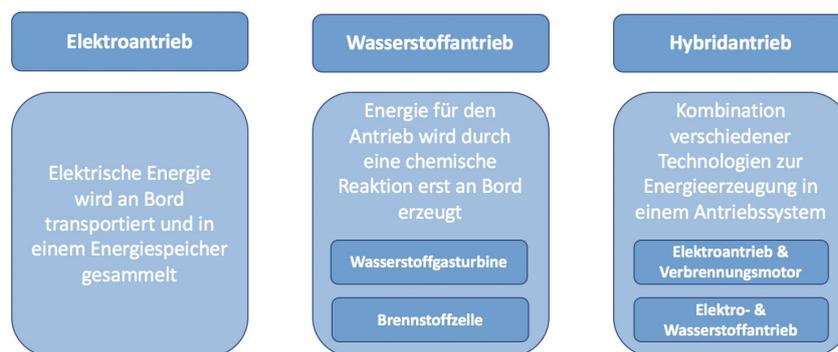


Abb. 1) Alternative Antriebsarten.

Ein weiteres Antriebsmodell, das zu einer Verbesserung der Nachhaltigkeit in der Luftfahrt führen soll, ist der Wasserstoffantrieb. Hier wird die Energie, die für den Antrieb des Luftfahrzeugs benötigt wird, erst an Bord des Luftfahrzeuges durch eine chemische Reaktion produziert. Hierbei kann der

gewandelt wird. Die Reaktion erfolgt effizient und ohne die Entstehung schädlicher Abgase. Luftfahrzeuge mit reinem Wasserstoffantrieb fliegen zurzeit nur mit Experimentalzulassung und werden für Forschungszwecke eingesetzt. Als drittes Antriebsmodell besteht die Möglichkeit einer Hybridisierung von

zwei einzelnen Antrieben. So werden verschiedene Technologien zur Energieerzeugung in einem Antriebssystem kombiniert. Gängige Kombinationen sind zum einen die Paarung aus Elektro- und Verbrennungsmotor sowie die Paarung aus Elektro- und Wasserstoffantrieb, wobei für Letztere zumeist ein Brennstoffzellensystem eingesetzt wird. Bei der Hybridisierung werden vor allem die Vorteile der zwei unterschiedlichen Möglichkeiten zusammengeführt. Meist dient einer der Antriebe als Reichweitenverlängerung (Range Extender) und/oder als Unterstützung für den Start und den Steigflug.

Die vorgestellten neuartigen Antriebstechnologien werden in Zukunft eher bei kleineren Flugzeugen in der General Aviation oder bei den kleineren Luftfahrzeugen in der kommerziellen Regionalluftfahrt zu finden sein. Denn große Langstreckenluftfahrzeuge haben einen höheren Energiebedarf, der nach dem aktuellen Stand der Technik weiterhin nur durch flüssige Kraftstoffe abgedeckt werden kann. Auch haben Flugzeuge sehr lange Nutzungszyklen von 30 Jahren und mehr. Aufgrund dieser langfristigen Nutzungsdauer ist eine Übergangsphase von 30-50 Jahren vorzusehen, in der das herkömmliche Kerosin trotz neuer Energieträger weiterhin parallel Verwendung finden wird.

3. Alternative Kraftstoffarten

Um auch mit großen Luftfahrzeugen emissionsarm oder zukünftig emissionsfrei fliegen zu können, ist in diesem Bereich der Einsatz von alternativen Kraftstoffen sinnvoll. Unter alternativen Kraftstoffen werden diejenigen Kraftstoffe aufgeführt, die in der Rohstoffbasis eine Alternative zum konventionellen Rohöl darstellen. Alternative Kraftstoffe aus fossilen Energieträgern, wie Erdgas und Kohle, sollen hier nur am Rande erwähnt werden, da aus ihnen zwar ebenfalls Kraftstoff hergestellt werden kann, doch damit keine relevante Emissionsminderung einhergeht.

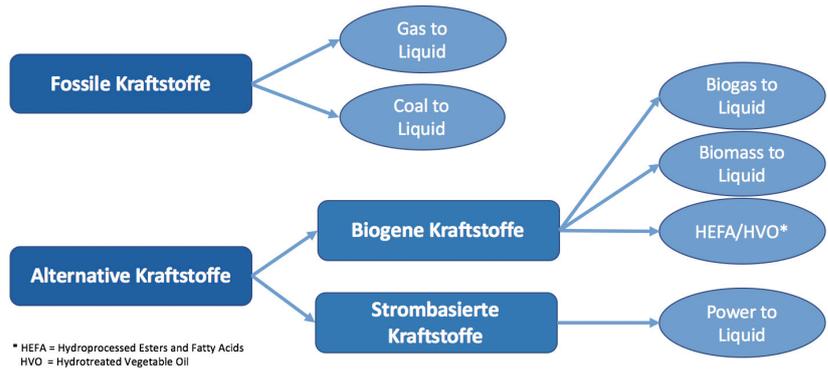


Abb. 2) Alternative Kraftstoffarten.

Besonders zukunfts tragend sind synthetische Kraftstoffe, die in Abb. 2 dargestellt sind. Biogas-to-Liquid-, Biomass-to-Liquid- und HEFA/HVO-Kraftstoffe werden aus unterschiedlichen biogenen Rohstoffen (z.B. Biogas, Energiepflanzen, Rest- und Abfallstoffen aus Forst- und Landwirtschaft) hergestellt. Die Kraftstoffe werden bei der Verbrennung als CO₂-neutral angesehen, da die verwendeten Rohstoffe beim Anbau so viel CO₂ binden, wie bei der Verbrennung entsteht. Während des Herstellungsprozesses (Verarbeitung, Transport, Vertrieb) werden allerdings Treibhausgasemissionen erzeugt. Diese liegen jedoch deutlich unter den Werten der fossilen Kraftstoffe und stellen so eine eindeutige Verbesserung bezüglich ihrer klimaschonenden Wirkung gegenüber diesen dar. Doch bei der Rohstoffgewinnung kann es bei biogenen Kraftstoffen zur Konkurrenz mit dem Nahrungsmittelanbau oder anderen Industriezweigen (z.B. Papierindustrie) kommen. Werden statt Abfall- und Reststoffen Energiepflanzen als Rohstoffbasis verwendet, besteht die Gefahr einer negativen Landnutzungsänderung, d.h. z.B. der Umwandlung einer vorhandenen Agrarfläche für den Anbau von Nahrungsmitteln in eine Agrarfläche für den Anbau von Energiepflanzen.

Doch vor allem dem zweiten Pfad der alternativen Kraftstoffe in Abb. 2 ist Aufmerksamkeit zu schenken. Die strombasierten Kraftstoffe, Power-to-Liquids (PtL) genannt, stehen vor allem durch ihre minimalen Emissionswerte sowohl bei der Verbrennung als auch bei der Herstellung hervor. Für die Herstellung gilt das allerdings nur, wenn der Strom aus erneuerbaren Energien (Windkraft,

Wasserkraft, Solarenergie) erzeugt wurde. Bei der Verbrennung wird PtL, genauso wie sein biogenes Pendant, als CO₂-neutral angesehen, da während der Kraftstoffsynthese so viel CO₂ aus der Umgebungsluft oder anderen CO₂-Quellen entnommen wird, wie bei der Verbrennung entsteht. Weitere Vorteile von PtL bestehen darin, dass die Konkurrenz zum Nahrungsmittelanbau nicht existiert, eine starke politische Unterstützung der Bundesregierung durch den Beschluss der Förderung von Forschung und Entwicklung von strombasierten Kraftstoffen im Koalitionsvertrag festgelegt wurde und zum jetzigen Zeitpunkt die Beimischung von PtL-JetA1-Flugkraftstoff schon zu 50 % möglich ist (vgl. Fabienke 2018: 57). Auch die Technologie für die Herstellung von PtL ist bereits vorhanden. Die Power-to-Liquid-Produktion kann in drei Hauptschritte unterteilt werden: Zunächst erfolgt die Stromgewinnung aus erneuerbaren Energien. Anschließend wird dieser gewonnene Strom mit Hilfe einer Elektrolyse-Einheit in Wasserstoff umgewandelt, der wiederum im nachfolgenden Schritt mit Kohlenstoffmonoxid (gewonnen aus CO₂ z.B. aus der Luft) in einem chemischen Reaktor zu dem gewünschten Endprodukt synthetisiert wird.

4. Tankstellensystem

4.1 Anforderung

Um die vorgestellten neuartigen Antriebstechnologien und Kraftstoffe etablieren zu können, muss vor allem darauf geachtet werden, die passende und ebenfalls neuartige Infrastruktur bereitstellen zu können. Daher wurde beispielhaft ein Tankstellensystem

für den Flughafen Berlin-Schönefeld konzipiert, welche genau diese benötigte Infrastruktur abbilden kann und nachfolgend vorgestellt werden soll. Der Flughafen Berlin-Schönefeld ist, bezogen auf die Infrastruktur und die Anzahl der Flugbewegungen, einer der größten Verkehrslandeplätze in Deutschland und für die Flughäfen im Berliner Raum ein wichtiger Entlastungsstandort (vgl. Flughafen Berlin-Schönefeld 2018a) für die Luftfahrzeugkategorie bis 14 t Maximum Take Off Weight (MTOW). Der Flughafen beteiligt sich u.a. am „Innovationsbündnis für die Entwicklung emissionsarmer Flugantriebe in der südöstlichen Metropolregion Berlin-Brandenburg“ (IBEFA) für einen zukunftsorientierten, nachhaltigen Flughafenbetrieb im Rahmen des Projektes „Airport of the Future“.

Das Tankstellensystem sollte folgenden Herstellungsumfang abbilden können: Zum einen wird die Gewinnung von Strom aus erneuerbaren Energien für die Versorgung von Luftfahrzeugen mit Elektroantrieb genutzt. Aus überschüssigem Strom soll weiterführend Wasserstoff in einer Elektrolyse-Einheit für die Versorgung von Wasserstoffflugzeugen produziert werden. Überschüssiger Wasserstoff wird dann abschließend für die Power-to-Liquid-Produktion genutzt, um auch Luftfahrzeuge mit konventionellen Verbrennungsmotor emissionsarm fliegen zu ermöglichen. Ziel dieses Vorhabens ist die komplette flughafen-eigene Produktion des Kraftstoffes.

4.2 Konzept

Die Aufteilung des Tankstellensystems orientiert sich z.T. an den Teilschritten der Power-to-Liquid-Produktion. So entstehen drei einzelne Systembausteine, die in Abbildung 3 dargestellt sind: die Energiegewinnungsanlage, die Herstellungsanlage und die Tankstelle, die alle miteinander verbunden sind. In der Hauptarbeit erfolgte keine umfassende Auslegung des Tankstellensystems an sich. Es wurde stattdessen ein Überblick über aktuelle und grundlegende Möglichkeiten gegeben, die bei einem Tankstellensystem dieser Art eingesetzt werden könnten. Dementsprechend findet auch in diesem Beitrag nur eine übersichtliche Betrachtung der

Auslegung statt. In den Vordergrund gestellt wird hier die Kapazitätsberechnung und die Betrachtung der grundsätzlichen Machbarkeit.



Abb. 3) Bausteine des Tankstellensystems.

Auf dem Flughafen Berlin-Schönefeld werden jährlich ca. 152.000 kWh Strom für die Flughafeninfrastruktur (Gebäude, Straßen- und Parkplatzbeleuchtung, Tankstelle, Befeuerung Start- und Landebahn) verbraucht. Geht man nun davon aus, dass bei einer Gesamtzahl von 60.000 prognostizierten Flugbewegungen für das Jahr 2028 etwa 15 % von Luftfahrzeugen mit Elektroantrieb (Hybridflugzeuge einbezogen) absolviert werden, ergibt sich bei verschiedenen Flugzeugtypen mit unterschiedlichen Akkukapazitäten (21-900 kWh) ein Jahresbedarf von ca. 415.000 kWh Strom. Hinzu kommt zusätzlich der Strombedarf für die PtL-Produktion. Um ein 10% PtL-Beimischungsverhältnis realisieren zu können, werden bei einem angenommenen Kraftstoffbedarf für das Jahr 2028 von 300.000 l JetA1 30.000 l PtL-JetA1 benötigt. Für dieses Produktionsvolumen ergibt sich ein Strombedarf von ca. 430.000 kWh (bei einem Wirkungsgrad der Produktionsanlage von 50%). Daraus folgt, dass pro Jahr etwa 1 Mio. kWh Strom auf dem Flughafen zur Verfügung gestellt werden müssten. Hieraus ergibt sich die erste Problemstellung: Welche Energiegewinnungsanlage kann diesen hohen Strombedarf mit der Eigenproduktion decken?

Auf dem Flughafen Berlin-Schönefeld stehen mehr als 10.000 m² freie Dachfläche zur Verfügung. Zusätzlich könnten große Freiflächen z.B. zwischen den zwei Start- und Landebahnen als Standort für die Energiegewinnungsanlage genutzt werden. Aufgrund dessen ist der Einsatz von Photovoltaikanlagen (PV-Anlagen) eine gute Möglichkeit. Geht man davon aus, dass im Idealfall pro m² Solarmodul 100 kWh Strom pro Jahr erzeugt werden könnten, könnte der errechnete Gesamtstrombedarf

von 10.000 m² Photovoltaikanlagen abgedeckt werden. Beim Einsatz dieser ist aber vor allem darauf zu achten, dass die Gefährdung des Flugbetriebs durch

Blendung der Piloten, Funkstörung, etc. ausgeschlossen wird.

Dem Ziel der kompletten Eigenproduktion zuwider stellt sich trotzdem die Frage, ob der Zukauf von Strom nicht doch eine mögliche Ergänzung darstellt, gerade da die Stromproduktion durch erneuerbare Energien mit starken, umwelt- bzw. wetterbedingten Schwankungen verbunden ist. So sinken die Investitionskosten der PV-Anlage, gleichzeitig entstehen allerdings neue Kosten für den zugekauften Strom. Im letzten Jahr betrug der durchschnittliche Strompreis 0,29 €/kWh. Geht man davon aus, dass die Hälfte des für die 10 % PtL-Produktion benötigten Stroms durch den Zukauf abgedeckt wird, wirken sich diese Stromkosten allerdings mit 2,10 € auf den späteren Literpreis des Kraftstoffes aus, alleine für den zugekauften Teil. Der aktuelle Preis von fossilem JetA1 (steuerbefreit und ohne 19% Mehrwertsteuer) liegt vergleichsweise bei 1,08€. Möchte man diesen aktuellen Wert beispielhaft als Kostenanteilszielwert des zugekauften Stroms für die Produktion von synthetischem JetA1 realisieren, müsste der Strompreis bei ca. 0,15€/kWh liegen, also deutlich unter dem Durchschnittspreis aus 2017. Hinzu kommt hier allerdings noch der Kostenanteil für die flughafen-eigene Stromproduktion. Würde dieser ebenfalls bei 0,15€ liegen, ergibt sich eine Gesamtauswirkung von ungefähr 2,20€ auf den späteren Kraftstoffpreis des geblendeten JetA1, alleine durch die anfallenden Stromkosten. Je kleiner die Stromkosten, desto kleiner natürlich auch die Auswirkungen auf den späteren Kraftstoffpreis. Aufgrund dessen muss der Strompreis deutlich unter den 0,15 € liegen, um die Konkurrenzfähigkeit des nachhaltigen Kraftstoffes

zu gewährleisten. Allerdings muss man bei diesen Überlegungen berücksichtigen, dass hier an einer Technologie für die Zukunft gearbeitet wird. Die Wirtschaftlichkeit wird erst mittelfristig in einer Serienproduktion eine Rolle spielen. Bis dahin werden die Kosten für fossile Energieträger deutlich gestiegen sein. Bedenkt man, dass ein Liter Jet A1 versteuert heute am Flughafen Schönhagen 2,06 € kostet und ein Liter AVGAS 2,41 € (Flughafen Schönhagen 2018b) würden in der Forschungs- und Erprobungsphase bereits Steuererleichterungen helfen, um den PtL-Kraftstoff auch tatsächlich in der Praxis einsetzen zu können. Bei dieser Preisbetrachtung ist allerdings noch anzumerken, dass hier weitere anfallende Kosten wie z.B. Kosten für die Beschaffung, den Betrieb und die Instandhaltung der benötigten Infrastruktur (u.a. Produktionsanlagen, Photovoltaikanlagen, Personalkosten) vereinfachend nicht berücksichtigt wurden.

Bei der Herstellungsanlage besteht die wichtigste Voraussetzung darin, dass die Anlage erweitert werden kann. Je nach steigendem Beimischungsverhältnis, das in Tab. 1 abgebildet ist, steigt der Bedarf an PtL-JetA1. Deshalb muss das Anlagensystem vorzugsweise bis zur jetzigen Zertifizierungsgrenze von 50 % Beimischung (in Tab. 1 gelb hinterlegt) „mitwachsen“ können. Anlagen, die die PtL Herstellung komplett durchgängig durchführen können sind

noch nicht kommerziell verfügbar. Demonstrationsanlagen hingegen schon, die je nach Art und Bauweise 80-160 Liter pro Tag des gewünschten Endproduktes herstellen können. Mit diesen Anlagen könnte man bereits eine Beimischung von 10-20 % realisieren.

Interessant wäre in diesem Zusammenhang der Einsatz von PtL-Kraftstoffen in Flugzeugen mit Hybridantrieb. Wenn z.B. eine kleine Turbine oder ein Verbrennungsmotor nur der Stromerzeugung im Flugzeug dienen und der eigentliche Antrieb über einen Elektromotor erfolgt, könnte u.U. die 50 % Blendinggrenze entfallen, d.h. ein PtL-Kraftstoff zu 100 % eingesetzt werden. Auf diese Weise hätte man schon heute einen quasi CO₂-neutralen Antrieb.

Die Herstellungsanlage besteht ebenfalls aus mehreren Komponenten. Neben der Elektrolyse-Einheit für die Wasserstoffproduktion und der Synthese-Einheit für die finale Kraftstoffherstellung gehören auch eine Blendinganlage für das Mischen des fossilen mit dem synthetischen JetA1 und das Distributionssystem für den Transport des geblendeten Kraftstoffs zur Tankstelle zum Herstellungssystem. Für die Realisierung des Letzteren empfiehlt sich ein unterirdisches Leitungssystem, das die Herstellungsanlage direkt mit der Tankstelle verbindet.

Die derzeitige Tankstelleninfrastruktur (Lagerungssystem und Zapfsäule) für fossiles JetA1 auf dem Flughafen selbst kann für die Betankung mit PtL-JetA1 beibehalten werden. Dies ist ein weiterer Vorteil des strombasierten Kraftstoffs. Um zusätzlich Elektroflugzeuge mit Strom versorgen zu können, empfiehlt sich eine Auslagerung der benötigten Ladestationen, um die Kapazitäten der eigentlichen Tankstelle aufgrund der langen Ladezeiten der Akkusysteme nicht zu überlasten. Zum einen sollten mehrere Ladestationen in den Hangars verteilt werden, um für Langzeitmieter eines Stellplatzes einen einfachen Zugang zum Strom zu schaffen. Für Tages- oder Kurzzeitgäste wäre es sinnvoll, einige Ladestationen an ausgewählten Abstellplätzen auf dem Vorfeld zu platzieren. Bei den Ladestationen wird es allerdings zusätzlich nötig sein, sowohl den Ladeprozess an sich als auch die Vorrichtungen mit den zugehörigen Steckern und den unterschiedlichen Stromstärken zu standardisieren. Die Tankinfrastruktur für die Wasserstoffversorgung von Luftfahrzeugen (Zapfsäulen- und Speichersystem) muss ebenfalls geschaffen werden. Eventuell einzuhaltende Sicherheitsmaßnahmen wie z.B. Sicherheitsabstände zu Zündquellen wie den anderen Kraftstoffen müssen vor und vor allem bei der Implementierung in das bestehende Tanksystem beachtet werden. Auch hier empfiehlt sich eine Standardisierung des Tankprozesses

Tab. 1) Benötigte Mengen von synthetischem PtL- und fossilem JetA1 für verschiedene Beimischungsverhältnisse (Grenze des aktuell zertifizierten Beimischungsverhältnisses orange hinterlegt).

Beimischungsverhältnis von synthetischem und fossilem JetA1 [%]	Bedarf an synthetischem PtL-JetA1 pro Jahr [l]	Bedarf an synthetischem PtL-JetA1 pro Monat [l]	Bedarf an synthetischem PtL-JetA1 pro Tag [l] (gerundet)	Bedarf an fossilem JetA1 pro Jahr [l]	Bedarf an fossilem JetA1 pro Monat [l]	Bedarf an fossilem JetA1 pro Tag [l] (gerundet)
10:90	30.000	2.500	82	270.000	22.500	740
20:80	60.000	5.000	164	240.000	20.000	657
30:70	90.000	7.500	247	210.000	17.500	575
50:50	150.000	12.500	411	150.000	12.500	411
80:20	240.000	20.000	657	60.000	5.000	14
100:0	300.000	25.000	822	0	0	0

und des Tanksystems. Vor allem bei Wasserstoff sollte ein besonderes Augenmerk auf die Sicherheitsvorkehrungen und Notfallpläne gelegt werden.

4.3 Diskussion

Aus dem vorgestellten Tankstellensystem ergeben sich zwei große Defizite. Zum einen existieren noch keine Gesetze, Vorschriften und/oder Normen, die sich explizit mit der Verwendung von Wasserstoff in Verbindung mit Luftfahrzeugen und mit dem Handling des Wasserstoffes auf Flugplätzen befassen (vgl. Fabienke 2018: 91). Unter den letzten Punkt fallen auch die Wasserstoffproduktion und der Wasserstofftankprozess auf dem Flugplatz. Aus diesen Defiziten leitet sich der Bedarf nach rechtlichen Vorgaben ab, die u.a. Sicherheitszonen und -abstände, Anforderungen an die benötigte Infrastruktur, den Ablauf des Tankprozesses etc. gesetzlich regeln.

Zum anderen besteht ein weiteres Problem darin, dass das Blenden von Kraftstoffen direkt auf dem Flugplatz innerhalb der Europäischen Union nicht gestattet ist (vgl. Fabienke 2018: 98). Dieser Prozess ist allerdings essentiell für den Erfolg und die Erhaltung der Wirtschaftlichkeit dieses Projektes, denn die Distributionskosten des geblendeten Kraftstoffes müssen so gering wie möglich gehalten werden. Muss der produzierte PtL-Kraftstoff erst zu einer externen Blendinganlage gebracht werden, um danach wieder zurücktransportiert zu werden, wären erhebliche Kosten und Risiken die Folge. Erfolgt weiterhin keine Erlaubnis des Blendens auf dem Flugplatz, dann wäre einzig und allein mit einem Standort der Blendinganlage außerhalb des Flugplatzgeländes allerdings in unmittelbarer Nähe die einzige Möglichkeit, um den Distributionsweg so kurz wie möglich zu halten und somit das Projekt erfolgreich und wirtschaftlich realisieren zu können.

4.4 Bewertung der Machbarkeit

Die Machbarkeit des Tankstellensystems ist im Wesentlichen von drei Punkten abhängig:

1. Das Finden von Projektpartnern und Investoren: Diesem Punkt kommt eine besondere Bedeutung zu, denn die Investoren müssen den noch unbekanntem Kostenrahmen tragen können und wollen.
2. Staatliche Förderung der Forschung und Entwicklung von strombasierten Kraftstoffen in Form von Projektgeldern und später durch Subventionen: Beispielhaft könnte man hier die Energiesteuer je nach prozentualem Beimischungsverhältnis für PtL-JetA1 um denselben Prozentsatz senken.
3. Behebung der juristischen Genehmigungs-Defizite: Hierzu gehört, zum einen die Nichtexistenz von Vorgaben für den Umgang mit Wasserstoff auf Flugplätzen und zum anderen der fehlenden Erlaubnis des Blendens von Kraftstoffen auf dem Flugplatz.

Viele Faktoren aus technischer und sicherheitstechnischer Sicht, wie z. B. das Vorhandensein der benötigten Technologie oder die Erweiterung von bereits existierenden Sicherheitsprogrammen und -abläufen könnten hingegen heute schon problemlos erfüllt werden.

5. Zusammenfassung

Für die Umsetzung der ehrgeizigen Ziele der Luftfahrtbranche und der Politik auf nationaler, europäischer und internationaler Ebene ist es notwendig, dass neuartige Antriebstechnologien wie Elektro-, Wasserstoff- oder Hybridantriebsmodelle entwickelt werden. Auch für Luftfahrzeuge mit konventionellem Verbrennungsmotor ist eine nachhaltige alternative Antriebsversorgung durch biogene oder strombasierte Kraftstoffe gegeben. Letztere stechen durch ihre vielen positiven Eigenschaften wie die CO₂-Neutralität sowohl bei der Produktion als auch bei der Verbrennung und der bereits vorhandenen 50 % Beimischungszertifi-

zierung für JetA1 hervor. Doch für die Kraftstoffversorgung mit diesen neuen Technologien muss die passende Infrastruktur bereitgestellt werden können. Überwindet man die vor allem rechtlichen und finanziellen Hürden des Projektes, ist es möglich, auf dem Flugplatz Schönhagen eine Hybrid-Tankstelle für die Versorgung von Elektroflugzeugen mit Strom, von Wasserstoffflugzeugen mit Wasserstoff und von Luftfahrzeugen mit Verbrennungsmotor mit PtL-Kraftstoff zu realisieren.

Es existiert eine Vielzahl an Projekten für alternative Antriebs-, Luftfahrzeug- und Kraftstoffkonzepte. Diese spiegeln u.a. auch den Trend und das Streben nach Nachhaltigkeit in der Luftfahrtbranche wieder. Deshalb ist es vor allem wichtig, Projekte wie das hier vorgestellte Tankstellenkonzept voranzutreiben, um die benötigte neuartige Infrastruktur zur Verfügung zu stellen und so ein Bewusstsein für neue und nachhaltige Konzepte zu schaffen und diese in der Luftfahrt zu etablieren.

LITERATUR

aero.de, dpa-AFX (2018) Zahl der Flugpassagiere 2017 auf Rekordniveau. <https://www.aero.de/news-28401/Zahl-der-Flugpassagiere-2017-auf-Rekordniveau.html>. Accessed 13 Dec 2018

Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft BDL. Keine Zukunftsmusik: Kerosin aus Wasser und CO₂. <https://www.klimaschutz-portal.aero/klimaneutral-fliegen/alternative-kraftstoffe/kerosin-aus-wasser-und-co2/>. Accessed 14 Dec 2018

Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft BDL (2017) CORSIA: Globales marktbasierendes Klimaschutzinstrument für den internationalen Luftverkehr. Positionspapier

Europäische Kommission (2011) Flightpath 2050. Europe's vision for aviation ; maintaining global leadership and serving society's needs; report of the High-Level Group on Aviation Research. Policy / European Commission. Publ. Off. of the Europ. Union, Luxembourg. ISBN: 978-92-79-19724-6

Fabienke H. (2018) Nachhaltigkeit in der zivilen Luftfahrt – Betrachtung von alternativen Antriebs-, Kraftstoff- und Luftfahrzeugkonzepten mit dem Ziel der Konzeption einer Hybrid-Tankstelle auf dem Flugplatz Schönhagen für die Energieversorgung mehrerer Antriebsarten. Bachelorarbeit, Technische Hochschule Wildau

Flugplatz Schönhagen (2018a) Herzlich willkommen auf dem Flugplatz Schönhagen. <http://www.flugplatz-schoenhagen.aero/der-flugplatz.html>. Accessed 13 Dec 2018

Flugplatz Schönhagen (2018b) Treibstoffpreise. <http://www.flugplatz-schoenhagen.aero/piloten/verkehrslandeplatz/treibstoffpreise.html>. Accessed 14 Dec 2018

International Air Transport Association IATA (2018) Fact Sheet: Climate Change & CORSIA.

International Civil Aviation Organization ICAO. Why ICAO decided to develop a global MBM scheme for international aviation? https://www.icao.int/environmental-protection/pages/a39_corsia_fa1.aspx. Accessed 14 Dec 2018

KLS Publishing (2007) Fliegen mit Wasserstoff. Eine Bestandsaufnahme. <http://klspublishing.de/ejourns/e-Journ%20AI-04%20Fliegen%20mit%20Wasserstoff.pdf>. Accessed 13 Dec 2018

Pompl W (2007) Luftverkehr. Eine ökonomische und politische Einführung, 5., überarb. Aufl. Springer-Lehrbuch. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783540327523. doi: 10.1007/978-3-540-32753-0

AUTOREN

Andreas G. Hotes, Dipl.-Ing.

Henrike Fabienke, B.Eng.

Fachgebiet Airlinemanagement & Aviation Security

Studiengang Luftfahrttechnik / Luftfahrtlogistik

Fachbereich INW

Technische Hochschule Wildau

Dr.-Ing. Klaus-Jürgen Schwahn

Flugplatzgesellschaft Schönhagen mbH

E-Mail für Korrespondenz:
andreas.hotes@th-wildau.de



Untersuchungen zu Mensch-Maschine-Schnittstellen eines Pilotenassistenzsystems zur Begegnung potentieller Gefahrensituationen der Allgemeinen Luftfahrt

Cheryl Nicoletta Schwahn, Sven Angermann* und Wolfgang Rüther-Kindel

Zusammenfassung

Privatpiloten, die sich in der Allgemeinen Luftfahrt bewegen, sind häufig anderen Gefahren ausgesetzt, als Piloten großer Verkehrsflugzeuge. Gefahrensituationen bringen Piloten schnell an Wissenslücken und Kapazitätsgrenzen. Für Privatpiloten stellt dabei der Kontrollverlust im Flug die häufigste Unfallursache dar.

Das Forschungsvorhaben Virtual Instructor for General Aviation (VIGA) des Fachgebiets Luftfahrttechnik leistet einen wesentlichen Beitrag zur Vermeidung dieser Unfälle. Ziel des Vorhabens ist es, ein Assistenzsystem zu entwickeln, das Privatpiloten frühzeitig mit Handlungsempfehlungen unterstützt, sobald diese in eine unkontrollierte Fluglage gelangen.

Dieser wissenschaftliche Beitrag stellt die Grundlagen des Forschungsvorhabens VIGA dar und beschreibt eine Konzepterstellung zur Mensch-Maschine-Schnittstelle von Assistenzsystemen der zivilen Luftfahrt unter Betrachtung der psychologischen Belastung in Notsituationen. Belastungssituationen beeinträchtigen sowohl die Wahrnehmung der Piloten, beispielsweise durch selektive Taubheit oder optische Täuschungen als auch die variierende Reaktionszeit des Piloten auf verschiedene Reize. Ziel ist es, eine geeignete Mensch-Maschine-Schnittstelle zu entwickeln, die jederzeit die Aufmerksamkeit des Piloten erlangt und Handlungsempfehlungen zielgerecht an diesen ausgibt. Erkenntnisse aus diesem Beitrag finden direkte Anwendung im Vorhaben VIGA.

Abstract

Private pilots in the field of private transportation have a higher risk to experience an incident than pilots of air carriers. Incidents become hazardous as soon as pilots reach the boundaries of their knowledge and capacities. For private pilots Loss of Control Inflight is the most common cause for an incident.

The research project Virtual Instructor for General Aviation (VIGA) is countering with this problem by creating an assistance system which transmits recommended actions in hazardous situations before a Loss of Control Inflight occurs. This paper summarizes the basic concept of the research project and comprises the concept of human-machine interfaces used in assistance systems in the field of civil aviation. During situations with a high workload the perception is changing. For example, Pilots experience selective auditory attention, visual illusions and a changing response time referring to the attraction. Therefore, it is the aim to create an appropriate human-machine interface which targets the attention and transmits recommended actions to the private pilot. The awareness is used as the foundation of the project VIGA.

1. Einführung

Das Forschungsvorhaben Virtual Instructor for General Aviation (VIGA) des Fachgebiets Luftfahrttechnik fokussiert Leichtflugzeuge der Allgemeinen Luftfahrt mit einer maximalen Abflugmasse von 2 t. Dieses Segment wickelt ca. 70 % der Flugbewegungen in Deutschland ab (Luftfahrt Bundesamt 2018) und spiegelt sich entsprechend

in den Unfallstatistiken wider (National Transport Safety Board 2016). Aus diesen stellt sich der Kontrollverlust als häufigste Unfallursache der Allgemeinen Luftfahrt heraus (Federal Aviation Administration 2018). Piloten verlieren dabei die Kontrolle ihrer Luftfahrzeuge und gelangen in eine unkontrollierte Fluglage. Eine stabile Fluglage ist ohne Hilfestellung selten zurückzuerlangen. Menschliches Versagen stellt dabei

eine wesentliche Fehlerquelle dar, für das gerade Privatpiloten besonders anfällig sind. 70 % der Flugunfälle wären durch den Menschen vermeidbar gewesen (National Civil Aviation Review Commission 1998). Assistenzsysteme helfen dabei, diese Fehlerquelle zu reduzieren, indem sie auf Gefahren hinweisen oder konkrete Handlungsempfehlungen an den Piloten bzw. Autopiloten ausgeben. VIGA greift dabei

jedoch nicht aktiv in die Bedienung des Luftfahrzeuges ein, wie es bei Verkehrsflugzeugen heutzutage üblich ist. Es nutzt in der Luftfahrt bereits erfasste und vielseitig verwendete Parameter für permanente Simulationen während des Fluges. Bei anbahnenden Risiken verwandelt es diese mittels Algorithmen in geeignete Warnsignale und Handlungsempfehlungen.

2. Risiken von Privatpiloten

VIGA fokussiert auf Privatpiloten, da diese den menschlichen Risikofaktoren der Luftfahrt stärker ausgesetzt sind als Berufs- oder Verkehrspiloten. Folgende Faktoren begründen diesen Sachverhalt.

Zunächst ist das Ausbildungsniveau erheblich niedriger. Die Ausbildung des Piloten schafft die Grundlage seines Wissens und seiner Erfahrung, auf die er in der Flugdurchführung zurückgreift. Sie ermöglicht ihm, mit komplexen Aufgabenstellungen routiniert umzugehen, Entscheidungen effizient zu treffen und schafft mehr Kapazitäten für Situationsbewusstsein. Ein Privatpilot schließt, je nach Ausbildungsform, seine Ausbildung nach 30–45 Flugstunden ab. Berufspiloten benötigen eine Flugerfahrung von 150–200 Flugstunden. Sie werden für komplexere Flugzeugtypen ausgebildet, die technisch besser ausgestattet sind und diverse Assistenzsysteme zur Verfügung haben. Verkehrspiloten müssen eine Erfahrung von mindestens 1.500 Flugstunden nachweisen, bevor sie ein Flugzeug eigenverantwortlich führen dürfen. Bis dahin haben sie zahlreiche Trainings- und Checkflüge absolviert. (Schwahn 2017)

Luftfahrzeuge der Allgemeinen Luftfahrt sind durchschnittlich älter als zehn Jahre und enthalten oft auch einen entsprechend alten Stand der Technik (Erb 2000). Umrüstungen sind kostenintensiv und mit hohen Ausfallzeiten verbunden. Nachteile, die der Flugzeughalter selbst tragen muss.

Ein weiterer Faktor besteht in den Befähigungsüberprüfungen von Piloten. Während Berufspiloten alle sechs Monate einer Befähigungsüberprüfung sowie jährlichen Linechecks unterzogen

werden und im Berufsalltag ihre Kenntnisse aufrechterhalten, werden Privatpiloten nur im Abstand von 24 Monaten geprüft (Schwahn 2017). Zusätzlich sind Privatpiloten selbst dafür verantwortlich, an Sicherheitsschulungen in eigenem Ermessen teilzunehmen. Des Weiteren entfällt häufig das geschulte Auge eines Zweimanncockpits, das Teilaufgaben abnimmt oder bestätigt.

Der kommerzielle Luftverkehr weist zudem mehr Personenkilometer, Umsätze und Beschäftigte auf und ist somit attraktiver für die Forschung und Verkehrspolitik. Fluggesellschaften unterliegen stets einem hohen öffentlichen Druck, sobald sich ein Zwischenfall ereignet. Investitionen in Sicherheitsmaßnahmen und Techniken konzentrieren sich daher vorrangig auf die kommerzielle Luftfahrt, zum Nachteil der Privatpiloten.

VIGA hat das Ziel, diesen Risiken durch Hilfestellungen entgegenzuwirken.

3. Ziel der Arbeit

Die Zulassungsbehörden legen keinen Standard für die Auslegung von Assistenzsystemen fest, solange sie nicht in die Flugführung bzw. Steuerung eingreifen. Studien und Praxisberichte belegen jedoch, dass Piloten in Situationen mit erhöhter Arbeitsbelastung, unter Zeitdruck, hoher Verantwortung, Lärm- und Mehrfachbelastung diese Systeme nur selektiv wahrnehmen. Die Anforderungen an Pilotenassistenzsysteme bestehen darin, Piloten in Situationen, in denen es ihnen an Erfahrung und Wissen mangelt, zu unterstützen. Das ist nicht gewährleistet, wenn das System den Piloten mit seinen Warnsignalen und Handlungsempfehlungen nicht erreicht. Ziel der Arbeit war es, auf Grundlage von neuroergonomischen Studien eine geeignete Mensch-Maschine-Schnittstelle für das System VIGA zu konzipieren. Es ist erforderlich, diese so auszulegen, dass das System den Piloten auch dann mit unterstützenden Hinweisen erreicht, wenn seine Aufnahmekapazitäten in Notsituationen begrenzt sind. Das Konzept fokussiert auf die Wahrnehmungskanäle, die Piloten während der generellen Flugführung nutzen. Diese umfassen die akustische, visuelle und vestibuläre Wahrnehmung.

4. Methode und Vorgehensweise

Die Auslegung von Assistenzsystemen erfolgt nach technischen und psychologischen Rahmenbedingungen sowie Erkenntnissen aus Unfalluntersuchungen. Die theoretischen Grundlagen des Forschungsvorhabens werden durch das Charakterisieren des Anwenderspektrums geschaffen. Dazu gehört es, Unfallraten zu erfassen und daraus die Risiken sowie den Umgang damit zu bestimmen. Risiken und etablierte Maßnahmen werden den Unfalluntersuchungsberichten sowie Luftfahrzeughandbüchern und Lehrbüchern entnommen. Des Weiteren gilt es folgende Fragestellungen zu klären:

1. Wie können Handlungsempfehlungen dem Piloten vermittelt werden?
2. Wie sieht die Gestaltung des fertigen Produkts aus?

Dabei werden verschiedene Vorgehensweisen erwogen. Hersteller von Pilotenassistenzsystemen nutzen eigene Labore und Versuchsreihen, um potentielle Mensch-Maschine-Schnittstellen zu testen. Die Untersuchung von Mensch-Maschine-Schnittstellen in bestehenden Assistenzsystemen zeigt, dass für die Aufmerksamkeitsgewinnung vorzugsweise akustische Signale verwendet werden. Sie sind im gesamten Arbeitsumfeld zu empfangen und benötigen gegenüber der visuellen Wahrnehmung keine Konzentration auf ein definiertes Blickfeld. Die Informationen selber werden dann visuell übertragen, um eine selektive Taubheit zu umgehen. Wesentliche Erkenntnisse dazu erarbeitet die Arbeitsgruppe „Menschliche Faktoren und Neuroergonomie“ des Instituts für Luft- und Raumfahrt in Toulouse mittels verschiedener Studien (Dehais & Causse 2017).

5. Neuroergonomie

Neuroergonomie erforscht die psychologischen Grundlagen, nach denen Kenntnisse des Arbeitsumfelds mit Aspekten der Neurowissenschaft verbunden werden. Die neuroergonomischen Studien bilden daher auch die Grundlage für die Auslegung der Mensch-Maschine-Schnittstelle von VIGA und

die Gestaltung des fertigen Produkts.

Der Mensch steht im Mittelpunkt einer langen Fehlerkette. Die Fehlerkette wird u.a. geprägt durch Verwechslungen, Bedienungsfehler und Missverständnisse. Aufgabe der Hersteller ist es, bereits in der Entwicklung bekannte Fehler zu berücksichtigen und zu kompensieren. Systeme sind an die Leistungsfähigkeit des Menschen aber auch seine Grenzen anzupassen.

Sicherheitsrelevante Erkenntnisse lassen sich in der Luftfahrt zwar meist aus Unfalluntersuchungen gewinnen, der psychologische Hintergrund ist dabei jedoch nur schwer nachvollziehbar. In der Neuroergonomie werden Notsituationen in Studien simuliert. Neue Erkenntnisse werden aus Beobachtungen und Elektroenzephalographie gewonnen. Die Elektroenzephalographie misst Hirnaktivitäten an der Schädeloberfläche mittels rhythmischer Spannungsschwankungen der Nervenzellen. Sie veranschaulicht die Antwort des Gehirns auf Einzelereignisse. Somit ist es möglich, die Aufmerksamkeit auf einen Reiz zu bestimmen und die Wahrnehmung unter erhöhter Arbeitsbelastung zu untersuchen.

6. Wahrnehmung unter erhöhter Arbeitsbelastung

Eine Untersuchung der Wahrnehmung des Piloten unter erhöhter Arbeitsbelastung erfordert zunächst die Bestimmung der Wahrnehmung bei der normalen Flugdurchführung. Bei dieser ist die Wahrnehmung des Piloten konzeptgesteuert und routiniert. Dies erfordert eine ganzheitliche Schulung. Dabei dienen Handlungsschemen als Hilfestellung, um komplexe Aufgabenstellungen zu erfüllen. Unerfahrene Piloten können bereits bei der normalen Flugdurchführung an ihre Kapazitätsgrenzen gelangen. Flugdurchführungen mit Störfällen können auch bei geschulten Piloten Stress auslösen. Sinne und Reize werden verändert wahrgenommen. Das Handeln erfolgt dann abseits von geschulten Abläufen. Die Auswirkung von Störfällen auf die Psychologie des Menschen variiert und ist nicht umfassend voraussehbar. Die Arbeitsgruppe „Menschliche Faktoren und Neuroergonomie“ des Instituts für

Luft- und Raumfahrt in Toulouse führte verschiedene Studien durch, die die Wahrnehmung von Menschen unter verschiedenen Bedingungen untersuchen (Dehais & Causse 2017). Diese werden nachfolgend erläutert.

Verlust der auditiven Wahrnehmung

T. P. Newman schilderte 1993 in “The philosophy of aircraft warning systems”, dass Flugschüler in Situationen mit hoher Arbeitsbelastung zunächst ihre auditive Wahrnehmung verlieren. Sie reagieren weder auf Anweisungen des Fluglehrers noch auf Kontrollfreigaben durch Fluglotsen (Newman 1993). Die Arbeitsgruppe testete dieses Szenario, indem sie Probanden aufforderte, akustische Signale, die von der visuellen Anzeige abweichen, per Knopfdruck zu detektieren. Dabei wurden 31 % der fehlerhaften Signale nicht wahrgenommen (Dehais & Causse 2017).

Wahrnehmung korrespondierender gegenüber abweichenden Signalen

Eine weitere Studie dieses Instituts untersuchte den Zusammenhang der Wahrnehmung von akustischen und visuellen Signalen. Die Aufgabenstellung bestand darin, die Entscheidung zur Landung anhand von visuellen und akustischen Signalen abzuwägen. Bei der ersten Versuchsreihe korrespondierten akustisches und visuelles Signal und versprachen eine problemlose Landung. Die Probanden folgten dem Signal. In einer weiteren Versuchsreihe war gemäß dem visuellen Signal eine Landung durchführbar, während die akustische Warnung das Gegenteil signalisierte. Die Probanden führten die Landung durch und vertrauten damit dem visuellen Signal. Abb. 1 stellt die Ergebnisse der Studie und die dazugehörigen Aufnahmen der Elektroenzephalographie dar. Die Aufnahmen veranschaulichen, dass das akustische Signal intensiver in Begleitung mit einem korrespondierenden visuellen Signal wahrgenommen worden ist. Stimmt die Aussagen beider Signale nicht überein, wurde das akustische Signal kaum wahrgenommen (Dehais & Causse 2017).

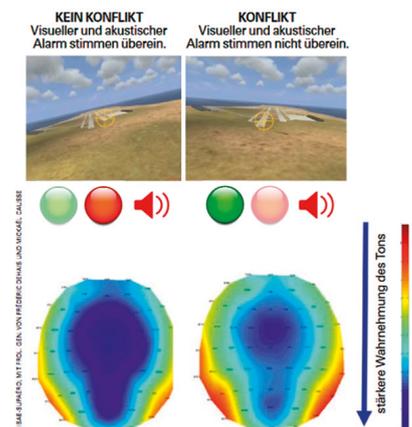


Fig. 1) Aufnahmen der Versuchsreihe zur akustischen Wahrnehmung (Dehais & Causse 2017).

Akustische Wahrnehmung unter variierendem Schwierigkeitsgrad

In einer weiteren Untersuchung wurde die Wahrnehmung akustischer Signale unter variierendem Schwierigkeitsgrad getestet. Probanden erhielten die Aufgabe, eine Landung durchzuführen. Zeitgleich wurde ihnen ein wiederkehrender Ton vorgespielt, der unregelmäßig mit einem hohen Ton versetzt wurde. Der hohe Ton musste von den Probanden über einen Knopf bestätigt werden. Von den hohen Tönen wurden 20 % nicht bestätigt. Wurden die Landebedingungen zusätzlich erschwert, wurden 30 % der Töne nicht wahrgenommen. Daraus lässt sich schließen, dass die selektive Taubheit mit steigender Belastung zunimmt. (Dehais & Causse 2017)

Wahrnehmung akustischer Reize unter variierender Belastung

Mit derselben Problematik beschäftigte sich eine weitere Studie des Instituts. Indikator für die Untersuchung war die P300-Welle aus der Elektroenzephalographie. Sie gibt Auskunft über den Zeitabschnitt und die Intensität der Hirnaktivitäten, die ein Reiz hervorruft. Generell liegt die Antwortzeit zwischen 300–700 ms bei gesunden Menschen. Abb. 2 veranschaulicht die Ergebnisse der Untersuchung. Die blaue Kurve veranschaulicht die Reizwahrnehmung in ruhiger Arbeitsatmosphäre. Der Reiz wird intensiv wahrgenommen. Die grüne Kurve zeigt eine deutlich schwächere Intensität der Reizwahrnehmung. Bei diesem Versuch wurden die

Probanden visuell abgelenkt. Während einer weiteren Versuchsdurchführung wurde zudem eine Notsituation simuliert. Die rote Kurve verdeutlicht dabei, dass der akustische Reiz kaum wahrgenommen wurde. (Giraudet et al. 2015).

eine Stresssituation zu erzeugen. In beiden Versuchsgruppen verringerte sich die Qualität der erbrachten Leistung mit steigendem Schwierigkeitsgrad. Die Elektroenzephalographie gab Aufschluss über die Unterschiede

spielsweise, um Verhaltensweisen ihrer Umgebung zu adaptieren und u. a. das Sprechen zu erlernen. Erwachsene, die Verhaltensweisen ihrer Gesprächspartner nachahmen, erzielen Sympathie bei diesen. Spiegelneuronen sind im Cockpit ebenfalls nutzbar. Probanden bekamen die Aufgabe, Handlungsempfehlungen einer Animation umzusetzen. Die Animationen aktivierten die Nervenzellen der Probanden direkt und die Reaktionszeit verkürzte sich um 60%. (Callan et al. 2012)

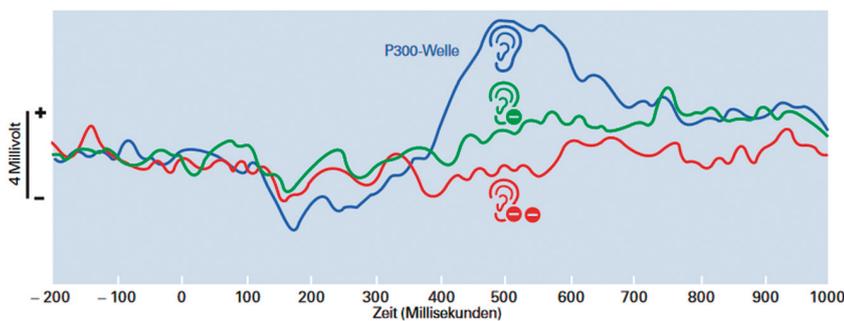


Abb. 2) Wahrnehmung akustischer Signale unter variierender Arbeitsbelastung (Dehais & Causse 2017).

Visuelle Wahrnehmung unter variierender Arbeitsbelastung

Ein weiterer Versuch testete die visuelle Wahrnehmung der Probanden unter erhöhter Arbeitsbelastung. Die Aufgabe bestand darin, anhand einer Drohnenaufnahme eine Zielscheibe zu erkennen. Die Versuchsgruppe war dabei so fixiert auf ihre Aufgabe, dass ein eingblendeter leerer Akkustand nicht bemerkt wurde. Die Studie wurde fortgeführt, indem die Drohnenaufnahme kurzzeitig ausgeblendet wurde, so dass der Bildschirm lediglich den leeren Akkustand signalisierte. Dabei wurden sämtliche Probanden auf das Problem aufmerksam. Der Versuch verdeutlicht, dass die Informationsaufnahmekapazitäten des Menschen beschränkt sind. (Dehais & Causse 2017)

Bedeutung des präfrontalen Kortex in der Wahrnehmung

Der präfrontale Kortex im Stirnhirn sorgt dafür, dass der Mensch in der Lage ist, mehrere Reize zu priorisieren und Stress in geringem Maße zu kompensieren. Probanden wurden in einer Versuchsreihe des Instituts dazu aufgefordert, Aufgabenstellungen mit steigendem Schwierigkeitsgrad zu bewältigen. Die Aufgabe bestand darin, die Durchführung eines Durchstartmanövers abzuwägen. Eine weitere Versuchsgruppe bekam dieselbe Aufgabenstellung, wurde vor dem Versuch jedoch auf die Kosten eines Durchstartmanövers hingewiesen, um dadurch

beider Versuchsgruppen, dargestellt in Abb. 3. Die Versuchsgruppe, die einer erhöhten Stresssituation ausgesetzt wurde, weist in der Elektroenzephalographie einen deutlich stärker angeregten präfrontalen Kortex vor. Die Aufgabenbewältigung unterschied sich in beiden Versuchsgruppen nicht voneinander. Psychologen gehen deshalb davon aus, dass das Gehirn in der Lage ist, Stress in geringem Maße zu kompensieren. (Causse et al. 2013)

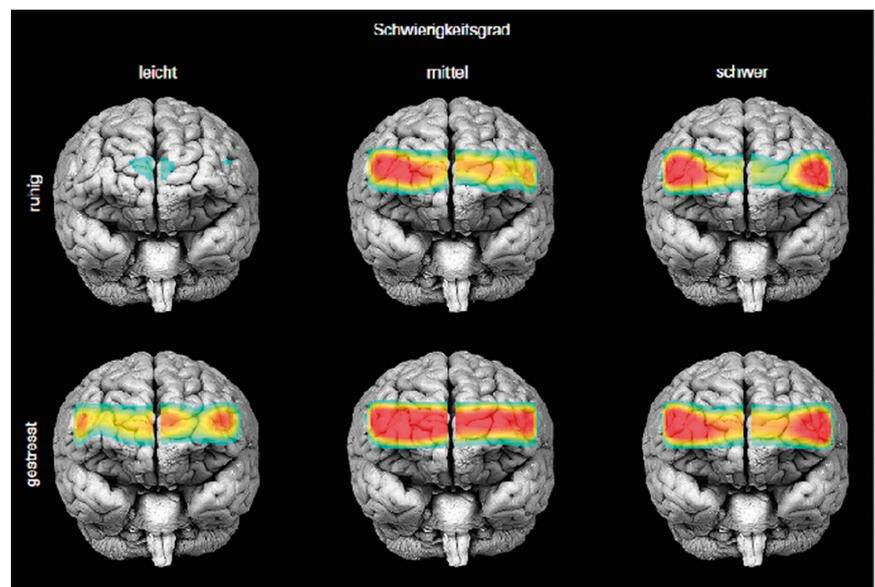


Abb. 3) Aktivitäten des präfrontalen Kortex während einer Belastungsstudie (Dehais & Causse 2017).

Nutzbarkeit von Spiegelneuronen

Spiegelneuronen stellen eine wesentliche Hilfestellung in der Informationsaufnahme und -verarbeitung des Menschen dar. Kinder nutzen diese bei-

Mensch nicht immer in der Lage ist, sämtliche akustischen Signale wahrzunehmen, diese stellenweise komplett überhört. Besonders Notsituationen und abnormale Abläufe erschweren die Wahrnehmung. Es empfiehlt sich

daher, akustische Signale mit visuellen, korrespondierenden Signalen zu koppeln. Visuelle Signale sind dabei so darzustellen, dass sämtliche Informationen eines Panels, die einer niedrigeren Priorität entsprechen, ausgeblendet werden, um beim Piloten Aufnahmekapazitäten für neue Informationen frei zu machen. Handlungsempfehlungen lassen sich visuell besser darstellen und vom Piloten vollständig erfassen. Komplexe Darstellungen sind somit umfassend ausführbar. Um Missverständnisse zu vermeiden, eignen sich zusätzliche Empfehlungen in Textform. Diese können mit Animationen gekoppelt werden, um die Spiegelneuronen des Piloten zu nutzen und die Reaktionszeit zu verkürzen.

8. Ausblick auf das künftige Produkt

Das fertige Produkt soll in der Lage sein, auf Unregelmäßigkeiten akustisch und visuell hinzuweisen und Handlungsempfehlungen durch visuelle Reize in Textform und per Animation auszugeben.

Piloten nutzen im Allgemeinen Headsets zur Kommunikation aber auch zum Lärmschutz, da die Umgebungsgereusche in einem Leichtflugzeug hoch sind. Damit akustische Signale den Piloten erreichen, sollten sie direkt über das Headset ausgegeben werden. Besonders geeignet erscheinen dazu dynamische Headsets, die Umgebungsgereusche aktiv unterdrücken und damit die Aufmerksamkeit weiter fokussieren. Ein Beispiel für ein solches Headset ist das A20 Aviation Headset des Herstellers Bose, dargestellt in Abb. 4. Durch Anschlussmöglichkeiten über AUX und Bluetooth bietet es die Möglichkeit, verschiedene Systeme, die in das Headset eingespeist werden, zu priorisieren.

Die visuelle Ausgabe muss die Möglichkeit bieten, Texte und Animationen darzustellen. Bevor eine Handlungsempfehlung ausgegeben wird, sollte sichergestellt sein, dass die Aufmerksamkeit des Piloten erlangt wurde. Dementsprechend wird ein Ausgabe- und Bedienelement benötigt. Diese Problemstellung lässt sich durch ein Tablet mit Touch-Funktion lösen. Als solches bietet sich z.B. das RugGear-Tablet an. Es ist robust und unempfindlich gegenüber Störungen. Anschlussmöglichkeiten bestehen über USB.

Die Mensch-Maschine-Schnittstelle erreicht den Piloten somit entsprechend dessen Wahrnehmung in Notsituationen gemäß neuroergonomischer Untersuchungen. Die Wahrnehmung variiert in Notsituationen jedoch zwischen den Piloten, somit lässt sich eine hundertprozentige Sicherheit nicht gewährleisten.



Abb. 4) Headset A20 Aviation (Bose, n. d.).



Abb. 5) RugGear Tablet mit Touch-Funktion (RugGear, n. d.).

LITERATUR

Aircraft Owners and Pilots Association AOPA (2016) Allgemeine Luftfahrt: Was ist das?

Callan DE, Gamez M, Cassel DB, Terzibas C, Callan A, Kawato M, Sato M-a (2012) Dynamic visuomotor transformation involved with remote flying of a plane utilizes the 'Mirror Neuron' system. PLoS one 7(4):e33873. doi: 10.1371/journal.pone.0033873

Causse M, Péran P, Dehais F, Caravasso CF, Zeffiro T, Sabatini U, Pastor J (2013) Affective decision making under uncertainty during a plausible aviation task: an fMRI study. Neuroimage 71:19–29. doi: 10.1016/j.neuroimage.2012.12.060

Dehais F, Causse M (2017) Entscheiden im Flugmodus. Spektrum der Wissenschaft 2017(11)

Dehais F, Roy R, Durantin G, Thibault G, Callan D (2017) EEG-engagement index and auditory alarm misperception: an inattentive deafness study in actual flight condition. In: Advances in Neuroergonomics and Cognitive Engineering: Proceedings of the AHFE 2017 International Conference

Erb M (2000) Die allgemeine Luftfahrt in Deutschland: eine Analyse im Spannungsfeld von Ökonomie und Ökologie. Dissertation, TU Darmstadt

Federal Aviation Administration (2009) Risk Management Handbook. FAA-H-8083-2

Federal Aviation Administration (2018) Fact Sheet – General Aviation Safety.

Gateau T, Durantin G, Lancelot F, Scannella S, Dehais F (2015) Real-time state estimation in a flight simulator using fNIRS. PLoS one 10(3):e0121279. doi: 10.1371/journal.pone.0121279

Giraudet L, St-Louis M-E, Scannella S, Causse M (2015) P300 event-related potential as an indicator of inattentive deafness? PLoS one 10(2):e0118556. doi: 10.1371/journal.pone.0118556

Gleim IN (2012) Pilot handbook. A comprehensive text/reference for all pilots, 6th ed. Gleim Publications, Gainesville, Fla.

Luftfahrt Bundesamt (2018) Bestand an Luftfahrzeugen in der Bundesrepublik Deutschland.

Moir I, Seabridge AG (2008) Aircraft systems. Mechanical, electrical, and avionics subsystems integration. Wiley, Chichester, West Sussex, England, Hoboken, N.J. ISBN: 9780470059968. doi: 10.1002/9780470770931

National Civil Aviation Review Commission (1998) Avoiding aviation gridlock & reducing the accident rate: a consensus for change. Washington, D.C..

National Transportation Safety Board (2016) 2014 NTSB US Civil Aviation Accident Statistics. Aviation: Data & Stats

Newman TP (1993) The Philosophy of Aircraft Warning Systems. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering 207(2):75–82. doi: 10.1243/PIME_PROC_1993_207_251_02

Scheiderer J, Ebermann H-J (eds) (2011) Human Factors im Cockpit. Praxis sicheren Handelns für Piloten. Springer, Berlin. ISBN: 9783642151675

Schwahn CN (2018) Konzept zur Umsetzung von Handlungsempfehlungen in potentiellen Gefahrensituationen der Allgemeinen Luftfahrt. Bachelorarbeit, Technische Hochschule Wildau

Schwahn K-J (2017) Beruf Pilot. Voraussetzungen, Ausbildung, Alltag. Motorbuch-Verl., Stuttgart. ISBN: 9783613028951

AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rüther-Kindel
Dr.-Ing. Sven Angermann
Cheryl Nicoletta Schwahn, B. Eng.
Fachgebiet Luftfahrttechnik
Luftfahrttechnik / Luftfahrtlogistik
Technische Hochschule Wildau

E-Mail für Korrespondenz:
sven.angermann@th-wildau.de



Vergleichende akustische Untersuchung von Drohnen-Propellern

Konrad Oeckel, Jan Heimann, Sven Angermann*, Michael Kerscher, Andreas Frahm, Gunnar Heilmann und Wolfgang Rütter-Kindel

Zusammenfassung

Die Reduzierung von Fluglärm ist eine der wesentlichen Herausforderungen der Luftfahrtindustrie. Dies betrifft ebenso unbemannte Luftfahrtsysteme, die zukünftig eine signifikante Rolle im alltäglichen Leben spielen werden. In diesem Zusammenhang wurde im Fachgebiet Luftfahrttechnik der TH Wildau das energetische Potential von Winglets an Propellern („Proplets“) untersucht, deren Einsatz sowohl eine Verbesserung der aerodynamischen Effizienz als auch eine Minderung der Geräuschemission versprechen. Daher musste der akustische Einfluss dieser Proplets präzise bestimmt werden.

In diesem Beitrag wird erstmals die Geräuschemission eines mit Proplets ausgerüsteten Propellers mit einem Referenzpropeller verglichen. Beide Prüfstücke sind, abgesehen von den Blattspitzen, identisch. Neben normgerechten, herkömmlichen Messungen der Schalleistungspegel sowie psychoakustischer Eigenschaften werden beide Prüfstücke mit einem Mikrofon-Array („Akustische Kamera“) untersucht, um die Lärmquellen entlang der Propellerblätter zu visualisieren. Hierfür wird erstmals ein virtuell mitrotierendes Array angewendet, um die aero-akustischen Quellen am stehenden Blatt zu identifizieren.

Schlagworte: Fluglärm, Propellerlärm, Winglets, Proplets, Akustische Kamera, Schallquellenlokalisierung, rotational beamforming.

Abstract

The reduction of aircraft noise is one of the major challenges of the aviation industry. This also concerns unmanned aerial vehicles (UAVs), since they will play an increasingly important role in everyday life. In the context of the presented project the energetic potentials of winglets at propeller tips ("proplets") were investigated in order to increase the aerodynamic efficiency and decrease the noise emission of propellers. Therefore it was necessary to determine the acoustic effects of the attached proplets.

This paper compares the noise emission of a reference propeller with a proplet-equipped propeller for the first time. Except for the tips, they were identically designed. The acoustic power level of both propellers was determined and the results are assessed psycho-acoustically. Additionally an examination of the test pieces with a spaced microphone array ("Acoustic Camera") was conducted to visualize the localization of sound sources on the propellers. A rotational beamforming filter was applied to precisely identify the positions of the rotating aero-acoustic sources.

1. Einführung und Ziel der Arbeit

Die unbemannte Luftfahrt hat in den vergangenen Jahren einen beispiellosen Siegeszug angetreten. Im Jahre 2017 wurden weltweit bereits mehr als 3,5 Millionen UAVs (*unmanned aerial vehicles* – unbemannte Flugsysteme) verkauft, während auch industrielle Anwendungen wie Paketzustelldrohnen erprobt und eingesetzt werden. In diesem Zusammenhang konnte eine kürzlich veröffentlichte Studie der

NASA allerdings ein signifikantes Ablehnungsverhalten der europäischen sowie US-amerikanischen Bevölkerung in Bezug auf das für UAVs typische, hochfrequente Fluggeräusch feststellen – auch im direkten Vergleich zu Straßenverkehrslärm.

Der Hauptanteil des Fluggeräusches, sowohl bei Multikoptern als auch bei konventionellen Tragflügeldrohnen, wird durch die Propeller emittiert. Aus diesem Grunde muss die akustische

Verbesserung an dieser Baugruppe ansetzen, um die allgemeine Akzeptanz für UAVs zu steigern.

In der jüngeren Vergangenheit wurden bereits einige Ansätze verfolgt, um den oben genannten Fluglärm zu mindern: Aufrauhnen der Blattoberfläche, Ausfransen der Blatthinterkante oder die Nutzung von Proplets. Bis heute konnten allerdings die akustischen Potentiale dieser Ansätze nicht zweifelsfrei vermessen oder verglichen werden.

In diesem wissenschaftlichen Beitrag wird nun zum ersten mal eine akustische Untersuchung umgesetzt, die einen mit Proplets ausgestatteten Propeller mit einem Referenzpropeller vergleicht. Mit Ausnahme der Blattspitzen weisen beide Propeller eine identische Geometrie auf. Sie wurden im Rahmen des Projektes SAPODS (Smart Airborne Pollutants Detection System) im Fachgebiet Luftfahrttechnik der Technischen Hochschule Wildau gefertigt, um als Teil des Antriebssystems der fachgebieteigenen Messdrohne ATISS (Autonomous Testbed for Integrated Sensor Systems) Flughöhen von ca. 5.000 Meter zu erreichen.

In diesem Beitrag werden die akustischen Eigenschaften beider Propeller zunächst mit herkömmlichen Messmethoden untersucht. Hierzu gehört eine normgerechte Schalleistungsvermessung sowie eine psychoakustische Bewertung. Für einen umfassenderen Einblick in den Entstehungsmechanismus des Propellergeräusches zu gewinnen, ist es aber notwendig, die Schallquellen am Propellerblatt frequenzabhängig begutachten zu können. Aus diesem Grunde wird im Anschluss eine Untersuchung mit einer Akustischen Kamera vorgenommen. Dieses audiovisuelle Messsystem wurde im letzten Jahr um einen neuartigen Filter erweitert, mit dem nun die Schallentstehung von schnell rotierenden Objekten auf das stehende Objekt projiziert werden können. Somit kann nun erstmals eine präzise Begutachtung des Propellerlärms vorgenommen werden.

2. Beschreibung der Prüfstücke

Beide Propeller wurden von Mitarbeitern des Fachgebietes Luftfahrttechnik der TH Wildau konstruiert und gefertigt. Es handelt sich um Faltpropeller, die für eine Messdrohne mit einem maximalen Abfluggewicht von 250kg entworfen wurden. Das gesamte Antriebssystem wurde für Flughöhen bis circa 5.000 m ausgelegt (Quaack 2016). Alle geometrischen Kenngrößen sind jeweils identisch:

- Propellerdurchmesser: 22" / 558,8 mm
- Propellersteigung: 19" / 482,6 mm
- Blattanzahl: 2

Beide Propeller wurden in Negativformbauweise als Nass-in-nass-Laminat aus kohlefaserverstärktem Kunststoff gefertigt. Die Negativformen verfügen über eine austauschbare Spitze, sodass die Profile entlang der Propellerblätter – und damit Kenngrößen, die den Gesamtschall des Propellers beeinflussen können, wie Blattdicke oder Wölbung – ebenfalls identisch sind. Die aerodynamische Effizienz der Propeller konnte durch verschiedene CFD-Testreihen überprüft werden (Angermann 2016).

Außerdem konnte Sven Angermann durch die Simulationsreihen die vielversprechendste Proplet-Konfiguration festlegen:

- Typ: Blended Proplet
- Höhe: 30 mm
- Neigungswinkel: 0°
- Krümmung: 0 mm

Nachstehende Abb. 1 zeigt die 3D-Modelle beider für diesen Beitrag maßgeblichen Propeller.



Abb. 1) Referenzpropeller und Propletpropeller (Angermann 2016).

Beide Propeller wurden auf dem Prüfstand für Elektroantriebe PRELA des Fachgebietes Luftfahrttechnik der TH Wildau untersucht, um die Simulationsergebnisse zu verifizieren. Entgegen der Hypothese, dass die Proplets einen positiven aerodynamischen Effekt bewirken, konnte bei diesen Prüfstandsversuchen ein geringfügig schlechterer Schubwirkungsgrad des Propletpropellers festgestellt werden.

Bei den oben beschriebenen Versuchen trat allerdings ein weiterer Effekt zu Tage: Von sämtlichen anwesenden Mitgliedern des Fachgebiets konnte ein wesentlich angenehmerer und weniger schneidender Klang des Propletpropellers festgestellt werden. Aus diesem Grunde sollen beide Propeller einer umfassenden akustischen Untersuchung unterzogen werden.

3. Bestimmung der Schalleistungspegel

Der erste Schritt einer vergleichenden akustischen Begutachtung ist die Bestimmung des Schalleistungspegels des Prüfobjekts, mithin die von sämtlichen Störeinflüssen bereinigte Schallenergie des Erzeugers. In diesem Beitrag wurde das Hüllflächenmessverfahren der Genauigkeitsklasse 2 nach DIN 3747:2011 angewendet (Deutsches Institut für Normung 2011). Dieses Verfahren schreibt mindestens vier Messpositionen auf einer Halbkugel rund um das Prüfobjekt verteilt vor.

Bei der Vermessung der Propeller wurden fünf Messpositionen aufgezeichnet, die im Abstand von 40° rund um den Propellerprüfstand platziert wurden. Damit konnte verhindert werden, dass sich die fünfte Messposition im Abwindfeld der Propeller befindet, wodurch die Messung aufgrund der auftretenden Luftmassenströme

verfälscht worden wäre. Die Distanz zu den Propellern betrug jeweils 1,50 m. Abb. 2 zeigt das Schema des Messaufbaus zur Bestimmung der Schalleistungspegel.

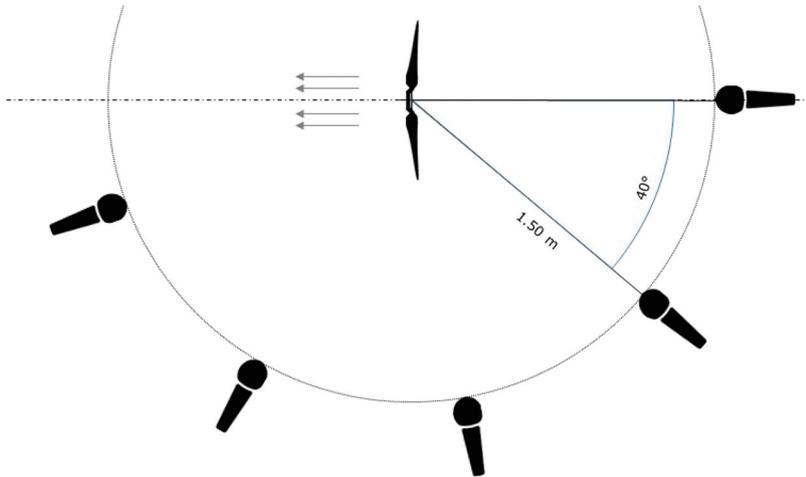


Abb. 2) Schematische Darstellung des Hüllflächenmessverfahrens.

Tab. 1) Ergebnisse der Bestimmung der Schalleistungspegel des Propellerpaares.

Drehzahl	Schalleistungspegel Referenzpropeller	Schalleistungspegel Propletpropeller
2.500 min ⁻¹	92,5 dB	93,3 dB
3.000 min ⁻¹	94 dB	96,1 dB
3.500 min ⁻¹	97,6 dB	98,1 dB
4.000 min ⁻¹	100 dB	101 dB
4.500 min ⁻¹	102 dB	104 dB

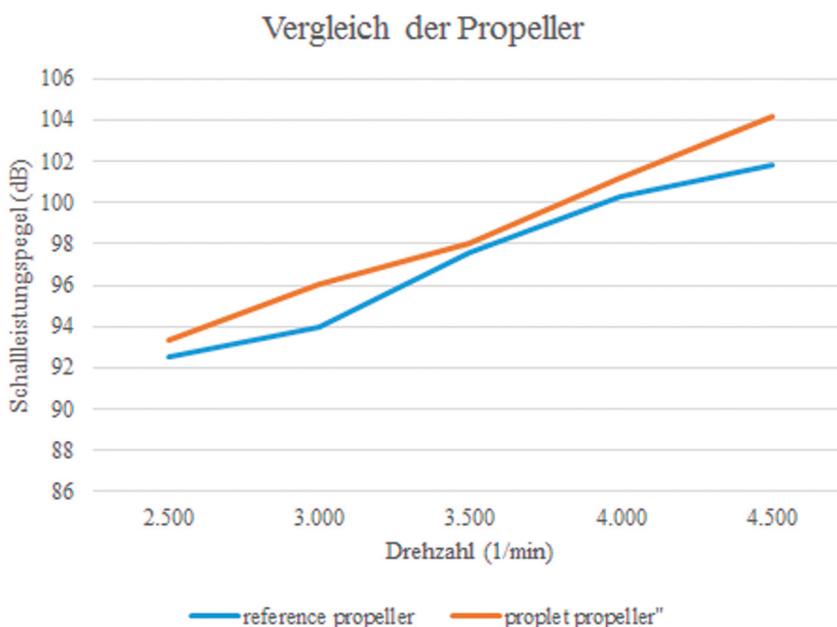


Abb. 3) Vergleich der Schalleistungspegel beider Propeller.

Aus den an den Messpositionen aufgezeichneten Schalldruckpegeln konnten unter Berücksichtigung verschiedener in der Norm festgelegter Korrekturfaktoren für Umgebunggeräusche oder Messraumcharakteristika die Schalleistungspegel für beide Propeller errechnet werden. Wie in nachstehender Tab. 1 zu sehen ist, wurde dieser Parameter über den kompletten Drehzahlbereich des Antriebssystems bestimmt.

Obwohl die Differenz beider Schalleistungspegel nicht mehr als etwa 2 dB pro Drehzahl beträgt, ist die Geräuschemission des Propletpropellers nachweislich etwas höher. Außerdem ist ein linearer Zusammenhang der errechneten Schallpegel ersichtlich (siehe Abb. 3). Der Arbeitsbereich des Antriebssystems wurde bei diesen Messungen fast vollständig abgedeckt, womit ausgeschlossen werden kann, dass sich die akustischen Eigenschaften des Propletpropellers in einem anderen Drehzahlbereich verändern.

Analog zu den Ergebnissen der aerodynamischen Prüfstandsversuche (Angermann 2016) kann also auch hier festgestellt werden, dass die Proplets einen negativen Einfluss auf die Gesamtschallerzeugung des Propellers haben.

4. Psychoakustische Bewertung

Eine Betrachtung der psychoakustischen Eigenschaften der Propeller verspricht Aufschluss über die subjektive Wahrnehmung der Propellergeräusche. Aus diesem Grunde wurden die Geräusche der Propeller bei den oben beschriebenen Versuchen über einen Zeitraum von jeweils 30 Sekunden aufgezeichnet. Somit ist es möglich den Frequenzverlauf der Propeller hinsichtlich des menschlichen Hörvermögens zu begutachten.

4.1 Frequenzspektren

Aus den Kurven gleicher Lautstärke DIN 226:2003 (Deutsches Institut für Normung 2003) geht hervor, dass der Mensch Schallereignisse im Bass- bzw. Hochtonbereich deutlich schlechter wahrnehmen kann, als im Mittentonbereich (siehe Abb. 4). Allerdings sinken die Verträglichkeits-

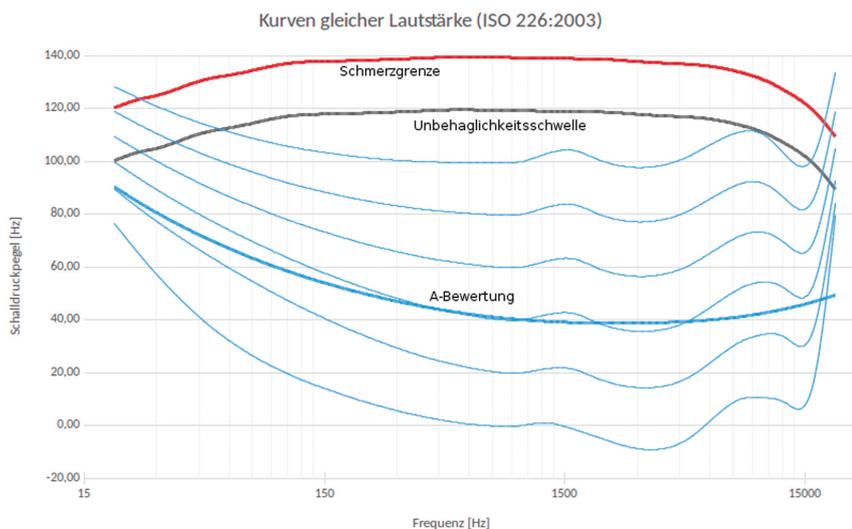


Abb. 4) Kurven gleicher Lautstärke mit Schmerz- und Unbehaglichkeitsschwelle.

schwelen in diesen Randbereichen deutlich schneller ab.

Die aufgezeichneten Geräusche der Propeller können durch eine schnelle Fouriertransformation in 1.024 Frequenzanteile zerlegt werden. Somit kann der jeweilige Frequenzgang dargestellt werden. In der nachstehenden Abb. 5 wurde eine lineare Skalierung der Abszisse gewählt, um vor allen Dingen den Hochtonbereich besser begutachten zu können.

Aus diesen Frequenzspektren geht hervor, dass der Propletpropeller deut-

eine deutliche breitbandige Anhebung im Spektrum des Referenzpropellers sichtbar. Dieser Frequenzbereich ist mitbestimmend für die subjektive Wahrnehmung eines Schallereignisses, da die Unbehaglichkeitsschwelle in diesem Bereich deutlich absinkt und identische Schallpegel als deutlich störender empfunden werden, als bspw. im Mittenbereich.

4.2 Schärfe

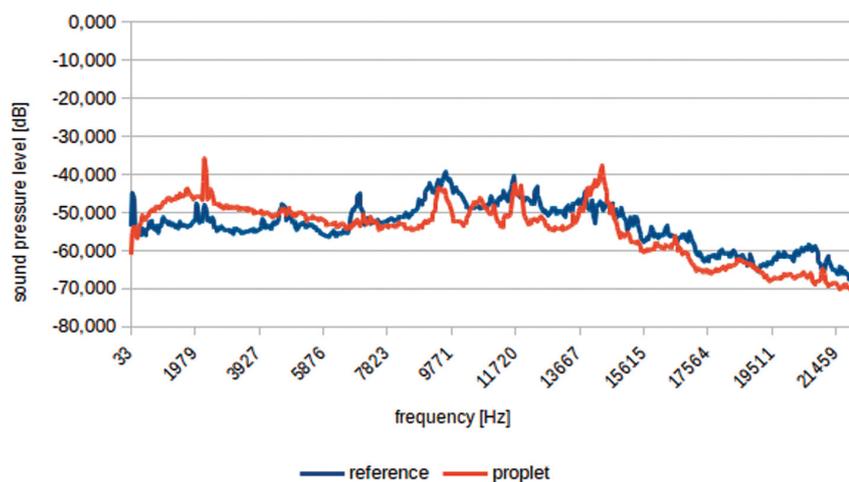


Abb. 5) Frequenzverläufe beider Propeller bei 3.000 min⁻¹.

lich höhere Pegel im Mittenbereich aufweist. Dies scheint in Bezug auf die Ergebnisse der Schalleistungsuntersuchung sinnvoll, da dieser Frequenzbereich den größten Anteil des Gesamtschallereignisses einnimmt. Im Hochtonbereich ab ca. 4.000 Hz ist

Um diese Erkenntnisse zu stützen soll nun die akustische Schärfe bestimmt werden. Dieser Empfindungsparameter wurde in DIN 45692:2009 definiert und ist als Subroutine in vielen akustischen Analysetools enthalten (Deutsches Institut für Normung

2009). Die zugehörige Einheit ist das Acum. Je höher der Wert, desto unangenehmer und schärfer klingt das jeweilige Geräusch. Ein hochdrehendes Motorrad weist eine Schärfe von ca. 1,8 acum auf. Zur Bestimmung der Schärfewerte der Propeller wurden dieselben Aufzeichnungen wie in Abschnitt 4.1 herangezogen.

- Schärfe Referenzpropeller: 2,76 acum
- Schärfe Propletpropeller: 2,21 acum

Damit konnten die psychoakustischen Bewertungen die oben genannten Wahrnehmungen bei den aerodynamischen Versuchen bestätigen. Zwar ist die Gesamtschallemission des Propletpropellers höher, gleichzeitig steigt aber auch die subjektive Verträglichkeit.

5. Untersuchung mit der Akustischen Kamera

Um die Lärmemission entlang des Propellerblattes besser zu verstehen, ist eine genauere Untersuchung der Geräuschenstehung vonnöten. Aus diesem Grunde wurde nun eine Akustische Kamera, also ein ringförmiges Mikrofon-Array, in die Messungen eingebunden. Dieses audiovisuelle Messsystem basiert auf den Laufzeitunterschieden von einer Schallquelle zu den verschiedenen Mikrofonen im Array, wodurch die Quelle millimetergenau lokalisiert werden kann.

Durch die Anwendung eines neuartigen *rotational beamforming*-Filters konnten nun erstmals die Schallquellen eines schnell rotierenden Prüfobjekts auf das stehende Objekt rückaufgelöst werden. Dies wird durch ein virtuelles, zusätzliches Array erreicht, welches sich mit gleicher Geschwindigkeit wie das Messobjekt dreht. Die Funktionsweise des Messsystems und der Filteralgorithmus wurden von Kercher et al. im Jahr 2017 beschrieben.

5.1 Prüfstand und Messraum

Für die Untersuchung mit der Akustischen Kamera ist ein akustisch optimierter Messraum notwendig. Daher wurden die Messungen in der reflexionsarmen Schallkabinen der Forschungsgruppe für Maschinendynamik und lärmarme Konstruktion der TH Wildau durchgeführt.

Des Weiteren wurde ein einfacher und mobiler Propellerprüfstand aufgebaut (siehe Abb. 6). Hierbei konnte eine Minimalkonfiguration genutzt werden, da keine weiteren aerodynamischen Parameter mit aufgenommen werden

mussten. Zusätzlich wurde ein einfaches LabVIEW-Programm geschrieben, mit dem die Drehzahl am Prüfstand präzise eingestellt wurde.

Für die korrekte Anwendung des *rotational beamforming*-Filters ist es notwendig, das Mikrofon-Array parallel zur Propellerdrehebene und konzentrisch zur Propellernabe zu platzieren. Dies konnte durch schrittweise, trigonometrische Annäherung mit einer Propellerreferenzscheibe umgesetzt werden.

Außerdem muss die Drehzahl dem Messsystem zeitsynchron zugespielt werden. Hierzu wurde ein zusätzlicher

Laser-Drehzahlmesser genutzt, der direkt an das Messsystem angeschlossen werden kann. Aus diesem Grunde wurden Reflexionsstreifen auf den Propellern aufgebracht.

Nach dem Einstellen der Zieldrehzahl (3.000 min^{-1}) wurden die Geräusche beider Propeller aufgezeichnet und mit einer Quantisierungstiefe von 24bit bzw. einer Samplerate von 96kHz gewandelt. Als Software sowohl für die Aufnahme als auch für die Analyse wurde das zum Messsystem gehörige Noiselmage 4.9 genutzt.

5.2 Messergebnisse

Nachdem der *rotational beamforming*-Filter auf die aufgezeichneten Daten angewendet wurde, konnte nun ein Akustisches Foto des Propellergeräusches generiert werden. Hiermit können die Schallquellen entlang der Propellerblätter begutachtet werden. Um die Ergebnisse aus den Abschnitten 3 und 4 vertiefen zu können, wird im Folgenden eine Terzbandanalyse vorgenommen. Hiermit können die Schallquellen frequenzbasiert analysiert werden.

Abb. 7 zeigt das Mittenfrequenzband bei 1.600 Hz.

Hier ist ein Einfluss der Propellerdicke auf die Schallemission zu sehen. Das Zentrum der Schallquelle befindet sich beim Referenzpropeller wie erwartet an der dicksten Stelle. Beim Propletpropeller befindet sich dieser Punkt allerdings weiter außen in Richtung der Blattspitze. Dies impliziert eine durch die Proplets induzierte, hochfrequente Blattschwingung und damit eine virtuelle Aufdickung des Profils. Die Aufnahme des Blattes am Mittelstück entwickelt keine Bremswirkung, da es sich um einen Falz- bzw. Klapppropeller handelt. Dieses Verhalten erklärt ebenso die in Abschnitt 2 genannten, schlechteren aerodynamischen Eigenschaften des Propletpropellers sowie den höheren Schallleistungspegel.

Weitere charakteristische Unterschiede sind im Terzband bei 3.000 Hz auszumachen (siehe Abb. 8).

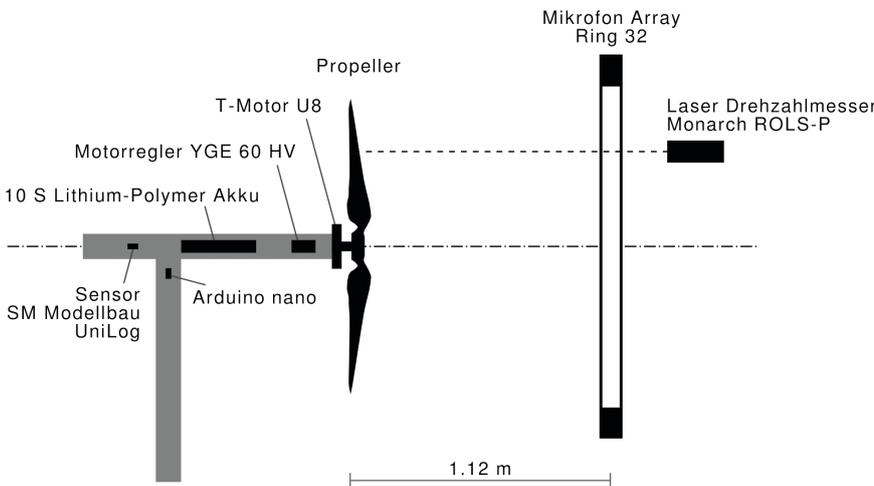


Abb. 6) Schematische Darstellung des Prüfstands.

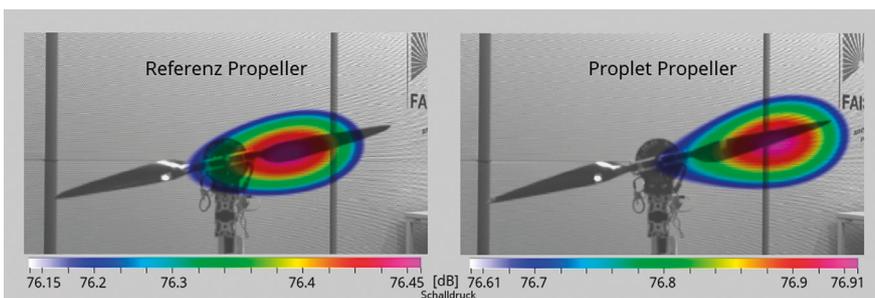


Abb. 7) Akustisches Foto beider Propeller - Terzband 1.600 Hz.

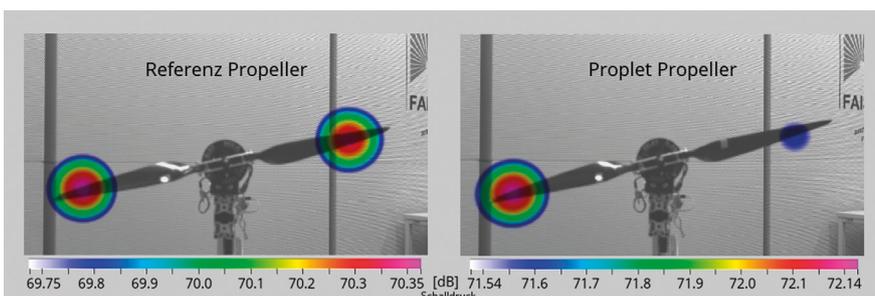


Abb. 8) Akustisches Foto beider Propeller - Terzband 3.000 Hz.

In diesem Akustischen Foto ist der Blattspitzenschlag zu sehen. Beim Referenzpropeller sind die Pegel der Schallquellen gleich verteilt. Beim Propeller hingegen konzentriert sich die Schallenergie auf die linke Blattspitze. Das linke Blatt ist damit dominant. Grund hierfür könnte eine Unwucht sein, die durch eine Masseungleichheit der beiden Blätter (statische Unwucht) oder durch eine Verschiebung der Schwerpunktlagen (dynamische Unwucht) induziert ist.

In Abb. 9 ist das Schallverhalten der Propeller im Terzband bei 8.000 Hz zu sehen.

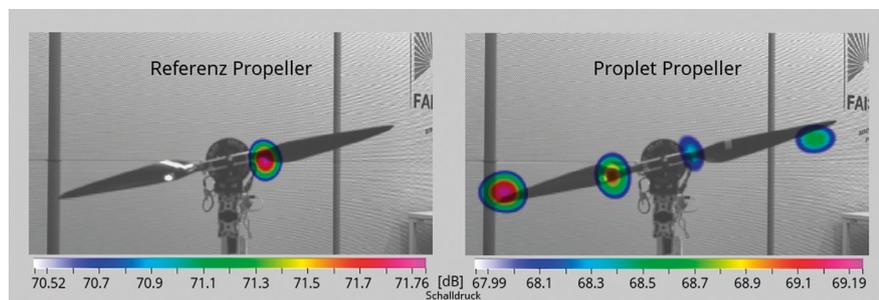


Abb. 9) Akustisches Foto beider Propeller - Terzband 8.000 Hz.

Die Schallenergie des Referenzpropellers konzentriert sich hier auf einen Punkt an der Propellerwurzel. Dies weist auf einen Strömungsabriss hin, was plausibel erscheint, da der Anstellwinkel an dieser Stelle maximal ist. Das akustische Foto des Propletpropellers zeigt hingegen eine gleichmäßige Verteilung der Schallenergie, wobei auch hier das linke Blatt dominant erscheint.

5.3 Validierung

Aus den Akustischen Fotos im vorherigen Abschnitt konnten verschiedene Annahmen hergeleitet werden, welche die unerwarteten Ergebnisse der aerodynamischen und akustischen Untersuchungen erklären können. Es ist allerdings notwendig, diese Thesen auf Sinnhaftigkeit zu prüfen.

Die vermutete Blattschwingung konnte durch eine Aufnahme mit einer Hochgeschwindigkeitskamera bestätigt werden. Hierbei wurde die Kamera senkrecht zur Propellerdrehebene platziert. Nach Einstellen der Zieldrehzahl

wurden jeweils vier Sekunden Propellerdrehung mit 1.000 Bildern pro Sekunde aufgezeichnet. Zur Auswertung wurden Standbilder am oberen Scheitelpunkt des Propellerdurchlaufs extrahiert. Zur Verdeutlichung der unterschiedlichen Ausschläge wurde die Propellersehne nachgezeichnet. In folgender Abb. 10 sind die Extrema dieser Ausschläge für beide Propeller skizziert.

Aus dieser Grafik wird ersichtlich, dass die Blätter des Propletpropellers mit deutlich größerer Amplitude oszillieren, als die des Referenzpropellers. Damit

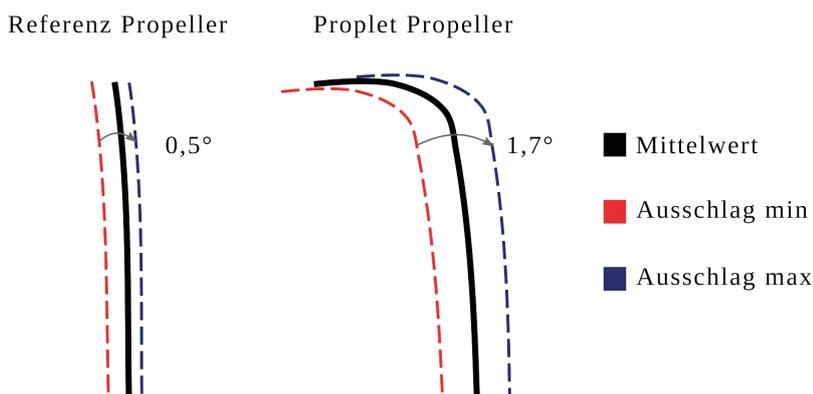


Abb. 10) Blattausschläge von Referenz- und Propletpropeller.

konnte die vermutete Blattschwingung nachgewiesen werden.

Weiterhin ist auf verschiedenen akustischen Fotos ein dominantes Blatt des Propletpropellers sichtbar geworden. Alle Propellerblätter wurden bei der Fertigung statisch gewuchtet, also auf ein Zehntel Gramm abgewogen worden. Allerdings wurde darauf verzichtet, den Schwerpunkt der Blätter zu bestimmen, mithin eine dynamische Wuchtung vorzunehmen. Bei der Überprüfung des Propletpropellers konnte nun festgestellt werden, dass sich die Schwerpunktlage entlang der Propellersehne um 0,91 mm unterscheidet. Beim Referenzpropeller beträgt diese Differenz lediglich 0,13 mm. Demnach konnte auch die vermutete (dynamische) Unwucht nachgewiesen werden.

6. Fazit

In diesem Beitrag konnte eine umfangreiche Messmethode erarbeitet werden, die es ermöglicht, die Lärmemission von Propellern besser zu verstehen und präziser zu analysieren. Fertigungsmängel konnten identifiziert werden. Durch die Anwendung des *rotational beamforming*-Filters ist die Akustische Kamera nun in der Lage, einen tieferen Einblick in das Schallverhalten am Propellerblatt zu gewähren und lärmindernde Potentiale künftig zielgerichteter anzuwenden. Somit können auch die bisher in der Fachliteratur verfügbaren, meist theoretischen Ansätze der Propellerlärmanalyse vertieft und erweitert werden.

Weiterhin konnte gezeigt werden, dass der Einsatz von Proplets einen Einfluss auf die Geräuschentwicklung der Propeller hat. Sie können ein Ansatz darstellen, um künftig die Akzeptanz von UAVs zu steigern, da sie die Schärfe des Propellerlärms abmildern, wodurch der Klang des Propellers als angenehmer bzw. weniger störend wahrgenommen wird.

Es wird daher empfohlen, die akustischen Potentiale der Proplets noch umfangreicher zu analysieren. Hierzu könnten die oben beschriebenen Messungen mit festgestellten Propellerblättern sowie mit Proplets

halber Höhe durchgeführt werden. Außerdem sollte die Messmethode auf größere Antriebssysteme umgesetzt werden, da hier aufgrund der steigenden Anzahl von Propellermaschinen im Sportluftverkehr sowie im Kurzstreckenlinienverkehr noch größere Notwendigkeiten der Lärmvermeidung angezeigt sind.

LITERATUR

Angermann S (2016) Investigations of Propeller Optimization by using Proplets. Dissertation, Università degli studi di Roma „Tor Vergata“

Deutsches Institut für Normung (2003) ISO 226:2006-04. Acoustics - Normal equal-loudness-level contours, Berlin

Deutsches Institut für Normung (2009) DIN 45692:2009-08. Measurement technique for the simulation of the auditory sensation of sharpness, Beuth

Deutsches Institut für Normung (2011) DIN EN ISO 3747:2011-03. Acoustics - Determination of sound power levels and sound energy levels of noise sources using sound pressure - Engineering/survey methods for use in situ in a reverberant environment, Beuth

Kerscher M, Heilmann G, Puhle C, Friebe C, Krause R (2017) Sound Source Localization on a Fast Rotating Fan Using Rotational Beamforming. In: InterNoise. 46th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, 27.–30.08.2017, Hong Kong

Quaack F (2016) Auslegung eines hörentauglichen Antriebes für das unbemannte Luftfahrtsystem ATISS. Masterarbeit, Technische Hochschule Wildau

AUTOREN

Dr.-Ing. Sven Angermann
Dr. Andreas Frahm
Konrad Oeckel, B. Eng.
Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Rütther-Kindel
Fachgebiet Luftfahrttechnik
Luftfahrttechnik / Luftfahrtlogistik
Technische Hochschule Wildau

Gunnar Heilmann
Jan Heilmann
Michael Kerscher
gfai tech GmbH

E-Mail für Korrespondenz:
sven.angermann@th-wildau.de



Richterwahl und Richteramt in einem künftigen Multilateralen Investitionsgericht: zentrale Regelungsfragen

Christian Hederer*

Zusammenfassung

Das aktuelle globale Investitionsschutzsystem ist ökonomisch notwendig, aber reformbedürftig. Ein Hauptkritikpunkt am jetzigen Zustand ist die Verfahrensführung durch ad-hoc-Schiedsgerichte, deren Neutralität und Sachkompetenz angezweifelt wird. Deshalb wird u.a. von der Europäischen Union die Etablierung eines ständigen Multilateralen Investitionsgerichts angestrebt. Der Beitrag analysiert zentrale regulatorische Optionen für den Auswahlprozess und die Ausgestaltung der Amtsführung der Richter eines künftigen Multilateralen Investitionsgerichts.

Abstract

The current global system of investment protection is economically necessary but in need of reform. A major critique of the present system is the conduct of proceedings by ad hoc arbitral tribunals, whose neutrality and competence are contested. This is why the European Union, among others, is advocating the establishment of a standing Multilateral Investment Court. This contribution analyses core regulatory options with respect to the selection and rules of conduct for judges of a future Multilateral Investment Court.

1. Einleitung und Problemstellung

In einer globalisierten Wirtschaft sind Schutzmechanismen für grenzüberschreitende Investitionen gegen willkürliche politische oder administrative Eingriffe in den Zielstaaten – insbesondere entschädigungslose Enteignung sowie grob ungerechte und/oder diskriminierende Behandlung – von hoher Bedeutung. In diesem Kontext sind weltweit aktuell etwa 2630 größtenteils bilaterale Investitions(schutz)abkommen in Kraft (vgl. UNCTAD 2018a), welche internationalen Investoren die Möglichkeit bieten, Zielstaaten, die solche Eingriffe vornehmen, vor einem internationalen Schiedsgericht auf Schadensersatz zu verklagen. Allein Deutschland hat aktuell 126 derartige Abkommen in Kraft (vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2018). Die Nutzung dieses völkerrechtlichen Instruments durch Investoren hat sich seit etwa 2003 erheblich intensiviert; pro Jahr werden im Mittel weltweit nunmehr etwa 65 neue Verfahren angestrengt (UNCTAD 2018b).

Parallel zu ihrer steigenden praktischen Bedeutung sind Investitionsabkommen allerdings teils massiver Kritik ausgesetzt (vgl. zusammenfassend Kaufmann-Kohler & Potestà 2016: 6ff.). Das Kernbedenken besteht in der vermuteten Einschränkung staatlicher Regelungsspielräume. In *materieller* Hinsicht gründet sich dies auf die zumeist relativ breite und damit erheblichen Interpretationsspielräumen unterliegende Formulierung der Investorenrechte: befürchtet wird, dass Staaten bereits im Voraus auf bestimmte Maßnahmen, etwa im Umweltbereich, verzichten könnten, um etwaigen Investorenklagen und in der Folge Schadensersatzzahlungen vorzubeugen. In *prozeduraler* Hinsicht wird – neben der grundsätzlichen Asymmetrie des Instruments, welches den Investoren das alleinige Klagerecht einräumt – vor allem die Konstituierung und Arbeitsweise der Schiedsgerichte kritisiert. Diese werden für jedes Verfahren ad hoc zusammengestellt und setzen sich regelmäßig aus drei Schiedsrichtern zusammen, von denen jeweils einer durch den klagenden Investor

und den klagenden Staat nominiert wird und der dritte – Vorsitzende – entweder konsensual oder von einer externen Instanz zu ernennen ist. Die Entscheidung eines Schiedsgerichts ist – abgesehen von eng umschriebenen Annullierungsmöglichkeiten aufgrund grober Rechtsmängel – endgültig. In der Praxis werden entsprechende Verfahren von einer relativ kleinen Elite fast ausschließlich in westlichen Industriestaaten ansässiger Experten betrieben, welche regelmäßig sowohl als Anwälte als auch als Schiedsrichter tätig werden (Langford et al. 2017). Diese Elemente erzeugen Bedenken zur Unabhängigkeit der Schiedsrichter und deren Anreizen, investorenfreundlich zu entscheiden, um neues „Fallgeschäft“ zu generieren (van Harten 2010); zu ihrer Qualifikation (Deutscher Richterbund 2016) und Repräsentativität, zB was überproportional oft beklagte Schwellen- und Entwicklungsländer betrifft (Langford et al. 2017); zur Konsistenz und Vorhersehbarkeit der Urteile angesichts des ad-hoc-Charakters der Schiedsgerichte und der fehlenden Berufungsmöglichkeit (Kauf-

* korrespondierender Autor

mann-Kohler 2016: 6ff.); und schließlich auch zu den Kosten und der Transparenz der Verfahren.

Diese Kritikpunkte werden von der Europäischen Kommission – die seit dem Vertrag von Lissabon für die Verhandlung von Abkommen mit Drittstaaten, welche derartige Investitionsschutzbestimmungen enthalten, zuständig ist – vor allem seit dem Amtsantritt von Handelskommissarin Malmström und auch auf Druck des Europäischen Parlaments und mehrerer Mitgliedstaaten, darunter Deutschland, zunehmend aufgegriffen. Ein Schwerpunkt der Reformbemühungen besteht in der Ersetzung der ad hoc-Schiedsgerichte durch eine ständige Instanz, deren Mitglieder allein durch die vertragsschließenden Staaten ernannt werden. Die auf europäischer Ebene jüngst ratifizierten EU-Handelsabkommen mit Kanada (CETA), Vietnam und Singapur sehen eine solche Instanz auf jeweils bilateraler Ebene bereits vor.¹ Darüber hinaus engagiert sich die Kommission aber auch für die Einrichtung eines Multilateralen Investitionsgerichts (MIG), das per Beitritt der jeweiligen Vertragsstaaten zu einer entsprechenden Konvention auch für bestehende Abkommen zuständig gemacht werden und damit den herkömmlichen Schiedsgerichtsbarkeitsmechanismus ersetzen könnte. Der EU-Ministerrat hat der Kommission im März 2018 ein Mandat zur Führung entsprechender Verhandlungen im Rahmen der Kommission der Vereinten Nationen für internationales Handelsrecht (UNCITRAL) erteilt.² Der Start konkreter Diskussionen ist für 2019 zu erwarten.

Aus Sicht der Europäischen Kommission würde die Etablierung eines MIG als vollwertiges internationales Gericht, das den Standards bereits etablierter Institutionen, wie etwa des

Internationalen Gerichtshofs (IGH), entspricht, die oben skizzierten prozeduralen Probleme des derzeitigen Investitionsschutzsystems im Wesentlichen lösen (European Commission 2017). Allerdings besteht gegen dieses Projekt international auch teils erhebliche Skepsis (vgl. z.B. Zuleta 2015). Befürchtet wird unter anderem, dass die derzeit kritisierte vermutete „Investorenfreundlichkeit“ der Schiedsrichter durch eine „Staatsfreundlichkeit“ von fix durch die Vertragsstaaten ernannten Richtern ersetzt werden könnte, was angesichts des spezifischen Charakters von Investorenklagen besonders problematisch wäre. Zudem ginge die Möglichkeit der Streitparteien, die Auswahl der Schiedsrichter spezifisch auf Gegenstand und Inhalte des jeweiligen Verfahrens abzustimmen, verloren. Generell könnte das Investitionsschutzsystem in höherem Maß politischen Einflüssen unterliegen und damit seinen aus Investorensicht wesentlichsten Vorzug verlieren.

Vor diesem Hintergrund ist zu erwarten, dass der Erfolg eines MIG zentral von seiner konkreten regulatorischen Ausgestaltung und dem Maß, in dem die Anliegen beider Seiten integriert werden können, abhängen wird. Ein neutralgischer Regelungsbereich, der den Fokus dieses Beitrags bildet, ist die Auswahl der Richter und die Ausgestaltung des Richteramtes, etwa in Hinblick auf die Amtsdauer und die Möglichkeit vorzeitiger Abberufung (vgl. auch Kaufmann-Kohler & Potestà 2017). Die Bedeutung dieser Regeln für die Qualität von Gerichtsurteilen wie auch für die Legitimität des jeweiligen Gerichts als Institution ist sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene allgemein anerkannt. Die Analyse zentraler regulatorischer Optionen für ein MIG ist diesem Bereich ist Gegenstand dieses Beitrags.

Der Beitrag gliedert sich wie folgt. Abschnitt 2 skizziert einen analytischen Beurteilungsrahmen in Hinblick auf den Charakter eines MIG als internationales Gericht. Zunächst werden zentrale Anforderungen an einen solches Gericht als Institution, und aufbauend darauf, an seine Richter diskutiert. In Anschluss daran wird gezeigt, dass manche dieser Anforderungen Zielkonflikten unterlie-

gen, die aktive regulatorische Entscheidungen notwendig machen. Auf dieser Grundlage diskutiert Abschnitt 3 dann konkrete regulatorische Optionen für Richterwahl und richterliche Amtsführung in einem MIG. Dies erfolgt in einer vergleichenden Perspektive unter Analyse von Regelungen und Erfahrungen ausgewählter bereits etablierter internationaler Gerichte, aber auch unter Berücksichtigung der skizzierten spezifischen Charakteristika und Bedürfnisse des internationalen Investitionsschutzes. Ein kurzes Fazit schließt den Beitrag.

2. Beurteilungskriterien internationaler Gerichte und ihrer Richter

2.1 Kriterien

Analog ihren nationalen Pendanten sind internationale Gerichte in grundsätzlicher Betrachtung rechtsstaatliche Institutionen, d.h. sie dienen der Lösung von Konflikten auf Grundlage völkerrechtlich verbindlicher Normen und beugen damit auch einer willkürlichen Machtausübung größerer gegen kleinere Staaten vor (Chesterman 2008). Dies wirft die Frage auf, warum souveräne Staaten überhaupt zu einer Abtretung entsprechender Kompetenzen an internationale Gerichte bereit sind. In der aktuellen Literatur gibt es dazu verschiedene, letztlich aber komplementäre Antworten (vgl. Posner & Yoo 2005, Helfer & Slaughter 2005, Voeten 2013). Zentral ist die Schaffung einer Vermittlungsinstanz, die von den partizipierenden Staaten als neutral betrachtet wird. Diese Neutralität erleichtert die a-priori-Betrachtung des Gerichts mit Konflikten, die zum Zeitpunkt des Abschlusses eines völkerrechtlichen Vertrags in keinem Fall vollständig vorhergesehen werden können, und erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass die der Lösung eines Konflikts zugrunde liegende Interpretation von Fakten und Rechtsgrundlagen durch das Gericht die Zustimmung aller Parteien findet. Zudem kann die Unterwerfung unter die Rechtsprechung eines internationalen Gerichts gegenüber anderen Staaten und Akteuren als Signal für die Bereitschaft eingesetzt werden, die eingegangenen völkerrechtlichen Verpflichtungen tatsächlich einzuhalten.

1 Comprehensive Economic and Trade Agreement (CETA) Art 8.29, http://trade.ec.europa.eu/doclib/docs/2014/september/tradoc_152806.pdf; EU-Vietnam Free Trade Agreement Chapter 8/2, Section 3 Art 15, <http://trade.ec.europa.eu/doclib/press/index.cfm?id=1437>; EU-Singapore Investment Protection Agreement, Art 3.9, <http://trade.ec.europa.eu/doclib/press/index.cfm?id=961> (alle zuletzt abgerufen am 01.03.2019).

2 Council of the European Union (2018) Negotiating directives for a Convention establishing a multilateral court for the settlement of investment disputes, Brüssel. <http://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-12981-2017-ADD-1-DCL-1/en/pdf> (zuletzt abgerufen am 01.03.2019).

ten – was gerade im Investitions- und Handelsbereich mit positiven ökonomischen Konsequenzen verbunden sein kann.

Aus diesen Überlegungen ergeben sich mehrere Kriterien, anhand derer die Qualität eines internationalen Gerichts grundsätzlich beurteilt werden kann. Erstens sollte das Gericht als Institution *unabhängig* sein, d.h. gegenüber allen relevanten Akteuren einen hohen Grad an Autonomie genießen, insbesondere auch in budgetärer und administrativer Hinsicht (vgl. z.B. Brown 2003, Mahoney 2008). Zweitens sollte das Gericht *unparteiisch* sein, was auch eine *hohe juristische Qualität* seiner Entscheidungen impliziert (z.B. bezüglich Qualität und Detail der seinem Urteil zugrundeliegenden Argumente, oder der Konsistenz der Urteile). Drittens sollte das Gericht ein hohes Maß an *Legitimität* genießen. Im allgemeinsten Sinn bedeutet dies eine grundsätzliche Akzeptanz seiner Rechtsprechungsfunktion und Urteile durch den betroffenen Adressatenkreis; im Regelfall wird diese Akzeptanz eng an die oben genannten Kriterien Unparteilichkeit, Unabhängigkeit und Qualität geknüpft sein (vgl. Grossman 2009, Cohen et al. 2018). Schließlich sollte das Gericht auch ein Mindestmaß an *faktischer Wirksamkeit* aufweisen; das heißt vor allem, dass Staaten sich des Gerichts zur Konfliktlösung auch tatsächlich bedienen und seine Urteile effektiv umsetzen (Posner & Yoo 2005: 28f.).

Aus diesen Kriterien für das Gericht als Institution können nun weitere Kriterien für die – hier in erster Linie zur Diskussion stehenden – Richter als Gruppe von Individuen abgeleitet werden,³ die in Abschnitt 3. auch der Analyse der Optionen für ein MIG zugrundegelegt werden. Zentral ist zunächst wieder-

³ Vgl. für internationale (wenngleich unverbindliche) einschlägige Richtlinien die „Burgh House Principles of the International Judiciary“ (2004) der International Law Association Study Group on the Practice and Procedure of International Tribunals, https://www.ucl.ac.uk/international-courts/sites/international-courts/files/burgh_final_21204.pdf; „Resolution on the Values Pertaining to Judicial Appointments to International Courts and Tribunals“ (2011) des International Bar Association's Human Rights Institute, https://www.ibanet.org/Human_Rights_Institute/council-resolutions.aspx; und die „Resolution on the Position of the International Judge (2011) 6th Commission of the International Institute of International Law, <http://www.iiil.org/app/uploads/2017/06/Question1.pdf> (alle zuletzt abgerufen am 01.03.2019).

rum die richterliche *Unabhängigkeit*, also ein hohes Maß an Autonomie auch gegenüber dem Gericht selbst und das Fehlen persönlicher Interessen oder sonstiger Faktoren, die einer rein rechtsfokussierten Fallbeurteilung entgegenstehen. Das Kriterium der *Unparteilichkeit* impliziert auf individueller Ebene auch ein hohes Maß an persönlicher *Integrität* und *Professionalität* bis hin zur Erfüllung allgemeiner charakterlicher Anforderungen. Des weiteren müssen alle Richter bestimmte *Qualifikationsanforderungen* erfüllen, die als (formale) Befähigung zu nationalen Richterämtern, aber auch (inhaltliche) Anforderungen bez. Sachkompetenz und/oder (Berufs-)Erfahrung formuliert sein können. Schließlich bildet gerade für die Richterschaft internationaler Gerichte auch deren *Repräsentativität* ein wichtiges Kriterium. Diese richtet sich traditionell nach verschiedenen geografischen Kriterien, schließt aber zunehmend auch das Geschlecht der Richter/innen mit ein.

2.2 Zielkonflikte

Auf den ersten Blick kann eine bestmögliche Erfüllung dieser Kriterien auch für die regulatorische Ausgestaltung eines MIG als „Goldstandard“ betrachtet werden. Allerdings bestehen zwischen einzelnen der Kriterien Zielkonflikte, die, wie im folgenden Abschnitt gezeigt wird, auch für den spezifischen Kontext des Investitionsschutzsystems teilweise von hoher Bedeutung sind.

Richterliche Unabhängigkeit und Unparteilichkeit werden zumeist als komplementär bzw. wechselseitig verstärkend angesehen. Sie können im Kontext von Verhaltens- und Abberufungsregeln für das Richteramt aber auch in einem Spannungsverhältnis stehen: wenn beispielsweise die vorzeitige Abberufung eines Richters sehr strengen Voraussetzungen unterliegt, stärkt dies zwar dessen Unabhängigkeit, reduziert aber gleichzeitig seine Kontrollierbarkeit in Hinblick auf die Einhaltung der genannten Standards während der Amtsführung. Verbunden damit ist das kontroverse Verhältnis zwischen der Unabhängigkeit des Gerichts und seiner Richter und seiner faktischen Wirksamkeit. Die konventionelle Betrachtungsweise geht hier wie-

derum von einem weitgehend komplementären Verhältnis aus. Posner und Yoo (2005) haben in einem einflussreichen Beitrag jedoch argumentiert, dass ein hohes Maß an richterlicher Unabhängigkeit den faktischen Mehrwert des Gerichts für die Vertragsstaaten reduzieren kann, weil Freiräume für eine Rechtsprechung geschaffen werden, die persönlichen, oft auch ideologisch motivierten Präferenzen der Richter mehr entspricht als den Interessen der Konfliktparteien – ein Zielkonflikt, der letztlich zur Notwendigkeit der Festlegung eines „politisch optimalen“ Maßes an Unabhängigkeit führen würde (Voeten 2013: 424).

Ein weiteres Spannungsfeld besteht zwischen Repräsentativität und Unabhängigkeit / Unparteilichkeit. Dies deshalb, weil ein striktes Verständnis der letzteren beiden Prinzipien die Entscheidung des Richters eigentlich vollständig von dessen persönlichem Hintergrund ablösen sollte: ein „home state bias“ richterlicher Argumentation ist ausdrücklich unerwünscht (Voeten 2014). Zielkonflikte können auch zwischen Repräsentativität und Qualifikation und im weiteren auch der juristischen Qualität der Gerichtsurteile bestehen. Beispielsweise sind Prozesse der Richterauswahl, die auf eine bestmögliche geografische Repräsentation abzielen, oft hochgradig politisiert und führen damit regelmäßig nicht zur Wahl der bestqualifizierten Kandidaten. Andererseits können sehr strikte Qualifikationsanforderungen ein gewünschtes Maß an Repräsentativität gefährden, insofern unterrepräsentierte Gruppen (z.B. kleinere Entwicklungsländer) zu wenige adäquate Kandidaten stellen können. Schließlich kann eine sehr heterogene Richterschaft zwar modernen Repräsentationsanforderungen besser entsprechen, andererseits aber die Konsensfindung und damit auch die faktische Wirksamkeit des Gerichts beeinträchtigen.

3. Optionen für ein Multilaterales Investitionsgericht

Auf Grundlage der obigen Diskussion kann nunmehr eine vergleichende Analyse regulatorischer Optionen vorgenommen werden, wobei grundsätzlich die Phase der Richterwahl bzw. -ernennung (3.1 und 3.2) von jener der Amtsführung (3.3. und 3.4) unterschieden wird. Für jeden Aspekt erfolgt zunächst ein kurzer Überblick bestehender Regelungen in den folgenden internationalen Gerichten: IGH; Internationaler Strafgerichtshof (IStGH); Internationaler Seegerichtshof (ISGH); WTO-Berufungsgremium (WTO BG, hier vereinfachend als ebenfalls als „Gericht“ eingestuft); Europäischer Gerichtshof (EuGH); und Europäischer Gerichtshof für Menschenrechte (EGMR).⁴ Die Analyse geht davon aus, dass die materiellen Schutzstandards bestehender Investitionsschutzverträge im wesentlichen unverändert bleiben, die analysierte hypothetische Reform sich also auf verfahrensrechtliche Aspekte beschränkt. Auf die mögliche Einrichtung einer Berufungsinstanz und etwaige gesonderte Kriterien für eine solche kann aus Raumgründen nicht eingegangen werden; ebenso

⁴ Die im folgenden angeführten Einzelregelungen werden aus Raumgründen nicht im Detail referenziert. Rechtsquellen für die genannten Gerichte sind folgende: IGH: Statute of the International Court of Justice, 24 October 1945; Rules of Court, International Court of Justice, adopted on 14 April 1978. IStGH: Rome Statute of the International Criminal Court, doc. A/CONF.183/9 of 17 July 1998; entered into force on 1 July 2002; Rules of Procedure and Evidence, Official Recordings of the Assembly of States Parties to the Rome Statute of the International Criminal Court, First Session, New York, 3-10 September 2002 (ICC-ASP/1/3 and part II.A. including subsequent Amendments (International Criminal Court, 2005); Code of Judicial Ethics, International Criminal Court ICC-BD/02-01-05. ISGH: United Nations Convention on the Law of the Sea, adopted 10 December 1982; Statute of the International Tribunal for the Law of the Sea, Annex VI to UN Convention on the Law of the Sea; Rules of the Tribunal, International Tribunal for the Law of the Sea ITLOS/8, 17 March 2009. WTO BG: Understanding on Rules and Procedures Governing the Settlement of Disputes, Annex 2 of the Agreement Establishing the World Trade Organization; Working Procedures for Appellate Review, WTO WT/AB/WP/6, 26 August 2010 (including Annex II, Rules of Conduct for the Understanding of Rules and Procedures Governing the Settlement of Disputes). EuGH: Treaty of the Functioning of the European Union, Official Journal C 326, 26/10/2012P, 1-390; Statute of the Court of Justice of the European Union, Protocol no 3, consolidated version; Rules of Procedure of the Court of Justice, 25 September 2012, including subsequent Amendments. EGMR: Convention for the Protection of Human Rights and Fundamental Freedoms, Rome, 4.XI.1950 (as amended by Protocols Nos 11 and 14; supplemented by Protocols Nos 1, 4, 6, 7, 12 and 13); Resolution on Judicial Ethics, Council of Europe, adopted by the Plenary Court on 23 June 2008; Rules of Court, European Court of Human Rights, 14 November 2016.

müssen die für die Amtsführungsphase getroffenen Regelungen der Zuteilung der Richter zu bestimmten Fällen und einer möglichen Suspendierung von denselben unberücksichtigt bleiben.

3.1 Auswahlanforderungen

a) Bestehende Regelungen.

Bezüglich der *Unabhängigkeit* von Kandidaten formulieren die betrachteten Gerichte mit Ausnahme des EuGH keine expliziten Anforderungen; Anforderungen für die persönliche *Integrität* sind zumeist recht allgemein gehalten (die gängigste Formulierung rekurriert auf einen „high moral character“). Für diese Kriterien liegt der Regelungsschwerpunkt in der Amtsführungsphase (vgl. unten 3.4).

Was die *Qualifikationsanforderungen* betrifft, findet sich ein reines Abstellen auf Expertise und Erfahrung (ISGH, WTO BG) ebenso wie eine Alternative zwischen „anerkannter Kompetenz“ und einer formalen Befähigung für das nationale Richteramt (IGH, EuGH, EGMR). Der IStGH bildet einen Sonderfall: einerseits wird die verlangte Expertise in zwei Kategorien (Straf- und Völkerrecht) unterteilt, wobei die Richter beider „Expertengruppen“ einen gewissen Mindestanteil nicht unterschreiten dürfen. Andererseits wird bezüglich der formalen Qualifikation verbindlich eine Befähigung zu *höchsten* nationalen Richterämtern verlangt.

Bezüglich der *Repräsentativität* ist zunächst zu differenzieren, ob die Zahl der vorgesehenen Richter jener der Vertragsstaaten entspricht („volle“ Repräsentation; hier EuGH und EGMR) oder diese unterschreitet („selektive“ Repräsentation; IGH, IStGH, ISGH, WTO BG) (vgl. Voeten 2009). Während die geografische Repräsentation in der ersteren Gruppe unproblematisch ist, bestehen in der letzteren durchgehend explizite Regelungen, die vor allem auf Repräsentation bestimmter Regionen oder Rechtstraditionen abstellen und tendenziell desto detaillierter ausfallen, je höher die Zahl der Richter im Verhältnis zur Zahl der Vertragsstaaten ist. Bez. des Anteils von Männern und Frauen bestehen für keines der betrachteten Gerichte verbindliche Anforderungen;

für den IStGH und informell auch für den EGMR bestehen allerdings explizite Empfehlungen bzw. Bestrebungen im Auswahlprozess, den Frauenanteil in der Richterschaft zu erhöhen.

b) Überlegungen für das MIG.

Eine Befolgung der skizzierten Regelungspraxis bez. *Unabhängigkeit* und *Integrität* erscheint für das MIG unproblematisch. Bez. *Qualifikation* sind angesichts der skizzierten Kritikpunkte am bestehenden System prinzipiell hohe Standards zu empfehlen, die allerdings so ausbalanciert werden sollten, dass das Richteramt zumindest längerfristig nicht nur der jetzt dominierenden Expertenelite zugänglich ist, sondern angemessenen Repräsentativitätsanforderungen genügen kann (siehe unten). Dies impliziert, dass die formale Qualifikationsanforderung des IStGH, die augenscheinlich am spezifischen Charakter dieses Gerichts als strafrechtliche Institution orientiert ist, für ein MIG wohl zu weit gehen würde. Die IStGH-Regelung zu den Expertengruppen ist hingegen für ein MIG sehr interessant. Investitionsschutzverfahren erfordern Expertise zumeist nicht nur in internationalem Investitionsrecht im engeren Sinne, sondern sehr oft auch in internationalem Handelsrecht, Völkerrecht und spezifischeren Rechtsmaterien (auf internationaler wie nationaler Ebene) wie Umweltrecht, Verwaltungsrecht oder Grund- und Menschenrechte. Eine Unterteilung der Qualifikationsanforderungen in Gruppen könnte (neben anderen Maßnahmen wie der Nominierung von ad hoc-Richtern oder Experten für bestimmte Fälle) diesem Spezifikum besser gerecht werden als das jetzige System, wobei auch hier der erwähnte Zielkonflikt mit den Repräsentativitätsanforderungen im Auge zu behalten ist.

Bez. *Repräsentativität* ist zunächst wiederum zu unterscheiden, ob volle oder selektive Repräsentation vorgesehen ist. Dies wird klarerweise primär von der Anzahl der Vertragsstaaten des MIG abhängen, wobei bez. der Entscheidung über die Zahl der Richter eines MIG auch der Zielkonflikt zwischen Heterogenität und Kohäsion bzw. der Fähigkeit einer konsensualen Urteilsfindung im Auge zu behalten ist. Im Fall voller Repräsentation könnte die relativ unproblematische Umsetzung geografischer Anforderungen für eine Verbesserung der Erfüllung anderer Kriterien genutzt werden, indem jeder Staat zu einer Nominierung mehrerer

Kandidaten (optional auch mit fremder Nationalität, um die Adressierung von möglichen personellen Engpässen bestimmter Vertragsstaaten zu erleichtern) verpflichtet wird, was etwa die Erreichung eines bestimmten Frauenanteils, aber auch eines differenzierteren Qualifikationsprofils der Richterschaft (siehe oben) erleichtern sollte. Im Fall selektiver Repräsentation wäre insbesondere eine Anforderung bez. Vertretung verschiedener Rechtskreise auch fachlich sinnvoll. Darüber hinaus könnten aber auch investitionsspezifische Aspekte berücksichtigt werden, etwa indem führende Herkunfts- oder Zielstaaten internationaler Investitionen ständig repräsentiert sind oder Vertretungen bestimmter Ländergruppen, die nach ihrem ökonomischen Entwicklungsstand differenziert werden, geschaffen werden. Der angesprochene Zielkonflikt zur konsensualen Urteilsfindung würde sich allerdings bei letzterer Variante mit besonderer Schärfe stellen.

3.2 Auswahlverfahren

Die Gestaltung des Auswahlverfahrens für die Richter eines MIG ist nicht nur für die effektive Umsetzung der oben genannten Auswahlkriterien von zentraler Bedeutung, sondern auch für die Legitimität und faktische Wirksamkeit des Gerichts. Prinzipiell gliedert sich das Verfahren in die Nominierung von Kandidaten auf nationaler Ebene und den anschließenden internationalen Prozess, der entweder in einer sofortigen Wahl durch die Vertreter der partizipierenden Staaten (mit variierenden Mehrheitserfordernissen) oder einem weiteren „screening“ der Kandidaten, etwa durch ein dazu beauftragtes Expertenkomitee, bestehen kann (vgl. Kohler-Kaufmann & Potestà 2017: 60 ff).

a) Bestehende Regelungen.

Für die Modalitäten bzw den Prozess der Nominierung auf *nationaler* Ebene existieren generell keine verbindlichen Regelungen. Was die Zahl der zu nominierenden Kandidaten betrifft, legt der EGMR eine Verpflichtung von drei Personen fest. IGH und ISGH erlauben eine Nominierung von maximal vier bzw zwei Personen. Ansonsten bildet die Nominierung von einem Kandidaten pro Staat den Regelfall.

Auf *internationaler* Ebene sieht nur der ISGH eine Wahl der Richter unmittelbar nach der nationalen Nominierung vor. Beim IGH und optional auch beim IStGH obliegt die formale Nominierung der Kandidaten auf internationaler Ebene der jeweiligen Gruppe nationaler Vertreter beim Ständigen Schiedshof in Den Haag, wobei die Autonomie dieser Gruppe, von den Vorschlägen ihrer Heimstaaten abzuweichen, von Land zu Land variiert. Beim WTO BG, EuGH, EGMR und wiederum optional beim IStGH sind – teilweise auf informeller Ebene – Komitees eingerichtet, die insbesondere die Erfüllung der Anforderungen an Qualifikation und Integrität durch die nationalen Kandidaten sicherstellen sollen.

Hintergrund der Einrichtung dieser Komitees war die oft beklagte Politisierung des Auswahlprozesses von Richtern internationaler Gerichte, die insbesondere für den IGH und den IStGH relativ gut dokumentiert ist (MacKenzie 2010: Kap. 4). Der Richterwahl und -ernennung in diesen Institutionen gehen regelmäßig intensive Kampagnen, Verhandlungen und politische „Kuhhändel“ voraus, die oft in einem breiteren Kontext der Verteilung von Macht und Einfluss in internationalen Organisationen angesiedelt sind. Die Vermutung liegt nahe – wenn auch diesbezügliche „harte“ empirische Evidenz natürlich nur schwer zu gewinnen ist – dass derartige Arrangements die Qualität der gewählten Richter, und damit auch die Legitimität und faktische Wirksamkeit der Gerichte, teilweise empfindlich beeinträchtigen (vgl. für den EGMR Kosař 2015). Angesichts dieses politischen Charakters variiert der faktische Einfluss der Komitees stark und ist auch fraglich, inwieweit die Auswahl der

Komiteemitglieder selbst wiederum politischen Einflüssen unterworfen ist.

Eine wichtige Variable auch für die politische Komponente der Richterwahl sind schließlich die Mehrheitserfordernisse. Hier ergibt sich bei den betrachteten Gerichten ein sehr heterogenes Bild, das hier nur grob wiedergegeben werden kann. EuGH und WTO BG erfordern im Wesentlichen eine einstimmige Entscheidung der Staatsregierungen. ISGH und IStGH erfordern eine Zweidrittelmehrheit, der EGMR eine einfache Mehrheit der wahlberechtigten Versammlung von Staatsvertretern; im einzelnen sind hier die Wahlprozesse bis zur Besetzung aller Positionen komplex – auch weil z. T. pro Staat mehr als ein Kandidat nominiert wird, vgl. oben – und können mehrere Durchgänge erfordern. Eine Wahl zum Richter des IGH erfordert schließlich eine einfache Mehrheit sowohl in der UN-Vollversammlung als auch im UN-Sicherheitsrat.

b) Überlegungen für das MIG.

In Hinblick auf die Auswahl der Richter eines MIG ist zunächst festzuhalten, dass ein gewisses Maß an „Politisierung“ des Prozesses angesichts der geforderten Abgabe von Souveränität der Vertragsstaaten an das Gericht unvermeidlich ist. Andererseits zählt die Möglichkeit eines politisch beeinflussten Gerichts, wie erwähnt, zu den Hauptbefürchtungen der Skeptiker eines MIG, und sollten daher regulatorische Möglichkeiten einer Versachlichung des Auswahlprozesses, wie sie von anderen Gerichten vorgezeichnet werden, jedenfalls genutzt werden.

Daraus ergibt sich zunächst, dass die bestehende Praxis, abgesehen von einer Regelung zur Zahl der Kandidaten pro Staat nicht in nationale Nominierungsprozesse einzugreifen, auch für das MIG sinnvoll erscheint. Wie bereits in Abschnitt 3.1 erwähnt, erscheint die Schaffung einer Möglichkeit oder sogar Verpflichtung für jeden Vertragsstaat, mehr als einen Kandidaten zu nominieren, für ein MIG sowohl aus Qualifikations- als auch Repräsentationsgesichtspunkten empfehlenswert. Allerdings führt eine größere Zahl von Kandidaten zu einer höheren Komplexität, und

damit auch potenziell höheren Politisierung, des Wahlprozesses. Dem könnte mit der Einrichtung eines Expertenkomitees nach Vorbild insbesondere des EuGH und des EGMR begegnet werden. Ein solches Komitee könnte auch nicht-staatliche Vertreter – insbesondere internationaler Investoren, aber auch involvierter NGOs – zumindest in einer beratenden Rolle mit einschließen und/oder um eine umfassende Stakeholder-Konsultation, wie sie insbesondere auf europäischer Ebene immer üblicher wird, ergänzt werden. Auf diese Weise könnte die Legitimität des MIG insgesamt erhöht und auch den bestehenden Bedenken von Investorenseite bezüglich der Unparteilichkeit seiner Richter begegnet werden. Die Arbeiten des Komitees würden dann in eine begründete Empfehlung an das wahlberechtigte Gremium münden.

Regulatorische Entscheidungen zur Zusammensetzung des Wahlgremiums und zu den Mehrheitserfordernissen hängen sehr stark von der Zahl der Vertragsstaaten des MIG ab. Bei einem kleineren und relativ homogenen Kreis erscheint nicht zuletzt aus Legitimitätsgründen ein Einstimmigkeitserfordernis durchaus sinnvoll. Allerdings sollte den potenziellen Problemen infolge von Beitritten weiterer Staaten nach Möglichkeit bereits vorab durch Festlegung gewisser Übergangsregelungen, beispielsweise in Richtung einer Abschwächung der Mehrheitserfordernisse, vorgebeugt werden. Einzelne Autoren (z.B. Kaufmann-Kohler & Postestà 2016: 60) schlagen vor, die Richterwahl für ein MIG von vorneherein in der UN-Vollversammlung anzusiedeln. Dies erscheint aber nicht zuletzt angesichts der Erfahrungen mit der Politisierung des IGH-Auswahlprozesses (siehe oben) wenig sinnvoll.

3.3 Amtsdauer

Bez. Amtsdauer sind prinzipiell deren Länge und Erneuerbarkeit, d.h. die Möglichkeit einer Wiederwahl, zu regeln. Zumeist wird davon ausgegangen, dass eine lange Amtsdauer und der Ausschluss einer Wiederwahl die Unabhängigkeit und Unparteilichkeit der Richter sowie die Qualität der Gerichtsurteile erhöhen, weil die Richter sich besser in ihre Materie einarbeiten,

einen „*esprit de corps*“ entwickeln und weitgehend unabhängig von künftigen Karrieremotiven entscheiden können. Allerdings stellt sich die Frage des Zielkonflikts mit der faktischen Wirksamkeit des Gerichts (siehe oben 2.2.).

a) Bestehende Regelungen.

Dem Standard langer und nicht erneuerbarer Amtsdauern wird durch den IStGH und den EGMR (jeweils 9 Jahre) entsprochen. Die Amtsdauern der anderen betrachteten Gerichte sind erneuerbar und reichen von 9 Jahren (IGH und ISGH) bis zu 4 Jahren (WTO BG). Der generelle Trend geht in Richtung einer Verlängerung der Amtsdauern; so wurde die Amtsdauer der Richter des EGMR 2010 von 6 auf 9 Jahre erhöht, ähnliche Projekte existieren auch für den WTO BG (vgl. Steger 2015: 463).

b) Überlegungen für das MIG.

Auf den ersten Blick erscheint eine lange Amtsdauer für die Richter eines MIG vor allem auch angesichts der Kritik an der Qualität und Konsistenz der schiedsgerichtlichen Urteile im jetzigen System (vgl. oben 1.) empfehlenswert. Dem stehen die skizzierten Befürchtungen bez. der faktischen Wirksamkeit des Gerichts gegenüber. Diese müssen allerdings in den spezifischen Kontext der Investitionsgerichtsbarkeit gestellt werden, in der nur Investoren, nicht aber Staaten klagsberechtigt sind. Vor diesem Hintergrund kann ein hohes Maß an richterlicher Unabhängigkeit zwei Effekte generieren: einerseits könnten Richter, die weitgehend losgelöst von den Interessen der Vertragsstaaten agieren, die Klagserhebung für Investoren im Vergleich zu einer Konstellation mit einem geringeren Maß an Unabhängigkeit attraktiver machen und damit die Wirksamkeit des Systems, gemessen an seinem Nutzungsgrad, sogar erhöhen. Andererseits könnten sich Staaten angesichts dieser Situation schrittweise aus dem System zurückziehen und/oder die Qualität der Urteilsumsetzung verschlechtern. Im Lichte dieser Ambivalenz empfiehlt es sich, den Regelungsschwerpunkt für ein MIG eher auf die Sicherung der richterlichen Unparteilichkeit im Rahmen von Amtsführungsstandards

zu legen (siehe unten) und bez. der Amtsdauer im Spektrum der bestehenden Regelungen einen Mittelweg einzuschlagen. Sinnvoll wäre damit etwa eine nicht erneuerbare Amtsdauer von ca. 6 Jahren.

3.4 Amtsführungsstandards und Abberufungsgründe

a) Bestehende Regelungen.

Die Amtsführungsstandards in den betrachteten Gerichten beziehen sich in erster Linie auf der Sicherstellung die richterlichen Unabhängigkeit und Unparteilichkeit. Dies erfolgt über mehrere Arten von Anforderungen. Erstens bestehen Regelungen bezüglich möglicher anderer Beschäftigungen. Ein Richteramt am IGH, EuGH, EMGR und mit Einschränkungen auch am IStGH kann nur als Vollzeitberuf ausgeübt werden; ISGH und WTO BG erfordern zumindest eine ständige Verfügbarkeit. Zweitens schließen alle Gerichte die parallele Bekleidung eines politischen oder administrativen Amtes sowie jede zusätzliche juristische Berufsaktivität aus. Diese Unvereinbarkeitsregeln werden am IStGH und EGMR auf die Vermeidung des bloßen Anscheins eines Interessenskonflikts ausgeweitet; beim WTO BG sind für alle Aktivitäten, die Zweifel an der Unabhängigkeit oder Unparteilichkeit erwecken könnten, strikte Offenlegungspflichten normiert. IStGH und EGMR schreiben darüber hinaus ausdrücklich ein richterliches Verhalten vor, welches die Reputation des Gerichts und das in dieses gesetzte öffentliche Vertrauen nicht beeinträchtigt. Drittens finden sich beim WTO BG, EGMR und EuGH auch Einschränkungen, was die berufliche Tätigkeit nach Verlassen des Richteramts betrifft, wobei erstere beiden Gerichte eine anwaltliche Rolle vor dem Gericht für eine bestimmte Periode ausdrücklich ausschließen.

Die Gründe für eine vorzeitige Abberufung aus dem Richteramt beschränken sich bei der Mehrzahl der betrachteten Gerichte auf die Formulierung, dass der Betroffene die Voraussetzungen für die Ausübung seines Amtes nicht mehr erfülle. In prozeduraler Hinsicht wird die Entscheidung zumeist dem Gericht selbst überlassen, wobei

die Mehrheitserfordernisse variieren (Einstimmigkeit der Richter bei IGH, EuGH und ISGH; Zweidrittelmehrheit bei EGMR, jeweils unter Ausschluss des Betroffenen). Der IStGH bildet in beiden Punkten eine Ausnahme, weil einerseits die Abberufungsgründe wesentlich detaillierter definiert und unterschiedliche „Schweregrade“ des Fehlverhaltens definiert werden und andererseits ein externes Gremium, nämlich die UN-Vollversammlung, mit der Entscheidung über eine Abberufung betraut wird. Der WTO BG weist keine expliziten Regelungen zu einer Abberufung auf.

b) Überlegungen für das MIG.

Vor dem Hintergrund der skizzierten Kritik am gegenwärtigen System, insbesondere der Struktur der einschlägigen Expertentätigkeit (vgl. oben I.) und den erwähnten Bedenken bez. der faktischen Wirksamkeit des MIG sollten die Amtsführungsstandards grundsätzlich streng formuliert und mit einer realistischen Abberufungsmöglichkeit verbunden werden. Im Spektrum der bestehenden Regelungen bedeutet dies, dass strikte Regelungen zu Unvereinbarkeit und Interessenskonflikten aufgestellt werden sollten, welche auch die Anscheinsvermeidung mit einschließen. Eine parallele Aktivität als Richter und Anwalt wäre damit für die Dauer der Amtszeit jedenfalls ausgeschlossen. Dem gleichen Zweck würden Einschränkungen für die Zeit nach der Amtsausübung nach dem Vorbild von WTO BG, EuGH oder EGMR dienen. Allerdings ist auch darauf zu achten, dass diese Einschränkungen zumindest in der Anfangsperiode des MIG nicht zu restriktiv formuliert werden, um die Attraktivität des Richteramts für qualifizierte Kandidaten nicht über Gebühr einzuschränken. Was die Abberufungsgründe betrifft, wäre in prozeduraler Hinsicht jedenfalls einer Lösung der Vorzug zu geben, die den partizipierenden Staaten ein institutionelles Mitspracherecht einräumt.

4. Fazit

Das internationale Investitionsschutzsystem steht an einem Scheideweg. Der grundsätzlichen Notwendigkeit von Schutzmechanismen für internati-

onale Investoren in einer globalisierten Wirtschaft steht ein inzwischen weithin anerkannter Reformbedarf gegenüber. Die Etablierung eines Multilateralen Investitionsgerichts hat grundsätzlich das Potenzial, das System auf eine tragfähigere Grundlage zu stellen; seine tatsächliche Einrichtung und sein Erfolg werden aber wesentlich von seiner konkreten regulatorischen Ausgestaltung abhängen. Dieser Beitrag beschäftigte sich mit einem Kernbereich eines künftigen MIG, nämlich der Auswahl und Amtsführung seiner Richter. Unbeschadet einer Analyse der konkreten politischen Realisierungschancen eines MIG, die in diesem Rahmen nicht geleistet werden konnte, wurden mehrere Regulierungsprobleme identifiziert, deren Adressierung wesentlich zum Erfolg oder Misserfolg der neuen Institution beitragen könnte. Es sind dies insbesondere die Findung einer adäquaten Balance zwischen Qualifikations- und Repräsentationsanforderungen, die Gestaltung des Auswahlprozesses im Spannungsfeld politischer und fachlicher Notwendigkeiten sowie eine Kalibrierung der Regeln für die richterliche Amtsführung und vorzeitige Abberufung, welche die klassischen Anforderungen an Unabhängigkeit und Unparteilichkeit ebenso berücksichtigt wie die Interessen der souveränen Staaten, die sich der Gerichtsbarkeit des MIG freiwillig unterwerfen. Wie gezeigt wurde, kann die Identifizierung von Lösungsansätzen für diese Probleme wesentlich von einer vergleichenden Betrachtung mit anderen internationalen Gerichten profitieren. In dieser Sicht könnte ein MIG letztlich zum integralen Bestandteil eines größeren Systems werden, das zu einer Stärkung rechtsstaatlicher Prinzipien auch auf internationaler Ebene beiträgt.

LITERATUR

- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2018) Übersicht über die bilateralen Investitionsförderungs- und -schutzverträge (IFV) der Bundesrepublik Deutschland. <https://www.bmwi.de/Navigation/DE/Service/Investitionsschutzvertraege/investitionsschutzvertraege.html>. Accessed 20 Dec 2018.
- Brown C (2003) The Evolution and Application of Rules Concerning Independence of the International Judiciary. *Law and Practice of Int'l Courts and Tribunals* 2(1), 63–96.
- Chesterman S (2008) An International Rule of Law? *The American Journal of Comparative Law* 56(2), 331–362.
- Cohen HG, Follesdal A, Grossman N, Ulfstein G (2018) Legitimacy and International Courts – a Framework. In: Cohen HG et al., eds., *Legitimacy and International Courts*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Deutscher Richterbund (2016) Stellungnahme zur Errichtung eines Investitionsgerichts für TTIP – Vorschlag der Europäischen Kommission vom 16.09.2015 und 12.11.2015. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/stellungnahme-deutscher-richterbund-zur-errichtung-eines-investitionsgerichts-fuer-ttip.pdf>. Accessed 20 Dec 2018.
- European Commission (2017) Factsheet on Commission Proposal for a Multilateral Investment Court. http://trade.ec.europa.eu/doclib/docs/2017/september/tradoc_156042.pdf. Accessed 20 Dec 2018.
- Grossman N (2009) Legitimacy and International Adjudicative Bodies. *George Washington Int'l Law Review* 41, 107.
- Helfer LR, Slaughter AM (2005) Why States Create International Tribunals: a Response to Professors Posner and Yoo. *California Law Review* 93(3), 899–956.
- Kaufmann-Kohler G, Potestà M (2016) Can the Mauritius Convention Serve as a Model for the Reform of Investor-State Arbitration in Connection with the Introduction of a Permanent Investment Tribunal or an Appeal Mechanism? CIDS Working Paper, Geneva. http://www.uncitral.org/pdf/english/commissionersessions/unc/unc-49/CIDS_Research_Paper_-_Can_the_Mauritius_Convention_serve_as_a_model.pdf. Accessed 20 Dec 2018.
- Kaufmann-Kohler G, Potestà M (2017) The Composition of a Multilateral Investment Court and of an Appeal Mechanism for Investment Awards. CIDS Supplemental Report, Geneva. http://www.uncitral.org/pdf/english/workinggroups/wg_3/CIDS_Supplemental_Report.pdf. Accessed 20 Dec 2018.
- Kosař D (2015) Selecting Strasbourg Judges: A Critique. In: Bobek M, ed. *Selecting Europe's Judges: A Critical Review of the Appointment Procedures to the European Courts*. Oxford University Press, Oxford.
- Langford M, Behn D, Hilleren Lie R (2017) The Revolving Door in International Investment Arbitration. *Journal of Int'l Economic Law* 20(2), 301–323.
- Mahoney P (2008) The International Judiciary – Independence and Accountability. *Law & Practice of Int'l Courts and Tribunals* 7, 313–349. doi: 10.1163/157180309X399654
- MacKenzie R et al. (2010) *Selecting International Judges: Principle, Process, and Politics*. Oxford University Press, Oxford.
- Posner EA, Yoo JC (2005) Judicial Independence in International Tribunals. *California Law Review* 93(1), 1–27. doi: 10.15779/Z38070P
- Steger D (2015) The Founding of the Appellate Body. In: Marceau G, ed. *A History of Lawyers in the GATT/WTO: The Development of the Rule of Law in the Multilateral Trading System*. Cambridge University Press, Cambridge.
- United Nations Commission on Trade and Development UNCTAD (2018a) Recent Developments in the International Investment Regime. IIA Issues Note, May 2018. http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/diaepcbinf2018d1_en.pdf. Accessed 20 Dec 2018.

United Nations Commission on Trade and Development UNCTAD (2018b) *Investor-State Dispute Settlement: Review of Developments in 2017*. IIA Issues Note, June 2018. http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/diaepcbinf2018d2_en.pdf. Accessed 20 Dec 2018.

Van Harten G (2010) Perceived Bias in Investment Treaty Arbitration. In: Waibel M, Kaushal A et al, eds., *The Backlash Against Investment Arbitration*. Kluwer, Amsterdam.

Voeten E (2009) The Politics of International Judicial Appointments. *Chicago Journal of Int'l Law* 9(2), 387–405.

Voeten E (2013) International Judicial Independence. In: Dunoff JA, Pollack MA, eds. *Interdisciplinary Perspectives on International Law and International Relations – the State of the Art*. Cambridge University Press, Cambridge.

Voeten E (2014) International Judicial Behavior. In: Romano C, Alter KJ, Shany Y, eds., *The Oxford Handbook of International Adjudication*. Oxford University Press, Oxford.

Zuleta E (2015) The Challenges of Creating a Standing International Investment Court. In: Kalicki JE, Joubin-Bret A, eds., *Reshaping the Investor-state Dispute Settlement System*. Brill Nijhoff, Leiden.

AUTOR

Prof. Dr. Christian Hederer, LL.M.
Fachbereich Wirtschaft, Informatik, Recht
Technische Hochschule Wildau

E-Mail für Korrespondenz:
christian.hederer@th-wildau.de



Mit Kollaboration zu individuellen Kompetenzzielen – Der Maker Space als neuer Lernort

Eva Ismer und Dana Mietzner*

Zusammenfassung

Lernen unterliegt einem kontinuierlichen Wandel. Gegenwärtige wissenschaftliche Diskussionen zeigen, dass Lernkonzepte zunehmend von individuellen Kompetenzzielen geprägt werden. Verschiedene lerntheoretische Ansätze, die sich mit den formalen und informellen Aspekten des Lernens bis hin zur Entgrenzung von Formalität und Informalität auseinandersetzen, rücken in den Fokus. Vor dem Hintergrund der theoretisch-konzeptionellen Auseinandersetzung der unterschiedlichen Lernformen wird die Frage der Anpassung von Lernorten erörtert und explizit der Lernort Maker Space als Ort kollaborativen Lernens in den Fokus gestellt. Exemplarisch wird dies auf das ViNN:Lab, den Maker Space an der Technischen Hochschule Wildau, angewandt und den verschiedenen Lernkontexten im hochschulischen Umfeld die Attribute der Formalität/ Informalität zugeordnet.

Abstract

Learning is subject to continuous change. Current scientific discussions show that learning concepts are increasingly shaped by individual competence goals. Various approaches to learning theory, which deal with the formal and informal aspects of learning up to the demarcation of aspects of formality and informality, are moving into focus. Against the background of the theoretical-conceptual discussion of the different forms of learning, the question of changing settings, structure and role of learning places accordingly, is being discussed and “Maker Spaces” as learning places are suggested. Taking the ViNN: Lab, the Maker Space at the Technical University of Applied Sciences Wildau, as an example, the attributes of formality / informality are assigned to the various learning contexts of higher education environments.

1. Lernkonzepte im Wandel

Vor dem Hintergrund rascher und facettenreicher Entwicklungen in Gesellschaft, Arbeitswelt und Bildungspolitik sowie aufgrund moderner lerntheoretischer Erkenntnisse in den verschiedenen Bereichen des Bildungssystems, wird zunehmend ein Wandel der Lernkulturen bzw. die Schaffung neuer Lernkulturen diskutiert (vgl. Schüßler 2004: 3, Overwien 2011: 260). Obwohl gegenwärtig „das Lernen“ überwiegend in seminaristischen Unterrichtsstrukturen verortet wird und Wissens- und Qualifizierungsziele häufig in den Vordergrund rücken, werden neuere Lernkonzepte durch individuelle, strategieorientierte Kompetenzziele beeinflusst (vgl. Erpenbeck & Sauter 2015: 17).

Bereits in den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts fokussierten diese „neueren“ Lehrkonzepte darauf, die Voraussetzungen und Interessen der Lernenden zu berücksichtigen sowie Selbstständigkeit, Selbstorganisation, Flexibilität, Kooperation, Problemlösefähigkeit und ganzheitliches Denken zu fördern (vgl. Pätzold & Lang 1999: 158). Damalig galten als „innovative Lernformen, -verfahren und -methoden“ zur Vermittlung „wegweisende(r) Qualifikationen für die Zukunft der Wissensgesellschaft“ (de Haan & Harenberg 1999: 58), z. B. Projektarbeit, Formen der Freiarbeit und des offenen Unterrichts, Methoden spielerischen Lernens, Rollen- und Planspiele, Computersimulation, Arbeit mit Datenbanken und elektronischen Informationssystemen, kreative Lernmethoden oder Zukunftswerkstätten.

Werden die neueren Lernkonzepte betrachtet, die den Lernenden im Fokus eines selbstgesteuerten kollaborativen Umfeldes sehen, so zeigt sich eine verstärkte Betonung und ein Bedeutungszuwachs der Verschränkung von informellen mit institutionellen Kontexten: Das informelle Lernen, häufig als nicht bewusste und außerhalb von formalen Institutionen stattfindende Wissenseignung definiert, rückt dabei zunehmend in den Fokus formaler Bildungsprozesse, wobei Lernabsichten der Lernenden als auch die Lernsettings und Lernergebnisse einander gegenüber gestellt und ihre gegenseitigen Effekte und Wechselwirkungen erforscht werden (vgl. Overwien 2011: 270; Bundesministerium für Familie, Senioren, Frauen und Jugend 2017: 414, Colley et al. 2003, Seufert et al. 2013, Schüßler 2014).

Gegenwärtige und aktuelle Empfehlungen zur Anwendung dieser neuen Lernkonzepte gehen davon aus, dass diese unter dem Einfluss individueller Kompetenzziele stehen und einen positiven Lerneffekt auf Lernende haben. Obwohl zwar die Notwendigkeit von neuen Lernkonzepten bekannt ist, gibt es zu der konkreten Wirkung und damit der Nachhaltigkeit des Gelernten allerdings kaum empirisch gesicherte Befunde. Darüber hinaus wird in diesem Zusammenhang die Frage diskutiert, inwieweit Wirkung oder Nachhaltigkeit von Bildungsveranstaltungen oder individuellen Lernkonzepten überhaupt empirisch erfasst werden können (vgl. Schübler 2004: 3).

Im Zuge dessen und im Diskurs neuer Lernformen und -methoden rückt auch die Gestaltung der Lernorte/-räume in den Blickpunkt interdisziplinärwissenschaftlicher Untersuchungen (vgl. Rummler 2014). Um die sich zunehmend ändernden Ansprüche an insbesondere akademische, formale Lernräume und deren Ausstattung zu berücksichtigen, ist es notwendig sich mit der Frage zu beschäftigen, wie diese Orte/Umgebungen für zukunftsfähiges Lernen aussehen können.

Als eben solche möglichen zukunftsfähigen Lernumgebungen stellen Maker Spaces Orte des kreativen gemeinschaftlichen Schaffens und die Keimzelle innovativer Ideen und Produkte dar. Maker/innen treffen dort aufeinander und realisieren ihre eigenen Projekte in einem kollaborativen und kreativen Umfeld mit Hilfe von Fertigungstechnologien.

Als offene „Möglichkeitsräume“, fördern sie Freude am Selbermachen und kollaborative Ideengenerierung, Engagement und Gemeinschaft. Dort trifft kreative Freizeit auf schaffenseffiziente Professionalisierung und das Entwickeln von Kompetenzen und individuellem Potential (vgl. Bergner 2017). Ein Maker Space ist nicht nur eine Werkstatt, in der physische Gegenstände kreiert werden. Es wird vor allem auch Wissen generiert, welches von den Nutzerinnen und Nutzern selbst aufbereitet und oft über Online-Plattformen geteilt wird. Nicht die Maschinen, sondern die Menschen der Community

sind die wichtigsten Akteurinnen und Akteure in einem Maker Space (vgl. Assaf 2014).

Allein innerhalb der 28 EU-Staaten gibt es mehr als 800 Maker Spaces, darunter Hackerspaces, FabLabs und andere Typen von Maker Spaces (vgl. Rosa et al. 2017: 14). Sie unterscheiden sich in Größe, Ausstattung und Betreibermodell und sind so vielfältig wie die Maker-Community an sich.

Die Zahl der schul- und hochschuleigenen Maker Spaces, die ein Lehren und Lernen im kreativen technologiebasierten Umfeld ermöglichen, ist in den letzten zehn Jahren stark angestiegen (vgl. Assaf 2014: 141f.). In verschiedenen Studien wird das „*Making*“ bereits als ein zentraler, wenn auch kritisch zu hinterfragender (vgl. Hira & Heynes 2018), *Trend für die Ausbildung* erkannt (vgl. z. B. Johnson et al. 2015, Watters 2012). Zu einer ähnlichen Einschätzung kommen auch Mietzner und Hartmann (2017).

Doch welches Potenzial haben solche Lernräume für die Optimierung kreativer Lernprozesse und welche konkreten Vorteile aber auch Herausforderungen sind mit der Bereitstellung von Bildung in informellen Lernumgebungen verbunden? Die Entgrenzung von Formalität und Informalität kann dabei nicht nur auf der lerntheoretischen Ebene stattfinden, sondern muss auch Auswirkungen auf Lernumgebungen haben, da beide Lernformen spezifische Anforderungen an ihre Umwelt stellen. Um diese Potenziale und Herausforderungen tiefergehend analysieren zu können, müssen zunächst das Lernen, ausgewählte Lerntheorien und grundlegende Lernformen und -methoden, die gegenwärtig und zukünftig Einfluss auf das Lernverhalten ausüben, diskutiert werden.

Nachfolgend soll aufgezeigt werden, welche *informellen und formalen Lernformen* ein *Maker Space* ermöglicht und in welcher Ausprägung diese Lernformen Gestalt annehmen. Dazu wird der Ansatz des Kontinuum Modells als viel diskutiertes und aktuelles Modell zur Entgrenzung von „Informalität“ und „Formalität“ untersucht, dass das Lernen anhand von Attributen

kategorisiert (vgl. Colley et al. 2003). Weiterführend soll herausgestellt werden welche Attribute des Kontinuum Modells auf Maker Spaces als Lernräume in öffentlichen Bildungseinrichtungen Anwendung finden.

2. Makerbewegung – Ursprung und Ziele

Die Makerbewegung ist ein technologiebasiertes und kollaborativ kreatives Phänomen und bedient sich u.a. innovativer Möglichkeiten der Herstellung von Objekten mithilfe von Rapid Prototypingtechnologien wie 3D-Druck, Lasercutten, CNC-Fräsen sowie offenen Softwarelösungen und frei programmierbaren Microcomputern. Eine Vielzahl von Menschen unterschiedlichen Alters und Geschlechts organisieren sich, um gemeinsam permanente oder temporäre Räume zu schaffen in denen ein breiter gesellschaftlicher Zugang zu innovativen Fertigungsmethoden gewährleistet werden kann. Im Fokus steht die gemeinschaftliche, kreative Entwicklung und Realisierung innovativer Ideen und deren Umsetzung in öffentlich zugänglichen Werkstätten, wie z. B. in FabLabs oder Maker Spaces (vgl. Peppler et al. 2016, Mietzner & Hartmann 2017: 10). An diesen Orten inspirieren sich die Maker/innen gegenseitig und kommen in Arbeitszusammenhängen mit Anderen auf neue Ideen (vgl. Knoll, 2016). Insofern nennt sich die Szene zurecht Community (vgl. MacQueen et al. 2001), da es den Maker/innen darum geht, gemeinsam Wissen zu erwerben und auszutauschen.

Diese wachsende Bewegung von Bastler/innen, Tüftler/innen, Ingenieur/innen, Hacker/innen und Künstler/innen, widmet sich der kreativen Gestaltung und Konstruktion von materiellen Objekten für spielerische und nützliche Zwecke.

Die Makerbewegung ist auch eine soziale Bewegung, die Einfluss auf unsere Gesellschaft, die Umwelt und die Wirtschaft ausübt. Mit der neuen Lust am Selbermachen (Do-it-Yourself-Ansatz) (vgl. Martin 2015: 30) - sowie erweiterter „Do-It-With-Other“ Ansätze (vgl. McCue 2012) geht auch eine wachsende Wertschätzung handwerklicher, regionaler und individueller

Produktionsmethoden und alternativer Wertschöpfungsmodelle einher. Die Zusammenarbeit und Gemeinschaft in der Makerbewegung spiegeln auch die wachsende Bedeutung dieser Werte in vielen Bereichen der Gesellschaft wider (vgl. Bergner 2017: 5).

Der Makerbewegung lassen sich nach Vossoughi und Bevan (2014) drei übergreifende Ziele zuordnen:

Ein Ziel fassen sie unter dem Begriff „Entrepreneurship and Community Creativity“ zusammen. Dabei geht es um die Bereitstellung öffentlich zugänglicher Fertigungstechnologien und das interdisziplinäre und kreative Zusammenarbeiten in diesen eigens dafür ausgelegten Räumen. Die Aktivitäten in diesen Räumen sind im Allgemeinen durch Kollaboration und Innovation gekennzeichnet und häufig hoch geschätzte Ressourcen in lokalen Umgebungen. Eine weitere treibende Kraft hinter diesen Räumen ist der Zugang einzelner Unternehmer/innen zu den Produktionsmitteln.

Das zweite übergreifende Ziel wird als „STEM Pipeline and Workforce Development“ bezeichnet und beschreibt die Kompetenzentwicklung im MINT-Bereich (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik) und die Potenziale, die die Makerbewegung in diesem Bereich mit sich bringt. Individuelle Fähigkeiten von Schülerinnen/Schülern und Studierenden sollen gestärkt werden, indem kreative Problemlösungskapazitäten junger Menschen und positive MINT-Lernidentitäten aufgebaut werden.

Als dritter Bereich wird die „Inquiry-based education“ identifiziert. Dabei geht es um das anwendungsbezogene und kollaborative Lernen unter Verwendung innovativer Technologien im kreativen Raum. Die Ziele sind im Allgemeinen, (1) Interesse zu wecken, (2) Engagement zu fördern, (3) das Verständnis für Prozesse und Konzepte zu entwickeln und (4) die Identitäten der Lernenden als Denkende, Schöpfende und Produzierende von Wissen zu unterstützen (vgl. Vossoughi & Bevan 2014: 5f.).

3 . Der Begriff des Lernens und ausgewählte Lerntheorien

Lernen kann sowohl aus neurobiologischer, aus (sozial-)konstruktivistischer, aus kognitivistischer Perspektive als auch unter dem Begriff des absichtsvollen (intentionalen) Lernens betrachtet werden.

Lernen aus *neurobiologischer Sicht* basiert auf Informationen, die aufgenommen, gespeichert und zur Verhaltenssteuerung abgerufen und eingesetzt werden. In den Nervenzellen des Gehirns werden dadurch biochemische Veränderung hervorgerufen. Bestehende Wissens- und Erfahrungsmuster werden durch Einwirken neuer Erfahrungen modifiziert. Ein Lerninhalt (z. B. eine neu zu lernende Vokabel) muss dafür mehrmals in sogenannten reverberatorischen Kreisen ein Erregungsmuster durchlaufen (vgl. Lauth et al. 2004: 16).

Entscheidend für das Lernen (Informationen speichern und beibehalten) ist daher, dass ein Inhalt mehrmals gleiche, regelhafte Erregungsmuster hervorruft. Dadurch können die notwendigen Synapsenverbindungen hergestellt werden. Im Schul- und Hochschulalltag – ebenso wie in Fort- und Weiterbildungen – wird das entweder durch die Unterrichtsmethodik (der/die Lehrende sorgt z. B. durch wiederholtes Üben für die Einprägung der Lerninhalte) oder durch selbstgesteuertes Lernen erreicht (der/die Lernende rekapituliert z. B. von sich aus neu zu lernende Begriffe). Lernen setzt somit eine „regelhafte Informationszufuhr“ voraus, die wiederum „regelhafte Abspeicherungen“ und dadurch ein sichtbares Lernergebnis entstehen lässt (vgl. Lauth et al. 2004: 16).

In *konstruktivistischen Modellen* geht es nicht um die reine Wissensvermittlung durch Lehrende, sondern um ein ausgewogenes Maß an Anleitung und Unterstützung individueller Lernprozesse. Hier ist die Annahme leitend, dass Eingriffe von Lehrenden nicht automatisch Lern- bzw. Wissensaneignungsprozesse auslösen bzw. diese vorab bestimmbar seien. Daher soll die Auseinandersetzung mit Lerninhalten und deren Zusammenhänge selbständig durch

die Lernenden bewerkstelligt werden (vgl. Vontobel 2006: 4).

„Eine konstruktivistische Lehr-Lern-Philosophie geht somit davon aus, dass Lernen ein konstruktiver und selbstgesteuerter Prozess ist, der vom Lernenden eine aktive Wissenskonstruktion erfordert. In *sozial-konstruktivistischer Sicht* ist Lernen darüber hinaus ein situatives und soziales Geschehen“ (Konrad 2014: 18).

Der *Kognitivismus* sieht den Lernvorgang als einen Prozess der Informationsverarbeitung, der auch die Interpretation und Bewertung des aufgenommenen Wissens miteinschließt. Kognitivistisches Lernen kann auch als *Lernen durch Einsicht* interpretiert werden, d.h. *Lernen durch Verstehen und Nachvollziehen*. Es geht also nicht mehr um das Auswendiglernen von Informationen, sondern darum, mit Lerninhalten umzugehen und Methoden und Fähigkeiten zu erwerben, um Probleme zu lösen (vgl. Konrad 2014: 15). Kognitivistische Theorien beinhalten Aspekte wie Aufmerksamkeit wecken, Wahrnehmung schulen, Wissensverfestigung oder -veränderung und Anwendung von Wissen. Diese informationsverarbeitenden Aspekte sind beim schulisch inszenierten Lernen von Bedeutung (vgl. Vontobel 2006: 4).

Absichtsvolles Lernen unterscheidet sich von beiläufigem oder unbewusstem Lernen. Beide „implizieren den individuellen oder kollektiven Erwerb von geistigen, körperlichen, sozialen Kenntnissen, Fähigkeiten und Fertigkeiten“ (Francis et al. 1995: 23). Während „absichtsvolles“ Lernen eine geplante und bewusste Lernaktivität ausmacht, meint *implizites (beiläufiges) Lernen* durch Handeln hervorgerufenen unbewusstes oder spielerisches Erlangen von Fähigkeiten und Wissen. Kinder erlernen so zum Beispiel eine Sprache, soziales Verhalten oder auch motorische Fähigkeiten (vgl. Konrad 2014: 19).

4. Lernformen

Die Unterscheidung der Begrifflichkeiten formales, non-formales und informelles Lernen findet seit den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts im europäischen Raum Anwendung. Dabei gibt es Widersprüchlichkeiten oder leichte Abweichungen bei den Definitionen des formalen und non-formalen Lernens (vgl. Schüßler 2004, Zürcher 2007). Beispielhaft zeigt sich dies an den Definitionen mit starker Wirkungskraft zwischen der Europäischen Kommission, dem CEDEFOP (Europäisches Zentrum für die Förderung der Berufsbildung) und der OECD (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung). Nach der Europäischen Kommission (2001) wird formales Lernen in Bildungseinrichtungen verfolgt, der Lernprozess ist stark strukturiert (z. B. in Form von Curricula an einer Hochschule) und führt zu einer Zertifizierung (z. B. Bachelorurkunde wird durch die Hochschule vergeben). Non-formales Lernen hingegen findet explizit außerhalb einer Bildungseinrichtung statt, trotzdem aber systematisch und zielgerichtet (z. B. Workshop zum 3-Druck in einem Unternehmen).

Die OECD (2010) und das CEDEFOP (2005) differenzieren hier. Die Institution, also der Ort des Lernens, ist nach dieser Definition nicht ausschlaggebend. Der Fokus liegt beim formalen Lernen auf strukturierten und organisierten Kontexten, die zu Leistungsnachweisen führen können, auch außerhalb einer institutionalisierten Bildungseinrichtung (z. B. Workshop zu Digital Marketing angeboten durch eine Marketing-Agentur). Non-formales Lernen liegt vor, wenn eine Aktivität Lernelemente enthält, die nicht auf einen Lernprozess abzielen (z. B. das Erlernen von Projektmanagementmethoden durch die Organisation einer Veranstaltung).

Der Begriff des informellen Lernens hingegen wird bei den drei genannten Organisationen kongruent verwendet:

Informelles Lernen findet außerhalb der Lehrpläne formaler und non-formaler Bildungsinstitutionen statt. Im Konzept des „informellen Lernens“ ist es wichtig zu beachten, dass bewusst das Wort

„Lernen“ und nicht „Bildung“ verwendet wird, da es in den Prozessen des informellen Lernens keine Bildungsinstitutionen, institutionell autorisierte Lehrkräfte oder vorgeschriebene Lehrpläne gibt. Es ist auch wichtig festzuhalten, dass es „außerhalb der Lehrpläne der Bildungseinrichtungen“ und nicht „außerhalb der Bildungseinrichtungen“ stattfindet, weil informelles Lernen auch innerhalb der formalen und non-formalen Bildungseinrichtungen stattfinden kann. In diesem Fall treten die Lernerfahrungen jedoch unabhängig (und manchmal gegen) die beabsichtigten Ziele des expliziten Lehrplans auf (vgl. Schugurensky 2000: 2). Ein Beispiel für das informelle Lernen ist das Erlernen einer Fremdsprache durch wiederkehrende Aktivitäten mit Austauschstudierenden oder die Absolvierung eines Auslandssemesters.

Livingstone definierte bereits 1999 informelles Lernen wie folgt: „[...] jede mit dem Streben nach Erkenntnissen, Wissen oder Fähigkeiten verbundene Aktivität außerhalb der Lehrangebote von Einrichtungen, die Bildungsmaßnahmen, Lehrgänge oder Workshops organisieren. [...] Die grundlegenden Merkmale des informellen Lernens (Ziele, Inhalt, Mittel und Prozesse des Wissenserwerbs, Dauer, Ergebnisbewertung, Anwendungsmöglichkeiten) werden von den Lernenden jeweils einzeln oder gruppenweise festgelegt. Informelles Lernen erfolgt selbstständig, und zwar individuell oder kollektiv, ohne dass Kriterien vorgegeben werden oder ausdrücklich befugte Lehrkräfte dabei mitwirken. Informelles Lernen unterscheidet sich von Alltagswahrnehmungen und allgemeiner Sozialisierung insofern, als das die Lernenden selbst ihre Aktivitäten bewusst als signifikanten Wissenserwerb einstufen. Wesensmerkmal des informellen Lernens ist die selbständige Aneignung neuer signifikanter Erkenntnisse oder Fähigkeiten, die lange genug Bestand haben, um im Nachhinein noch als solche erkannt zu werden“ (Livingstone 1999: 280).

Weiter differenzierte Livingstone „informelles Lernen“ von „informeller Bildung“, wobei letzteres dadurch gekennzeichnet ist, dass professionelles Personal (d. h. Lehrende, Coaches

oder Mentor/innen) als Lerngestalter/innen fungieren und Verantwortung für die jeweilige Lernsituation/das Lernsetting übernehmen (vgl. Livingstone 2006: 205).

Parallel zu diesen exemplarischen Definitionsansätzen, die idealtypische Kategorisierungen von Lernen aufstellen, finden sich im Diskurs des informellen Lernens ebenso Ansätze, die die Widersprüchlichkeiten diverser Definitionen, doch vor allem die in diesen Definitionen immanente Vermischung institutioneller Bedingungen des Lernens mit den Lernabsichten der Lernenden, kritisieren (vgl. Colley et al. 2003, Seufert et al. 2013: 493). Diese Ansätze entfernen sich von der Annahme, dass die Attribute „formal“, „non-formal“ und „informell“ klar voneinander abgrenzbare Kategorien sind. Vielmehr verorten sie Lernen innerhalb eines Kontinuums aus „Informalität“ und „Formalität“ (vgl. Colley et al. 2003). Für Autor/innen jener Definitionsansätze sind „Formalität“ und „Informalität“ somit dem Lernen zugeschriebene Attribute und keine dem Lernen innewohnende Qualität. Im Ansatz des Kontinuum Modells verändert sich demzufolge der Blick: Jede Lernsituation enthält unterschiedlich stark ausgeprägte und in Wechselbeziehung stehende Attribute von Formalität und Informalität (vgl. Colley et al. 2003: 30f). Der Ansatz des Kontinuum Modells ermöglicht es demzufolge auch, Rahmenbedingungen für Lernsituationen zu bestimmen bzw. die Gestaltung von Lernsituationen, vor allem mit Blick auf informelle Kontexte und deren Vor- und Nachteile, vorab zu planen (vgl. Meier & Seufert 2016: 552, Zürcher 2007).

Wegweisend für die Unterscheidung, die diesem Ansatz innewohnen, war die groß angelegte Studie der Forschungsgruppe des Lifelong Learning Instituts der Universität Leeds in Großbritannien, die durch historische, politische und theoretische Literaturrecherche und -analyse, die am häufigsten genannten Unterscheidungskriterien formalen und informellen Lernens erfasste und daraus vier Attribute von Formalität/Informalität ableitete (siehe Abb. 1). Diese Attribute sind: (1) der Lernprozess, (2) der Ort und das jeweilige Setting, (3) die Absichten und Ziele

sowie (4) die Lerninhalte der jeweiligen Lernsituation (vgl. Colley et al. 2003: 31).

Lerninteraktionen zwischen Lernenden gibt und ein gemeinsames Verständnis der Aufgabe und der Zielerreichung

Kooperation bedeutet dagegen, dass Personen *zusammenarbeiten* und sich gegenseitig bei der Erreichung individueller Ziele unterstützen. Dies impliziert auch eine *gegenseitige Abhängigkeit* der Lernpartner. *Kooperatives Lernen* unterscheidet sich vom kollaborativen Lernen insofern als es in höherem Maße strukturiert ist. Während beim kooperativen Lernen die Arbeitsaufgaben aufgeteilt, individuell bearbeitet und zum Schluss zusammengefügt werden, arbeiten kollaborativ Lernende permanent in einer Gruppe zusammen (vgl. Hinze 2004). Kooperatives und kollaboratives Lernen bezeichnen also zwei unterschiedliche Arten von Lernmethoden in Gruppen.

Attribute	Lernformen	
	Formales Lernen	Informelles Lernen
Prozess	Lernsituation und Lernprozesse haben definierte Ziele und Inhalte und gehören zu einer organisierten Bildungsmaßnahme	Lernsituation und Lernprozesse haben kein Curriculum und keine definierten Lernziele
	Die Lehrperson nimmt eine direkte Rolle ein, strukturiert die jeweilige Lernsituation (z.B. in Weiterbildungskursen)	Die Unterstützung reicht von „Lernbegleiter/innen“ oder Mentor/innen (weniger formal) bis hin zu Kolleginnen und Kollegen sowie Freundinnen und Freunde, Familienangehörige (informell)
Ort & Setting	Bildungsinstitution sowie Orte, die für die Lernsituation und -prozesse spezifisch gestaltet sind	Arbeitsplatz, Gemeinschaft, Familie
	Lernzeiten haben festgelegte Start- und Endzeiten	Unbestimmtes Ende sowie keine bis nur wenige zeitliche Festlegungen
Absichten & Ziele	Lernen ist das vorrangigste Ziel	Ein anderes Ziel als Lernen steht im Vordergrund
	Lernen erfüllt externe Vorgaben und Bedürfnisse	Lernen ist Begleiterscheinung
	Lernergebnisse werden spezifiziert (Zertifizierung gilt als höchste Ausprägung von Formalität)	Lernende bestimmt selbst das Lernen und das Lernen ist selbstinitiiert und ergebnisoffen
Inhalte	Der Fokus liegt auf der Aneignung von abstrakter Theorie und/oder etablierten Wissen von Expertinnen und Experten	Der Fokus liegt auf dem Aufdecken von Erfahrungswissen sowie der Generierung von neuem Wissen, Bekanntgabe von praktischen Tipps

Abb. 1) Attribute von Formalität und Informalität (in Anlehnung an Colley et al. 2003: 31).

Über diese Kategorisierung von Lernformen hinaus, gibt es verschiedene Lernmethoden, die sowohl beim formalen als auch beim informellen Lernen eine prägende und wichtige Rolle in der Literatur (vgl. Konrad 2014, Erpenbeck 2015) spielen. Bei diesen Merkmalen geht es um verschiedene Typisierungen von Gruppenlernen, wie kollaboratives und kooperatives Lernen.

Kollaboratives Lernen im Allgemeinen ist definiert als jede Art des Gruppenlernens, bei dem es einige sinnvolle

vorausgesetzt werden kann. Gruppen von Lernenden diskutieren dabei ohne intensive Eingriffe von Lehrenden komplexe Themen und versuchen, ihre eigenen Erfahrungen im Kontext theoretischer Konzepte zu reflektieren und dabei gleichzeitig die Bedeutung der verwendeten Konzepte zu verstehen (vgl. Konrad 2014: 79). Kollaboratives Lernen ist geprägt von *sozialer Interaktion der Lernpartner/innen* (sozialer Wissenstransfer). Sie können sich gegenseitig unterstützen und voneinander lernen (vgl. Hinze 2004).

5. Der Maker Space als Lernumgebung

Die Kategorisierung der Lernformen spiegelt sich auch in der Definition von Lernräumen wieder. Differenziert wird zwischen formalen und informellen Lernräumen. Die Zuordnung lässt sich meist aus der spezifischen Nutzung ableiten. Analog zu den Lernformen stellt sich die Frage ob sich formale und informelle Lernräume trennscharf voneinander abgrenzen lassen. So kann man möglicherweise nicht nur jeder Lernsituation die Attribute von Formalität und Informalität zuschreiben, sondern auch den Lernräumen (vgl. Lomas 2006, Sackey et al. 2015).

Bei überwiegend formalen Lernkontexten wird der Hörsaal/ das Klassenzimmer zum formalen Ort, an dem Wissen aufgebaut wird und Lernen durch Lehrende vermittelt wird. Ergänzend existieren *informelle Lernräume* (in Bildungseinrichtungen Aufenthaltsräume, Gruppenräume), die nach Zürcher (2007) durch *offene Funktionalität und die Nutzung durch beliebige Personen* definiert werden können.

Es gibt zwar bereits einige Untersuchungen darüber, wie *Maker Spaces als informelle Lernräume* bzw. Lernorte mit hohem Anteil von *Informalität* funktionieren und Innovationen auslösen können (vgl. z. B. Gershenfeld 2005, Hatch 2013), aber wenig Literatur konzentriert sich auf die Bildungsaspekte von Maker Spaces und das zugrundeliegende Konzept des Lernens

(vgl. Libow Martinez & Stager 2013). Insbesondere ist unklar, wie (akademische oder schulische) Bildung in informellen Kontexten/Umgebungen Form annehmen muss, um strukturierte Lernerfahrungen zu verbessern und wie es Personen ermöglicht werden kann, sog. informelle Räume für die Schaffung von Wissen zu nutzen.

In der Literatur wirft Zürcher (2007) die Frage auf, ab wann ein Raum für informelles Lernen geschaffen ist. Informelles Lernen kann nach Zürcher überall stattfinden. Von einem informellen Lernraum kann allerdings erst gesprochen werden, wenn dort eigens für Lernzwecke eingegriffen wurde, das heißt, dass z. B. eine digitale Infrastruktur vorliegt, die Lernprozesse unterstützt. Der Kontext muss dabei auf individuelle Lernwege angelegt sein (vgl. Zürcher 2007: 60). Somit ließe sich, auch in Bezug auf Livingstone (2006) festhalten, dass *Maker Spaces Bestandteil der informellen Bildung* sind, da *professionelles Personal als Lerngestalter/innen* fungieren und *Verantwortung für die jeweilige Lernsituation/das Lernsetting* übernehmen.

Lernende verbringen einen großen Teil ihrer Zeit außerhalb des „formalen“ Lernraums (Hörsaal, Klassenzimmer, Seminarraum). Räume, die soziale Interaktion, zufällige Begegnungen und spontane Gespräche fördern, tragen zum persönlichen und beruflichen Wachstum bei. Die zunehmende Digitalisierung ermöglicht Arbeiten und Lernen nahezu überall und zu jeder Zeit (vgl. Lomas 2006: 56).

Informelle Lernräume ermöglichen kollaboratives Lernen, wobei Partizipation, Flexibilität, Unterstützung und Inklusion als wesentliche Kernbereiche einer kollaborativen Lernumgebung definiert werden (vgl. Lomas, 2006: 57f.). Lernen ist ein sozialer Prozess und die Lernräume haben dabei eine besondere Bedeutung, da sie die sozialen Verbindungen ermöglichen.

Ein Maker Space beinhaltet viele Aspekte, die sich den *Attributen der Informalität* zuschreiben lassen (z. B. Erlebnis der Gemeinschaft, Austausch mit Freunden, Erwerben von Erfahrungswissen).

Durch die temporäre Verlagerung des Lernens vom Seminarraum in den Maker Space können die Hemmnisse, sich mit innovativen Technologien auseinanderzusetzen, reduziert und Kompetenzen im sozialen, technologischen und kommunikativen Bereich zeitgleich gestärkt werden, wie exemplarisch der Ansatz „Learning through making“ von Rosenfeld Halverson und Sheridan (2014) zeigt. Aber auch bei diesem Ansatz sind die Grenzen zwischen formalem und informellem Lernen fließend zu sehen. Die Vermittlung von Lerninhalten im Maker Space weist demnach auch einige Aspekte des formalen Lernens auf (z. B. die Vermittlung von Inhalten im Maker Space mit definierten Zielen durch eine autorisierte Lehrperson). Auch das implizite Lernen spielt im Maker Space eine Rolle. So werden sowohl bei angeleiteten Workshops als auch bei individuellen Projektumsetzungen „beiläufig“ Kenntnisse und Fähigkeiten erworben.

Während die Makerbewegung in den USA bereits viele Schnittstellen zur institutionalisierten Bildung, wie etwa Colleges ausgebildet hat (siehe usfn.org), befindet sich diese Entwicklung in Deutschland zwar noch im Anfangsstadium, rückt jedoch zunehmend in das Interesse von Hochschulen und anderen Bildungseinrichtungen. Im schulischen Kontext wird der Maker Space neuerdings als „neuer Raum“ anerkannt, der das klassische, schulische Werken und die Handarbeit mit digitalen Fabrikationstechnologien vereint. Wichtige Kompetenzen der Gegenwart, wie Innovationsfähigkeit, Konstruktion, Kollaboration, Projektmanagement, Problemlösekompetenz, Handwerk, Umgang mit digitalen Technologien und Umgang mit Misserfolgen werden bereits in der schulischen Bildung gefordert und zunehmend auch gefördert (vgl. Blikstein 2013: 7f., Martinez & Stager 2013: 31f., Picot & Neuburger 2014: 9f, P21: 2016).

Die Bestrebungen, Maker Spaces in Schulen und Hochschulen einzurichten und Maker-Aktivitäten in den Lehrplan zu integrieren, sind relativ neu und positionieren die *Attribute der Formalität innerhalb des Raumgefüges Maker Space*. Die benötigten pädagogischen Rahmenbedingungen

sowie die genaue Gestaltung dieser Lernräume und Aktivitäten müssen noch erforscht werden. Sicherheitsaspekte, Lärmemissionen, Organisation, Finanzierung, Versicherungsfragen, Raum- und Unterrichtsstruktur müssen ebenso berücksichtigt werden (vgl. Asaf 2014: 141f.).

Durch die verstärkte Integration von Maker Spaces mit ihren charakteristischen Technologien und Arbeitsweisen in Schulen, Hochschulen und Fortbildungseinrichtungen wird eine synergetische Entwicklung bei der Umsetzung innovativer Lernprozesse denkbar (vgl. Libow Martinez & Stager 2013: 31f.). Nach Blikstein (2013) lässt sich beim Lernen in Maker Spaces bei Schüler/innen und Studierenden eine völlig neue Wertschätzung der eigens hergestellten Prototypen erkennen. Die Lernatmosphäre ist zeitlich flexibler und Studierende erlernen bisher unbekannte Arbeitsweisen und neuartige Ebenen der Teamzusammenarbeit. Das Arbeiten mit digitalen Fertigungsmethoden beschleunigt dabei die Prozesse des eigenen Vorstellungsvermögens und ermöglicht eine positivere Selbstreflexion und den Umgang mit dem eigenen Fehler-Management.

Am Beispiel des ViNN:Labs (venture innovation laboratory), dem hochschulintegrierten Maker Space an der Technischen Hochschule Wildau, erfolgt der Versuch die verschiedenen Lernkontexte im Maker Space den Attributen von *Formalität und Informalität* zuzuordnen (siehe Abb. 2). Dabei soll verdeutlicht werden, dass der Maker Space als „Raum“ die Attribute Lernprozess, Ort/ Setting, Absichten/ Ziele sowie die Lerninhalte der jeweiligen Lernsituation in unterschiedlichen Ausprägungen vereint.

Dabei wird das ViNN:Lab als Maker Space in unterschiedlichen „Lernsituationen“ eingesetzt.

Im Rahmen von Studium und Lehre wird das ViNN:Lab eher klassisch durch Elemente von *Formalität* geprägt. Dabei werden z. B. die *angeleitete Entwicklung von Prototypen* für die Anwendung in der Verkehrslogistik oder Seminare und Übungen im Innovationsmanagement angeboten. Dagegen rücken bei



Abb. 2) Kontinuum-Modell am Beispiel ViNN:Lab.

der Durchführung von Workshops für (Vor)Schulkinder und Jugendliche (im KiVi:Lab) stärker die *Attribute von Informalität des Lernens* in den Mittelpunkt. Dabei werden anwendungsbezogene DIY-Workshops zu den Themen 3D-Drucken, Laserschneiden oder Programmieren für verschiedene Altersgruppen angeboten. Der *Open Lab Day*, ein wöchentlicher Tag, an dem alle Hochschulangehörige sowie Personen und Organisation außerhalb der Hochschule den Maker Space für *individuelle Vorhaben*, wie z. B. 3D-Scannen, 3D-Drucken oder elektrotechnisches Arbeiten nutzen können, fokussiert letztlich am stärksten das *informelle Lernen*. Der kreative und kollaborative Austausch der Nutzer des Maker Spaces spielt dabei eine tragende Rolle. Damit findet sich im Ansatz des ViNN:Labs das Kontinuum-Modell wieder mit seiner deutlichen *Verzahnung von Formalität und Informalität* und den *verschwimmenden Grenzen zwischen informellem und formalem Lernen*.

6. Fazit

Lernen wandelt sich kontinuierlich auf vielen Ebenen. Informelles Lernen bzw. Lernsituationen mit Attributen von Informalität gewinnen zunehmend an Bedeutung und benötigen besondere Orte des Lernens (vgl. Seufert et al. 2013, Zürcher 2007).

Maker Spaces als Orte des kollaborativen Lernens decken viele der Bedürfnisse und Anforderungen an informelle

Lernräume ab. Darüber hinaus impliziert der Maker Space zahlreiche Attribute von Formalität und kann damit auch einige Funktionen und Aufgaben der institutionalisierten Bildung übernehmen.

Wie am Beispiel des ViNN:Labs illustriert, bieten Maker Spaces die Möglichkeit, sowohl formales als auch informelles Lernen zu unterstützen. Durch die im Maker Space möglichen, unterschiedlichen Lernformen können individuelle, strategieorientierte Kompetenzziele der Lernenden adressiert werden. In diesem Sinne unterstützen Maker Spaces neue Lernkonzepte, die den Lernenden im Fokus eines selbstgesteuerten kollaborativen Umfeldes sehen.

Schulen, Universitäten und Unternehmen erkennen die Potenziale von Maker Spaces und beginnen diese zu integrieren. Dabei gibt es noch viele offene Fragen, die es kritisch zu hinterfragen gilt, bspw. wie die lerntheoretischen Rahmenbedingungen und die optimale Lernraumgestaltung aussehen kann. Ebenso müssen Fragen zum gleichberechtigten und niederschweligen Zugang und den oftmals divergenten Anforderungen von Maker Spaces und öffentlichen Lernräumen (Sicherheit vs. Zugang etc.) berücksichtigt werden.

Bildungseinrichtungen werden sich zukünftig weiter öffnen und einen Teil ihres institutionalisierten Bildungsauftrages projektbezogen in Maker Spaces

verlagern, um den Lernenden die Möglichkeit zu geben, in einer kollaborativen und kreativen Lernumgebung Wissen selbstständig und im Team zu akkumulieren. Das Kontinuum-Modell mit seiner deutlichen Verzahnung von Formalität und Informalität und den verschwimmenden Grenzen zwischen informellem und formalem Lernen kann hierbei eine geeignete lerntheoretische Grundlage für Raum, Konzept- und Methodenentwicklung bilden.

LITERATUR

- Assaf D (2014) Maker Spaces in Schulen: Ein Raum für Innovation. In: Rummler K (ed) Lernräume gestalten – Bildungskontexte vielfältig denken. 22. Jahrestagung der Gesellschaft für Medien in der Wissenschaft, GMW 2014. Medien in der Wissenschaft, vol 67. Waxmann, Münster, ISBN: 978-3-8309-3142-3, pp 141–149
- Bergner A (2017) Make - Design - Innovate. Das Potential des Maker-Movements für Innovation, Kreativwirtschaft und Unternehmen
- Blikstein P (2013) Digital Fabrication and 'Making' in Education. In: Walter-Herrmann J, Büching C (eds) FabLab. Of Machines, Makers and Inventors. Kultur- und Medientheorie. transcript Verlag, s.l., ISBN: 9783837623826, pp 203–222
- Bundesministerium für Familie, Senioren, Frauen und Jugend BMFSFJ (2017). 15. Kinder- und Jugendbericht. Bericht über die Lebenssituation junger Menschen und die Leistungen der Kinder- und Jugendhilfe in Deutschland
- Colley H, Hodkinson P, Malcolm J (2003) Informality and formality in learning: a report for the Learning and Skills Research Centre. University of Leeds: Leeds
- Erpenbeck J, Sauter W (2015) Kompetenzentwicklung mit humanoiden Computern. essentials. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-09934-3. doi: 10.1007/978-3-658-09935-0
- Europäische Kommission (2001) Mitteilung der Kommission: Einen europäischen Raum des Lebenslangen Lernens schaffen. KOM(2001)678. Brüssel
- Fischer M, Huber K, Mann E, Röben P (2014) Informelles Lernen und dessen Anerkennung aus der Lernendenperspektive – Ergebnisse eines Projekts zur Anerkennung informell erworbener Kompetenzen in Baden-Württemberg. bwpat 26
- Francis MC, Mulder TC, Stark JS (1995) Intentional learning: A process for learning to learn in the accounting curriculum. American Accounting Association, Sarasota
- Gershenfeld NA (2005) Fab. The coming revolution on your desktop - from personal computers to personal fabrication, Paperback publ. Basic Books, New York, NY. ISBN: 9780465027460
- Haan Gd, Harenberg D (1999) Bildung für eine nachhaltige Entwicklung. Gutachten zum Programm. Materialien zur Bildungsplanung und zur Forschungsförderung, Heft 72. Bund-Länder-Kommission für Bildungsplanung und Forschungsförderung (BLK) Geschäftsstelle, Bonn. ISBN: 3-9806547-2-9
- Halverson ER, Sheridan K (2014) The Maker Movement in Education. Harvard Educational Review 84(4):495–504. doi: 10.17763/haer.84.4.34j1g68140382063
- Hatch M (2013) The maker movement manifesto. Rules for innovation in the new world of crafters, hackers, and tinkers. McGraw-Hill Education, New York. ISBN: 9780071821131
- Hinze U (2004) Computergestütztes kooperatives Lernen. Einführung in Technik, Pädagogik und Organisation des CSCL. Waxmann, Münster
- Hira A, Hynes MM (2018) People, Means, and Activities: A Conceptual Framework for Realizing the Educational Potential of Makerspaces. Education Research International 2018(1):1–10. doi: 10.1155/2018/6923617
- Johnson L, Becker S, Estrada V, Freeman A (2015) NMC Horizon Report: 2015 Higher Education Edition. Deutsche Ausgabe. Übersetzung: Helga Bechmann. Multimedia Kontor: Hamburg
- Knoll G (2016) Messe Make Munich. Selber machen statt konsumieren. Die Zeit
- Konrad K (2014) Lernen lernen - allein und mit anderen. Konzepte, Lösungen, Beispiele. Springer VS, Wiesbaden. ISBN: 9783658049850. doi: 10.1007/978-3-658-04986-7
- Lauth GW, Brunstein GW, Grünke M (2004) Lernstörungen im Überblick: Arten, Klassifikation, Verarbeitung und Erklärungsperspektiven. In: Lauth, GW, Grünke M, Brunstein JC (eds) Intervention bei Lernstörungen. Förderung, Training und Therapie in der Praxis. Hogrefe, Göttingen, pp 13–23
- Libow Martinez S, Stager G (2013) Invent to learn. Making, tinkering, and engineering in the classroom. Constructing Modern Knowledge Press, Torrance, Calif. ISBN: 9780989151108
- Livingstone DW (1999) Informelles Lernen in der Wissensgesellschaft. In: ABWF e.V./QUEM (ed): Kompetenz für Europa – Wandel durch Lernen – Lernen im Wandel. Referate auf dem internationalen Fachkongress Berlin
- Livingstone DW (2006) Informal Learning: Conceptual Distinctions and Preliminary Findings. In: Bekermann Z, Burbules NC, Silberman-Keller D (eds) Learning in Places. The Informal Education Reader, New York, pp 203–227
- Lomas C (2006) Student Practices and their Impact on Learning Spaces. In: Oblinger, DG (ed) Learning Spaces. ISBN 0-9672853-7-2
- MacQueen KM, McLellan E, Metzger DS, Kegeles S, Strauss RP, Scotti R, Blanchard L, Trotter RT (2001) What is Community? An Evidence-Based Definition for Participatory Public Health. American Journal of Public Health 91(12):1929–1938
- Martin L (2015) The Promise of the Maker Movement for Education. Journal of Pre-Collage Engineering Education Research 5(1): 30–39. doi: 10.7771/2157-9288.1099
- McCue TJ (2012) Do it with others – Maker Community Manifesto. Forbes June
- Mietzner D, Hartmann F (2017) The Maker Movement - Current Understanding and Effects on Production. In: The XXVIII ISPIM Innovation Conference. Composing the Innovation Symphony, 18.–21.06.2017, Vienna
- Neber H, Wagner AC, Einsiedler W (eds) (1978) Selbstgesteuertes Lernen, 1. Aufl. Beltz-Studienbuch. Beltz, Weinheim. ISBN: 3407511361
- Overwien B (2011) Informelles Lernen in einer sich globalisierenden Welt. In: Scheunflug A, Sander W (eds) Politische Bildung in der Weltgesellschaft, pp 259–277
- Peppler KA, Halverson E, Kafai YB (eds) (2016) Makeology. Routledge, London. ISBN: 9781317537151
- Picot A, Neuburger R (2014) Arbeit in der digitalen Welt – Zusammenfassung der Ergebnisse der AG1-Projektgruppe anlässlich der IT-Gipfelprozesse 2013 und 2014. https://www.de.digital/DIGITAL/Redaktion/DE/IT-Gipfel/Publication/2014/it-gipfel-2014-ag-1-arbeit-in-der-digitalen-welt.pdf?__blob=publicationFile&v=4. Accessed 30 Jun 2016
- Pätzold G, Lang L (1999) Lernkulturen im Wandel. Didaktische Konzepte für eine wissenschaftsbasierte Organisation. Bertelsmann, Bielefeld. ISBN: 978-3763901203
- P21 (2016). Framework for 21st Century Learning. http://www.p21.org/storage/documents/docs/P21_framework_0816.pdf. Accessed 04 Jan 2019
- Rosa P, Wanner M, Ferretti F, Guimarães Pereira Â, Panella F (2017) Overview of the Maker Movement in the European Union. EUR, Scientific and technical research series, vol 28686. Publications Office, Luxembourg. ISBN: 9279705253
- Rosenfeld Halverson E, Sheridan K (2014) The Maker Movement in Education. Harvard Educational Review 84(4):495–504. doi: 10.17763/haer.84.4.34j1g68140382063
- Rummler K (2014) Lernräume gestalten - Bildungskontexte vielfältig denken. 22. Jahrestagung der Gesellschaft für Medien in der Wissenschaft, GMW 2014. Medien in der Wissenschaft, vol 67. Waxmann, Münster, ISBN: 978-3-8309-3142-3
- Sackey D, Nguyen MT, Grabill J (2015) Constructing learning spaces: What we can learn from studies of informal learning online. Computers and Composition 35: 112–124. doi: 10.1016/j.compcom.2015.01.004
- Schugurensky D (2000) The Forms of Informal Learning: Towards a Conceptualization of the Field. WALL Working Paper 19
- Schüßler I (2004) Lernwirkungen neuer Lernformen. Berlin
- Seufert S, Lehner M, Tödtli M (2013) Didaktisierung des Informellen Lernens. In: Seufert S, Metzger C (eds) Kompetenzentwicklung in unterschiedlichen Lernkulturen. Festschrift für Dieter Euler zum 60. Geburtstag, 1. Auflage. Eusl, Paderborn, ISBN: 9783940625274, pp 487–507
- Seufert S, Meier C (2016) Informelles Lernen mit digitalen Medien in Unternehmen. In: Rohs M (ed) Handbuch Informelles Lernen, ISBN: 978-3-658-05953-8, pp 547–566
- Vontobel P (2006) Didaktisches Design aus lernpsychologischer Sicht. Pädagogische Hochschule Zürich
- Vossoughi S, Bevan B (2014) Making and Tinkering: A Review of the Literature. National Research Council Committee on Out of School Time STEM Learning
- Watters A (2012) Top Ed-Tech Trends of 2012: The Maker Movement. <https://www.hackeducation.com/2012/11/21/top-ed-tech-trends-of-2012-maker-movement>. Accessed 04 Jan 2019
- Zürcher R (2007) Informelles Lernen und der Erwerb von Kompetenzen. Theoretische, didaktische und politische Aspekte. Materialien zur Erwachsenenbildung 2

AUTORINNEN

Dipl.-Ing. Eva Ismer
Prof. Dr. rer. pol. Dana Mietzner
Forschungsgruppe Innovations- und Regionalforschung
Technische Hochschule Wildau

E-Mail für Korrespondenz:
dana.mietzner@th-wildau.de



Die Entwicklung eines Technologie Radars für den IT-Mittelstand

Marko Berndt und Dana Mietzner*

Zusammenfassung

Die systematische und kontinuierliche Auseinandersetzung mit neuen digitalen Technologien und das frühzeitige Erkennen von Chancen und Risiken als Grundlage für strategische Entscheidungen im Sinne einer langfristigen Aufrechterhaltung der Wettbewerbsfähigkeit, stellt für KMU generell aber auch für mittelständische IT-Unternehmen eine Herausforderung dar. Ursache dafür sind eine hohe Dynamik in den Unternehmensumfeldern, geringe Ressourcen für eine systematische strategische Vorausschau sowie ein Mangel an passfähigen methodischen Ansätzen. Im Mittelpunkt dieses Beitrages steht das Technologie Scouting als ein ausgewählter methodischer Ansatz, um die strategische Vorausschau von KMU der IT-Wirtschaft zu unterstützen. In diesem Beitrag wird gezeigt, wie das Technologie Scouting schlank und agil für eine ausgewählte Branche, den IT-Mittelstand, gestaltet werden kann und wie die Ergebnisse des Scoutings in einem Technologie Radar visualisiert und nutzbar gemacht werden können. Zu diesem Zweck wird im Beitrag die Betaversion eines Technologie Radars vorgestellt.

Abstract

The systematic and continuous evaluation of new digital technologies and the early recognition of opportunities and risks as a basis for strategic decisions in the sense of maintaining competitiveness in the long term pose a challenge for SME in general, but also for medium-sized IT companies. This is due to the high dynamics in the business environment, low resources for systematic strategic foresight and a lack of suitable methodological approaches. The focus of this paper is technology scouting as a selected methodological approach to support strategic foresight of SME in the IT sector. This article will show how technology scouting can be made lean and agile for a selected IT mid-sized sector, and how the results of scouting can be visualized and harnessed in a technology radar. For this purpose, the article presents the beta version of the technology radar.

1. Hintergrund und Zielsetzung

Der Mittelstand wird in zahlreichen Studien und Publikationen immer wieder als Motor oder gar als das Rückgrat der deutschen Wirtschaft bezeichnet (vgl. IfM Bonn 2016, BMWi 2017a). Die aktuellen Ergebnisse des Mittelstandsbarometers von Ernst & Young verweisen auf eine gute wirtschaftliche Situation im deutschen Mittelstand. Trotz der Zuversicht und einer positiven Auftragslage werden Gefahren wie der Fachkräftemangel oder der zunehmende Wettbewerb nicht außer Acht gelassen (vgl. E&Y 2018). Die omnipräsente Herausforderung der Digitalisierung schwebt zusätzlich als bedeutender Trend über der deutschen KMU Landschaft. Die mit der Digitalisierung

einhergehenden Veränderungen schaffen dabei nicht nur Gewinner. Neue digitale Technologien ermöglichen neue Geschäftsmodelle mit einem disruptiven Charakter. Dadurch geraten bestehende Unternehmen zunehmend unter Druck und ganze Branchen können grundlegend verändert werden. Ein Beispiel für diese Entwicklung ist z. B. das Geschäftsmodell von Twitter, das die Form der Erstellung, Aufbereitung und Verbreitung von Nachrichten fundamental verändert und etablierte Marktakteure unter Druck gesetzt hat. Dabei hat Twitter keine eigene neue Technologie entwickeln müssen, sondern hat verfügbare und sich schnell entwickelnde Technologieplattformen genutzt (vgl. Downes & Nunes 2013: 48).

Nokia übersah wiederum den Trend des Smartphones und Kodak fand keinen Anschluss an die digitale Fotografie. Beide Unternehmen kostete dies ihre Marktführerschaft (vgl. Schallmo et al. 2017: 289–290, Streibich 2016: 212) Diese Beispiele verweisen darauf, dass es nötig ist, frühzeitig Chancen und Trends zu identifizieren, wie den Einsatz neuer Technologien (vgl. Streibich 2016: 212). Dies stellt jedoch für ein einzelnes Unternehmen eine große Herausforderung dar und ist vor allem für kleine und mittlere Unternehmen unter Umständen schwierig umzusetzen. In der deutschen Unternehmenslandschaft ergibt es Sinn, dass diese Aufgabe im Mittelstand selbst verortet wird, speziell im IT-Mittelstand, der sich an der Schnittstelle

* korrespondierende Autorin

zwischen IT und deren wirtschaftlicher Entfaltungsmöglichkeit befindet (vgl. Bär et al. 2018: 128). Der IT-Mittelstand besitzt damit im gegenwärtig dominierenden Trend der Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft eine Enablerfunktion. Für dessen KMU ist es deshalb erforderlich, sich frühzeitig mit neuen digitalen Technologien auseinanderzusetzen und deren Potenziale zu bewerten. Ein Schlüsselaspekt dieser Aufgabe kann das Technologie Scouting sein. Es ist wichtig, den IT-Mittelstand nicht nur für das Thema zu sensibilisieren, sondern auch dazu zu befähigen, die Entwicklungsdynamiken von Technologien zu nutzen, um nicht wie Nokia und Kodak von neu auf den Markt drängenden Innovatoren supprimiert zu werden. Dieser Beitrag widmet sich der Frage, wie neue Technologien erkannt, bewertet und systematisch in operative Aktivitäten von Unternehmen überführt werden können.

Dazu wird in dem vorliegenden Beitrag zuerst der IT-Mittelstand vorgestellt. Im Anschluss zeigt dieser Beitrag die Ziele und einen möglichen Prozess des Technologie Scouting auf und präsentiert abschließend eine Möglichkeit zur Visualisierung der Ergebnisse in Form eines online zur Verfügung stehenden Technologie Radars. Der gesamte Prozess wird dabei im Hinblick auf Adaption durch den IT-Mittelstand beleuchtet.

2. Der IT-Mittelstand und die Rolle von Netzwerken

Nach der Definition des Instituts für Mittelstandsforschung gehören in Deutschland 9.852 IT-Unternehmen zum IT-Mittelstand. Berücksichtigt wurden hierbei Unternehmen mit einer Anzahl zwischen 10 und 499 Beschäftigten und einem maximalen jährlichen Umsatz von 50 Millionen Euro (vgl. IfM Bonn 2018). Im Jahr 2015 erwirtschafteten die im deutschen Unternehmensregister eingetragenen IT-Mittelständler 68 Milliarden Euro, was 35 Prozent des gesamten Branchenumsatzes entspricht. Die übrigen 65 Prozent entfallen dabei zu 13 Prozent auf Unternehmen mit 9 oder weniger Beschäftigten und zu ca. 52 Prozent auf die 0,2 Prozent der Unternehmen mit mehr als 500 Angestellten.

Dass knapp 56 Prozent der sozialversicherungspflichtigen Mitarbeiter/innen dabei im IT-Mittelstand arbeiten, verdeutlicht ebenfalls die bereits ange-deutete Bedeutung des IT-Mittelstands für die Digitalisierung des Mittelstands insgesamt (vgl. Bitkom e.V. 2018). Im IT-Mittelstand konvergieren eine gewisse Flexibilität, die der agileren, weniger komplexen Unternehmensstruktur geschuldet ist und eine ausreichende Marktpräsenz, um dem Mittelstand insgesamt neue Impulse zu geben. Eben diese Schlüsselposition soll den IT-Mittelstand zum Wegbereiter der Digitalisierung und zum zentralen Treiber der digitalen Transformation werden lassen (vgl. BMWi 2017: 90). Vorschub leisten diesem Ziel eine Vielzahl von IT-Netzwerk-Organisationen in Deutschland. Eine Kienbaum Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie beschreibt, dass diese Netzwerke breit auf regionaler Ebene aufgestellt sind und dass je Bundesland mindestens eine Netzwerk-Organisation besteht. Darunter zählen unter anderem Cluster, Wirtschaftsförderungen, Unternehmensverbände und wissenschaftliche Einrichtungen (vgl. Kienbaum 2016: 26). Die systematische Auseinandersetzung mit neuen Technologien, die Bewertung ihrer Potenziale und die damit einhergehende Schaffung einer Wissensbasis als Grundlage für Strategieprozesse der Unternehmen, kann für einzelne KMU des IT-Mittelstandes, aufgrund von Ressourcenengpässen oder durch den Mangel an passfähigen Methoden, eine enorme Herausforderung darstellen. Eine Möglichkeit die notwendige systematische Auseinandersetzung mit neuen Technologien zu unterstützen, ist die Umsetzung von Ansätzen der strategischen Vorausschau auf der Ebene von branchenspezifischen Netzwerken. Eine ausgewählte Methode der strategischen Vorausschau ist das Technologie Scouting. Das Technologie Scouting ist ein mehrgliedriger Prozess, der bereits einiges an wissenschaftlicher Aufmerksamkeit erfahren hat, dessen Umsetzung in der Wirtschaft allerdings eher noch punktuell anstatt in der Breite stattfindet. Im Folgenden wird daher zuerst das Technologie Scouting vorgestellt und dann detailliert ein methodischer Ansatz skizziert, der Anwendung im IT-Mittelstand finden kann.

3. Technologie Scouting

Die eingangs genannten Beispiele früherer Marktführer zeigen die möglichen Auswirkungen der Entwicklungsdynamiken von Technologien auf Unternehmen. Ein Beispiel für die rasante Veränderung bietet die Musikindustrie. Vor knapp 15 Jahren revolutionierte Apple mit dem iTunes Store die Branche. Doch Streamingdienste wie Spotify oder Deezer verdrängen das ehemalige Erfolgsmodell in die Bedeutungslosigkeit (vgl. Châlons & Duft 2016: 20). Dies ist nur ein Beispiel dafür, dass Technologieentwicklungen einen wesentlichen Treiber für neue Produkte, Dienstleistungen, Prozesse oder Geschäftsmodelle darstellen können. Die Umsetzbarkeit von neuen Geschäftsideen kann durch die Entwicklung einer oder mehrerer Technologien erst ermöglicht werden (vgl. Schimpf et al. 2016: 32). Auf einzelne Unternehmen bezogen liegt die Herausforderung nun darin, Technologieentwicklungen möglichst frühzeitig zu erkennen und daraus entstehende Innovationschancen und -risiken für das eigene Unternehmen zu bewerten. Schimpf et al. stellen fest, dass diese Beobachtung und Bewertung in nahezu jedem Unternehmen stattfindet, jedoch auch, dass ab einer bestimmten Unternehmensgröße oder technologischen Komplexität die Herausforderung besteht, die Identifikation von Technologieentwicklungen abzustimmen, zu koordinieren und Transparenz über die Bewertung zu schaffen. Genau an dieser Stelle setzt das Technologie Scouting an, das Rohrbeck wie folgt definiert: "[...]a systematic approach by companies whereby they assign part of their staff or employ external consultants to gather information in the field of science and technology and through which they facilitate or execute technology sourcing. Technology scouting is either directed at a specific technological area or undirected, identifying relevant developments in technological white spaces. Technology scouting relies on formal and informal information sources, including the personal networks of the scouts" (Rohrbeck 2010: 3). Die Grundidee dabei ist es, ein Netzwerk aus Expertinnen und Experten, bestehend aus den sogenannten Technologie Scouts (die interne oder

externe Mitarbeiter/innen sein können) aufzubauen, das neue Technologien identifiziert, untersucht und zugänglich macht (vgl. Auth et al. 2017: 940). In der betriebswirtschaftlichen Literatur finden sich viele weitere Begriffe, wie Technology Monitoring, Technology Scanning, Technologiefrühaufklärung oder Technology Intelligence. Schimpf et al. stellen fest, dass die Ansätze der unterschiedlichen Begrifflichkeiten zum Teil mit dem Technology Scouting gleichgesetzt werden können (vgl. Schimpf & Lang-Koetz 2010: 9). Dully beschreibt, dass die Grundstruktur des Prozesses in allen Ausprägungen ähnlich ist: vereinfacht gesagt folgt der Erfassung der Informationen die Verarbeitung, bevor die Weiterleitung an die Empfänger erfolgt (vgl. Dully 2011: 42). Rohrbeck spricht dabei von einer Trichterlogik (siehe Abb. 1), die Technologien von der Identifizierung bis zur Umsetzung durchlaufen. Schrittweise verringern sich dabei die als relevant eingestuftes Technologien, bis am Ende eine bestimmte Auswahl von einsetzbaren Technologien übrigbleibt (vgl. Auth et al. 2017: 941). Eine übliche Visualisierung der Ergebnisse des Technology Scouting erfolgt oft durch ein sogenanntes Technologie Radar.

Detaillierter betrachtet teilt Rohrbeck den Technology Scouting Prozess in vier Phasen ein: (1) Die Identifikationsphase, (2) die Selektionsphase, (3) die Bewertungsphase und (4) die Verbreitungsphase (vgl. Rohrbeck 2007: 6). Schimpf et al. verfolgen einen ähnlichen Ansatz. Die im Folgenden vorgestellten Phasen stellen eine Synthese der Aspekte beider Quellen dar und dienen als Grundlage für die Planung eines Technology Scouting Prozesses für den IT-Mittelstand.

3.1 Die Identifikationsphase

In der ersten Phase sollten zunächst für das Unternehmen relevante Technologien und Anwendungsfelder abgegrenzt werden, um den Prozess möglichst zielgerichtet und effektiv zu gestalten. Grundlagen dafür stellen beispielsweise im Unternehmen vorhandene Kompetenzen und technologische Möglichkeiten dar, aktuelle und zukünftig erforderliche Funktionalitäten bestehender Anwen-

dungen oder technologische, gesellschaftliche, ökonomischen bzw. ökologische Trends. Schimpf et al. konstatieren, dass die Identifikation von Technologie- und Anwendungsfeldern in starker Abhängigkeit zur Technologiestrategie des Unternehmens steht. Die Schwierigkeit besteht darin, dass zukünftige technologische Entwicklungen in der Strategie berücksichtigt werden müssen (vgl. Schimpf et al. 2010: 10).

von Expert/innen, öffentliche Förderdatenbanken oder persönliche Kontakte (vgl. Schimpf & Lang-Koetz 2010: 10, Rohrbeck 2007: 5). Qualität und Informationsdichte variieren je nach Quelle. Weiterhin stellt die Informationsbeschaffung oftmals einen nicht unerheblichen Kosten- und Zeitfaktor für die Unternehmen dar (vgl. Dully 2011: 45).

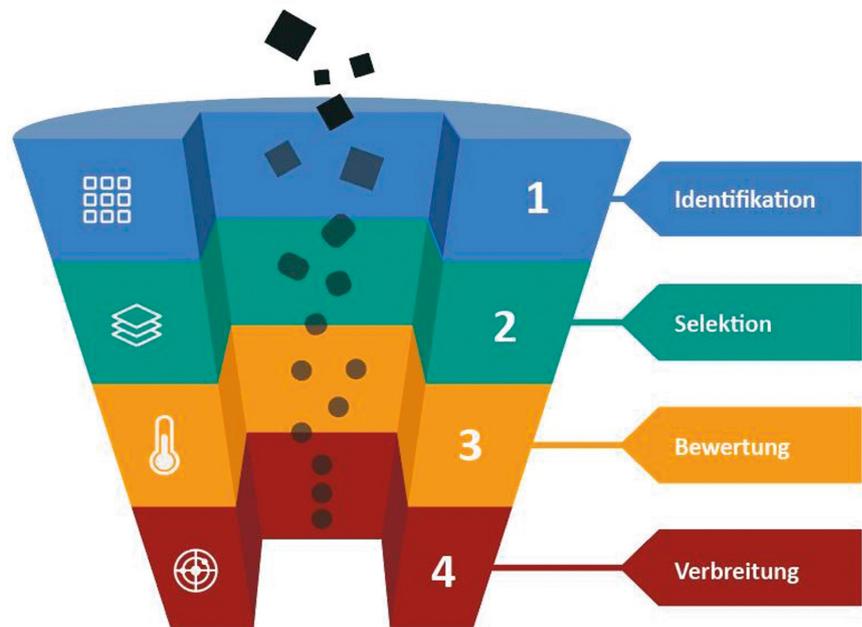


Abb. 1) Der Technologie Scouting Prozess. Eigene Darstellung in Anlehnung an Rohrbeck 2007: 8.

3.2 Die Selektionsphase

In der zweiten Phase werden zu den identifizierten Technologien Informationen gesammelt. Einerseits können diese Informationen aus internen Quellen bezogen werden, sofern Expertinnen und Experten für eben jene Entwicklungen im Unternehmen beschäftigt sind (zum Beispiel im Rahmen von F&E). Allerdings ist in den meisten Fällen davon auszugehen, dass die strukturierte Einbindung externer Informationsquellen unumgänglich ist. Die Vielzahl und Mannigfaltigkeit von Angeboten in diesem Sektor stellt die Unternehmen vor die Aufgabe, eine sinnvolle Auswahl und darüber hinaus eine sinnvolle Verknüpfung vorzunehmen. Neben formalen Quellen, wie Studien, Geschäftsberichten oder Patentdatenbanken existieren auch informelle Quellen, wie Gesprächsrunden

3.3 Die Bewertungsphase

In der dritten Phase werden die identifizierten Technologien bewertet. Grundlage dieser Bewertung sollte nach Möglichkeit eine klar definierte Metrik sein. Diese kann verschiedene Dimensionen umfassen, denkbar sind zum Beispiel die mit der Einführung einer Technologie verbundenen Kosten, die erwarteten Gewinne (Zeit, monetär, Effizienz), die Dauer bis zur Marktreife oder das Risiko einer Einführung oder Nichteinführung (vgl. Haag et al. 2011: 315). Handelt es sich um eine mehrdimensionale Metrik, so kann die Reduzierung auf eine eindimensionale Form für die Verbreitungsphase hilfreich sein (vgl. Granig 2007: 68).

Die eigentliche Beurteilung der ermittelten Technologien sollte im Abgleich mit der Technologiestrategie des Unternehmens vorgenommen werden. Dabei können verschiedene Methoden zum Einsatz kommen (beispielsweise Markt- und Patentanalysen, Befragungen oder Delphi Studien). Die Wahl der Methode hängt dabei von der Verfügbarkeit von Ressourcen ab und es gilt, dass sie den entsprechenden Anforderungen des Einzelfalls angepasst werden kann (vgl. Schimpf & Lang-Koetz 2010: 11).

3.4 Die Verbreitungsphase

In der vierten Phase erfolgt die Kommunikation der Ergebnisse. Sie stellt einen wesentlichen Erfolgsfaktor für den Gesamtprozess dar, da die gewonnenen Erkenntnisse nur dann Wirkung entfalten können, wenn sie entsprechend kommuniziert werden und den richtigen Akteurinnen und Akteuren zur Verfügung stehen. Nicht nur die Managementebene, sondern auch Beschäftigte mit technischem Schwerpunkt sollten dabei einbezogen werden (vgl. Schimpf & Lang-Koetz 2010: 11). Endprodukte dieser Phase können Berichte, Dokumentationen, Online-Wikis oder eben ein Technologie Radar sein (vgl. Rohrbeck 2007: 7).

4. Technologie Radar

Ein Technologie Radar bietet den Vorteil einer grafischen Visualisierung, die neben der Verortung der Technologien eine kurze Zusammenfassung inklusive aktueller Entwicklungen, des Forschungsstatus und des wirtschaftlichen Potentials beinhaltet. Als Basis der Darstellung dient dabei oft das eponyme Radar, das heißt eine Unterteilung eines Kreises in Quadranten und kreisförmige Distanzlinien (Ringe). Quadranten stellen dabei üblicherweise nominale Attribute dar (z. B. einen Technologiesektor), Ringe stehen für die Metrik, die in Phase (3) zur Beurteilung verwendet wurde (z.B. Erzielung der Marktreife in ein, zwei oder drei Jahren). In der Praxis existiert eine Vielzahl von spezifischen Visualisierungen (siehe Abb. 2) für verschiedenste Zwecke (vgl. Rohrbeck 2007: 7).

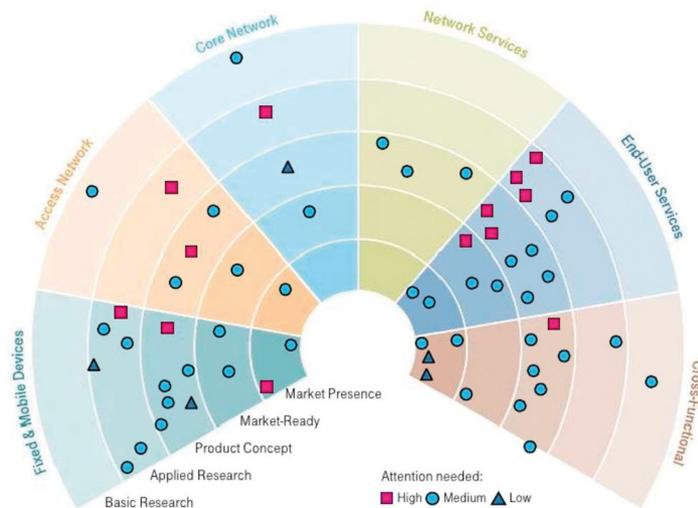


Abb. 2) Beispiel Technologie Radar der Deutschen Telekom (Hartenthaler 2009: 10).

Nachdem es erstmalig 2004 bei der Deutschen Telekom eingesetzt wurde, hält das Technologie Radar mittlerweile sukzessive Einzug in die deutsche Unternehmerlandschaft (vgl. Rohrbeck 2017: 6). Neben der Deutschen Telekom nutzen es beispielsweise der Online-Versandhändler Zalando und der Online-Marktplatz AutoScout24 (vgl. Zalando 2018, AutoScout24 2018). Üblicherweise erfolgt die Klassifizierung der Technologien unter Einbeziehung der Relevanz für das Geschäftsmodell des Unternehmens und des Reifegrads der Technologie (vgl. Golovatchev et al. 2008: 993). Zu den Funktionen des Technologie Radars gehören (1) die Frühwarnung und -aufklärung möglicher Gefahren aus dem Unternehmensumfeld aus technologischer Sicht, (2) die Identifikation potenzieller neuer Wettbewerber, die dieselbe Technologie anbieten, jedoch ein erweitertes Funktionsprofil aufweisen, (3) die Sicherung von Planungszyklen und die flexiblere Reaktionsfähigkeit auf technologische Veränderungen und (4) die Identifikation von strategischen Fenstern, bei der zum Beispiel die eigene Technologie mit einer weiteren kombiniert werden kann, um neue Märkte zu adressieren (vgl. Ardilio 2012: 61f.). Der Einsatz eines Technologie Radars ermöglicht zusammengefasst die strukturierte Beobachtung technologischer Entwicklungen und deren frühzeitige Einbindung in die Unternehmensplanung. Weiterhin wird eine Grundlage für die Kommunikation geschaffen, durch die verschiedene Hand-

lungsoptionen berücksichtigt werden können (vgl. Schimpf et al. 2016: 42). Die Bewertung einer Vielzahl komplexer Technologien kann in der Form eines Technologie Radars verdichtet und greifbar präsentiert werden (vgl. Auth et al. 2017: 946).

5. Zwischenfazit – Technologie Scouting im IT-Mittelstand

Zwar zeigen die eingangs vorgestellten Beispiele von Nokia und Kodak, dass in den wettbewerbsintensiven Märkten, auf denen auch der IT-Mittelstand agiert, Technologie Scouting als Geschäftsnotwendigkeit verstanden werden muss (vgl. Golovatchev & Budde 2010: 760), jedoch ist diese Notwendigkeit selten unmittelbar. In Anbetracht der Tatsache, dass die vollständige Umsetzung des geschilderten Prozesses für ein einzelnes Unternehmen einen erheblichen personellen und finanziellen Aufwand bedeutet, verknüpft mit positiver Auftragslage und dem Problem des Personalmangels, kann deshalb davon ausgegangen werden, dass das Technologie Scouting einen eher geringen Stellenwert im IT-Mittelstand aufweist. Aus diesem Grund erscheint eine geeignete Anpassung des dargestellten Prozesses für die vom Mittelstand geprägte IT-Wirtschaft sinnvoll, um einen niederschweligen Einstieg in das Thema zu ermöglichen. Ziel ist es dabei nicht nur für das Technologie Scouting zu sensibilisieren, sondern die Unternehmen zu befähigen, die Methode selbst anzuwenden.

6. Ein vereinfachter Prozess für den IT-Mittelstand

Die vier Phasen des beschriebenen Technologie Scouting Prozesses bedeuten einen hohen Zeitaufwand, wenn sie von Grund auf neu umgesetzt werden. Dieser lässt sich jedoch erheblich reduzieren, wenn auf bereits vorhandenes Wissen zurückgegriffen werden kann. Eine Reduzierung der Granularität, zum Beispiel von spezifischen Technologien hin zu Einflussfaktoren, verringert die erforderlichen Ressourcen, beispielsweise den personellen Aufwand. Für die Phasen (1) und (2) wurde im konkreten Beispiel daher auf die Trend-Aggregationswebseite TRENDXPLORER von TRENDONE zurückgegriffen. Die Bewertung in Phase (3) erfolgte an Hand des Technology Readiness Level (siehe Abb. 3), ebenfalls unter Reduzierung der Komplexität von neun auf drei Stufen. Für Phase (4) wurde eine Open Source Bibliothek unter Visualisierungs-, Effizienz-, Skalierungs- und Datenschutzgesichtspunkten angepasst. Die folgenden Abschnitte detaillieren diese Schritte.

Phasen (1) und (2): Ermittlung der Inhalte

Bereits einfache Internetrecherchen liefern Technologie Radare, die aktuelle, relevante und fundierte Daten visualisieren (vgl. Thoughtworks 2018, Zalando 2018, AutoScout24 2018). Innerhalb des Mittelstand 4.0-Kompetenzzentrum Netzwerkes in Deutschland existiert ebenfalls ein aktuelles Technologie Radar, das kostenfrei zugänglich ist (vgl. Kompetenzzentrum Hamburg 2018). Um den Zielen der Aufwandsreduktion und Generalisierung Rechnung zu tragen, wurde kein weiteres Technologie Radar mit spezifischen Technologien entwickelt, sondern vielmehr ein Technologie Radar erstellt, das spezifische Einflussbereiche zusammenfasst und an Hand von Signalen Beispiele zur Anwendung aufkommender oder aktueller Einflussfaktoren zeigt. Signale sind hier Zeichen aus der Wissenschaft und Wirtschaft, die auf neue Anwendungen von Technologien im IT-Bereich verweisen (vgl. IFTF 2018). Das hier vorgestellte Vorgehen stellt daher eher ein ergänzendes denn ein substituierendes Angebot der bereits verfügbaren Radare dar.

Wie bereits erwähnt, ist die Sichtung, Bewertung und Aufbereitung von Technologie Trends häufig aufwendig und kostenintensiv. Mittlerweile gibt es jedoch einige Scouting Plattformen, die es sich zur Aufgabe gemacht haben, diesen Prozess zu automatisieren und aus verschiedenen Quellen weltweit Trends zu identifizieren und in einer Datenbank zusammenzuführen (vgl. Mapegy 2018, Trendone 2018). Als Quellen dienen dabei unter anderem Pressemitteilungen, Forschungsberichte oder Geschäftsberichte. TRENDONE verfolgt beispielsweise den Anspruch, Trends innerhalb von 30 Sekunden zu erschließen (vgl. Trendone 2018). TRENDONE teilt zur Übersicht Trends in Mega-, Makro- und Micro-Trends ein (siehe Abb. 3). Von Bedeutung ist dabei die automatische, hierarchische Kategorisierung der ermittelten Daten. So kann auf jeder Hierarchieebene auf Statistiken zurückgegriffen werden, die eine Einschätzung der Bedeutung des jeweiligen Trends für eine ausgewählte Branche erlauben.

quellen. Diese Art der Informationsermittlung ist daher ideal für einen ersten Einstieg in die Thematik, ersetzt aber für strategische Unternehmensentwicklung nicht eine fundierte Analyse.

Da die oben beschriebene Datenbank weitgehend automatisiert arbeitet, erscheint es sinnvoll, weitere, nicht technologie-basierte Quellen, heranzuziehen. Dies können beispielsweise Studien oder Expertenmeinungen sein. Für das Technologie Radar für den IT-Mittelstand wurden hierbei unterschiedliche Forschungsarbeiten verwendet, die Technologietrends der Zukunft im IT-Mittelstand untersuchten (vgl. Bitkom e.V. 2018: 19, BMWi 2017b). Die Ergebnisse wurden mit den jeweiligen Trends der Datenbank verglichen und angepasst.

Phase (3) Bewertung der Trends

Eine Bewertung identifizierter Technologien ist – wie bereits beschrieben – an Hand einer Vielzahl von Metriken mög-

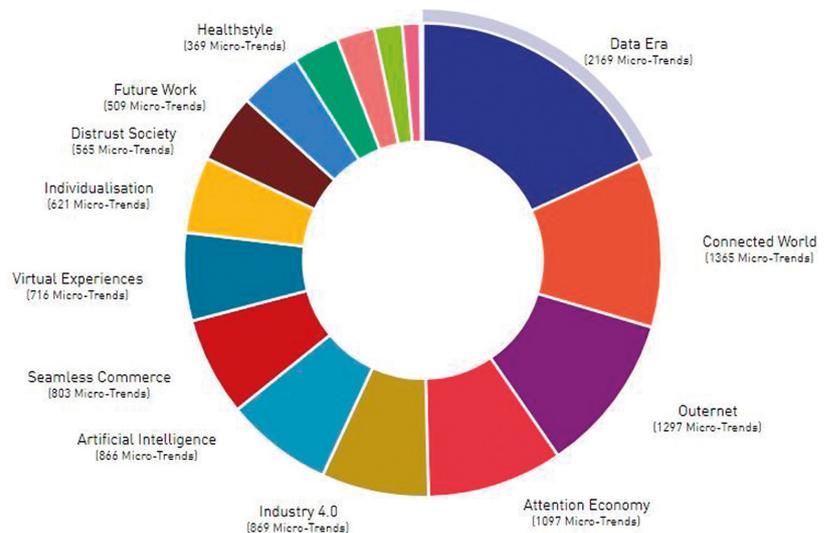


Abb. 3) Trendaggregation des TRENDXPLORERS (Trendone 2018).

Die Nutzung einer solchen Datenbank als primäre Quelle zur Befüllung des Technologie Radars bietet folgende Vorteile: (1) Automatische Hierarchisierung einschließlich Gewichtung (so lassen sich zum Beispiel die wichtigsten Einflussbereiche leicht identifizieren und dann durch drill down spezifizieren). (2) Vermeidung des größten Anteils an Zeitaufwand, nämlich Beschaffung und Sichtung von Einzel-

lich. Auf den ersten Blick sowohl leicht greifbar als auch relativ leicht zu bewerten ist dabei der zeitliche Horizont, innerhalb dessen eine Umsetzung möglich bzw. geboten scheint. Das wohl bekannteste Verfahren zur Bestimmung des Reifegrades ist das TRL-Konzept (Technology Readiness Level), das in den 1980er Jahren von der NASA entwickelt wurde (vgl. Warschat et al. 2015: 59). Der Ansatz eignet sich vor allem,

um die Marktnähe zu beschreiben (vgl. Preissler 2016: 121). Technologien werden hierbei in neun TRL-Stufen eingeteilt. Diese Stufen reichen von der Beobachtung wissenschaftlicher Grundlagen (TRL-Stufe 1) bis hin zum Einsatz der Technologie im Feld (TRL-Stufe 9). Dabei können drei Stadien eine gröbere Einteilung ermöglichen, die vom Forschungs-, über das Prototypen- bis hin zum Marktreifestadium reichen (siehe Abb. 4).

(4) Visualisierung der gewonnenen Erkenntnisse

Die Visualisierung in Form eines Radars ist mit – je nach gewählter Ausprägung – teils erheblichem Aufwand verbunden. Grundsätzlich existieren dabei verschiedene Möglichkeiten, von rein statischen Darstellungen (beispielsweise als Grafik) bis hin zu voll dynamischen Radaren (Datenbasis editierbar in der Cloud, responsive Oberfläche, etc.). Im

7. Technische Umsetzung des Technologie Radars

Ein Pionier der digitalen Umsetzung eines Technologie Radars ist das multinationale Softwareunternehmen Thoughtworks. Thoughtworks hat es sich zur Aufgabe gemacht, die Softwarebranche weiterzuentwickeln und erarbeitetes Wissen zu teilen. Aus diesem Grund veröffentlicht Thoughtworks halbjährlich ein Radar mit Technologien, die für die Entwicklung von Software relevant sind (vgl. Thoughtworks 2018). Die hierfür verwendete Softwareplattform steht als Open Source bei Github zur Verfügung und diente als Grundlage für die technische Umsetzung des eigenen Radars (vgl. Github 2018).

Dieser ursprüngliche Code wurde stark erweitert, vor allem in Hinblick auf Skalierbarkeit und Benutzerfreundlichkeit. Ergänzt wurde eine Datenbereitstellung entweder auf Excel-Basis oder über ein Datenbank-Backend, so dass ein Mehrbenutzersystem mit Versionierung ohne Probleme umzusetzen wäre. Aus dieser Datenbasis werden mittels Java automatisiert, sowohl Detailseiten für jeden Einflussfaktor erstellt, als auch die Überblicksvisualisierung in Form des eigentlichen Radars generiert. Des Weiteren wurde die grafische Darstellung überarbeitet. Die Bereitstellung der Web-Anwendung erfolgt über das node.js Framework.

8. Komponenten der Visualisierung im Technologie Radar

Die vier Quadranten des Radars stellen Einflussbereiche dar, die als relevant für den IT-Mittelstand identifiziert wurden. Innerhalb dieser Quadranten werden relevante Einflussfaktoren verortet, die wiederum Signale beinhalten (siehe Abb. 5).

Einflussbereiche (A): Die Zusammenstellung der Einflussbereiche teilt das Radar in vier Quadranten auf. Ganz trennscharf sind diese nicht, das bedeutet, dass einige Signale auch anderen Quadranten zugeordnet werden könnten. Dennoch helfen die Quadranten dabei, eine Grundordnung zu schaffen. Die einzelnen Einflussbereiche lassen sich genauer durch einen Klick auf den Auswahlpunkt betrachten.

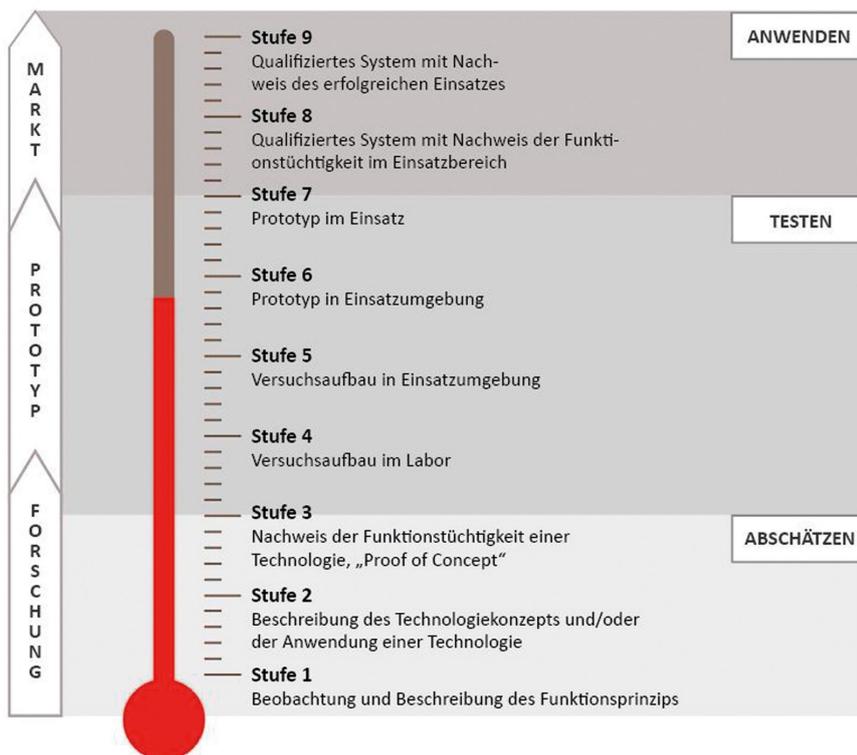


Abb. 4) Technology Readiness Level (Eigene Darstellung in Anlehnung an Mankins 1995).

Für das hier vorgestellte Technologie Radar wurde eben diese reduzierte Granularität gewählt. Durch eine genaue Untersuchung der Quellen der Signale wird dem dazugehörigen Einflussfaktor eines der Stadien zugewiesen. Die drei Stadien werden durch drei Ringe im Radar visualisiert, um Einflussfaktoren grafisch zu verorten. Diese Festlegung ermöglicht eine Umsetzung von Phase (3) mit vertretbarem Aufwand und eignet sich als Einstieg und Grundlage für das Setzen von Impulsen für Innovationsaktivitäten.

Gegensatz zu der Komplexitätsreduktion für die Phasen (1) bis (3) wurde für die Phase (4) eine dynamische und flexible (dadurch entsprechend technisch komplexere) Umsetzung gewählt. Dadurch kann das vorliegende Beispiel sowohl leicht erweitert, als auch leicht auf andere Domänen übertragen werden, das heißt die anfängliche Umsetzungscomplexität fällt bei Transfer zum Beispiel zu interessierten Unternehmen weg und ermöglicht eine sehr einfache Visualisierung von Ergebnissen eines unternehmenseigenen Scouting Prozesses.

Technologiereifegrad (B): Die Ringe des Radars beschreiben den Reifegrad der Einflussfaktoren (C). Gemäß der Metapher des Radars steigt der Reifegrad der Einflussfaktoren mit der Annäherung ans Zentrum. Dabei geben die einzelnen Ringe bereits mögliche Handlungsempfehlungen, die Einflussfaktoren anzuwenden, zu testen oder sie zunächst abzuschätzen.

Signale (D): Die Signale sind den Einflussfaktoren zugeordnet und somit erst in einer tieferen Ebene des Technologie Radars ersichtlich. Signale können Entscheider inspirieren und somit Impulse für eigene Innovationsaktivitäten geben. Durch einen Klick auf den gewünschten Einflussfaktor öffnet sich nicht nur eine Erklärung desselben, sondern zusätzlich ein konkretes Beispiel Signal des Einflussfaktors inklusive der Quelle. Zusätzliche Signale und eine Zusammenfassung der Bewertung sowie die Zuordnung zu einer spezifischen Technologie runden die Zusammenfassung der Einflussfaktoren ab.

Technologie Tags (E): Sind nur einzelne, spezifische Technologien und ihnen zugeordnete Signale von Interesse, kann ein Schieberegler der jeweiligen Technologie aktiviert werden. Dies ermöglicht dem Betrachter eine gezieltere Suche von Einflussfaktoren.

9. Kommunikation der Inhalte des Technologie Radars

Wie bereits ausgeführt, ist die initiale Zielsetzung neben der Bereitstellung von Informationen die Sensibilisierung für die Thematik des Technologie Scouting. Die Ergebnisse sind deshalb als Grundlage für weitere Arbeiten zu verstehen. So soll das Technologie Radar im Laufe der Zeit spezifiziert, vervollständigt und agil weiterentwickelt werden. Es soll Impulse für die unternehmenseigene Technologiestrategie setzen und für aufkommende Technologieentwicklungen sensibilisieren.

10. Fazit und Ausblick

Auf Grund der Bedeutung des Mittelstandes für die deutsche Unternehmenslandschaft einerseits und der immer weiterwachsenden Möglichkeiten der digitalen Technologien und dem damit verbundenen Wettbewerbsdruck andererseits, erscheint es unumgänglich, die Digitalisierung des Mittelstandes rasch und effizient voranzutreiben, wobei dem IT-Mittelstand eine tragende Funktion zukommt. Technologie Scouting spielt dabei eine wichtige Rolle. Während die Marktführer der IT-Branche die entsprechenden Prozesse bereits fest im Unternehmen verankert haben, sind zwar beim IT-Mittelstand vereinzelte Bemühungen im Bereich der technologischen Vorausschau durchaus festzustellen, jedoch scheint diese in der

Breite noch nicht angekommen sein. Dabei sollte angesichts der besonders hohen Wettbewerbsdynamik das Technologie Scouting als geschäftsnotwendig angesehen werden, um langfristig erfolgreich am Markt agieren und das eigene Unternehmen weiterentwickeln zu können.

Die Betaversion des hier vorgestellten Technologie Radars wird im nächsten Schritt Unternehmen des IT-Mittelstands und Branchenexpertinnen und -experten zum Testen zur Verfügung gestellt. Das Feedback wird aufgenommen, ausgewertet und zur Weiterentwicklung des Radars verwendet. Eine wiederholte Iteration ist denkbar und antizipiert. Als Endprodukt entsteht ein Technologie Radar für den IT-Mittelstand (vgl. <http://radar.itwirtschaft.de/>).

Mittelfristig wäre eine offene Plattform zum Crowdsourcing der relevanten Einflussbereiche bzw. Einflussfaktoren denkbar. Incentivierung potentieller Teilnehmer/innen, Güte der Ergebnisse (im Vergleich zu automatisierten Verfahren wie z.B. TRENDONE) und auch der Vergleich mit der Situation und Wahrnehmung von Technologien und entsprechenden Anwendungen in anderen Branchen sowie die Gestaltung der Schnittstellen zu Strategieprozessen sind weitere interessante Forschungsbereiche.

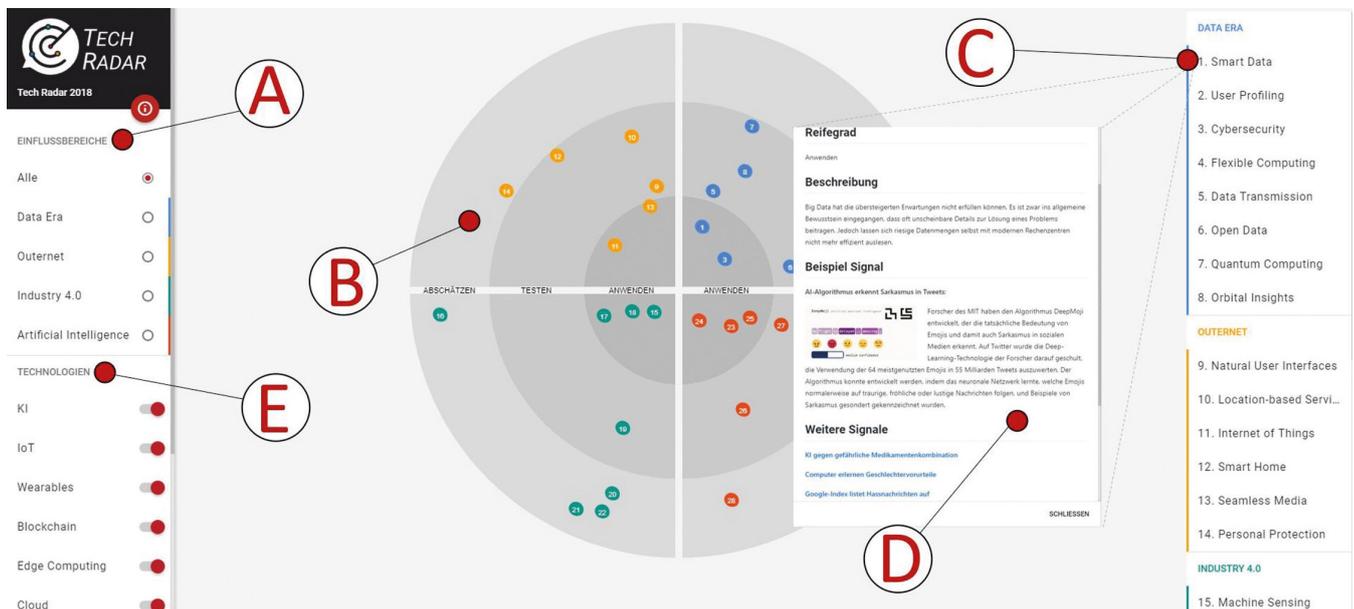


Abb. 5) Beschreibung der einzelnen Komponenten des Technologie Radars (eigene Darstellung).

LITERATUR

Ardilio A (2012) Fraunhofer TechnologieRadar: Trends erkennen – Technologien umsetzen. In: Bullinger HJ (ed) Fokus Technologiemarkt. Technologiepotenziale identifizieren - Marktchancen realisieren, Hanser, München, pp 78-90

Auth G, Meyer P, Porst G (2017) Erkennung und Nutzung von Technikinnovationen für den Digital Workplace der Deutschen Telekom. HMD 54(6):935–949. doi: 10.1365/s40702-017-0365-7

AutoScout24 (2018) Autoscout Radar Feb 2018. <https://radar.thoughtworks.com/?sheetId=https%3A%2F%2Fgithubusercontent.com%2FScout24%2Fas24-tech-radar%2Fmaster%2Fradars%2FAutoScout24%2520Radar%2520Feb%25202018%2520.csv>. Accessed 03 Sep 2018

Bär C, Grädler T, Mayr R (eds) (2018) Digitalisierung im Spannungsfeld von Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Recht, 1. Band: Politik und Wirtschaft. Springer Gabler, Berlin. ISBN: 978-3-662-55719-8. doi: 10.1007/978-3-662-55720-4

Bitkom e.V. (2018) Der IT-Mittelstand in Deutschland. Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V., Berlin

BMW (2017a) Wirtschaftsmotor Mittelstand Zahlen und Fakten zu den deutschen KMU. https://www.bmw.de/Redaktion/DE/Publikationen/Mittelstand/wirtschaftsmotor-mittelstand-zahlen-und-fakten-zu-den-deutschen-kmu.pdf?__blob=publicationFile&v=1. Accessed 03 Sep 2018

BMW (2017b) Monitoring-Report Wirtschaft DIGITAL 2017

Châlons C, Dufft N (2016) Die Rolle der IT als Enabler für Digitalisierung. In: Abolhassan F (ed) Was treibt die Digitalisierung? Warum an der Cloud kein Weg vorbeiführt, Springer Gabler, Wiesbaden, pp 27-37

Dully S (2011) Internetbasiertes Technologie-Scouting für Recyclingtechnologien. Dissertation, Universität Stuttgart

Downes, L, Nunes P (2013) Big Bang Disruption. Harvard Business Review: 44-56

EY (2018) Mittelstandsbarometer 2018. [https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-mittelstandsbarometer-januar-2018/\\$FILE/ey-mittelstandsbarometer-januar-2018.pdf](https://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/ey-mittelstandsbarometer-januar-2018/$FILE/ey-mittelstandsbarometer-januar-2018.pdf). Accessed 03 Sep 2018

GitHub (2018) Thoughtworks - build-your-own-radar. <https://github.com/thoughtworks/build-your-own-radar>. Accessed 03 Sep 2018

Golovatchev J, Budde O (2010) Technology and innovation radar - Effective instruments for the development of a sustainable innovation strategy. In: 2010 IEEE International Conference on Management of Innovation & Technology, 02.06.-05.06.2010, Singapore, Singapore. IEEE, ISBN: 978-1-4244-6565-1, pp 760–764. doi: 10.1109/ICMIT.2010.5492855

Granig P (2007) Innovationsbewertung, 1. Aufl. Gabler Verlag, s.l. ISBN: 3835007793

Grün, O (2018) Datenökonomie braucht einen offenen Markt. In: Bär C, Grädler T, Mayr R (eds) Digitalisierung im Spannungsfeld von Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Recht, 1. Band: Politik und Wirtschaft. Springer Gabler, Berlin, pp 127-135

Haag C, Schuh G, Kreysa J, Schmelter K (2011) Technologiebewertung. In: Schuh G (ed) Technologiemanagement. Handbuch Produktion und Management 2. 2., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp 309-366

Hartenthaler J (2009) Vision 2050: Von der physischen Mobilität zur virtuellen Präsenz. <https://www.slideshare.net/hartenthaler/vision-2050-5491055>. Accessed 03 Sep 2018

IfM Bonn (2016) KMU in Deutschland gemäß der KMU-Definition des IfM Bonn. https://www.ifm-bonn.org/fileadmin/data/redaktion/statistik/unternehmensbestand/dokumente/KMU-D_2012-2016_ifm-Def.pdf. Accessed 03 Sep 2018

IfM Bonn (2018) KMU-Definition des IfM Bonn. <https://www.ifm-bonn.org/definitionen/kmu-definition-des-ifm-bonn/>. Accessed 03 Sep 2018

ITFF (2018) Signals. <http://www.iff.org/what-we-do/foresight-tools/signals/>. Accessed 03 Sep 2018

Kienbaum (2016) Machbarkeitsstudie. Vernetzung von mittelständischen IT-Anbieterunternehmen in flexiblen Wertschöpfungspartnerschaften über ein IT-Mittelstandszentrum. Kienbaum Management Consultants GmbH, Berlin

Kompetenzzentrum Hamburg (2018) Einführung zum Technologieradar. <https://www.kompetenzzentrum-hamburg.digital/angebot/technologieradar/einfuehrung-zum-technologieradar>. Accessed 03 Sep 2018

Kompetenzzentrum IT-Wirtschaft (2018) Wir vernetzen IT made in Germany. <https://itwirtschaft.de/>. Accessed 03 Sep 2018

Kompetenzzentrum IT-Wirtschaft (2019): Technologie Radar. radar.itwirtschaft.de. Accessed 18 Feb 2019

Mankins JC (1995) Technology Readiness Level. Office of Space Access and Technology NASA

Mapegy (2018) Tap into innovation. <https://scout.mapegy.com/>. Accessed 03 Sep 2018

Mittelstand-Digital (2017) Zyprien gibt Startschuss für drei weitere Mittelstand 4.0-Kompetenzzentren. <https://www.mittelstand-digital.de/MD/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2017/2017-12-04-zyprien-gibt-startschuss-fuer-drei-weitere-mittelstand-4-0-kompetenzzentren.html>. Accessed 03 Sep 2018

Preissler S (2016) Interorganisationaler Wissens- und Technologietransfer. Dissertation

Rohrbeck R (2007) Technology Scouting – a case study on the Deutsche Telekom Laboratories. ISPIIM-Asia 2007 Conference, 12.01.2007 New Dehli

Rohrbeck R (2010) Harnessing a network of experts for competitive advantage: technology scouting in the ICT industry. R&D Management 40(2):169–180. doi: 10.1111/j.1467-9310.2010.00601.x

Rummel S (2014) Eine bewertungsorientierte Vorgehensweise zur Tauglichkeitsprüfung von Technologiekonzepten in der Technologieentwicklung. Dissertation, Universität Stuttgart

Schallmo D, Rusnjak A, Anzengruber J, Werani T, Jünger M (eds) (2017) Digitale Transformation von Geschäftsmodellen. Grundlagen, Instrumente und Best Practices. Schwerpunkt. Springer Gabler, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-12387-1. doi: 10.1007/978-3-658-12388-8

Schimpf S, Lang-Koetz C (eds.) (2010) Technologiemonitoring. Technologien identifizieren, beobachten und bewerten. Fraunhofer IAO, Stuttgart

Schimpf S, Heubach D, Rummel S (2016) Technologieentwicklung als Innovationstreiber in bestehenden und disruptiven Märkten – von der Beobachtung zur Umsetzung. In: Abele T (ed) Die frühe Phase des Innovationsprozesses, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, pp. 31-49

Streibich K-H (2016) Software verändert die Welt: Die Zukunft gehört dem digitalen Unternehmen. In: Bär C, Fischer AT, Gulden H (eds) Informationstechnologien als Wegbereiter für den steuerberatenden Berufsstand. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, ISBN: 978-3-662-44908-0, pp 207–214. doi: 10.1007/978-3-662-44909-7_20

t3n (2018) So eklatant ist der IT-Fachkräftemangel in Deutschland. <https://t3n.de/news/it-fachkraeftemangel-mint-1078563/>. Accessed 03 Sep 2018

Thoughtworks (2018) Technology Radar VOL. 18. Insights into the technology and trends shaping the future. <https://www.thoughtworks.com/de/radar>. Accessed 03 Sep 2018

Trendone (2018) Trendone – Wir begleiten Sie in die Zukunft. <https://www.trendexplorer.com/de/ueber-uns/ueber-trendone/>. Accessed 03 Sep 2018

Warschat J, Schimpf S, Korell M (2015) Technologien frühzeitig erkennen, Nutzenpotenziale systematisch bewerten. Methoden, Organisation, semantische Werkzeuge zur Informationsgewinnung und –speicherung. Ergebnisse des Verbundforschungsprojektes syncTech - synchronisierte Technologieadaptation als Treiber der strategischen Produktinnovation. Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation. Fraunhofer-Verlag: Stuttgart. ISBN 978-3-8396-0881-4

Zalando (2018) Zalando Tech Radar – 2018.05. <https://opensource.zalando.com/tech-radar/>. Accessed 03 Sep 2018

AUTOREN

Marko Berndt, M.A.

Prof. Dr. rer. pol. Dana Mietzner
Forschungsgruppe Innovations- und Regionalforschung
Technische Hochschule Wildau

E-Mail für Korrespondenz:
dana.mietzner@th-wildau.de



Technology and Institutions in neo-Schumpeterian and Original Institutional Thinking

Iciar Dominguez Lacasa *

Zusammenfassung

Ziel dieses Beitrags ist es, die Wechselwirkungen zwischen Technologie und Institutionen in sozioökonomischen Prozessen aus Sicht der *Original Institutional Economics* (OIE) und der neo-Schumpeterianischen Ökonomik (NSE) zu analysieren. Insbesondere werden Affinitäten und Divergenzen beider ökonomischen Denkschulen identifiziert, um Impulse für deren Zusammenarbeit zu setzen. Beide Theoriestränge heben die Bedeutung von Wissen und Institutionen für die wirtschaftliche Entwicklung hervor. Ganz konkret lassen sich die Gemeinsamkeiten beider Denkschulen in drei Bereichen erkennen: (i) in der Bedeutung von Wissen für die sozioökonomische Entwicklung, (ii) in dem handlungsbezogenen Charakter der Technologie, die von Institutionen geprägt wird, und (iii) in der Handlungsfähigkeit von Akteuren im technologischen Wandel. In Anbetracht der Gemeinsamkeiten könnten beide Denkrichtungen von Synergien profitieren. Die neo-Schumpeterianische Konzeptualisierung der wirtschaftlichen Entwicklung könnte um die Berücksichtigung des Wertesystems und der Machtstruktur erweitert werden. Werte und Macht spielen aus Sicht der OIE eine Schlüsselrolle für die Verbreitung (bzw. Beibehaltung) von Wissen und Technologie. Beide Aspekte werden von OIE operationalisiert und können der Weiterentwicklung der Modellierung von Selektionsmechanismen in neo-Schumpeterianischen Ansätzen dienen, um die Pfade der wirtschaftlichen Entwicklung zu erklären.

Abstract

The aim of this inquiry is to deepen our understanding of the interactions between knowledge, technologies and institutions in socio-economic process by considering the affinities and divergences of Original Institutional Economics (OIE) and neo-Schumpeterian economics (NSE). Both strands of evolutionary economic thought recognize the importance of knowledge for human progress and the role of institutions in molding this process. OIE and NSE share a common perspective in what concerns (i) the role of knowledge for socio-economic change, (ii) the behavioral dimension of technology molded by institutions, and (iii) the role of purposeful evaluation in processes of institutional and technological change. Considering these commonalities, both strands of thinking could benefit from “joining forces”. Firstly, the conceptualization of how knowledge and technologies drive human progress from a neo-Schumpeterian perspective could very much benefit from the consideration of the value system and the power structure sustaining it as put forward by OIE. Values and power appear as key determinants channeling (or retaining) knowledge towards human progress. Moreover, the role of the value system as suggested by OIE could be operationalized and further developed to explain paths of socio-economic development drawing on the conceptualization of “selection mechanisms” as put forward by neo-Schumpeterian models.

1. Introduction

The body of economic literature exploring processes of technological change and its influence on economic progress and social change has largely recognized the need to properly account for the interactions between technologies and institutions. Specially two schools of economic thought are aware of these interactions: neo-Schumpeterian Economics (NSE) and Original Institutional Economics (OIE). The aim of this

inquiry is to find complementarities between these two strands of evolutionary economic research to improve our understanding on how knowledge and technologies trigger human progress. Previous research has already considered the commonalities and differences of both strands of research (Hodgson 2007, Frigato & Santos-Arteaga 2012). Our goal is to identify a potential research path for both schools to join forces. Rather than reviewing the body of research of both evolu-

tionary schools of economic thought, we will focus on contributions of two contemporary exponents developing the theoretical grounds of both strands of research in what concerns the conceptualization of technologies and institutions and their role in socio-economic change: Richard Nelson and Paul Bush. Both authors view the socio-economic system as a structure of coordinated behavior for the application and diffusion of knowledge and information as described by Metcalfe

* corresponding author

(2014), where innovations face evaluation processes generated by prevailing orders (Metcalf 2014: 26). This common general view, together with their explicit consideration of the interaction of technologies and institutions for socio-economic change make them especially interesting for the purpose of this paper. Richard Nelson is among the most influential exponents of the neo-Schumpeterian strand of economic research. Together with Sidney Winter he has concentrated on the study of economic growth and differences of growth and innovation rates across industries. Their seminal contribution (Nelson & Winter 1982) stressed the role of technological change as the motor of economic growth. Moreover, Richard Nelson has largely acknowledged the role of institutions in processes of technological change. His conceptualization of institutions and their interaction with technology has developed in the last 30 years. Even though the collaborative work between Richard Nelson and Sidney Winter published in 1982 did not explicitly aim at bringing institutions into the study of technological change and economic growth, their analysis had strong institutional aspects in the Veblenian sense of "habits of thought". Nelson (2002) recognizes this connection in the concept of "routines". Hodgson (2007) has also stressed the institutional aspects of Nelson's work. More recently, also together with Bhaven N. Sampat (Nelson & Sampat 2001, Nelson 2002, 2005, 2008) he developed the concept of "social technologies" and explicitly called for the need to bring institutions into the analysis of technological change and economic growth. Interestingly, even though he refers to Veblen and the American Institutionalist School in his more recent work (Nelson 2002: 19, Nelson 2005: 144; Nelson 2008: 2), he does not deepen into important developments in Original Institutional Thinking (Hayden 2006). Paul Bush, has largely contributed to Classical Institutional thinking in economics. As a school of thought in economics and social science, Classical Institutional Inquiry is frequently noted as the Original Institutional Economics, and is distinguished by the acronym OIE. This school adopts fundamental precepts that differentiate it from what

is known as New Institutional Economics, a school of thought stemming from ideas advanced by Ronald Coase and Douglass North. Classical Institutional Inquiry stems from seminal ideas advanced by Veblen. Research of William Waller (1982) suggests that Veblen's understanding of an institution changed and evolved over the years of his active inquiry. In the Veblen literature we find a proclivity for scholars to borrow an understanding from his *Absentee Ownership and Business Enterprise in Recent Times* [1923]. Here, Veblen (1923: 101) teaches us that an institution is "of the nature of a usage which has become axiomatic and indispensable by habituation and general acceptance." Moreover, in his writings Veblen stresses the role of technology for social change (Veblen 1904, 1914). Scholars have intensively discussed Veblen's concepts of "institution" and "technology" and the implications of different interpretations for the analysis of socio-economic change (Hodgson 2004, Waller 1982). Paul Bush (1983, 1987) draws on the extensions and refinements of Veblen's disciples to put forward a theory where institutional change is mainly driven by knowledge growth and technological change. In a more recent contribution, Bush and Tool (2001: 197) define their perspective as "neoinstitutionalist", based on the integration of Veblenian analysis with John Dewey's philosophy as Clarence E. Ayres' developed it.

The paper discusses their conceptualization of technologies and institutions, identifies commonalities and suggests a research path for OIE and NSE to join forces.

2. Institutions and Technologies in neo-Schumpeterian Thinking

To discuss how technologies and institutions are conceptualized in neo-Schumpeterian Thinking we focus on the work of Richard Nelson. His integration of technologies, institutions and economic growth has developed in the last 30 years. Together with Sidney Winter he published *An Evolutionary Theory of Economic Change* in 1982 inspiring a community of researchers contributing to the development of what is called neo-Schumpeterian eco-

nomics. Their work was a tentative of explaining how the strategies of heterogeneous firms in the pursuit of competitive advantage are significant determinants of the rate and direction of technological change and economic growth. For this purpose they introduce search and selection mechanisms to explain changes in the rate and direction of technological change (Nelson & Winter 1982). In 1982 Nelson and Winter introduced two key elements in their analysis of economic growth: (i) an industry as a population of heterogeneous firms with dynamic behavior and (ii) an unchanging selection environment prescribing which firms grow and survive. In Nelson and Winter's view, firm behavior and the selection environment entail clear institutional aspects.

Firm behavior

In what concerns firm behavior, even though their vision of the economy considers different types of organizations involved in technical advance, profit-oriented firms aiming at improving its position vis-à-vis their competitors are the key units of specification in the modeling exercises of Nelson and Winter (1982). Nelson and Winter (1982: 250, 263) recognize that different types of organizations do research and development (R&D): universities, firms, the government. Their objectives in what concerns investment in R&D differ. Moreover, their decision rules are responsive to variables that guide the achievement of these different purposes. Nelson and Winter opt explicitly for the use of the term "firm" to refer to all these different organizations (Nelson & Winter 1982: 264).

Drawing on organizational and behavioral concepts developed by March, Simon and Cyert the main assumptions of Nelson and Winter regarding the behavior of the firm deal with the question of why firms do what they do, or in other words, which are the factors shaping firms' decision-making. The answer to this questions draws on institutions. More specifically, to them the possible behavior of a firm is determined by its so called "routines". Routines may be considered as collective rules or procedures that programme the behavior of firms

and change their characteristics over time. They store essential information, which is remembered (or transferred) between individuals. Rather than the result of optimization problems, firms' strategies in taking management and technological decisions are shaped by these behavioral and cognitive regularities (routines).¹ Agency though can influence the evolution and implementation of routines. In other words, firms are considered to have a criteria to evaluate potential changes in routines. In most models this criteria is anticipated profit (Nelson & Winter 1982: 18). With routine guided search firms explore alternative technological directions for more effective means of production.

Technologies

Firms are the careers of technology. To introduce technical advance in their formal models, Nelson and Winter (1982: Chapter 9) conceptualized firms and technological change at first in a highly simplified way: technological change is the result of routine guided search by firms and improves productivity of capital. Successful innovations increase productivity and tend to enhance the profitability of a firm. Accordingly, firms aim at developing better technologies (increases in productivity) to produce more effectively and compete in a selection environment.

The Selection Environment and Technological Change

In what concerns the selection environment, Nelson and Winter's (1982) models conceptualize a market with production from firms and a demand from consumers. The market represents an unchanging selection mechanism, which applies to less profitable firms, or, in other words, to those firms who are not able to keep up with the pace of technological progress of their competitors. Firm's profitability in the market determines whether firms expand or contract to develop the power structure of the market in terms of firms' size and market shares.

¹ As pointed out by Becker (2004) the concept of "routine" as Nelson and Winter proposed it is not associated with the every-day meaning of the term in many languages. Variation and change are phenomena that are not in opposition to the concept of routines.

Nelson and Winter are aware of the simplification of their models and go further to develop in a descriptive way (ii) the process of search for technologies and (iii) alternative selection environments to the market (Nelson & Winter 1982: Chapter 11). These considerations introduced in chapter 11 of their seminal work draw on previous publications (Nelson & Winter 1977) and have been further developed in later contributions (Nelson 2003, 2002).

In what concerns technological change, firms explore alternative directions in which to search for novel technical solutions or improvements. However, this choice is not random. Guided by routines technicians in their problem-solving activities develop beliefs about what is *worth attempting*, or to which extent certain improvements may be *feasible* or not.

Technological advance involves search and evaluation of possible technological options according to economic parameters (such as unit production costs given demand and factor supply conditions, pay off) and technical dimensions specific to the particular technologies (such as size, chemical composition, etc.) (Nelson & Winter 1982: 248). Given the heterogeneity of organizations driving technical advance, the evaluation of possible technological options will differ among agents given their heterogeneous ends of investing in R&D. Organizations adopt or not a technical improvement depending on the benefits and costs, on the profitability. The term "profitable" indicates the value of the technical advance "in the eyes of the firm, without implying that the objectives are monetary profit rather than something else" (Nelson & Winter 1982: 264). The dimensions of this "profit" may vary across organizations and the way organization weighed economic and technical criteria vary across types of organizations. This range of possible directions of technological development based on the assessments of what is technologically feasible and worth attempting has been called by Nelson and Winter a "technological regime" (Nelson & Winter 1977, Nelson & Winter 1982: 258). Underlying these trajectories, there is a "body of knowledge held by techni-

cians, engineers and scientists involved in the relevant inventive activity" (Nelson & Winter 1982: 261).

The complexity of this selection environment has been tackled by Nelson and his colleagues in a number of contributions. In their early models Nelson and Winter relate explicitly the selection environment to the institutional structure shaping innovation processes. To them, the concept of selection environment allows for considering the institutional complexity and variety in the economy (Nelson & Winter 1977: 70). The selection environment determines the evaluation of inventions among users (i.e. fitness) and captures the incentives for firms to engage in research and development or in solving-problem processes. Dosi and Nelson (1994) stress that the competitiveness of firms in the selection environment may depend on diverse (sometimes even conflicting) criteria. The mechanisms through which selection occur are very complex: Dosi and Nelson point out the possible endogeneity of the selection criteria themselves in the economic system (Dosi & Nelson 1994: 156). Moreover, evaluation and incentives vary among economic sectors and activities. This institutional diversity of the real economy has been stressed more recently by Nelson (2003). To Nelson "the economy is the term used to denote and focus attention on the activities of the community that use scarce resources to achieve human purposes" (Nelson 2003: 706). Under this perspective, economic enquiry needs to consider the whole range of governing structures of economic activity: "market, government, neighborhood groups, voluntary associations, clubs, etc." (Nelson 2003: 706). The challenge for economic analysis is to study the nature of evaluation and diffusion of technical advance in different institutional structures (market and non-market selection environments) (Nelson & Winter 1977: 71, Nelson 1988: 268).

In more recent contributions, Nelson further develops on the integration of technologies, institutions and economic growth (Nelson 2005, 2008). For this purpose, he defines the "economic activity" as the basic unit of analysis to conceptualize technologies and in-

stitutions. Building on the concept of “routine” and on its role in deploying economic activities he differs between “social technologies”, “physical technologies” and “institutions”. To Nelson “social technologies” are coordinated behavior of actors involved “in doing something useful”, social technologies refer to “the way work is divided and coordinated” (Nelson & Sampat 2001: 44, Nelson 2008: 3). Social technologies complement physical technologies in economic activities. He points out that the “productivity or effectiveness of an activity” is determined by both: social and physical technologies (Nelson 2008: 3). In this framework, Institutions are “structures that define or mold the way economic agents interact to get things done” (Nelson 2005: 153) or “structures and forces that mold and hold in place prevalent social technologies” (Nelson 2008: 3). From this view, institutions framing and supporting social technologies refer to a broad set of things from law to organizations including market and non-market structures. Nelson stresses that social and physical technologies interact and change in the process of economic growth. New physical technologies give rise to changes in social technologies (changes in behavior to pursuit economic activities) and in the institutions supporting them. Social technologies and institutions are however more difficult to mold, control and replicate than physical technologies. A main difference between both types of technologies lies on the “scientific” understanding bearing both types of technologies. To Nelson, there is a much larger body of scientific knowledge and cumulative learning related to physical technologies. Moreover, the establishment and diffusion of social technologies “can be driven by fad or ideology” (Nelson 2008: 9). Given these differences, Nelson’s final interest lies on the identification of institutions required for economic progress. Interestingly, he largely acknowledges *the role of human purpose and beliefs* in determining what is feasible and appropriate for the selection of institutions and in the determination of the institutions that survive (Nelson 2008: 7). Nelson does not elaborate the selection processes of institutions. As we will see below, these aspects of social

evolution have been largely developed by OIE.

3. Technologies and Institutions in Original Institutional Thinking

In the Veblenian tradition and drawing largely on Foster (1981), Paul Bush (1987: 1076) takes a holistic view of society to study socio-economic evolution. Bush defines an institution as “a set of socially prescribed patterns of correlated behavior”. A behavioral pattern involves “two behaviors (or activities) and a value that acts as the standard by which the behaviors are correlated” (Bush & Tool 2001: 206, see also Bush 1987: 1077). We understand correlated behavior (or activity) as aligned behavior among human beings. Coordinated collective activity according to social prescriptions. This behavioral alignment in collective action builds the institutional structure of the community. The institutional structure is hence a set of “patterns of behavior” established and generally accepted in the community. Even though Bush acknowledges the possibility of randomness in human behavior, he stresses that, especially in problem-solving (purposive) behavior, social prescriptions organize human activities. Most importantly, the correlation (alignment) of behavior among human beings rests on values.

Values and changes in the value structure

A key element in the contributions of Paul Bush is the explicit consideration of the value system as a main building block of the institutional structure (Bush 1987). Most importantly, the analysis of the evolution of economic institutions in the society rests on analyzing the changes in the value structure (Bush & Tool 2001: 204). To Bush, values are the “socially accepted standards of judgment for human action.” Human activity involves hence “valuation” (the use of a value as standard of judgment in specific situations such as establishing an education system, producing and providing goods and services). Interestingly for Bush, values are “the outcome of conscious choices” and institutional change a “discretionary process” (Bush 1987: 1077). In a contribution to a volume edited by

Kurt Dopfer (Dopfer 2001), Bush and Tool briefly discuss how values are used in community’s decision processes and how they undergo a selection process to warrant their function in guiding collective action. They briefly present the concept of “value judgment” as “the selection of a value as an appropriate standard of judgment” (Bush & Tool 2001: 202–203).

Building upon what Veblen (1904) elaborated at length as a discrepancy between the industrial needs of the community and the pecuniary needs of the corporation, Bush discerns between two types of values: “instrumental values” and “ceremonial values.” For Bush (1983: 37, 1987: 1079–1080) “instrumental values” on the one hand are standards of judgment that develop from the application of knowledge, tools and skills in problem-solving processes. Most importantly, they are “self-correcting” standards of judgment since they are the result of knowledge accumulation in problem-solving processes to serve the community. These values are assessed according to the implications of using them to guarantee efficiency in problem solving. On the other hand, “ceremonial values” offer criteria for discerning invidious distinctions and for establishing a power structure in the community. Research of Bush (1987: 1085) suggests that validation of ceremonial values (i.e. the assessment of the appropriateness of values as standards of judgment) is not found in knowledge but rather in tradition, and with the formulation of beliefs and ideologies. While instrumental values are self-correcting and change with the accumulation of knowledge, ceremonial values are ingrained in the community’s established proper way of doing things. The value system can display ceremonial or instrumental dominance depending on whether ceremonial or instrumental values mainly correlate behavior in the community.

These values used for aligning behavior determine whether institutions manifest themselves ceremonial or instrumental characteristics. Under this logic Bush develops his interpretation of the Veblenian dichotomy. Ceremonially warranted patterns of behavior

establish institutions for defining status, a power structure and differential privileges in the community. Instrumentally warranted patterns of behavior establish institutions for efficiently solving problems in the community and to guarantee its continuity (Bush 1987: 1082–1085). Sustainable socio-economic progress draws hence on the establishment of instrumentally warranted patterns of behaviour to solve societal challenges. On institutions with a instrumental function. Whether they are able to embody human action and social processes depends, from Bush perspective, on the value structure of the society.

Technologies

Technologies in Bush's view are essential for institutional change and socio-economic progress (Bush 1987: 1089). Bush's concept of technology goes beyond the physical tools, machines and assembly lines (Bush 1987, 1983, Bush & Tool 2001). Technology is defined very broadly as a "form of behavior" that involves the skills and knowledge "upon which the community depends in the problem-solving processes" (Bush & Tool 2001: 205). The increase of knowledge in the community brings about technology. Changes in behavior in problem-solving processes (behavior with instrumental aims) bring about a challenge for the institutional structure since in collective action individual behavior needs to align with prevailing structures of behavior (or activities). The extent to which new technology is able to become fully embodied in behavioral patterns depends on the prevailing value system. What Bush teaches us is that technology and instrumentally warranted patterns of behavior (institutions with instrumental function) are fundamentally and categorically different. The application of knowledge to solve a problem translates into a behavior with instrumental aims (i.e. a technology). Nonetheless, it does not automatically entail instrumentally warranted patterns of behavior in collective action to solve the problem. This new behavior (Technology) needs to be correlated within the institutional structure with other behaviors (or activities). Under conditions that the value system suffers under cer-

emonial dominance (mainly ceremonial values correlate behavior in the community) technologies will be ingrained in institutions protecting vested interests rather than in institutions solving societal problems. This institutional structure may allow for incremental technological innovations, however, it deprives the community of the full potential for technologies to effectively address a pressing social problem.

Institutional Change

Bush (1987: 1101–1102) develops the concepts of "Institutional Adjustment" and "Progressive Institutional Change" to describe the changes needed in the institutional space for a community to fully exploit its technological possibilities. In a situation of ceremonial dominance these changes refer to the looseness or even displacement of ceremonial constraints by instrumental values through dynamics of "cumulative causation". Incremental technological innovation triggers learning and finally a modification in the value structure of the community which reflects institutional change. The interaction of technologies and institutions works through knowledge generation and changes in collective action. Institutional change results when collective action triggers changes in the value system for new technologies to develop and diffuse.

4. Discussion

After reviewing selected research of Richard Nelson on the integration of technologies, institutions and economic growth and having discussed Paul D. Bush's theory of institutional change, we now turn to highlight the common aspects and potential paths of research to identify the variables channeling knowledge and technological change towards human progress. Indeed, both strands of research acknowledge the importance of technological advance for human progress in a system of coordinated collective action. Given this common overarching view of socio-economic change, both OIE and NSE share a perspective in what concerns (i) the role of knowledge for technological change, (ii) the behavioral dimension of technology

molded by an institutional structure, and (iii) the role purposeful evaluation in processes of institutional and technological change.

In what concerns the role of knowledge for technological change, the contributions considered recognize that technology is more than machines and tools. It involves knowledge and a behavior for solving problems. In the Nelson and Winter models, economic agents engage in research activities to develop technologies. Moreover, the possible directions of technological development (the technological regimes) lie on the knowledge and skills of technicians and engineers involved. Even though in the simulation models of Nelson and Winter (1982) technical advance is highly simplified as an increase in firm's productivity, technologies develop along trajectories through problem-solving processes and evaluation mechanisms. Also Nelson's concept of social technologies explicitly involves knowledge embodied in coordinated collective behavior. On the other hand, to Paul D. Bush the growth of the knowledge fund of the community is an essential process underlying technological development. Paul D. Bush concept of technology is explicitly a form of behavior that involves the skills and knowledge to be applied in problem-solving processes.

As to institutions, in both strands institutions mold human behavior (also in problem-solving activities). Bush explicitly takes a Veblenian perspective to conceptualize institutions as socially prescribed patterns of human behavior in collective action. In simple words, to Bush institutions are collective action coordinated by established values. Institutional change implies changes in the value system. In the neo-Schumpeterian contributions considered, the role of institutions is at first less explicit. Nonetheless, institutions mold different dimensions of the economy. Firstly, Nelson and Winter conceptualize firm's strategies for triggering technological advance in terms of rules or procedures that programme the behavior of firms. These rules are called "routines". This concept recalls to the idea of "habits of thought" among members of a technological communi-

ty in a Veblenian sense. Routines mold firm's behavior and with it technical advance. This connection with Veblen in the conceptualization of firms strategies and decision-making processes has been recognized by Nelson (2002). Nelson's concept of social technologies (Nelson 2008) and his concept of institutions as organizations, laws, rules, etc. that support them has again strong veblenian influences and explicitly recognizes that habituation and social acceptance are essential elements of human agency. Interestingly, institutions also appear in the collaborative work of Nelson and Winter (1982) in the conceptualization of the selection environment. The selection environment challenging firms to develop technical advances to grow and survive represents the complex institutional structure determining technological change. Interestingly, Nelson largely acknowledges the role of human purpose and beliefs in determining what is feasible and appropriate for the selection of institutions and in the determination of the institutions that survive. However, he does not elaborate on the selection processes of institutions and the role of the value system in this concern.

In what concerns the role of purposeful evaluation in processes of technological change, both strands of research consider that agents are actively involved in evaluation processes that determine the path of technological development and (in the case of Paul D. Bush) the institutional structure and its dynamics. This aspect of the research relates to the extent to which the value system (or criteria for decision-making and problem-solving processes) is included in the analysis of technological and institutional change. In the case of Bush the value system and, to a lesser extent, the purposeful evaluations by agents are essential and well developed parts of his theory of institutional change. He distinguishes between ceremonial and instrumental values. To him, values correlating (technological) behavior determine the ultimate function of technologies in collective action; they offer a framework to qualify technological development according to its final aims and the extent to which technological development triggers human

progress. Instrumental values evaluate whether technologies are employed in an efficient way in problem solving in respect to what is technologically feasible. Ceremonial values, on the other hand, provide the terms according to which privileges should be granted to the members of the community. They determine the status and power structure within the community. Values are the core of the institutional structure and can change. Most importantly, values are the result of purposeful behavior and have been established by the economic agents. From this perspective, agents influence the institutional structure in the establishment of a value system and mold its changes. At the same time, the institutional structure molds human behavior.

Nelson also refers explicitly to values and selection criteria both within firms and in the selection environment challenging firms to grow and survive. In what concerns evaluation processes within firms, organizations adopt (or not) a technical improvement depending on its profitability. For Nelson and Winter the term "profitable" indicates the value of the technical advance in the eyes of the firm. Even though Nelson and Winter recognize that the term does not imply that the objectives of technical advance are monetary profit, in their models profit is model as pecuniary variable that determines the growth of firms and a power structure within the industry. With respect to evaluation in the selection environment, again Nelson and Winter, and specially Nelson in his younger contributions, recognize the need of considering different types of selection environments for firms and technologies beyond the market institution based on monetary profit as incentive for technical advance. However, their modeling exercises introduce market environments as unchanging selection mechanisms and do not develop formal alternatives. All in all, even though the theory put forward by Nelson acknowledges the need of going beyond market mechanisms and monetary profitability as incentive for technological development, his modeling exercises together with Sidney Winter do not consider changes in the selection environment or alternative ways of organiz-

ing markets as to account for changes in the selection environments.

To us, NSE theorizing about technological change and economic growth could very much benefit from the conceptualization of the value system as in Bush's theory of institutional change. The value system in Bush's theory can improve the concept of institutional structure (selection environment) in NSE. In his theory of institutional change Bush allows for different incentives or values that can trigger investments in research and development: instrumental and ceremonial values. This differentiation allows for the consideration of different evaluation standards and moreover, it brings into the analysis the influence that the power structure of the industry can have on the definition of the selection environment. The power structure is relevant since, in certain situations, the growth of knowledge does not guarantee that available (or feasible) technologies are developed to effectively address pressing social problems. With an institutional structure (selection environment) dominated by ceremonial values to preserve a given power structure, available knowledge for technological development may be applied for technical advance only to the point that the power structure of the industry remains unchanged. Investment in R&D and technical advance are then molded by institutions generating social costs. As an example, in a monopoly market structure, profit seeking as motivation for investment in research and development allows for technological advance along technological paths that preserve the monopoly power and have negative welfare consequences. In this situation, Bush's theory of institutional change considers changes in the value system (dislocation of ceremonial values granting monopoly power by instrumental values granting use of knowledge for solving problems effectively) as a chance for exploiting alternative existing technological possibilities. For NSE thinking this means the need for dynamic selection environments with varying selection criteria that guarantee the instrumental use of knowledge to reduce social costs. NSE and OIE could join forces to develop models of industry evolution and so-

cio-economic change considering the value system. These models could consider interactions between technological change, industry power structures and valuation mechanisms of the selection environment (institutional structure). In the presence of social costs, the consideration of changes in the selection environment (i.e. different market organizations or different cost accounting mechanisms) can guarantee a selection environment channeling investments in technologies reducing social costs rather investment in technologies preserving a given power structure of the industry.

REFERENCES

- Becker MC (2004) Organizational routines: a review of the literature. *Industrial and Corporate Change* 13(4):643–678
- Bush PD (1983) An Exploration of the Structural Characteristics of a Veblen-Ayres-Foster Defined Institutional Domain. *Journal of Economic Issues* 27(1):35–66.
- Bush PD (1987) The Theory of Institutional Change. *Journal of Economic Issues* 11(3):1075–1116
- Bush P, Tool M (2001) The Evolutionary Principles of American Neoinstitutional Economics. In: Dopfer K (ed) *Evolutionary Economics: Program and Scope*, Springer Netherlands, ISBN 978-94-010-0648-4, pp. 195–229
- Dopfer, K (2001) *Evolutionary Economics: Program and Scope*, Springer Netherlands. ISBN 978-94-010-0648-4
- Dosi G, Nelson RR (1994) An introduction to evolutionary theories in economics. *Journal of Evolutionary Economics* 4:153–172
- Foster JF (1981) The Effect of Technology on Institutions. *Journal of Economic Issues* 15(4): 907–913
- Frigato P, Santos-Arteaga FJ (2012) Planned obsolescence and the manufacture of doubt: on social costs and the evolutionary theory of the firm. In: Wolfram E, Frigato P, Paolo R (eds) *Social Costs Today*, Routledge, Abingdon, pp. 73–95
- Hayden FG (2006) Technology, Institutions, and Economic Growth by Richard R. Nelson. *Journal of Economic Issues*. 40(4):1177–1181
- Hodgson GM (2004) *The Evolution of Institutional Economics: Agency, Structure and Darwinism in American Institutionalism*. Routledge, London and New York.
- Hodgson GM (2007) The 2007 Veblen-Commons Award Recipient: Richard R. Nelson. *Journal of Economic Issues* 41(2):311
- Metcalfe S (2014) Capitalism and Evolution. *Journal of Evolutionary Economics* 24:11–34
- Nelson RR (1988) National systems of innovation and institutions supporting technical change in the United States. In: Dosi G, Freeman C, Nelson R, Silverberg G, Soete L (eds) *Technical Change and Economic Theory*, Printer, London, pp. 309–329
- Nelson RR, Sampat BN (2001) Making sense of institutions as a factor shaping economic performance. *Journal of Economic Behavior & Organization* 44(1):31–54
- Nelson RR (2002) Technology, institutions and innovation-systems. *Research Policy* 31:265–272
- Nelson RR (2003) On the Complexities and Limits of Market Organization. *Review of International Political Economy* 10(4):697–710
- Nelson RR (2005) *Technology, Institutions, and Economic Growth*. Harvard University Press, London. ISBN: 9780674019164.
- Nelson RR (2008) What enables rapid economic progress: What are the needed institutions? *Research Policy* 37:1–11
- Nelson R, Winter SG (1977) In search of a useful theory of innovation. *Research Policy* 6(1):33–76
- Nelson RR, Winter SG (1982) *An evolutionary theory of economic change*. The Belknap Press of Harvard University Press, Cambridge. ISBN: 0-674-27228-5
- Veblen T (1904) [2005] *The Theory of the Business Enterprise*. Cossimo Classics, New York.
- Veblen T (1914) [1990] *The Instinct of Workmanship and the State of the Industrial Arts*. Transaction publishers, New Brunswick.

Veblen T (1923) [1996] *Absentee Ownership: business enterprise in recent times: the Case of America*. Transaction publishers, New Brunswick.

Waller WT (1982) The Evolution of the Veblenian Dichotomy: Veblen, Hamilton, Ayres, and Foster. *Journal of Economic Issues*: 757–771

AUTHOR

Prof. Dr. rer. pol. habil. Iciar Dominguez Lacasa
Technische Hochschule Wildau

E-Mail for correspondence:
dominguez_lacasa@th-wildau.de



Decision-Making Process of Prospective International Students: a Proposed Generic Complementary Model

Sandra Haas* and Florence Terry

Zusammenfassung

Der globale Bildungsmarkt entwickelt sich rasant und die Anzahl an Studierenden ist in den letzten Jahren signifikant gestiegen. Trotz dieser positiven Entwicklung sehen sich deutsche Hochschulen einem intensiven internationalen Wettbewerb ausgesetzt. Potentielle Studierende können aus einer breiten Anzahl von Studienangeboten wählen und bewerben sich an mehreren Hochschulen parallel. Der vorliegende Beitrag soll das Hochschulmarketing in der Anwerbung internationaler Studierender unterstützen, indem ein Studienentscheidungsmodell inklusive beeinflussender Faktoren vorgestellt wird. Unter Anwendung qualitativer Inhaltsanalysen wurden sowohl theoretische Konzepte im Themenfeld als auch neuere empirische Studien zur Konzeptentwicklung herangezogen.

Abstract

The global education market is rapidly expanding and the number of students has increased significantly over the last years. Despite this positive development, German universities are affected by a high international competition. Prospective students can choose of a broad variety of educational products and will apply at several universities at the same time. To support marketing departments of higher education institutions, the paper provides a generic conceptual model on the decision-making process of potential international students including influencing parameters. Applying a scoping study and content analyses, the concept bases upon theoretical concepts in this field but also the latest empirical findings.

1. Introduction

According to a study by Ken Research and Euromonitor International, the global education industry is not only among the largest sectors worldwide but also one of the fastest developing (Euromonitor International 2017, Ken Research 2011). Hereby, the global higher education market plays a significant role: The number of students has more than doubled between 2000 and 2014 (207 million) (UNESCO 2017). In 2009, China, India, the US and Russia have a combined share of 45 per cent of total global tertiary enrolments (British Council 2012). “A key feature of the global tertiary education sector has been the growth in internationally mobile students. Their number has risen from 800,000 in the mid-1970s to over 3.5 million in 2009” (British Council 2012: 4). In 2016, there were about 3.5 million foreign students within OECD areas (OECD 2018). Despite an incre-

ased share of foreign students among freshmen at German higher education institutions (hereinafter: HEIs) (2004: 19,5%; 2016: 24,8%, (Statista 2018)) and almost no study fees, Germany still ranks below countries like the US, the UK, Australia and France (British Council 2012) with respect to the number of foreign students enrolled. According to a report by UNESCO, private universities in particular benefit from the global market growth (UNESCO 2017) although it did not change the disparity of access to college (across 76 countries, 20% of the richest 25–29 year olds had completed at least four years of higher education, compared with less than 1% of the poorest (Bagri 2017). As the demand for higher education is going to rise in the future, German governments and (public) HEIs have to respond adequately, to secure German HEI will not be left behind.

It is important to understand that HEIs in today’s globalized world are considered businesses, whether they are profit or non-profit, private or public organizations (Hemsley-Brown & Oplarka 2006). Therefore, HEIs employ the same methods and tools that have been endorsed in the business world and use marketing to identify and satisfy the needs and wants of their customers – potential international students (hereinafter: PIS). “Globalization and market pressure in the education sector have propelled higher education institutions to constantly review on the need of economic accountability and performance improvement, many universities aim to increase the number of students admitted as a means of increasing their income while the admitted students are considered as customers” (Watrakul 2014: 676). Farjam and Hongyi consider students to be “consumers in higher education,” who “exist in positional market, where institutions

* corresponding author

compete for the best students while the applicants compete for the most preferred institutions” (Farjam & Hongyi 2015: 72). Understanding students as customers and attracting PIS with marketing programs sounds simple. In fact, it is quite a challenge:

- “Across the European Union, higher education institutions are operating in an increasingly competitive environment. Nowhere is this more apparent than in the area of international student recruitment, where increased student mobility combined with an increase in the number of institutions offering Eng-

lish-language degrees has created more choice than ever before for international students.” (QS Enrolment Solutions 2017) Setting up appropriate marketing programs is not only seen as a competence by HEI anymore, it is performed & supported by regional and national governments as well (Cubillo et al. 2006, GATE-Germany 2018b). The UK Government is said to have sponsored several initiatives to become the world’s leading nation in international education (Binsardi & Ekwulugo 2003).

- The “decision to study overseas is one of the most significant and expensive initiatives that students may ever undertake” (Cubillo et al. 2006: 102 referring to Mazzarol 1998) and international education is not a frequently purchased service by this target group (Nicholls et al. 1995, Cubillo et al. 2006). Hereby students will consider various aspects in addition to the program offered by a foreign HEI (like safety, security, cultural activities, country image etc.) (QS Enrolment Solutions 2017, 2018).

Tab. 1) Arksey and O’Malley framework stages for the conduct of scoping reviews combined with a description of the performed stages (Colquhoun et al. 2014).

Arksey & O’Malley framework stage	Description of scoping review stage
#1 Identifying the research question	<p>Research question: Which conceptual frameworks on the decision making process on study choices or studying abroad exist within literature?</p> <p>(1) How can the identified decision processes be characterized with regard to sequences and integrated influencing parameters?</p> <p>(2) Looking at similarities and differences, which generic concept can be derived? Are further specification of the generic concept necessary?</p>
#2 Identifying relevant studies	<p>Google Scholar is used as a main database to retrieve useful sources. First, a general search was conducted looking for literature about the student decision-making process as a whole (key words: ‘student decision process’, ‘student higher education choice process’, ‘university decision’, ‘international student choice’). Studies written in English are looked at and no restriction of time is made. Synonyms like ‘decision’ and ‘choice’; ‘higher education’ and ‘university’; ‘international’, ‘abroad’ and foreign; are used to iterate the research. Based on this first round of searching, the student decision-making process is identified as a complex multi-stage choice operation with various influencing factors. Subsequently the research is concentrated on integrated – incorporating multiple, versatile types of influencing factors rather than focusing on one specific. Thereafter, a composition is made of secondary studies that provide an overview of the available literature in the field as well as primary studies that offer a self-developed model, based on empirical research. Also backwards snowballing is used as a technique, looking at the sources of the most relevant studies. In the end, a list of twenty studies was constructed.</p>
#3 Study selection	<p>In order to select relevant studies systematically, inclusion and exclusion criteria were set up. The first exclusion happened in the searching phase, based on the title and the abstract not containing the keywords searched for. In a second stage, only studies that meet one or more of the following criteria are selected:</p> <ol style="list-style-type: none"> the decision-making process is not concentrated on just one particular stage, different parameters, factors or influences are dealt with) the model presented has a cyclic nature or consists of several consecutive steps; a schematic model or graphic representation is offered; international students are perceived as a group (excluded are studies focused on specific nationality or country of origin); Factors for higher education institution independent of home country are examined, unless if Europe (or Germany) is focused upon as destination.

■ According to the latest study by QS Enrolment Solutions, a vast majority of potential international students will consider five universities or fewer. Around one quarter of PIS will apply to six or more (QS Enrolment Solutions 2018).

To support German HEIs in meeting these challenges, the DAAD (= German Academic Exchange Service) has set up different research and supporting programs (GATE-Germany 2018a).

However, these programs do not fully support HEI marketing departments in understanding the decision-making process of PIS. Knowledge of the decision-making process and its influencing factors are a central prerequisite for at-

tracting PIS to study programs at German HEIs. The purpose of this paper is to propose a generic conceptual model on the decision-making process of PIS including influencing parameters. Our work will be based upon theoretical concepts in this field but also the latest empirical findings.

2. Theoretical perspectives on decision-making processes of prospective international students

2.1 Methods

To summarize and structure the existing theoretical knowledge on decision-making processes of PIS, a scoping study was performed. “A scoping

review or scoping study is a form of knowledge synthesis that addresses an exploratory research question aimed at mapping key concepts, types of evidence, and gaps in research related to a defined area or field by systematically searching, selecting, and synthesizing existing knowledge.” (Colquhoun et al. 2014: 1292-1293). This research method was applied by using the methodological steps outlined in the Arksey and O'Malley (2005) framework:

Following the first stages of the scoping study, seven models were selected for further analysis (see Tab. 2). It needs to be stated here that a large majority of the identified sources are older than 20 years. Only the concept by Oliveira &

Tab. 2) Selected theoretical concepts on the student decision-making process.

Age of concept	Author	Year	Title of the conceptual framework	Research Approach	Population	Integration of parameters
≤ 10 years	Oliveira & Soares	2016	Conceptual Model for the decision process of international students	Literature Review & Qualitative Study (interview with currently enrolled students in engineering programs at a public university in North of Portugal)	PIS	X
11–20 years	Vrontis et al	2007	Concept a: Preliminary integrated generic higher education student-choice model	Generic Concept build upon Jackson (1982); Chapman (1986) & Hanson and Litten's (1989)	US/CA	X
	Vrontis et al	2007	Concept b: A contemporary higher education student-choice model for developed countries	Conceptual Model	Students from developed countries	X
	Cubillo et al	2006	A model of international students' preferences	Conceptual Model	PIS	X
	Perna	2006	Conceptual model of student college choice	Conceptual Model	US	X
21–30 years	Hanson & Litten	1989	Mapping the road to academe	Conceptual Model	n.d.	X
> 30 years	Hossler & Gallagher	1987	Three-Phase model of college choice	Generic Concept build upon Alexander (1978); Anderson, Bowman, and Tinto (1972); Jackson (1982); Litten (1982); Chapman (1981)	US/CA	X
	Chapman	1981; 1986	A behavior model of the college selection process	Behavioral Model	CA	X
	Jackson	1982	Combined student choice model	Conceptual Model	US	X

Soares (2016) was published within the last five years.

2.2 Findings

The identified theoretical concepts were examined in a descriptive analytical manner with respect to: (1) the general research approach; (2) sequences and (3) presented influencing factors of the decision making process of PIS (= stage 4 “Charting the data” of the scoping study according to Arksey & O’Malley (2005), see Colquhouna et al. 2014). In the following chapters, results of the performed scoping study will be presented.

2.2.1 General research approach

With regard to the general research approach it needs to be stated that a large majority represent conceptual models, either own creations or generic concepts resting upon existing concepts in that field (see Tab. 2). Moreover, only the concepts by Cubillo et al. (2006) and Oliveira & Soares (2016) address

decision-making practices of PIS in particular. All of the reviewed concepts included parameters of decision-making.

2.2.2 Stages of the decision-making processes

Except for the concept of Perna (2006) and Cubillo et al. (2006), all reviewed processes span three or five stages. Five-stage concepts suggest strong dependences on the traditional decision-making process of consumers in general (Kotler et al. 2008). Perna “uses the term ‘college choice’ to refer to all phases” (Perna 2006, p. 101) of the decision-making process. Her concept centers around an evaluation of expected monetary and non-monetary benefits and expected costs, whereby evaluations are “influenced by an individual’s academic preparation for college and availability of resources to pay the costs of attendance” (Perna 2006: 116). To evaluate similarities and differences in the order of stages, all stages were colored based on content similarities (see Tab. 3).

Most of the concepts begin with the recognition of a need to study which can turn into aspirations to study abroad. According to Oliveira & Soares (2016), students’ main motivation for leaving their country of origin is the goal of seeking an international experience for personal, academic and professional development. Following the stage “Need recognition & aspirations to study abroad”, PIS most likely start to search for information (about studying abroad in general, HEI, study programs etc.) to satisfy their needs (=Search Stage). Jackson (1982) did not include a search stage. Within the concept by Hanson & Litten (1989) as well as in the generic concept by Vrontis et al. (2007) a distinction between “locating information” and “gathering information” is made. In the latter case, this may be caused by building upon student decision-making processes from the 1980s. In the same sense Chapman (1986) and Hanson & Litten (1989) assumed that prospective students form a set of potential HEIs before their search. As information-seeking processes have

Tab. 3) Comparison of stages of identified student decision-making processes.

Jackson (1982)	Chapman (1981 & 1986)	Hanson & Litten (1989)	Hossler and Gallagher (1987)	Perna (2006)	Cubillo et al (2006)	Vrontis Generic Model (2007)	Vrontis Contemporary Model (2007)	Oliveira & Soares (2016)
I Preference stage (educational aspiration)	I Pre-search stage (List of considered colleges)	I Having college aspirations	I Pre-disposition (Determination of study aspiration)	Evaluation of expected monetary and non-monetary benefits and expected costs	Purchase Intention of PIS regarding the destination country as provider of the education service	I College aspirations	I Need Recognition	I Need recognition
II Excluding institutions from the prospective list	II Search Stage	II Investigation of HE and creation of set of candidates (sub-phase: Searching & gathering information)	II Search			II Search process	II Info Search	II Information search
	III Application Decision	III Process of applying	III Choice (which college to attend)			III Information gathering	III Alternative Evaluation	III Evaluation of alternatives
III Evaluation stage	IV Choice Decision	IV Sending Application	IV Purchase & Consumption			IV Purchase & Consumption		
	V Matriculation Decision	V Enrolling	V Post-consumption Evaluation			V Post-consumption evaluation		

been technologically improved, enabling potential students to gather information globally and simultaneously, the separation as well as the formation of a fixed set of alternatives before searching will not be considered appropriate anymore.

Decision making takes place in the third stage, whereby some researchers separate this stage into a pre-purchase stage *“Evaluation of Alternatives”* and a purchase stage *“Application Decision”*. In the later stage PIS have to decide, whether, when, what for and where to apply (Vrontis et al. 2007). At this stage, a high involvement from students can be assumed (Nicholls et al. 1995, Cubillo et al. 2006). This supports the separation of a pre-purchase and purchase stage according to the Contemporary Model by Vrontis et al. (2007) and Oliveira & Soares (2016).

Furthermore, the purchase stage may be divided into three sub-stages: Applying (Chapman 1986, Hanson & Litten 1989, Vrontis et al. 2007); Matriculation Decision (Chapman 1986) and Enrolling (Hanson and Litten 1989; Vrontis et al. 2007). As a large majority of PIS apply on average to 5 HEI (QS Enrolment Solutions 2018), an equation of applying and enrolling may be considered as unrealistic. Therefore, a separation of the purchase stage into *“Applying at an HEI abroad”* and *“Confirmation”* is considered suitable. The later includes matriculation decisions as well as enrolling at an HEI overseas. Chapman (1986) integrated *“Matriculation Decision”* to take the likeliness of changed circumstances into account due to timing differences between application (spring) and matriculation (fall). Additionally, a majority of college-choice research supports the idea, that *“inaccurate or incomplete information may affect a student’s decision,*

the decision would still be rational provided that it was based on a reasoned reaction to the information available to them at the time that they made the decision” (DesJardins & Toutkoushian: 2005: 218). The final stage indicates a *“Post-Choice Evaluation”* of the experienced education abroad (Oliveira & Soares 2016, Vrontis et al. 2007). This stage will not be examined in further research, as the focus lies upon initial decisions.

Within the course of the investigation a close alignment of more recent concepts with the classical consumer decision-making process can be stated. We strongly support the comparability of consumer decision-making processes for complex services with the decision making of PIS on foreign educational products. Yet, we would recommend further specifying the generic concept in two aspects:

- (1) Firstly, none of the existing concepts integrated feedforward **and** feedback interrelations between all stages of the decision making process. However, both exist within the classical buying process (Tyagi & Kumar 2004) as well as in real life: Through this process, the aspiration to study abroad may be narrowed down to a set of potential countries based on the gained information about visa requirements. And following a rather rational approach of decision making, the ideal process assumes that the gathered information will influence the evaluation & choice of prospective HEI by the PIS.
- (2) Secondly, the decision-making process must include the consideration set of potential HEIs within students’ choice. Due to the internationalization of the education market (e.g. by the Bologna Reform), the mass

adoption of the internet, as well as the penetration of mobile technologies, there is a huge offer of study programs and simply too much information out there. Following Shocker et al (1991), we assume that students’ *“decision making is based upon hierarchal or nested sets of alternatives which [...] are processed by the decision maker prior to choice”* (Shocker et al. 1991: 182). All potential solutions (study programs, HEIs, countries etc.) which in general satisfy the need to study abroad shape the universal set of a PIS. Although information searching has been improved, it can be assumed that PIS may not know about all existing solutions. Instead, their decision making will be limited to the solutions which they come across or know about (=awareness or knowledge set) (Donkers 2002). From this set the consideration set evolves, which holds all acceptable alternatives or solutions for later consideration in decision making (Chapman 1986). The consideration set is purposefully constructed, influenced by context factors and outcomes of decision-making stages. The application set consists of the most relevant solutions (=choices) which the PIS will select from the consideration set and where students are going to apply. (Chapman 1986, Jackson 1982, Hossler & Gallagher 1987, Shocker et al. 1991)

Upon that stage of research, the decision-making process of PIS will be shaped as presented in Fig. 1. This cycle of stages will be used in further research on the influencing factors of students’ decision-making.

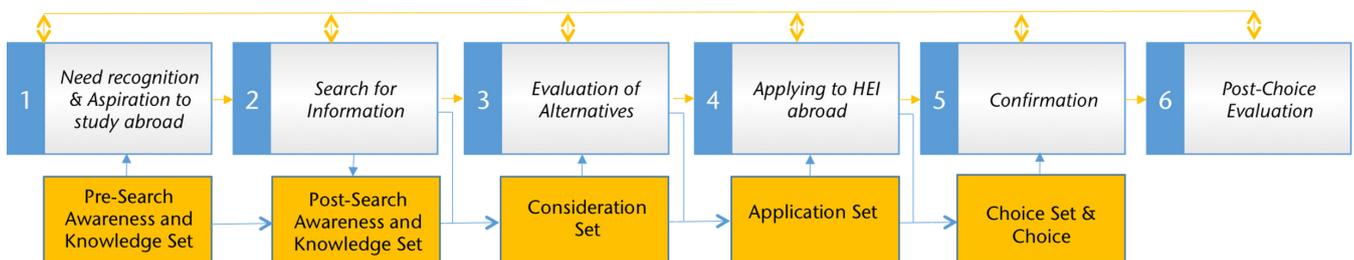


Fig. 1) Generic theoretical concept on the stages of the decision-making process of PIS.

2.2.3 Influencing parameters of the decision-making process of prospective international students

Looking at the type of influencing factors, it needs to be stated that combined or complementary models dominate the research. All concepts include indicators from economic as well as sociological models. Economic concepts build on the economic model of human capital investment, whereas student investments in education are a result of a comparison of expected lifetime monetary and non-monetary benefits and expected cost (Perna 2006). Although students will certainly face incomplete or incorrect information, this approach follows a rational behavior pattern in decision making (DesJardins & Toutkoushian 2005). Sociological models try to explain the influence of socioeconomic backgrounds on students' choices (Perna 2006). As both concepts have their limitations, a combination is viewed beneficially in the literature (Perna 2006).

With respect to stages 1-5 of the developed generic theoretical concept on the decision-making process of PIS (see Fig. 1), all stated parameters were gathered and classified by applying content analyses. Notwithstanding the high relevance of the concept by Oliveira & Soares (2016), it must specifically be addressed here that their plotted concept stated fewer parameters than they discussed previously. Within our studies we integrated only the parameters plotted (see Oliveira & Soares 2016: 138, Tab. 4).

Stage 1 – Need recognition & Aspiration to study abroad:

With respect to the first stage, four main factors are considered in the literature: (a) *Individual Factors*, (b) *Environment*, (c) *HEI* as well as (d) *High School* (Hanson & Litten 1989, Jackson 1982, Oliveira & Soares 2016, Vrontis et al. 2007). Except for the contemporary model by Vrontis et al. (2007), all parameters are specifically related to influencing aspirations to study (abroad).

As some concepts represent generic works, a broad agreement is no surprise. Yet, a more applicable classification was derived from content analysis. Student characteristics, personal as well as motivational attributes, represent individual factors. From our point of view, environmental factors shall be further separated into home-country specific and destination-country specific factors, as varying conditions across countries may pull (better occupational or economic conditions in foreign country), or push (lack of opportunities to study in domestic area, censorship etc.) human capital abroad (Oliveira & Soares 2016). Unfortunately, the influence of HEI was not pointed out in the concept by Oliveira and Soares (2016). The presented parameters are considered relevant for study decisions in general (Hanson & Litten 1989, Hossler & Gallagher 1987, Vrontis et al. 2007). By looking at empirical studies in chapter 3, the influence of the main characteristics of foreign HEI will be further investigated. The impact of the attended high school is

Tab. 4) Influencing factors on stage „Need recognition & Aspiration to study abroad“ (based on Jackson 1982, Hanson & Litten 1989, Hossler & Gallagher 1987, Vrontis et al. 2007, Oliveira & Soares 2016).

(a) Individual Factors	(b) Environment	(c) HEI	(d) High school
<p>A1: Student Characteristics: race, income/resources, socioeconomic status, parent's education/job, family culture/background, religion, sex, proximity to a university at home country</p> <p>A2: Personal Attributes: class rank, academic ability/aptitude, students/academic performance/achievements, self-image; personal value, benefits sought, personality, lifestyle/social context, educational aspirations</p> <p>A3: Motivational Attributes: outcome of international experience</p>	<p>B1: Home Country <i>B1a: General</i> occupational structure; economic conditions, cultural conditions <i>B1b: Public Policy Aid</i> <i>B1c: Influences/Media</i> parents, career, neighborhood, counsellors, peers, communications, college officers</p> <p>B2: Destination Country <i>B2a: General</i> occupational structure; economic conditions, cultural conditions geographical location destination country; cost of living <i>B2b: Public Policy Aid</i> <i>B2c: Influences/Media:</i> social references and personal recommendations (parents, peers), available info destination country</p>	<p>C1: Characteristics: cost/ financial aid; size & location; control (public/private); program availability</p> <p>C2: Actions: recruitment activities; admissions policies; aid granted; communications</p>	<p>D1: High School Characteristics: social composition; quality; curriculum; programs</p>

only addressed by concepts focusing on students in general, not on PIS. For the decision making process of PIS this factor is viewed as subordinate as it mainly influences the decision to study in general.

Stage 2 – Search for Information:

Five out of seven concepts listed relevant factors influencing students' search (Chapman 1981, 1986, Hanson & Litten 1989, Hossler & Gallagher 1987, Vrontis et al. 2007, Oliveira & Soares 2016). According to these concepts, five relevant factors have to be considered: (a) *Individual Factors*; (b) *HEI-Activities*; (c) *Search activities performed by students*; (d) *Sources* and (e) *Pre-Search Awareness & Knowledge Set* (see Fig. 2).

As described before, students start their search based on a "Pre-Search Awareness & Knowledge Set" (=preliminary college value (Hossler & Gallagher 1987)), that includes HEIs which students came across in preceding periods. According to Hossler and Gallagher (1987), HEI-activities, search activities performed by students as

well as existing sources influence each other. On the one hand, HEI carry out target group-specific marketing activities to search for students and, on the other hand, potential students search for relevant information about HEI. Following Vrontis et al. (2007) it can be assumed that individual determinants have an impact on the student's pre-search awareness & knowledge set and search activities, as well as sources used by the student.

Stage 3 – Evaluation of Alternatives:

The concepts by Jackson (1982), Perna (2006), Vrontis et al. (2007), Oliveira & Soares (2016) deal with the evaluation of alternatives. Yet, only Jackson (1982) and Oliveira & Soares (2016) speak of stage-specific evaluation criteria, like college costs, job-benefits/employability, HEI characteristics and influencers. Even though marketing departments of HEI may favor rational decision making and a fixed set of evaluation criteria for more efficient targeting, academics point out that "there is not one set course leading to college enrollment but that multiple routes are possible" (Perna 2006: 116).

Consequently, the concept by Perna combines economic and sociological models to the largest extent and puts an evaluation of *expected benefits* and *costs* in focus (Perna 2006: 115). Moreover "assessments of the benefits and costs are shaped not only by the *demand for higher education* and *supply of resources to pay the costs* but also by an *individual's habitus* and, directly and indirectly, by the *family, school, and community context, higher education context, and social, economic, and policy context.*" (Perna 2006: 119). On this account, our classification of influencing factors follows the conceptual model by Perna (2006) adding factors which were specifically mentioned in other concepts (see Fig. 3).

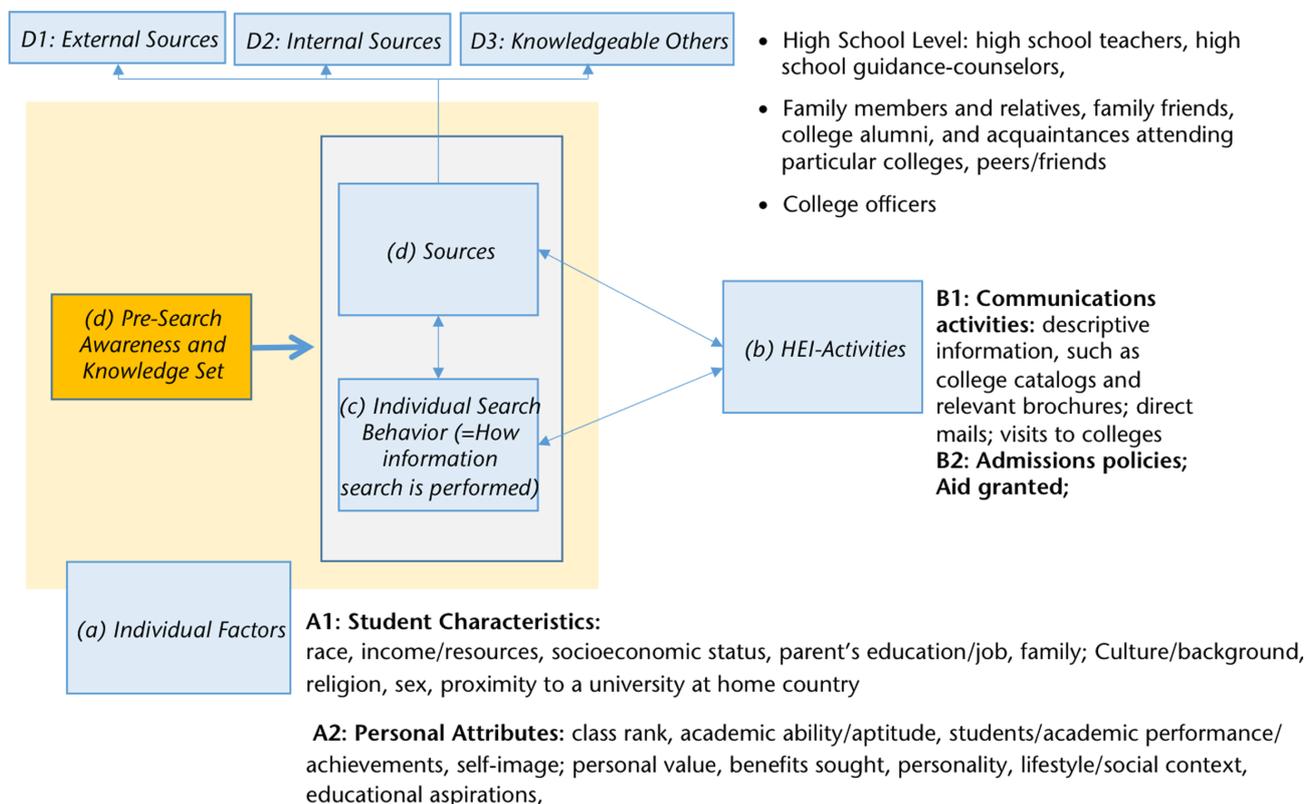


Fig. 2) Influencing factors on stage „ Search for Information“ (based on Chapman 1981, 1986, Hanson & Litten 1989, Hossler & Gallagher 1987, Vrontis et al. 2007, Oliveira & Soares 2016).

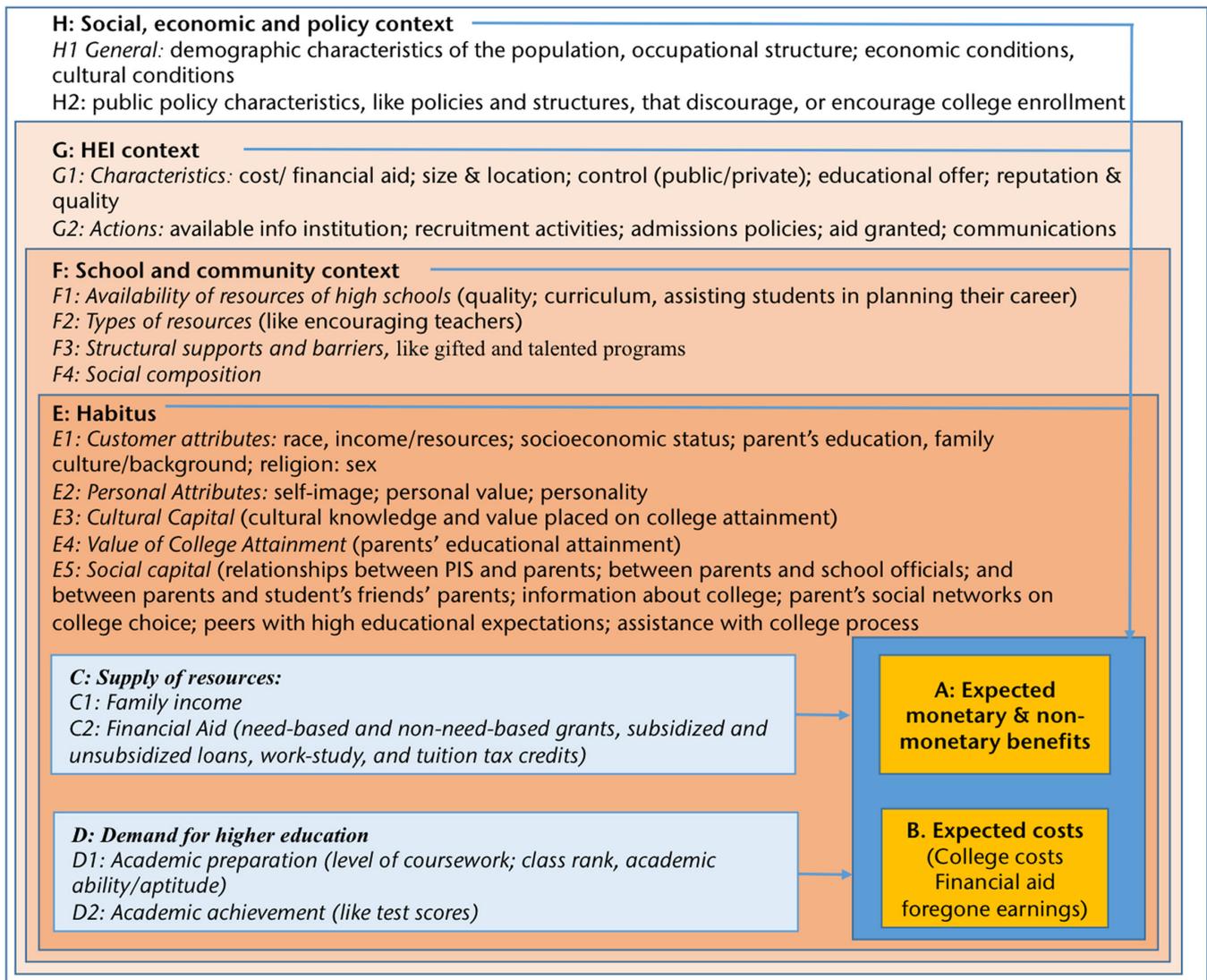


Fig. 3) Influencing factors on stage „ Evaluation of Alternatives” (based on Jackson 1982, Perna 2006, Vrontis et al. 2007, Oliveira & Soares 2016).

Stage 4 – Applying at HEI abroad:

Within the fourth stage, PIS will define their application set consisting of universities they are going to apply to (Chapman 1986). In that sense, Cubillo et al. (2006) use the term purchase intention, which “is defined as the intention of the student regarding the destination country as provider of the education service” (Cubillo et al. 2006: 104). According to our research the act of shaping the application set and sending applications will be influenced by: (a) *individual factors*; (b) *location-specific factors of the destination country & city*; (c) *HEI*; (d) *high school* and (e) *student's expectations about the probability of admission* (Chapman 1981, 1986, Hanson & Litten 1989, Cubillo et al. 2006, Vrontis et al. 2007, see Tab. 5).

Stage 5 – Confirmation:

The 5th stage of the decision-making process is of very high importance for both PIS and HEI: In that stage PIS make their final “buying” decision about the educational product. For HEI, the definitive number (and quality) of freshmen and the final amount of public funding (based on the number of students) will be defined. Despite this importance, only the concepts by Chapman (1981 & 1986), Hanson & Litten (1989), Hossler & Gallagher (1987) and the generic concept by Vrontis et al. (2007) have specifically addressed this stage within their research. As the generic concept by Vrontis et al. builds also upon models from the 1980-1990, research in that stage needs to be considered as rather outdated. Additionally, there is a broad consensus about the importance of *HEI actions* as an influencing factor

within that stage. Yet, Hossler & Gallagher (1987) highlight the limited impact of HEI at this point: “... most institutions are eliminated before they can really ‘court’ prospective students” (Hossler & Gallagher 1987: 218).

3. Empirical studies on decision-making processes of prospective international students

In the second stage of the review process, empirical data on the decision making of PIS was searched and examined to specify the stages or add further influencing factors in the derived theoretical generic model. A prioritization of the identified factors was also of interest within this research stage. The search for available empirical studies was carried out through database research via *google* using the key word ‘*international student survey*’. The high

Tab. 5) Influencing factors at the stage „Applying at HEI abroad” (based on Chapman 1981, 1986, Hanson & Litten 1989, Cubillo et al. 2006, Vrontis et al. 2007).

Consideration Set				
(a) Individual Factors	(b) Location	(c) HEI	(d) High school	(e) student's expectations about the probability of admission
<p>A1: Student Characteristics: race, income/resources, socioeconomic status, parent's education/job, family; Culture/background, religion, sex, proximity to a university at home country</p> <p>A2: Personal Attributes: class rank, academic ability/aptitude, students/academic performance/achievement/self-image; personal value, benefits sought, personality, lifestyle/social context, personal improvement ethnocentrism educational aspirations</p>	<p>B1: Destination Country <i>B1a: General</i> occupational structure; economic conditions, cultural conditions geographical location destination country; cost of living</p> <p><i>B1b: Public Policy Aid</i></p> <p><i>B1c: Country Image</i> cultural proximity social and academic reputation socioeconomic level</p> <p><i>B1d: Influences/Media</i> parents, career, neighborhood, counselors, peers, communications, college officers</p> <p>B2: City city dimension city image cost of living environment</p>	<p>C1: Characteristics cost/ financial aid; size & location; control (public/private); program availability; proximity, ambiance,</p> <p>C2: Actions: recruitment activities; admissions policies; admit/deny aid granted; communications written information campus visits communications admission/recruiting</p> <p>C3: Institution Image quality of professors institution's prestige international recognition communication facilities on campus</p> <p>C4: Programme evaluation programmes recognition programmes suitability programmes specialization costs and finance</p>	<p>D1: High School Characteristics: social composition; quality; curriculum; programs</p>	

number of search results was reduced by the use of selection criteria such as the year of publication (no older than five years) or the focus of the survey on the European higher education market. Studies focused on one specific country or region of origin of PIS were eliminated since differences between nationalities were not in focus of our research. Based on these criteria five studies were selected as shown in Tab. 6:

3.1 Empirical findings on the decision making process

The stages of the decision making process of PIS were addressed within the studies by Hobsons EMEA (2014) and QS Enrolment Solutions (2017 &

2018). With a focus on PIS enquiring to study in the UK or Australia, a specific order of choice was identified by Hobsons EMEA (2014): “Course, then country, then institution: that is the order of an international student’s decision-making process. Students select a course to study first, then they evaluate the country and only after doing that will they select the institution” (Hobsons EMEA 2014: 4). In a later study this fact was also proven for PIS interested in studying in Europe (QS Enrolment Solutions 2017: 7). The recent *International Student Survey* by QS Enrolment Solutions even strengthens the importance of “subject & course” above the university.

3.2 Empirical findings on influencing factors

Based on the theoretical generic concept of the decision-making process of PIS (see Fig. 2), all empirical studies were examined for influencing factors. The most important criteria considered by the students (top 5 or highlighted results by the authors) were taken into further consideration.

Stage 1 – Need recognition & Aspiration to study abroad:

Only two of five studies have taken up influencing factors of the first stage. While QS Intelligence Unit (2016) addressed factors motivating PIS, the

Tab. 6) Empirical studies on decision-making processes of PIS (Hobsons EMEA 2014, QS Enrolment Solutions 2017, 2018, QS Intelligence Unit 2016, 2018).

Author	Year	Title	Sample	Focus of survey
Hobsons EMEA	2014	Beyond the data: Influencing international student decision making	18,393 PIS who had enquired to a UK or Australian higher education institution	decision-making process of international students aspiring to studying abroad
QS Intelligence Unit	2016	What Matters to International Students? Global Overview	1,800 students in 11 countries globally	common motivations and priorities of PIS
QS Enrolment Solutions	2017	International Student Survey Europe	18,706 PIS from 187 countries worldwide, interested in studying in Europe	international student motivation and decision making; communication preferences and used digital channels
QS Intelligence Unit	2018	Applicant Survey 2018: What Drives an International Student Today?	16,560 PIS	motivations and decisions higher education applicants make, linked to the current political and economic context in the US and Europe as host countries for higher education
QS Enrolment Solutions	2018	International Student Survey European Union	22,838 PIS who identified that they are considering studying in the following European countries: Germany, the Netherlands, Sweden, France, Italy, Denmark, Austria, Hungary, Spain, the Czech Republic and Latvia	international student motivation and decision making; communication preferences and used digital channels

QS Enrolment Solutions (2018) focused on concerns of PIS to study abroad:

Stage 2 – Search for Information:

Hobsons (2014), QS Enrolment Solutions (2017 & 2018) inquired about factors of PIS while searching for and pre-evaluating potential foreign HEI. Alt-

hough these studies did not put great emphasis on that stage, four factors could be derived: (1) *social media*; (2) *website of HEI*, (3) *response time of HEI after an enquiry* and (4) *agents*. According to QS Enrolment Solutions (2018), 65% of the PIS use social media platforms before they make an enquiry. In 2017, even 85% of the PIS stated they used so-

cial media. With regard to the response time, PIS expect at least weekly contacts by the HEI after their enquiry (QS Enrolment Solutions 2017). The use of agents was only addressed by Hobsons EMEA (2014), whereby the study underlined that these third parties only play a role for about 10% of the respondents, mainly PIS of South East Asian nationality.

Factors Motivating PIS to study abroad	Biggest concerns of PIS about studying abroad:
<p>PIS from developing markets:</p> <ul style="list-style-type: none"> • study as an opportunity to access a better quality of education • Access more specialized and established programs in their chosen field, • contributing to the development of their own country, • get a more internationally famous university on their CV, • standing out in their own national employment market (employability) <p>PIS from developed markets:</p> <ul style="list-style-type: none"> • extended networking opportunities, • improved employment prospects 	<p>#1: Cost of living (80%)</p> <p>#2: Availability of scholarships (69%)</p> <p>#3: Finding accommodation (57%)</p> <p>#4: Safety (57%)</p> <p>#5: Getting a job (54%)</p>

Fig. 4) Influencing factors of students decision to study aboard (QS Enrolment Solutions 2018, QS Intelligence Unit 2016).

Stage 3 & 4 – Evaluation of alternatives & Applying at HEI abroad:

According to the analyzed empirical studies, PIS follow a specific order in making their study choice: course – country – town – university (see section 3.1). Therefore, it's essential to look at the specific influencing factors of these sub-decision-making stages as we may assume they are also relevant criteria for evaluation.

Factors influencing the choice of field of study were addressed by QS Enrolment Solutions (2017, 2018). Both of these studies emphasized factors such as *teaching quality, tuition fees* as well as a *high graduate employment rate*. Among the relevant factors are also criteria such as the *ranking of the course, good reputation* as well as *studying with like-minded people*. By comparing both studies, it seems that in the latest report PIS put their personal development more in focus: 72% of PIS state that they chose their course based on their *career planning*. With respect to the high importance of this sub-decision stage further investigations are recommended.

With the exception of QS Intelligence Unit (2016), all studies contained factors influencing country selection. There are different factors of importance between 2014 and 2018. Due to this fact, it is not possible to derive an overall ranking. Instead a set of stated most relevant factors of PIS shall be provided:

(1) Quality of education compared to home country/ teaching quality International recognition of qualification of guest country/ well-ranked universities	(2) Country's attitude to international students/ safety of destination country	(3) Costs (affordable cost of living, scholarship/ financial aid availability)
(4) Ease of getting a visa	(5) Good graduate employment options	(6) Person-related reasons (cultural interest and lifestyle, institutions I'm interested in are located there)

Fig. 5) Set of most relevant factors influencing country choice of PIS (Hobsons EMEA 2014, QS Enrolment Solutions 2017, 2018, QS Intelligence Unit 2018).

“The considerations made when choosing a town or city to study in were similar. The top two most important factors were again considerations of teaching quality and the welcoming nature of the location” (QS Enrolment Solutions 2017: 9).

All studies included criteria to evaluate and choose foreign HEI. Factors which were identified majorly and are rather highly ranked by PIS include: (1) *funding availabilities (scholarships) & tuition fees*; (2) *academic reputation & ranking (in a student's chosen subject & global preferred) & prestigious brand*; (3) *teaching quality*; (4) *course match to own expectations* and (5) *extent to which international students are welcomed*. Additionally, *entry requirements* were mentioned by PIS interested in studying in the UK or Australia (Hobsons EMEA 2014) and 45% of PIS considering studying in European countries value *good career service and links to employer* (QS Enrolment Solutions 2018). QS Intelligence Unit (2016) researched that PIS sometimes meet difficulties assessing information they need to reach a thoughtful decision. Due to the fact that PIS will most likely search from abroad, the *Digital Communication by HEI* will influence their choice as well (QS Intelligence Unit 2016).

Recommendations, advice and feedback from others are an important source for PIS while making their decision (QS Enrolment Solutions 2017). In the latest report by QS Enrolment Solutions 60% of PIS stated that they had been affected by influencers at some stage. “45% of them claiming that the *experience of friends and family* has influenced their choice of country

to study in.” (QS Enrolment Solutions 2018: 17). QS Enrolment Solutions (2017) found, that *parents, career advisors and career counsellors* as well as *friends* are key influencers of PIS.

“The vast majority (73%) will only consider five universities or fewer, this means that a significant proportion (27%) are considering applying to six or more universities underlining the increased competition European universities face from their global competitors” (QS Enrolment Solutions 2018: 13). With regard to “**Stage 4 – Applying at HEI abroad**”, students use and are influenced by *Social Media* (QS Enrolment Solutions 2017, 2018). Furthermore, 68.6% state in the early report to expect at least a weekly *communication by HEI*. This is also expected by 78.7% of the PIS during “**Stage 5 – Confirmation**” (QS Enrolment Solutions 2017).

When comparing the results from the scoping analysis on theoretical concepts with the empirical results on the decision-making process of potential (international) students, the following conclusions can be drawn:

Both kind of sources must be viewed as useful complements of each single source as both offer advantages but hold limitations in respect to their use in educational marketing as well. Empirical studies provide clear recommendations to marketing departments of HEIs but they do not map the full complexity of the context in which students make their choices. Thus, their marketing measures are based on a simpler image of conditions and may not be perfectly targeted at the needs, wishes, problems etc. of PIS. The advantage of complementary theoretical models, on the other hand, is the mapping of the “full” context of decision making processes. Yet, they do not offer hands-on recommendations for marketers and are simply too complex for daily use in marketing.

With regard to the first stage “Need recognition & Aspiration to study abroad” empirical studies provide additional value, as they describe motivations, but also concerns of

PIS in going abroad in more detail. This also counts for the “Search for Information” stage. Empirical studies are more recent in respect to (digital) communication behavior and expectations of PIS on the communication to/ from HEIs.

Empirical studies did not differentiate between “Evaluation of Alternatives” and “Applying at HEI abroad.” Yet they provide clear criteria for choice making, which can be considered relevant evaluation criteria as well. Additionally, these studies provided new knowledge on the size of the application set, the order of choice and the influence of new information and communication technologies. Based on the empirical findings, theoretically derived influencing factors on the decision making process may be prioritized.

4. Summary model & managerial implications for HEI

At this point a presentation of our generic concept, which is based on an aggregation of the gained knowledge on theoretical complementary models and empirical findings, is expected. However, our generic concept would be characterized by the same limitations as the existing theoretical concepts: too complex and less practice-oriented for use in HEI-Marketing. For this reason, we have tried to transfer our knowledge on the decision making process and its influencing factors to a practical marketing tool. The *Buying Proforma* by Dibb and Simkin was used as a basic framework as it is “built on the accepted best practice principles from the buying behavior literature and, over the years, has proved very successful in portraying the nature of the customer challenge” (Dibb & Simkin 2008: 42). The *Buying Proforma* integrates (1) a Customer Profile; (2) Buying Center Composition (= people involved in the purchase and their respective roles); (3) Key Customer Values (= factors considered most important by customers); (4) Buying Process Mechanics (= steps involved in the buying process) and (5) the Core Influences (= any factors which have an influence on the buying decision) (Dibb & Simkin 2008).

The developed *Buying Proforma* holds all the relevant information on a general PIS (s. fig. 6), making choices to study abroad. More relevant influencing factors which were highlighted in the empirical studies are in bold print. We advise marketing departments to use the provided proforma as a starting point and ask to develop target market specific proforma (PIS of a specific region or country in focus) and integrate their findings. Additionally, we hope our idea stimulates creative thinking about communication and service offers to PIS. Not to mention the opportunity to create more efficient marketing activities by considering pull (= marketing measures to create demand for studying abroad) as well as push (= focus on countries in which conditions support study abroad aspirations of PIS) dynamics in attracting PIS.

Nevertheless, our efforts have to be critically viewed as well. Firstly, there are limitations on the nature of the performed scoping study. Research was focused on English sources only and it will be necessary to investigate the importance of each influencing factor of a student’s decision-making. With respect to those limitations, we recommend quantitative studies across students from different countries to verify our concept, develop target group-specific buying proforma and to weigh the importance of factors. Secondly, we tried to reduce the complexity of decision-making processes by developing a *Buying Proforma*. To which extent the proposed proforma proves a better practicability also needs to be investigated.

Customer Profile

PROFILE

Student Characteristics: race, income/resources, socioeconomic status, parent's education/job, family; Culture/background, religion, sex, proximity to a university at home country

Personal Attributes: self-image; personal value; personality, benefits sought lifestyle/social context, personal improvement, ethnocentrism, educational aspirations, cross-cultural interests

Demand for higher education: Academic preparation (level of coursework; class rank, academic ability/aptitude)

Academic achievement (test scores)

Cultural & Social capital
Value of College Attainment

INFLUENCERS

Private Level: Family members and relatives, family friends, college alumni, and acquaintances attending particular colleges, peers/friends, neighborhood

High School Level: teachers, guidance-counselors or college officers

Education Agents

KEY CUSTOMER VALUES

Outcome of international experience

PIS from developing markets:

- access a better quality of education, more specialized and established programs in chosen field
- contributing to the development of home country
- get a more internationally famous university on CV,
- standing out in own national employment market (employability)

PIS from developed markets:

- extended networking opportunities,
- improved employment prospects

Influencing Factors

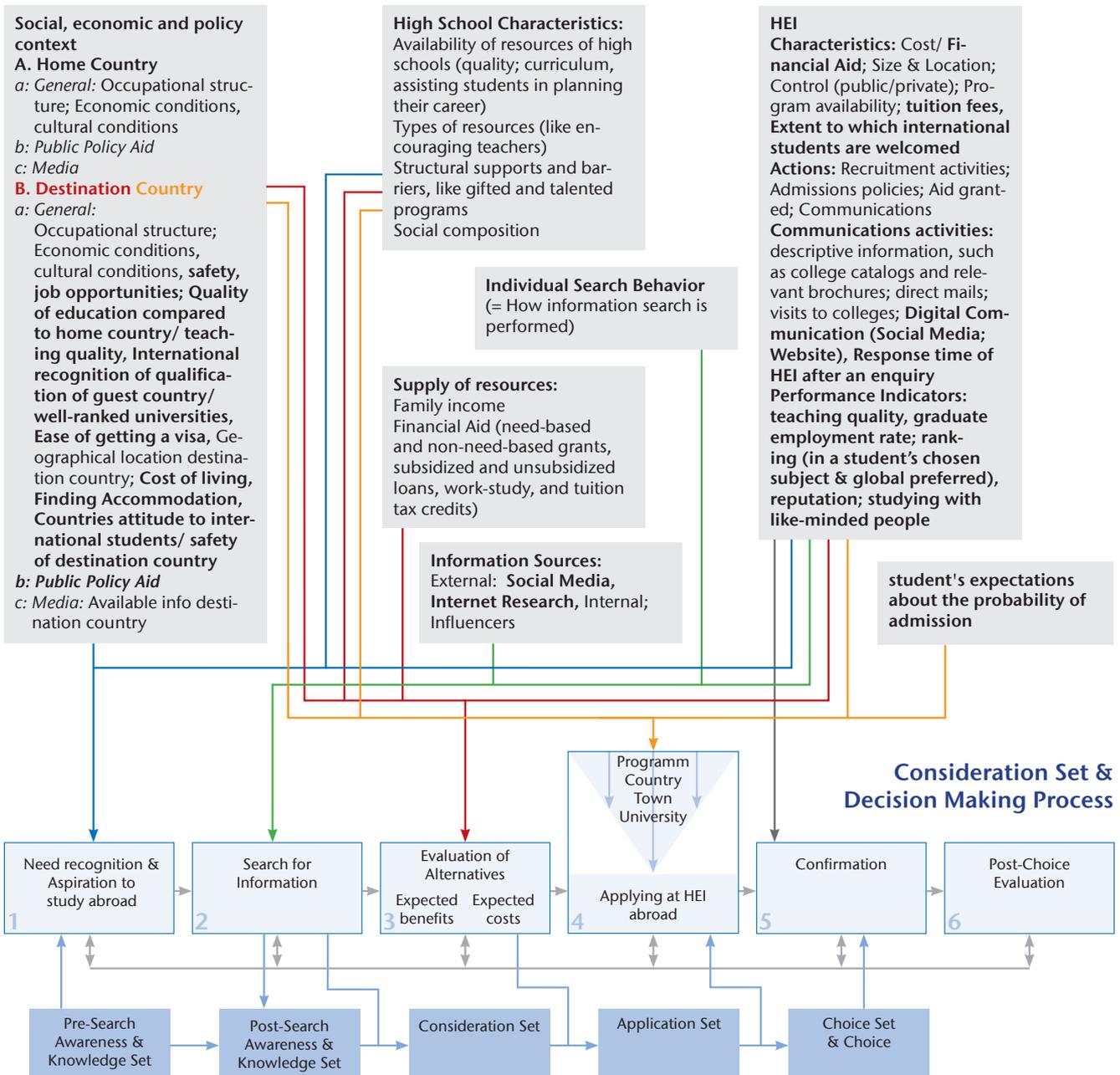


Fig. 6) Buying Proforma of PIS. **Bold:** Prioritization of identified factors based on empirical data on the decision making of PIS, see chapter three.

REFERENCES

Arksey H, O'Malley L (2005) Scoping studies: towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology* 8:19–32. doi: 10.1080/1364557032000119616

Bagri NT (2017) The number of students globally has doubled since 2000—and it's private colleges that are meeting the demand. <https://qz.com/965664/the-number-of-students-globally-has-doubled-since-2000-and-its-private-colleges-that-are-meeting-the-demand>. Accessed 09 Jan 2019.

Binsardi A, Ekwulugo F (2003) International marketing of British education: research on the students' perception and the UK market penetration. *Marketing Intelligence & Planning* 21(5):318–27

British Council (2012) The shape of things to come: higher education global trends and emerging opportunities to 2020. *Going Global* 1.

Chapman DW (1981) A model of student college choice. *Journal of Higher Education* 52(5): 490–505

Chapman RG (1986) Toward a theory of college selection: a model of college search and choice behavior. *Advances in Consumer Research* 13:246–250

Colquhoun HL, Levac D, O'Brien KK, Straus S, Tricco AC, Perrier L, Kastner M, Moher D (2014) Scoping reviews: time for clarity in definition, methods, and reporting. *J Clin Epidemiol* 67:1291–1294. doi: 10.1016/j.jclinepi.2014.03.013

Cubillo JM, Sánchez J, Cerviño J (2006) International students' decision-making process. *International Journal of Educational Management* 20:101–115. doi: 10.1108/09513540610646091

Desjardins SL, Toutkoushian RK (2005) Are students really rational? The development of rational thought and its application to student choice. In Smart JC (ed.) *Higher Education: Handbook of Theory and Research* 20, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 191–240

Dibb S, Simkin L (2008) *Marketing planning: A workbook for marketing managers*. South-Western Cengage Learning, London

Donkers B (2002) Modeling consideration sets across time: The relevance of past consideration. *American Marketing Association. Conference Proceedings, suppl. 2002 AMA Winter Educators' Conference* 13

Euromonitor International (2017) *Current Trends in the Global Education Sector*. <https://www.euromonitor.com/current-trends-in-the-global-education-sector/report>. Accessed 09 Jan 2019.

Farjam S, Hongyi X (2015) Revising Students' Decision-making Process. *The International Journal of Management Science and Business Administration* 1:70–78. doi: 10.18775/ijmsba.1849-5664-5419.2014.110.1006

GATE-Germany (2018a) [gate-germany.de](http://www.gate-germany.de/). Accessed 09 Jan 2019.

GATE-Germany (2018b) *Netzwerk-Konferenz*. <https://www.gate-germany.de/konferenzen/netzwerk-konferenz.html>. Accessed 09 Jan 2019.

Hanson K, Litten L (1989) Mapping the Road to Academia: A Review of Research on Women, Men, and the College Selection Process. *The undergraduate woman: Issues in education* P. Perun:73–98

Hemsley-Brown J, Oplatka I (2006) Universities in a competitive global marketplace: A systematic review of the literature on higher education marketing. *International Journal of Public Sector Management* 19:316–338. doi: 10.1108/09513550610669176

Hobsons EMEA (2014) *Beyond the data: Influencing international student decision making*. https://www.hobsons.com/res/Whitepapers/23_Beyond_The_Data_Influencing_International_Student_Decision_Making.pdf. Accessed 09 Jan 2019.

Hossler D, Gallagher K (1987) Studying student college choice: A three-phase model and the implications for the policymakers. *College and University* 2(3), 207–221

Jackson GA (1982) Public Efficiency and Private Choice in Higher Education. *Educational Evaluation and Policy Analysis* 4:237–247. doi: 10.2307/1164016

Ken Research (2011) *Global Education Sector and Changing Trends*. <https://www.kenresearch.com/education-and-recruitment/education/global-education-market-research-report/139-99.html>. Accessed 09 Jan 2019.

Kotler P, Armstrong G, Wong V, Saunders J (2008) *Principles of marketing, 5th European ed.* Financial Times Prentice Hall, Harlow.

Nicholls J, Harris J, Morgan E, Clarke K, Sims D (1995) Marketing higher education: the MBA experience. *The International Journal of Educational Management* 9(2):31–8

OECD (2018) *Education at a Glance 2018: OECD Indicators*. OECD Publishing, Paris.

Oliveira D, Soares AM (2016) Studying abroad: developing a model for the decision process of international students. *Journal of Higher Education Policy and Management* 38:126–139. doi: 10.1080/1366080X.2016.1150234

Perna LW (2006) Studying college access and choice: a proposed conceptual model. In: Smart JC (ed) *Higher Education*, vol 21. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp 99–157

QS Enrolment Solutions (2017) *International Student Survey 2017: Welcoming the World. Europe*. <https://www.internationalstudentsurvey.com/international-student-survey-2017/>. Accessed 09 Jan 2019.

QS Enrolment Solutions (2018) *International Student Survey 2018: Harnessing Opportunities in Global Higher Education. EU*. <https://www.internationalstudentsurvey.com/international-student-survey-2018/>. Accessed 09 Jan 2019.

QS Intelligence Unit (2016) *What Matters to International Students? Global Overview*. <https://www.topuniversities.com/student-info/qs-guides/what-matters-international-students-overview>. Accessed 09 Jan 2019.

QS Intelligence Unit (2018) *QS Applicant Survey 2018: What Drives an International Student Today?* <https://www.topuniversities.com/student-info/qs-guides/qs-applicant-survey-2018-what-drives-international-student-today>. Accessed 09 Jan 2019.

Shocker AD, Ben-Akiva M, Boccara B, Nedungandi P (1991) Consideration Set Influences on Consumer Decision Making and Choice: Issues, Models, and Suggestions. *Marketing Letters* 2(3):181–197

Statista (2018) Anteil der ausländischen Studienanfänger/-innen an Universitäten in Deutschland in den Studienjahren* von 2004 bis 2016. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/199075/umfrage/anteil-der-auslaendischen-studienanfaenger-in-deutschland/>. Accessed 09 Jan 2019.

Tyagi CL, Kumar A (2004) *Consumer Behaviour*. Atlantic Publishers and Distributors, New Delhi, India.

UNESCO (2017) *Six ways to ensure higher education leaves no one behind. Global Education Monitoring Report: Policy Paper*.

Vrontis D, Thrassou A, Melanthiou Y (2007) A contemporary higher education student-choice model for developed countries. *Journal of Business Research* 60:979–989. doi: 10.1016/j.jbusres.2007.01.023

Wajtrakul B (2014) Factors affecting students' intentions to study at universities adopting the "student-as-customer" concept. *International Journal of Educational Management* 28:676–693. doi: 10.1108/IJEM-09-2013-0135

AUTHORS

Prof. Dr. Sandra Haas
Florence Terry, M.A.
International Management / Marketing
Technische Hochschule Wildau

E-Mail for correspondence:
sandra.haas@th-wildau.de





**Technische Hochschule
Wildau**
*Technical University
of Applied Sciences*

Hochschulring 1
15745 Wildau
Germany

www.th-wildau.de