



**Wissenschaftliche Beiträge
TH Wildau**

2018

WISSENSCHAFTLICHE BEITRÄGE 2018

INHALTSVERZEICHNIS

Wissenschaftliche Beiträge 2018

ANGEWANDTE BIOWISSENSCHAFTEN

- 7 Die einfache Extraktion und Quantifizierung von sprengstofftypischen Verbindungen in Bodenproben über LC-MS/MS
*Liane Kober, Christian Hanschke, Rainer Macholz, Marcus Frohme**

- 17 Biohybride Architekturen für eine effiziente Umwandlung von Licht in elektrische Energie durch Integration von Photosystem I in skalierbare mesoporöse 3D-Elektroden
*Kai Stieger, Sven Christian Feifel, Heiko Lokstein, Mahdi Hejazi, Athina Zouni und Fred Lisdat**

INFORMATIK/TELEMATIK

- 25 Image recognition of multi-perspective data for intelligent analysis of gestures and actions
Egbert Gedat, Pascal Fechner, Richard Fiebelkorn, Jan Vandenhouten, Ralf Vandenhouten*

OPTISCHE TECHNOLOGIEN/PHOTONIK

- 31 Theorie der Modenlinienspektroskopie zur optischen Charakterisierung von Polymerschichten
Patrick Steglich, Viachaslau Ksianzou, Claus Villringer, Silvio Pulwer und Sigurd Schrader*

PRODUKTION UND MATERIAL

- 39 Einsatz der Brennstoffzelle als Netzersatzanlage sicherheitsrelevanter Digitalfunkstationen im Feldtest
Denny Ragusch, Michael Jergović, Lutz B. Giese und Siegfried Rollet*

- 47 Schutzverhalten von weichballistischem ultrahochmolekularem Polyethylen
Michael Hendrix, Michael Herzog*

- 53 Untersuchung der kapazitiven Auswirkungen einer Variation im Personaleinsatz in der Handgepäck-Nachkontrolle einer Flughafen-Sicherheitskontrollspur am Beispiel des BER-Layouts
Andreas G. Hotes, Benjamin Fischer*

MANAGEMENT UND RECHT

- 61 Citizen Science – Die Rolle des Bürgers in der Wissenschaft
Frank Hartmann und Dana Mietzner*

- 71 Beruflich Qualifizierte auf dem Weg ins Studium
Xenia Valeska Jeremias, Katja Wenger, Birgit Sellmer*

- 79 The Directive on Antitrust Damages Actions and the European Leniency Program
Carsten Kunkel, Giovanni Figà-Talamanca, Martina Semmler*

VORWORT

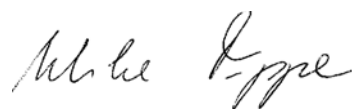
PROF. DR. RER. NAT. ULRIKE TIPPE

Seit dem 1. Dezember 2017 darf ich die Technische Hochschule Wildau als Präsidentin leiten, und ich freue mich sehr, den Weg dieser innovativen und forschungsstarken Hochschule in den nächsten Jahren gemeinsam mit den Kolleginnen und Kollegen sowie den Studierenden zu gestalten. 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 2016/2017 725 Bachelor- und Masterabsolventinnen und absolventen feierlich verabschieden. Damit haben seit der Gründung der TH Wildau im Jahr 1991 insgesamt bereits 12.100 Studierende ihr Studium an der TH Wildau erfolgreich abgeschlossen.

Unser Qualitätsanspruch als Hochschule spiegelt sich nicht nur im Bereich der Lehre wider, sondern leitet in gleichem Maße unsere Forschungs- und Transferaktivitäten. Beispielhaft für die erfolgreiche Arbeit im Bereich Forschung und Transfer sei an dieser Stelle das Projekt „Innovation Hub 13“ genannt, das wir im Jahr 2017 gemeinsam mit der BTU Cottbus-Senftenberg im Rahmen der BMBF-Initiative „Innovative Hochschule“ akquirieren konnten. Mit dieser Förderung können wir unsere Transferaktivitäten und strukturen weiter stärken, nachhaltige Impulse in der Region setzen sowie Wandlungsprozesse begleiten und unterstützen. Im Zentrum unserer gemeinsamen Arbeit steht insbesondere der Ausbau der Ko-

operationsbeziehungen mit wichtigen regionalen 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 haben. In diesem Sinne wünsche ich Ihnen eine anregende Lektüre der Wissenschaftlichen Beiträge 2018. Sie enthalten eine große Bandbreite an Themen und spiegeln so das weit gefächerte Forschungsspektrum unserer Hochschule wider.



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/>

Die einfache Extraktion und Quantifizierung von sprengstofftypischen Verbindungen in Bodenproben über LC-MS/MS

Liane Kober, Christian Hanschke, Rainer Macholz, Marcus Frohme*

Zusammenfassung

Die Kontamination von Flächen mit Rüstungsaltslasten durch sprengstofftypische Verbindungen (STV) wie 2,4,6-Trinitrotoluol (TNT) ist nach wie vor ein großes Risiko für Gesundheit und Umwelt. Die Hochdruckflüssigchromatographie (HPLC) ist in Kombination mit der Tandem-Massenspektrometrie (MS/MS) ein besonders sensitives und exaktes Verfahren zur Konzentrationsbestimmung derartiger Umweltkontaminanten. Jedoch benötigen die derzeit eingesetzten Methoden zur Extraktion und Quantifizierung viel Zeit und Bodenmaterial. Wir haben daher eine 20-minütige LC-MS/MS-Methode entwickelt, die in einer Probe simultan acht STV qualitativ und quantitativ nachweisen kann. Im Vergleich zur EPA-Referenzmethode konnte bei der Extraktion die eingesetzte Bodenmenge von 10 g auf 2 g reduziert und die Extraktionsdauer von 18 h auf 30 min verkürzt werden. Die abschließende Validierung zeigte eine gute Reproduzierbarkeit und mit etablierten Protokollen vergleichbare Detektions- (LOD) und Quantifizierungslimits (LOQ), so dass die optimierten Methoden für eine schnelle und zuverlässige Analyse von Realproben eingesetzt werden konnten.

Abstract

Soil contamination on former military sites with explosives-related compounds (STV) such as 2,4,6-trinitrotoluene (TNT) is still a major health and environmental threat. High pressure liquid chromatography (HPLC) combined with tandem mass spectrometry (MS/MS) is a very sensitive and precise method to detect such environmental contaminants. However, currently used extraction and quantification methods often need a long time and a high sample amount. Thus, we developed an LC-MS/MS method that detects and quantifies eight explosives simultaneously in only 20 min. Compared to the EPA reference method, the amount of soil was reduced from 10 g to 2 g and the extraction time shortened from 18 h to 30 min. The validation revealed a good reproducibility of the fast analysis process. Limits of detection (LOD) and quantification (LOQ) were comparable to established protocols. Hence, the optimized methods were used for a fast and reliable quantification of STV in soil samples of a former military site.

1. Einleitung

Auf Altlastenverdachtsflächen werden immer noch großflächige Kontaminationen mit Sprengstoffen gefunden. Allein im Land Brandenburg gelten 400.000 ha als belastet (Küchler 2011). Die Stoffe sind nicht nur durch ihre Explosivkraft, sondern auch durch ihre hohe Toxizität ein erhebliches Umweltproblem (Herrmann 2008). Insbesondere TNT wurde in den zurückliegenden zwei Weltkriegen in großen Mengen produziert. Durch Transformationsreaktionen entstehen verschiedene

TNT-Abbauprodukte, die neben dem Boden auch das Grundwasser belasten. Mit den Neben- und Zwischenprodukten sowie weiteren als Sprengstoff genutzten Nitroverbindungen wie z. B. 1,3,5-Trinitrobenzol (TNB) bilden sie eine Vielzahl an Verbindungen, die unter dem Begriff der sprengstofftypischen Verbindungen (STV) zusammengefasst werden (Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg 2015).

Die Verteilung der STV im Boden ist aufgrund ihres Ursprungs als hochkonzentrierte Aggregate nicht homogen. In Abhängigkeit von der Her-

kunft, der Bodenbeschaffenheit und den Umwelteinflüssen verändern sich ihre Abbauraten und lokalen Konzentrationen über die Zeit. Insbesondere humushaltiger Boden weist eine hohe Kapazität auf, große Mengen STV adsorptiv zu binden (Via & Zinnert 2016). Unter anaeroben Bedingungen wird nicht adsorbiertes TNT oft schnell in seine Abbauprodukte umgewandelt (Environmental Protection Agency 2017). Neben abiotischen Transformationen durch Licht, Metallionen oder ein alkalisches Milieu können die STV auch durch Mikroorganismen transformiert werden. Unter an-

aeroben Bedingungen findet häufig eine Reduktion der Nitrogruppen zu Aminogruppen statt, die nicht weiter abgebaut werden können und in der Umwelt verbleiben (Monteil-Rivera et al. 2009). Beim Abbau von TNT werden so unter anderem Aminodinitrotoluole (ADNT) gebildet, die nach TNT als zweithäufigste Kontamination auf Altlastenverdachtsflächen gefunden werden können.

Die Intoxikation mit TNT durch Inhalation oder Hautkontakt wurde insbesondere für die an der Herstellung von Explosivstoffen beteiligten Arbeiter beschrieben, sie kann aber auch durch den Kontakt mit kontaminierten Böden oder hoch belastetem Grundwasser erfolgen. Studien legen nahe, dass die Toxizität von TNT und seinen Abbauprodukten auf die Generierung von reaktiven Sauerstoffverbindungen zurückzuführen ist, die die Leber, das Blut, das Immunsystem und die Reproduktionsfähigkeit schädigen können (Environmental Protection Agency 2017).

Um das Ausmaß der STV-Ausbreitung und das damit verbundene Gefährdungspotential einschätzen zu können, werden daher genaue und schnelle Analysemethoden benötigt, die die Probenaufarbeitung des Bodens, die Extraktion der STV aus dem Boden und die Ermittlung der STV-Konzentration mit geeigneten Methoden einschließt. Letzteres kann im einfachsten Fall über eine chromatographische Auftrennung und UV/Vis-Detektion bei 254 nm durchgeführt werden. Zur Erhöhung der Sensitivität und Selektivität kann die Chromatographie mit einem Massenspektrometer gekoppelt werden, wobei Ionen der STV gemäß ihrem Masse-Ladungs-Verhältnis (m/z) detektiert werden (Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg 2015). Bei der Triple-Quadrupol-Technologie können zudem zunächst Produkt-Ionen selektiert, in einer Kollisionszelle fragmentiert und schließlich spezifische Fragment-Ionen der STV nachgewiesen werden. Dadurch wird die Spezifität und Sensitivität der Methode weiter erhöht und eine sehr genaue Quantifizierung der im Boden enthaltenen STV ermöglicht.

Neben der Analysemethode kommt der Probenvorbereitung eine besondere Bedeutung zu. Aufgrund der inhomogenen Verteilung der STV im Boden ist die Homogenisierung der Proben ein wichtiger Bestandteil, um reproduzierbare und richtige Ergebnisse zu erhalten. Im Anschluss daran kann in einem einfachen Extraktionsverfahren die Bodenprobe mit Lösungsmittel versetzt und über einen längeren Zeitraum (ca. 18 h) geschüttelt werden (Deutsches Institut für Normung 2014; Environmental Protection Agency 2006). Die im Boden enthaltenen STV lösen sich dabei im organischen Lösungsmittel und können nach Filtration am LC-MS/MS quantifiziert werden.

Um eine gute Auftrennung der strukturell sehr ähnlichen STV zu erreichen und gleichzeitig eine zeitsparende Analyse zu etablieren, soll eine LC-MS/MS-Methode zum simultanen Nachweis von acht relevanten STV entwickelt werden. Für die untersuchten STV wird zudem überprüft, ob die Extraktion in Anbetracht bestehender Referenzmethoden vereinfacht und beschleunigt werden kann. Eine abschließende Validierung der Methoden und Testung an Realproben soll schließlich für die Bewertung herangezogen werden, ob diese in Zukunft für eine schnellere und flächendeckende Analyse belasteter Altlastenverdachtsflächen genutzt werden können.

2. Material und Methoden

2.1 Chemikalien

Alle verwendeten Chemikalien und Lösungsmittel wiesen den Reinheitsgrad p.A., HPLC oder LC-MS auf und wurden von der Carl Roth GmbH (Karlsruhe) erworben. Folgende STV-Standards wurden von der Sigma-Aldrich Chemie GmbH (Taufkirchen) bezogen: 2-Amino-4,6-Dinitrotoluol (2-ADNT), 4-Amino-2,6-Dinitrotoluol (4-ADNT), 1,3-Dinitrobenzol (DNB), 2-Nitrotoluol (2-NT) und 1,3,5-Trinitrobenzol (TNB). 2,4,6-Trinitrotoluol (TNT), 2,4-Dinitrotoluol (2,4-DNT) und 2,6-Dinitrotoluol (2,6-DNT) sowie die belasteten Bodenproben wurden von der terracon GmbH (Jüterbog) zur Verfügung gestellt.

2.2 Herstellung von Standardlösungen

Für die Methodenentwicklung wurden Stammlösungen der acht STV-Standards (TNT, 2-ADNT, 4-ADNT, TNB, DNB, 2,4-DNT, 2,6-DNT, 2-NT) sowie ein Gemisch mit allen STV mit Konzentrationen von 1 $\mu\text{g/ml}$ und 10 $\mu\text{g/ml}$ in Acetonitril erstellt. Für die Kalibration wurden Konzentrationen von 0,01 $\mu\text{g/ml}$ bis 50 $\mu\text{g/ml}$ des STV-Gemischs (0,01; 0,025; 0,05; 0,10; 0,25; 0,5; 1,0; 5,0; 10,0; 25,0; 50,0 $\mu\text{g/ml}$) verwendet.

2.3 Vorbereitung der Bodenproben

Zur Bereitstellung einer definierten Bodenbelastung wurden Sand- und Humusboden mit TNT dotiert. Hierzu wurden unbelasteter Sand bzw. Humus getrocknet, auf 2 mm Partikelgröße gesiebt, mit TNT versetzt, 10 min gemischt, um dann erneut gesiebt und für 10 min gemischt zu werden. Die Endkonzentrationen betragen für beide Bodenarten 1 g TNT/kg Boden. Die von der terracon GmbH zur Verfügung gestellten Bodenproben wurden vor der Entnahme der Stichproben gemischt und der Wassergehalt der Proben wurde zur Berücksichtigung in der Konzentrationsberechnung bestimmt.

2.4 STV-Extraktion aus Bodenproben

Die Extraktion wurde gemäß der von der EPA beschriebenen Methode 8330b durchgeführt (Environmental Protection Agency 2006). Kurz zusammengefasst wurden die Bodenproben im Dunkeln getrocknet, auf 2 mm Partikelgröße gesiebt, 10 g abgewogen und in 20 ml Acetonitril auf dem Schüttler (Intelli Mixer RM-21, Elmi) für 18 h extrahiert. Zur Vereinfachung der Extraktion wurden verschiedene Experimente mit den dotierten Bodenproben durchgeführt. Hierzu wurden die Verkürzung der Extraktionszeit (1 min, 5 min, 10 min, 30 min, 60 min, 18 h) sowie die Verringerung des Bodenmaterials (1 g, 2 g, 5 g, 10 g) bei gleichbleibendem Verhältnis zum Lösungsmittel Acetonitril untersucht. Als Alternative wurde zudem eine Ultraschallextraktion mit den o. g. Zeiten betrachtet. Da zur Kalibration Standardlösungen verwendet wurden, erfolgte eine Va-

lidierung der Methoden mit dotierten Extrakten. Zu diesem Zweck wurden die Wiederfindungsrate (10 µg/ml STV-Gemisch) und die Präzision (n = 10) bei Anwendung der optimierten Methoden bestimmt sowie Realproben analysiert.

Vor der Messung an der LC-MS/MS wurden alle Extrakte zentrifugiert (2 min, 10.000xg), der Überstand filtriert (PTFE, 0,22 µm) und im Verhältnis 1:10 bzw. 1:100 mit Acetonitril verdünnt.

2.5 Chromatographie und MS-Optimierung

Die LC-MS/MS-Analysen wurden am LCMS-8040 (Shimadzu Europa GmbH, Duisburg), bestehend aus einer HPLC mit Photodiodenarray (PDA) und einem Triple-Quadrupol-Massenspektrometer mit Elektrospray-Ionisierung (ESI), durchgeführt. Für die Gerätesteuerung und Auswertung der Ergebnisse wurde die Software LabSolutions (Shimadzu) verwendet. Die Auftrennung der STV erfolgte mithilfe der HPLC-Säule Nucleodur® C18 HTec, 3 µm, 2 x 150 mm (Macherey-Nagel GmbH & Co. KG, Düren) und dem zugehörigen Vorsäulensystem (Column Protection System, Macherey-Nagel). Als mobile Phase wurde ein Gradient aus Wasser mit 5 mM Ammoniumacetat und 0,001 % Ammoniumhydroxid (A) sowie Methanol (B) verwendet. Eine optimale Auftrennung konnte bei einer Säulentemperatur von 28°C, einer Flussrate von 0,15 ml/min und dem in Tab. 1 dargestellten Gradienten erreicht werden. Die UV-Detektion und -Quantifizierung erfolgte bei 254 nm. Das Injektionsvolumen betrug 1 µl.

Im Massenspektrometer konnten im negativen Ionenscan fünf der acht STV anhand spezifischer Produktionen identifiziert werden. Über das Multiple-Reaction-Monitoring (MRM) wurden für diese fünf STV die häufigsten Fragmente bestimmt (Tab. 2). Mit Ausnahme der ADNT wurde bei allen STV das häufigste Fragment (*) zur Quantifizierung herangezogen. Die optimierten Bedingungen waren hierfür eine ESI-Kapillarspannung von -3,5 kV, eine Ionenquellentemperatur von 250°C und eine Heizblocktemperatur von 400°C. Als Verneblungs- und Trocknungsgas wurde Stickstoff

Tab. 1: Profil des Lösungsmittelgradienten zur STV-Separation

Zeit [min]	Lösungsmittel A [% v/v]	Lösungsmittel B [% v/v]
0,0	43	57
2,0	43	57
13,0	30	70
14,8	30	70
15,0	90	10
20,0	90	10

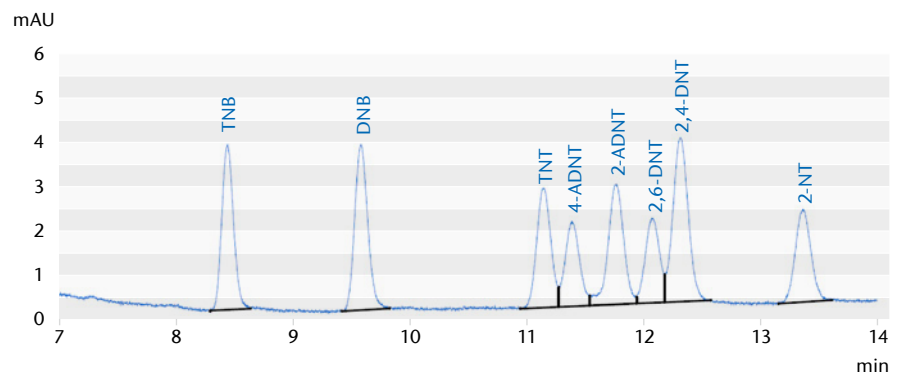


Abb. 1) Chromatographische Auftrennung und UV-Detektion (254 nm) eines 1-µg/ml-STV-Standardgemischs mit TNB, DNB, TNT, 4-ADNT, 2-ADNT, 2,6-DNT, 2,4-DNT und 2-NT.

eines Stickstoffgenerators (Infinity NM32L, Peak Scientific Instruments GmbH, Düren) mit einer Flussrate von 3 bzw. 15 l/min eingesetzt. Das Gas Argon wurde zur Fragmentierung der STV in der Kollisionszelle genutzt (230 kP).

3. Ergebnisse

3.1 LC-MS/MS-Methodenentwicklung

Im Zuge der chromatographischen Methodenentwicklung konnten die acht strukturell sehr ähnlichen STV erfolgreich separiert werden (Abb. 1). Insbesondere für die Trennung der Isomere 4- und 2-ADNT bzw. 2,4- und 2,6-DNT spielten eine genaue Einstellung des Gradienten (Tab. 1) sowie die Säulentemperatur (28°C) eine wichtige Rolle.

Im negativen Ionenscan des Massenspektrometers konnten für fünf der acht Verbindungen spezifische Ionen detektiert werden. Für TNT, 4-ADNT, 2-ADNT und 2,4-DNT wurde das de-

protonierte Anion $[M-H]^-$ nachgewiesen. Bei TNB zeigte sich dagegen eine größere Abweichung zum Molekulargewicht (s. Tab. 2). Für die ionisierbaren STV wurden in der automatisierten MRM-Optimierung die zwei bis fünf häufigsten Fragmente bestimmt, von denen in den meisten Fällen das häufigste zur Quantifizierung genutzt wurde. Die weiteren Fragmente dienen zur Qualitätssicherung. Bei 2-ADNT und 4-ADNT wurde bei der Auswahl des Fragments zur Quantifizierung berücksichtigt, dass das Fragment beim jeweils anderen Isomer ein möglichst geringes Signal hervorruft. Aufgrund der sehr ähnlichen Struktur und des daraus resultierenden Fragmentierungsverhaltens ist in den MRM-Chromatogrammen zu den Elutionszeiten jeweils trotzdem ein Doppelpeak zu erkennen (Abb. 2). Daher ist insbesondere für die ADNT nicht nur die Auswahl spezifischer Fragmente, sondern auch der Elutionszeitpunkt ein wichtiger Faktor, um den korrekten Peak zur Quantifizierung heranzuzie-

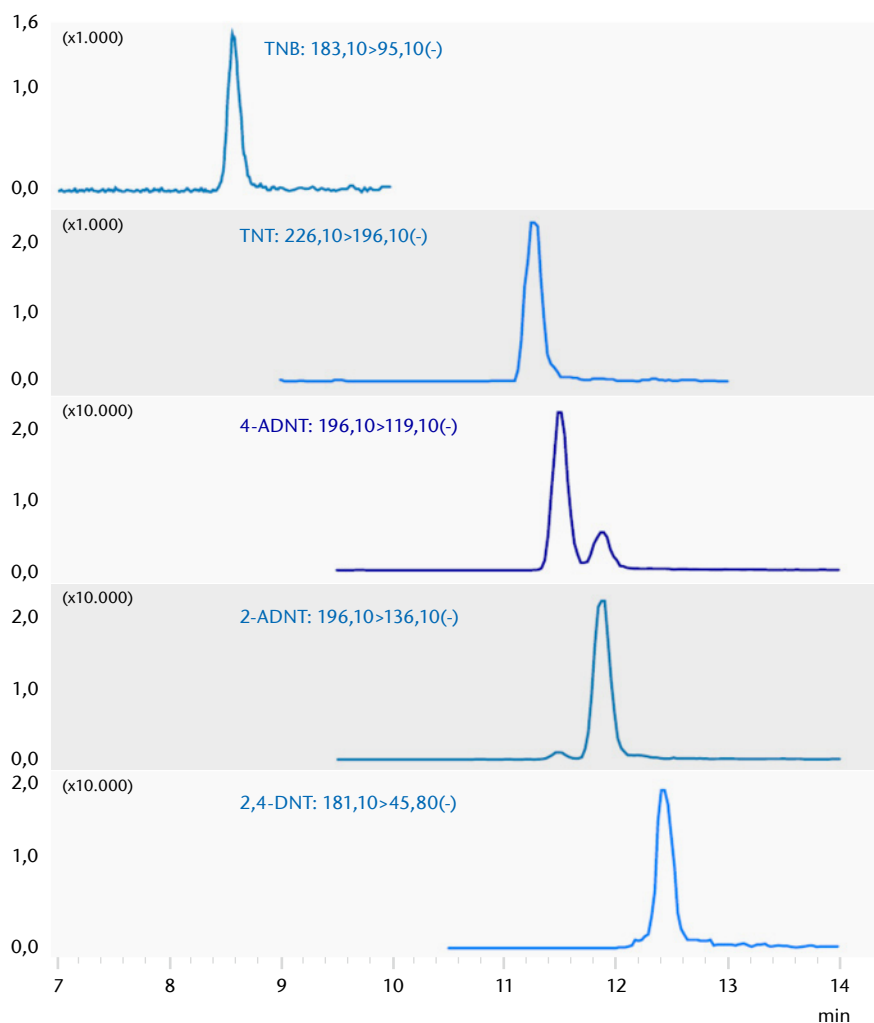


Abb. 2) MRM-Chromatogramme der fünf über ESI ionisierbaren STV TNB, TNT, 4-ADNT, 2-ADNT und 2,4-DNT eines 1- μ g/ml-STV-Standardgemischs mit Kennzeichnung und Benennung der zur Quantifizierung genutzten Fragmente.

hen. Im Vergleich zu den anderen drei STV ist der Nachweis der Aminodinitrotoluole um den Faktor 10 sensitiver.

3.2 Validierung der LC-MS/MS-Methoden

Zur Konzentrationsbestimmung in Bodenproben wurden Kalibrationsgeraden für die STV mithilfe der UV-Chromatogramme und der MRM-Chromatogramme erstellt. In beiden Detektionsverfahren zeigt die Mehrfachbestimmung nur eine geringe Standardabweichung von durchschnittlich 5 % (0,17 – 16,6 %) mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,999 bis 1. Die massenspektrometrische Quantifizierung weist gegenüber der UV-Quantifizierung eine größere Sensitivität auf (vgl. Abb. 3 für 4-ADNT). Daher erstreckt sich auch der lineare Bereich in einem niedrigeren Konzentrationsbereich als die UV-Kalibration (Tab. 3).

Zur Bestimmung der Nachweis- (LOD) und Quantifizierungslimits (LOQ) wurde das Signal-Rausch-Verhältnis (S/N) der Peaks herangezogen. Ein $S/N > 3$ wurde als untere Nachweis-, ein $S/N > 10$ als Quantifizierungsgrenze festgelegt (DeArmond & DiGoregorio 2013; Leito et al. 2017). Die massenspektrometrische Detektion ist auch hier bis zu 25-mal sensitiver (Tab. 3).

Tab. 2: Molekulargewicht der untersuchten STV, Elutionszeitpunkte im UV-Chromatogramm (254 nm), Nachweisbarkeit im MS (ESI) sowie spezifische Produkt-Ionen und Fragment-Ionen mit Kennzeichnung des für die Quantifizierung genutzten Fragments (*).

STV [-]	M_w [g/mol]	UV: 254 nm [min]	MS: ESI- [-]	Produkt-Ion [m/z]	Fragment-Ionen [m/z]
TNT	227,1	10,9	✓	226,1	196,10*; 46,00; 64,05
4-ADNT	197,1	11,2	✓	196,1	166,30; 149,15; 136,10; 119,15*; 46,00
2-ADNT	197,1	11,6	✓	196,1	166,10; 150,10; 136,10*; 119,15; 45,85
2,6-DNT	182,1	11,9	-	-	-
2,4-DNT	182,1	12,2	✓	181,1	135,25; 116,05; 105,20; 45,80*
2-NT	137,1	13,1	-	-	-
TNB	213,1	8,3	✓	183,1	125,10; 95,10*
DNB	168,1	9,4	-	-	-

Um die Selektivität der chromatographischen Auftrennung zu bewerten, wird die Peakauflösung R_s genutzt. Sie ist ein Maß dafür, wie weit benachbarte Peaks (A und B) im Chromatogramm auseinanderliegen. Für die Berechnung werden die Retentionszeiten t_R und die Halbwertsbreiten $w_{1/2}$ der Peaks benötigt.

$$R_s = \frac{t_R(B) - t_R(A)}{0,85(w_{1/2}(B) - w_{1/2}(A))}$$

Als Richtwert kann hier eine Auflösung von mindestens 1,5 herangezogen werden (Leito et al. 2017). Dieser Wert wurde für die meisten STV erreicht (Tab. 3). Lediglich TNT und 4-ADNT (1,13), 2-ADNT und 2,4-DNT (0,98) sowie 2,4-DNT und 2,6-DNT (0,96) zei-

gen eine schlechtere Peakauflösung. Beim MRM-basierten Nachweis wird dieser Parameter durch die spezifische Produkt- und Fragment-Ion-Selektion nicht benötigt. Neben der hohen Sensitivität ist diese Selektivität ein weiterer Grund, zur Bestimmung der STV-Konzentrationen die MRM-Quantifizierung der UV-Quantifizierung vorzuziehen.

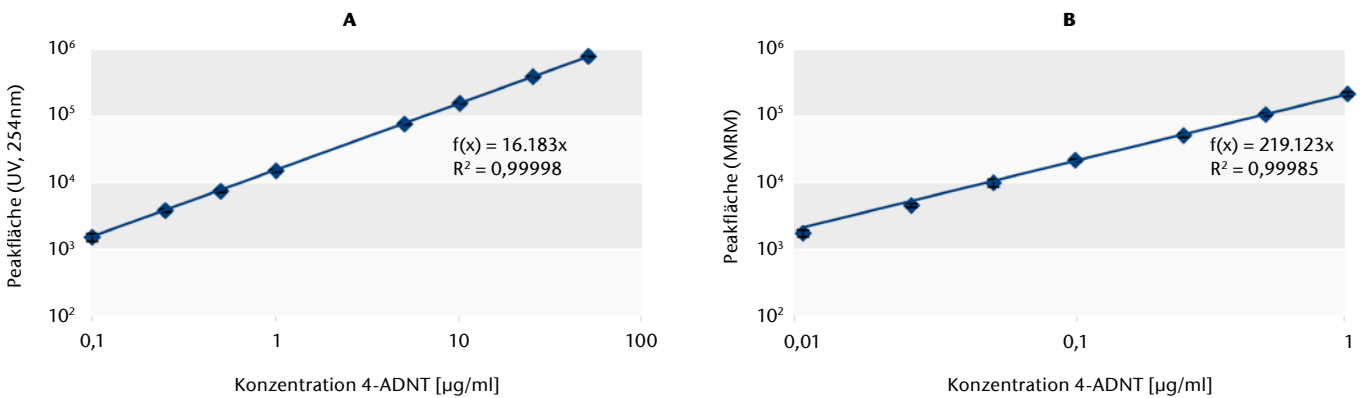


Abb. 3) Kalibrationsgeraden zur Bestimmung von 4-ADNT in Bodenproben (n = 3); UV-Quantifizierung bei 254 nm (A) und MRM-Quantifizierung des spezifischen Fragments (hier: 196,1 > 119,15(-)) (B) in doppelt logarithmischer Darstellung.

Tab.3: Methodenvalidierung der UV- und MS-Quantifizierung hinsichtlich des linearen Bereichs, der unteren Nachweis- (LOD) und Quantifizierungsgrenze (LOQ) sowie der Selektivität der chromatographischen Auftrennung zur nachfolgend eluierten STV (Peakauflösung R_s)

Methode	STV	Linearer Bereich [µg/ml]	LOD [µg/ml]	LOQ [µg/ml]	Peakauflösung (UV)
UV	TNB	0,1 - 50	0,25	0,50	5,52
	DNB	0,1 - 50	0,10	0,25	6,77
	TNT	0,1 - 50	0,25	0,50	1,13
	4-ADNT	0,1 - 50	0,25	0,50	1,61
	2-ADNT	0,1 - 50	0,25	0,50	0,98
	2,4-DNT	0,1 - 50	0,10	0,25	0,96
	2,6-DNT	0,1 - 50	0,25	0,50	3,90
	2-NT	0,1 - 50	0,25	0,50	-
MS	TNB	0,1 - 10	0,10	0,25	-
	TNT	0,1 - 25	0,05	0,10	-
	4-ADNT	0,01 - 1	0,01	0,025	-
	2-ADNT	0,01 - 1	0,01	0,025	-
	2,4-DNT	0,1 - 10	0,10	0,25	-

3.3 Optimierung der STV-Extraktion aus Bodenproben

Aktuelle Referenzmethoden zur Extraktion von STV aus Bodenproben benötigen große Probenmengen von 10 bis 20 g und sind mit langwierigen Extraktionen bis zu 24 h verbunden (Environmental Protection Agency 2006; Deutsches Institut für Normung 2014). Um eine schnellere und trotzdem effektive Extraktion der hier betrachteten STV zu erreichen, wurden verschiedene Parameter optimiert. Zunächst wurde die Verringerung der eingesetzten Bodenmenge für zwei mit 1 g TNT/kg dotierte Böden untersucht. Sowohl für den humushaltigen als auch für den sandigen Boden konnte kein großer Einfluss durch die Verringerung der eingesetzten Bodenmenge festgestellt werden (Abb. 4 A und B). Bei 1 g Boden fällt im Vergleich zu den anderen Proben lediglich die Standardabweichung höher aus. Für den sandigen Boden wurden etwas höhere Werte als 1 g TNT/kg Boden bestimmt. Beim humushaltigen Boden liegen die bestimmten Konzentrationen von ca. 700 mg TNT/kg Boden deutlich unter der vormals dotierten Konzentration.

Durch diese Ergebnisse wurden 2 g Boden als ausreichend erachtet und in nachfolgenden Experimenten zur Ermittlung einer verkürzten Extraktionszeit eingesetzt. Für beide dotierte Böden wurden Extraktionszeiten von 1 min, 5 min, 10 min, 30 min, 60 min sowie 18 h als Referenzwert untersucht. Bereits nach 1 min konnten in allen Proben bis zu 75 % der nach 18 h ermittelten TNT-, 2-ADNT- und 4-ADNT-Konzentrationen nachgewiesen werden (Abb. 4 C und D). Bis zur Extraktionszeit von 30 min kann eine weitere Zunahme festgestellt werden, die mit Ausnahme von 2-ADNT bis zur Maximalzeit von 18 h keine großen Veränderungen zeigt. Im TNT-dotierten Humusboden fielen die TNT-Konzentrationen noch einmal niedriger als im Vorexperiment aus. Dafür konnten erhöhte Konzentrationen der Aminodinitrotoluole nachgewiesen werden, die im Sandboden nicht vorhanden waren.

Im letzten Optimierungsexperiment wurde überprüft, ob die STV-Extraktion aus dem dotierten Humusboden

durch die Anwendung von Ultraschall verbessert werden kann. Nach 1 min Extraktionszeit wurden durch den Ultraschall ca. 5–10 % mehr TNT extrahiert, allerdings gleicht sich die Konzentration der beiden Verfahren nach 5 min wieder an und fällt bei der einfachen Extraktion nach 30 min und 60 min sogar höher aus (Abb. 4 E). Nach 18 h zeigt sich wiederum ein leichter Vorteil des Ultraschallverfahrens.

Aufgrund der Ergebnisse zur Optimierung der Extraktion wurde ein verkürztes Verfahren etabliert, das für TNT und die Aminodinitrotoluole vergleichbare Ergebnisse zum Referenzverfahren lieferte. Dieses optimierte Verfahren nutzt eine geringe Bodenmenge (2 g) und eine einfache Lösungsmittelextraktion mit Acetonitril bei einer deutlich verkürzten Extraktionszeit von 30 min.

Abschließend wurden zur Validierung der gesamten Messmethodik inklusive des verkürzten Extraktionsverfahrens die Wiederfindungsrate und die Präzision bestimmt. Die Wiederfindungsrate wird zur Bewertung der Probenvorbereitung herangezogen. Hierfür wurde unbelasteter, humushaltiger Boden gezielt mit 10 µg/ml STV-Mix versetzt, im Anschluss mit dem optimierten Verfahren extrahiert und am LC-MS/MS analysiert. Mit Ausnahme von 2,4-DNT ist die Wiederfindungsrate der MS-Quantifizierung höher als bei der Verwendung der UV-Quantifizierung (Abb. 5 A). Alle anderen Wiederfindungsraten liegen mindestens bei 85 %, bei 2-ADNT sogar bei 95 % (MS-Quantifizierung).

Zur Bestimmung der Präzision wurden für die dotierten Böden zehn Extraktionen durchgeführt und über LC-MS/MS quantifiziert. Die massenspektrometrische Quantifizierung lieferte etwas höhere TNT-Werte als der UV-Nachweis (Abb. 5 B). Die für die Präzision relevante Standardabweichung der TNT-Konzentrationen fällt bei dem dotierten Humusboden etwas höher als beim Sandboden aus. Die im Humusboden nachgewiesenen 2- und 4-ADNT zeigen dagegen nur eine geringe Standardabweichung.

Die optimierten Extraktions- und Messmethoden wurden an Realproben (H0–H4) getestet, die einige Wochen zuvor als Referenz von einem pro-

fessionellen Anbieter (terracon GmbH Jüterbog) analysiert worden waren. In der Probe H0 konnten mit beiden Verfahren keine STV nachgewiesen werden. Die Proben H1 bis H4 zeigen Kontaminationen mit TNT, 2-ADNT und 4-ADNT (Abb. 6). Im Vergleich zu den Referenzwerten sind unsere Messwerte niedriger. Insbesondere bei der hoch kontaminierten Probe H1 werden größere Abweichungen deutlich. Allerdings musste bei dieser Bodenprobe eine Probe der Dreifachbestimmung ausgeschlossen werden, da sie im Vergleich zu den anderen beiden Extrakten eine zehnfach erhöhte TNT-Konzentration aufwies. Die Quantifizierungsergebnisse der niedriger belasteten Proben liegen dagegen deutlich näher an den Referenzwerten.

4. Diskussion

4.1 LC-MS/MS-Methodenentwicklung

Die untersuchten Sprengstoffe unterscheiden sich in ihrer Polarität, was für die Separation in der Umkehrphasen-HPLC (RP-HPLC) genutzt werden kann. Eher polare Sprengstoffe, wie TNB oder DNB, eluieren zu Beginn des Gradienten, da der polare Anteil der mobilen Phase hier höher ist. Weniger polare Sprengstoffe wie 2-NT werden dagegen erst am Ende bei einem hohen organischen Anteil des Lösungsmittels eluiert. Mit der optimierten Methode konnten alle acht STV separiert werden. Aufgrund der sehr ähnlichen chemischen Struktur der Sprengstoffe zeigten sich im Chromatogramm teilweise Überlagerungen der Peaks. Dies wirkte sich negativ auf die Peakauflösung aus, so dass der Grenzwert von 1,5 teilweise unterschritten wurde. Insbesondere strukturelle Isomere wie 2- und 4-ADNT oder 2,4- und 2,6-DNT neigen zur Co-Elution in der Chromatographie (Bečanová et al. 2010), was sich negativ auf die Quantifizierung auswirken kann. Bei Erstellung der Kalibrationsgeraden und Quantifizierung der STV in Bodenproben wurde jedoch keine Beeinträchtigung beobachtet. Die Kalibration zeigte eine hohe Reproduzierbarkeit und ermittelte vergleichbare Ergebnisse zu der massenspektrometrischen Quantifizierung.

Zum massenspektrometrischen Nachweis müssen die STV über ESI ionisierbar sein. Durch den Einsatz von Additiven wie Ammoniumacetat und Ammoniumhydroxid kann die Ionisation der Analyten deutlich verbessert werden (Kostiainen & Kauppila 2009). So konnten TNT, 2-ADNT, 4-ADNT und 2,4-DNT als deprotonierte Anionen $[M-H]^-$ nachgewiesen werden.

Von TNB wurde statt des deprotonierten Anions bereits ein spezifisches Fragment als Vorläufer-Ion detektiert $[TNB-NO]^-$ (Song et al. 2005). Die drei weiteren STV (DNB, 2,6-DNT, 2-NT) konnten aufgrund der geringen Anzahl von Nitrogruppen bzw. ihrer Struktur nicht über ESI ionisiert werden. Mithilfe der APCI (chemische Ionisation bei Atmosphärendruck)

als alternative Ionisationsquelle wäre eine Ionisation von DNB und 2,6-DNT möglich (Thurman & Ferrer 2012). 2-NT kann dagegen nur über GC-MS (Gaschromatographie-Massenspektrometrie) nachgewiesen werden (Perr et al. 2005). Für die ionisierbaren STV wurden im Zuge des MRM spezifische Fragmente (Produkt-Ionen) ermittelt und damit

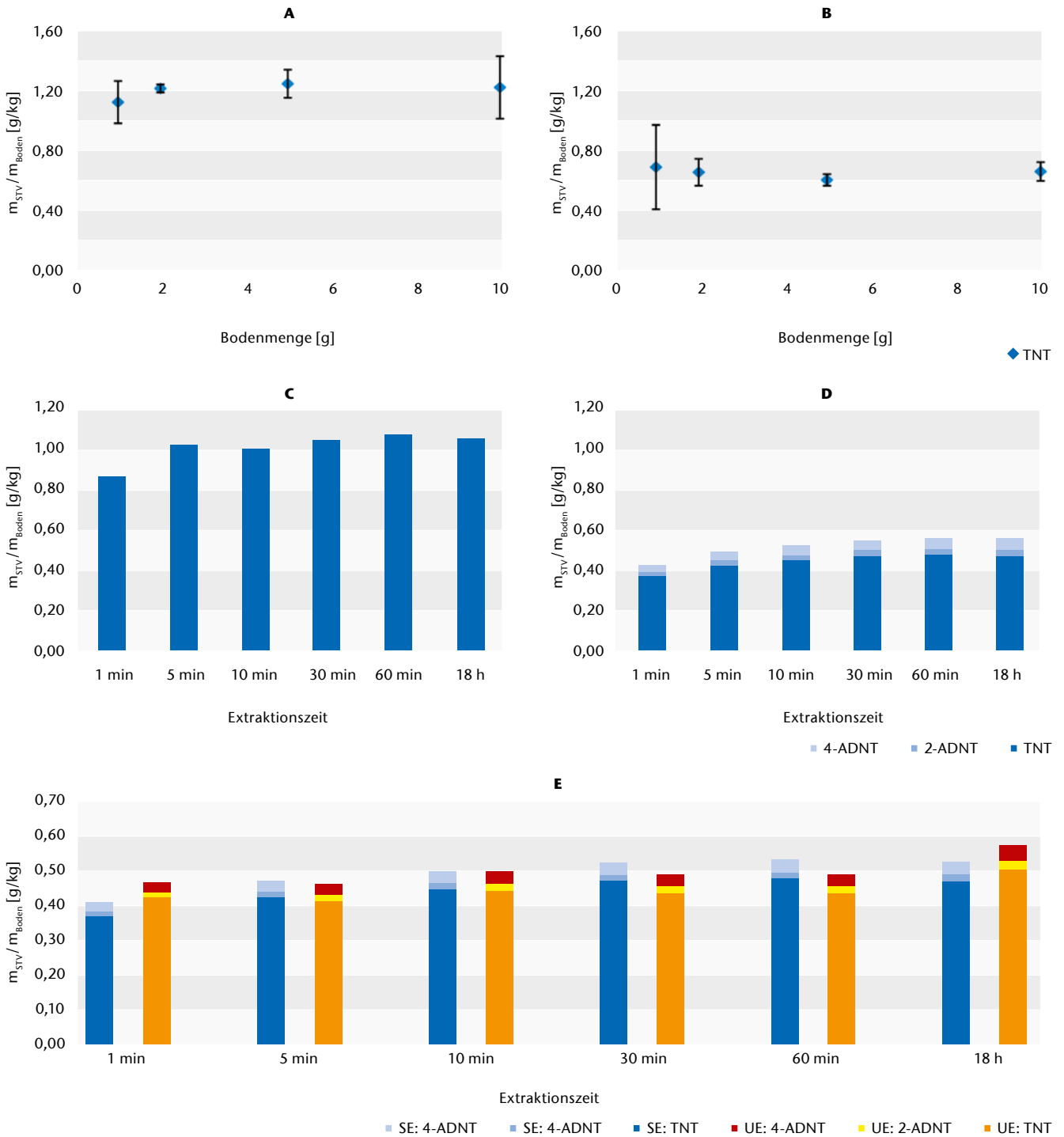


Abb. 4) Optimierung der STV-Extraktion aus dotierten Bodenproben: Nachgewiesene TNT-Konzentrationen bei Einsatz verschiedener Bodenmengen für sandigen (A) bzw. humushaltigen Boden (B); Einfluss der Extraktionsdauer auf die nachgewiesene STV-Konzentrationen in sandigem (C) und humushaltigem Boden (D); Vergleich der über Schüttel- (SE) und Ultraschallextraktion (UE) extrahierten STV in dotiertem Humusboden (E).

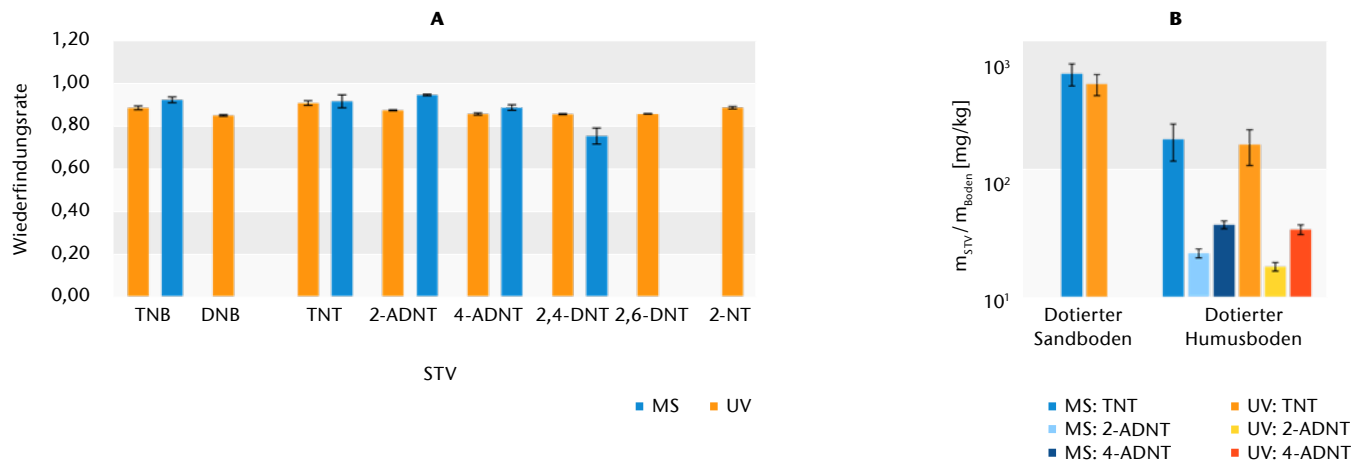


Abb. 5) Wiederfindungsrate von STV (10 µg/ml) in humushaltigen Bodenproben, die über die optimierten Methoden extrahiert und analysiert worden sind (n = 2) (A); Präzision der entwickelten Extraktions- und LC-MS/MS-Methoden für dotierten Sand- und Humusboden (n = 10) (B).

auch die Sensitivität für die Quantifizierung der STV deutlich erhöht. Selbst bei den Doppelpeaks der ausgewählten ADNT-Fragmente ist durch den jeweils spezifischen Zeitpunkt der Elution und die erhöhte Spezifität des Produkt-Ionen-Nachweises eine unabhängige Quantifizierung möglich. Bei der MS-Quantifizierung wurden für alle STV niedrigere LOD und LOQ im Vergleich zur UV-Quantifizierung ermittelt. Die Sprengstoffe mit der höchsten Sensitivität wiesen die niedrigste LOD (0,01 µg/ml) auf, was im besseren Ionisationsverhalten der ADNT-Isomere gegenüber TNT, TNB und 2,4-DNT begründet ist. Im Vergleich zur Ionisationsmethode der APCI (LOD – 0,002 bis 0,027 µg/ml), die häufiger für den massenspektrometrischen STV-Nachweis eingesetzt wird, konnten für die hier untersuchten STV mit der ESI ähnlich gute LOD erzielt werden (Jiang 2010).

4.2 STV-Extraktion aus Bodenproben

Ein wichtiger Parameter bei der Durchführung einer Bodenextraktion ist die Probenvorbehandlung, bei der der Boden homogenisiert und bei Bedarf getrocknet wird. Boden ist eine komplexe Probenmatrix, und die Verteilung der STV in belasteten Gebieten ist meistens inhomogen (Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg 2015). Dieses Verhalten konnte auch in den hier untersuchten Bodenproben beobachtet werden. So wurden im dotierten

Sandboden trotz einer 20-minütigen Homogenisation bis zu 10 % höhere TNT-Konzentrationen bestimmt, als ursprünglich dotiert wurden. Diese Vermutung wird auch durch die im Validierungsprozess überprüfte Methodenpräzision bestätigt, da größere Schwankungen der gemessenen TNT-Konzentrationen in der UV- und MS-Bestimmung aufgetreten sind. Beim dotierten Humusboden konnten noch andere Einflussfaktoren beobachtet werden. So wurde hier in allen Experimenten weniger TNT nachgewiesen, als dotiert wurde. Zudem nimmt die TNT-Konzentration von ca. 700 mg/kg Boden im ersten Experiment (Einfluss der eingesetzten Bodenmenge) auf ca. 250 mg/kg Boden im letzten Experiment zur Bewertung der Methodenpräzision ab. Aufgrund der Mehrfachbestimmung und der Untersuchung der weiteren Proben kann die Homogenisation hier nicht der einzige Grund für diese Abweichungen sein. Allerdings ist durch den hohen Humingehalt des Bodens ein erhöhtes Schadstoffrückhaltevermögen zu erwarten, d. h., es ist eine teilweise Bindung des TNT an Huminstoffe wahrscheinlich, das dann nicht mehr für Extraktionen zur Verfügung steht (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2009). Zudem konnte neben der Abnahme der TNT-Konzentration eine Zunahme der ADNT in dem dotierten Humusboden festgestellt werden. So wurden im letzten Experiment reproduzierbar bis zu 100 mg ADNT/kg Boden nachgewiesen. Da sie nicht dem

Boden zugefügt worden waren, sind sie auf Transformationsprozesse im Boden zurückzuführen. Die Proben wurden dunkel, kühl und fest verschlossen gelagert, so dass photolytische Transformationsreaktionen unwahrscheinlich sind. Vielmehr könnten im Humusboden vorhandene Mikroorganismen das dotierte TNT zu 2-ADNT und 4-ADNT abgebaut haben. Ein weiteres Indiz hierfür ist die vermehrte Bildung von 4-ADNT gegenüber 2-ADNT, was für reduktive Mechanismen spricht (Monteil-Rivera et al. 2009). Die Ultraschallextraktion konnte im Vergleich zur einfachen Extraktion nur eine geringfügige Erhöhung der extrahierten STV nach 18 h erzielen. Da das Ziel in der Entwicklung einer einfachen und schnellen Methode lag, die möglichst auch im Feld angewendet werden kann, ist daher die einfache Lösungsmittelextraktion vorzuziehen. In den hier untersuchten Bodenproben waren nur die häufigsten STV TNT, 2-ADNT und 4-ADNT vertreten. Für andere STV, wie z. B. TNB, müsste im Einzelnen geprüft werden, ob die verkürzte Extraktion angewendet werden kann oder andere Verfahren (z. B. Beschleunigte Lösungsmittelextraktion (ASE) oder Soxhlet-Extraktion) vorteilhafter sind.

Bei der Messung von Realproben wurden trotz geringer Standardabweichung deutliche Differenzen zu den vorliegenden Referenzwerten ermittelt. So fielen die meisten berechneten Konzentrationen niedriger aus und

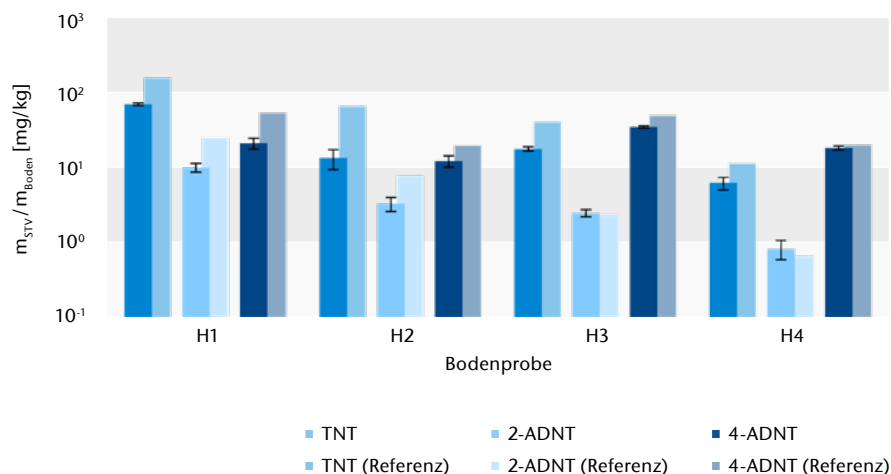


Abb. 6) LC-MS/MS-Bestimmung von TNT, 2-ADNT und 4-ADNT in kontaminierten Realproben mit den optimierten Methoden im Vergleich zu den Werten des Analytlabors (terracon GmbH) als Referenz (H1: n = 2; H2–H4: n = 3).

lagen außerhalb des Vertrauensintervalls. Auch hier kommen zwei der bereits zuvor beobachteten Fakten zum Tragen. Zum einen lag vermutlich keine ausreichende Homogenisierung der entnommenen Gesamtprobe vor. Von den jeweils 10–20 kg entnommenen Bodenproben wurde nur ein sehr geringer Teil (insgesamt 6 g je Probe) in unserem Labor analysiert. Für die Probe H1 wurde in der Dreifachbestimmung trotz vorheriger Durchmischung sogar ein Wert mit zehnfach erhöhter TNT-Konzentration gegenüber den anderen beiden Extrakten ermittelt, der als Ausreißer nicht in die Auswertung einbezogen wurde. Eine unzureichende Durchmischung der Ausgangsmaterialien hat daher wahrscheinlich zu den großen Abweichungen zwischen unseren ermittelten Konzentrationen und den Werten des Referenzlabors geführt. Zum anderen lagen zwischen den Analysen mehrere Wochen, so dass insbesondere bei den huminhaltigen Proben (H2–H4) Transformations- und Bindungsprozesse stattgefunden haben könnten.

5. Schlussfolgerung und Ausblick

Die Laboranalyse sprengstofftypischer Verbindungen kann in drei größere Arbeitskomplexe unterteilt werden. Dazu zählen eine möglichst präzise Probenvorbereitung, die Extraktion der Sprengstoffe aus Bodenproben und die Analyse der Sprengstoffbelastung mittels geeigneter Quantifizierungsmethoden. Über die Proben-

vorbereitung wird dafür gesorgt, dass für die nachfolgenden Arbeitsschritte eine repräsentative Probe des Bodenmaterials zur Verfügung steht. Bestehende Extraktionsmethoden nutzen eine hohe Menge Bodenmaterial und benötigen für die Extraktion der STV hohe Lösungsmittelvolumina sowie lange Analysezeiten. Bei einer Vielzahl von Laboranalysen, wie sie für die Erfassung von kontaminierten Liegenschaften notwendig sind, kann so ein beträchtlicher Material- und Kostenaufwand entstehen. Bei der Optimierung einer bestehenden Extraktionsmethode für STV wurde die verwendete Bodenmenge von 10 auf 2 g und die Extraktionsdauer von 18 h auf 30 min reduziert. Durch die reduzierte Bodenmenge verringert sich gleichzeitig das benötigte Lösungsmittelvolumen für die Extraktion von 20 auf 4 ml Acetonitril. Die abschließende Validierung der Methode zeigte hohe Wiederfindungsraten und eine gute Präzision, aber auch die Notwendigkeit einer guten Probenvorbereitung. Insbesondere bei der Reduktion der Bodenmenge ist daher auf eine ausreichende Homogenisation der Bodenproben zu achten.

Zur Quantifizierung von Sprengstoffbelastungen erwies sich die LC-MS/MS als geeignete Methode. Die erfolgreiche Etablierung einer chromatographischen Methode zur Separation von acht STV (TNB, DNB, TNT, 4-ADNT, 2-ADNT, 2,4-DNT, 2,6-DNT und 2-NT) in der HPLC ermöglichte eine zuverlässige UV-Quantifizierung bei 254 nm.

Eine sensitivere und selektivere Detektion konnte durch die Etablierung einer MS-Quantifizierungsmethode für fünf der acht STV erreicht werden. Für TNB, TNT, 2-ADNT, 4-ADNT und 2,4-DNT wurden geeignete Produkt- und Fragment-Ionen zum Quantifizieren ermittelt.

Mit neuen und gut homogenisierten Realproben sollte die Anwendbarkeit der Methode noch einmal überprüft werden. Dafür wäre am besten ein Bodenmaterial geeignet, das auch Kontaminationen durch die anderen STV aufweist. Eine Alternative für kontaminierte Realproben wäre die Verwendung eines zertifizierten Referenzmaterials, bei dem die STV-Konzentrationen bekannt sind. So könnte der verkürzte Extraktionsvorgang auch für die anderen STV überprüft werden. In dieser Arbeit wurden nur die STV TNT, 4-ADNT und 2-ADNT nachgewiesen, die allerdings auch die häufigsten und bedeutendsten Kontaminationen auf Altlastenflächen darstellen. Trotzdem wäre es insbesondere für Nitramin-Sprengstoffe wie Oktogen (HMX) oder Hexogen (RDX) von Interesse, die Methode auf zusätzliche STV auszuweiten und auch Transformationsprodukte, wie z. B. Benzoesäuren, zu betrachten. Die Analyse eines breiteren Schadstoffspektrums setzt allerdings auch eine Neubewertung und eventuelle Verbesserung der chromatographischen Auftrennung voraus. Schließlich konnte mit dieser Arbeit ein vereinfachtes und deutlich schnelleres Verfahren entwickelt werden, das für ein STV-Screening von Altlastenverdachtsflächen genutzt werden kann. Darauf aufbauend könnten an ausgewählten Kontaminationsherden Standardverfahren zur STV-Analyse eingesetzt werden, um eine ausreichende Gefährdungsabschätzung der betroffenen Liegenschaften zu treffen und Sanierungspläne zu erstellen.

LITERATUR

Bayerisches Landesamt für Umwelt (2009) Arbeitshilfe für die Untersuchung von Sprengplätzen. Praxisteil, Augsburg

Bečanová J, Friedl Z, Šimek Z (2010) Identification and determination of trinitrotoluenes and their degradation products using liquid chromatography–electrospray ionization mass spectrometry. *International Journal of Mass Spectrometry* 291(3):133–139. doi: 10.1016/j.ijms.2010.01.016

DeArmond PD, DiGoregorio AL (2013) Characterization of liquid chromatography-tandem mass spectrometry method for the determination of acrylamide in complex environmental samples. *Anal Bioanal Chem* 405(12):4159–4166. doi: 10.1007/s00216-013-6822-4

Deutsches Institut für Normung (2014) Bodenbeschaffenheit - Bestimmung von ausgewählten Explosivstoffen und verwandten Verbindungen - Teil 2: Verfahren mittels Gaschromatographie (GC) und Elektronen-Einfang-Detektion (ECD) oder massenspektrometrischer Detektion (MS). (DIN-ISO-11916-2). Accessed 13 Nov 2017

Environmental Protection Agency (2006) Method-8330B. Nitroaromatics, nitramines, and nitrate esters by high performance liquid chromatography (HPLC).

Environmental Protection Agency (2017) Technical Fact Sheet - 2,4,6-Trinitrotoluene (TNT).

Herrmann B (2008) Untersuchungen der Transformationswege von 2,4,6-Trinitrotoluol in Oberflächengewässern und deren Nutzen als natürliche Schadstoffminderungsprozesse an einem ehemaligen Rüstungsstandort. Dissertation, Philipps-Universität

Jiang G (2010) Simultaneous UHPLC/MS Analyses of Explosive Compounds. Thermo Scientific

Kostiainen R, Kauppila TJ (2009) Effect of eluent on the ionization process in liquid chromatography-mass spectrometry. *J Chromatogr A* 1216(4):685–699. doi: 10.1016/j.chroma.2008.08.095

Küchler F (2011) Probennahme und Qualitätssicherungsmaßnahmen bei Bodenkontaminationen mit sprengstofftypischen Verbindungen. Dissertation, Freie Universität Berlin

Landesamt für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg (2015) Arbeitshilfe Grundwasserkontaminationen mit sprengstofftypischen Verbindungen im Land Brandenburg. Behandlung, Aufnahmemechanismen, Abbauverhalten Stufe IB - Umsetzung der Literaturrecherche und Erarbeitung vertiefender Grundlagen -. Fachinformation des LUGV. Altlastenbearbeitung im Land Brandenburg, Potsdam

Leito I, Krueve A, Rebane R, Oldekop M-L, Evard H, Herodes K, Kipper K, Helm I (2017) LC-MS Method Validation. Online Course. https://sisu.ut.ee/lcms_method_validation/course-introduction. Accessed 13 Nov 2017

Monteil-Rivera F, Halasz A, Groom C, Zhao J-S, Thiboutot S (2009) Fate and Transport of Explosives in the Environment. In: Sunahara GI, Lotufo G, Hawari J, Kuperman RG (eds) *Ecotoxicology of explosives*. Taylor & Francis, Boca Raton, ISBN: 9781420004342, pp 5–33

Perr JM, Furton KG, Almirall JR (2005) Gas chromatography positive chemical ionization and tandem mass spectrometry for the analysis of organic high explosives. *Talanta* 67(2):430–436. doi: 10.1016/j.talanta.2005.01.035

Song Y, Chen H, Cooks RG (2005) Reactivity of acetonide anion with nitroaromatics. An atmospheric pressure chemical ionization study. *Rapid Commun. Mass Spectrom.* 19(23):3493–3499. doi: 10.1002/rcm.2206

Thurman EM, Ferrer I (2012) Adapting EPA Method 8330B for Analysis of Explosives in Water to SPE and LC/MS/MS. Application Note 5991-0676EN, Colorado

Via SM, Zinnert JC (2016) Impacts of explosive compounds on vegetation. A need for community scale investigations. *Environ Pollut* 208(Pt B):495–505. doi: 10.1016/j.envpol.2015.10.020

AUTOREN

Prof. Dr. Marcus Frohme

Liane Kober, M. Sc.
Molekulare Biotechnologie und Funktionelle Genomik
Technische Hochschule Wildau

Christian Hanschke, M. Sc.
terracon – Laboratorium für Umwelt- und
Pestizidanalytik GmbH

Prof. Dr. Rainer Macholz
Prof. Dr. Rainer Macholz Umweltprojekte GmbH

E-Mail für Korrespondenz:
marcus.frohme@th-wildau.de



Biohybride Architekturen für eine effiziente Umwandlung von Licht in elektrische Energie durch Integration von Photosystem I in skalierbare makroporöse 3D-Elektroden

Kai Stieger, Sven Christian Feifel, Heiko Lokstein, Mahdi Hejazi, Athina Zouni, Fred Lisdat*

Zusammenfassung

Die Kombination von fortschrittlichen Materialien und kontrolliertem Oberflächendesign mit komplexen Proteinen aus der natürlichen Photosynthese ist derzeit eines der Hauptthemen bei der Entwicklung von Biohybridsystemen und Biophotovoltaik. In dieser Studie werden transparente makroporöse Indium-Zinn-Oxid-(μ ITO-) Elektroden mit dem trimeren Superkomplex Photosystem I (PSI) aus dem Cyanobakterium *Thermosynechococcus elongatus* sowie dem kleinen Redoxprotein Cytochrom *c* (Cyt *c*) kombiniert, um neuartige und effiziente biohybride Photokathoden herzustellen. Mit diesen bis zu 40 μ m hohen 3D-Strukturen können beide Proteine in einer annähernden Monolage abgeschieden werden und die elektrische Kommunikation mit der Elektrode kann erzielt werden. Der generierte Photostrom folgt dabei linear der kontrollierbaren Schichtdicke der μ ITO-Elektrode, wobei Stromdichten von bis zu 150 μ A cm^{-2} erhalten werden. Eine effiziente elektrische Kopplung der Proteine kann durch die hohe interne Quanteneffizienz von 30 % gezeigt werden.

Abstract

The combination of advanced materials and a controlled surface design with complex proteins from natural photosynthesis is currently one of the major topics in the development of biohybrid systems and biophotovoltaic devices. In this study, transparent macroporous indium tin oxide (μ ITO) electrodes are combined with the trimeric supercomplex, Photosystem I (PSI) from the cyanobacterium *Thermosynechococcus elongatus*, and the small redox protein cytochrome *c* (cyt *c*) to create novel and efficient biohybrid photocathodes. With these 3D structures up to 40 μ m in size, both proteins can be deposited in a monolayer fashion and electrical communication with the electrode can be established. The generated photocurrent linearly follows the controllable layer thickness of the μ ITO electrode up to 40 μ m, whereby current densities of up to 150 μ A cm^{-2} are obtained. An efficient electrical coupling of the proteins can be demonstrated by the high internal quantum efficiency of 30 %.

Einleitung

Der Aufbau und die Entwicklung von Photobiohybrid-Elektroden aus Schlüsselkomponenten der natürlichen Photosynthese – vor allem aus den Proteinkomplexen der Lichtenergieumwandlung – sind in den letzten Jahren verstärkt vorangetrieben worden (Czechowski et al. 2014, Sassolas et al. 2012). Diese Biohybrid-Elektroden eignen sich für mögliche zukünftige Anwendungen wie photoschaltbare Biosensoren oder für photokatalytische oder photovoltaische Systeme und bilden die Grundlage einer biobasierten erneuerbaren Wirtschaft (Badura et al. 2011a; Plumeré

2012; Leech et al. 2012; Dominguez-Benetton et al. 2013; Kothe et al. 2013; Gordiichuk et al. 2014; Operamolla et al. 2015).

Von der Natur lernend, sind gerade die Licht in Ladungsträger umwandelnden Proteine der oxygenen Photosynthese von Pflanzen und Cyanobakterien von großem Interesse für die Konstruktion von neuartigen funktionellen Systemen (Wang et al. 2013). Einer der vielversprechendsten lichtumwandelnden Proteinkomplexe ist das Photosystem I (PSI), aufgrund seiner hohen Quanteneffizienz (~100 %), einer schnellen und stabilen Ladungstrennung und einer effektiven spektralen Überlappung mit dem Sonnenlicht

(Nelson & Yocum 2006; Wang et al. 2013). Im thermophilen Cyanobakterium *Thermosynechococcus elongatus* (*T. elongatus*) liegt PSI als trimerer Pigment-Protein-Superkomplex vor, der pro monomerer Untereinheit aus 12 unterschiedlichen Proteinuntereinheiten besteht sowie 96 Chlorophyll *a* (Chl *a*) und 22 Carotinoide beherbergt. Die meisten Chl dienen als lichtsammelnde Antennenpigmente, während 6 Chl die Elektronentransportkette formieren (Jordan et al. 2001). Im PSI erfolgt die Ladungstrennung am luminalen Pigmentdimer, Chl *a* / Chl *a*' (P_{700}), was schließlich zu einer Reduktion des stromal angeordneten terminalen Eisen-Schwefel-Clusters (F_B) führt (Díaz-

Quintana et al. 1998; Grotjohann & Fromme 2005). Die lichtinduzierten Elektronen-Loch-Paare werden im natürlichen System über Cytochrom c_c (Cyt c_c) aufgefüllt, das P_{700} reduziert – die Oxidation von PSI erfolgt durch Ferredoxin (Fdx) am F_B -Cluster (Cramer et al. 2006).

Die effektive elektrische Kontaktierung von PSI mit verschiedenen Elektrodenstrukturen und Materialien ist von fundamentaler Bedeutung für die Generierung einer funktionellen photobiohybriden Elektrode mit hoher Photostromausbeute (Nguyen & Bruce 2014). Eine Vielzahl von Strategien wurde bereits veröffentlicht, die unterschiedliche Oberflächendesigns und eine unterschiedliche Oberflächenchemie verwenden (Ko et al. 2004; Kincaid et al. 2006; Ciobanu et al. 2007; Carmeli et al. 2007; Grimme et al. 2008, 2009; Yan et al. 2012; Manocchi et al. 2013). Eine deutliche Verbesserung der Elektrodenleistung erfolgt, wenn elektrische Signalketten mit Elektronen-Shuttle-Systemen oder leitfähigen Molekülen verwendet wurden (Terasaki et al. 2009; Yehezkeli et al. 2010; Efrati et al. 2013; Stieger et al. 2014; Feifel et al. 2015).

Um die Einschränkungen von 2D-Anordnungen zu überwinden und um höhere Photoströme je geometrischer Elektrodenfläche zu erzeugen, wurden verschiedene Strategien entwickelt, die vorwiegend in drei Gruppen aufgeteilt werden können: Multischicht-Architekturen (Ciesielski et al. 2010; LeBlanc et al. 2012, 2014; Yehezkeli et al. 2013; Ocakoglu et al. 2014; Stieger et al. 2016), 3D-Polymergele (Badura et al. 2011a; Hartmann et al. 2014; Kothe et al. 2014; Baker et al. 2014; Gizzie et al. 2015; Zhao et al. 2015) und 3D-Elektrodenoberflächen (Terasaki et al. 2006; Ciesielski et al. 2008; Yu et al. 2015). Besonders in der letztgenannten Gruppe kann ein großes Anwendungspotential erkannt werden, da sich Einschränkungen des Elektronentransports in PSI-Multischicht-Architekturen aufgrund langer Elektronentransferwege umgehen lassen. Lichtinduzierte Ladungsträger können direkt in ein hochleitfähiges Material injiziert werden, ohne auf eine planare Fläche beschränkt zu sein. Photoaktive PSI-haltige 3D-Elektroden wurden daher entwickelt – oftmals mit Halbleitermaterialien, wie z. B. ZnO/TiO₂-

Nanodrähten (Mershin et al. 2012) oder nanostrukturierten TiO₂-Säulen (Shah et al. 2015). Darüber hinaus konnten bereits andere lichtsammelnde Komponenten wie das Bakterienreaktionszentrum – Lichtsammelkomplex 1 (RC-LH1) mit makroporösen Silberelektroden kontaktiert werden (Friebe et al. 2016).

In dieser Studie nutzen wir die Eigenschaften einer makroporösen Indium-Zinn-Oxid-Elektrode (μ ITO). Transparente leitende Oxide (TCO) bieten den Vorteil einer hohen Transparenz bei ausreichender Leitfähigkeit. Eine direkte Elektrochemie großer Proteine an TCOs ist oftmals schwer zu realisieren. Die Ursachen dafür können vielfältig sein, wie z. B. unpassende chemische Oberflächengruppen, eine niedrige intrinsische Ladungsträgerdichte oder geringe Elektronentunnelnraten. Durch eine geeignete Oberflächenmodifikation wurden jedoch effiziente funktionelle Systeme mit Enzymen nachgewiesen (Frasca et al. 2013; Sarauli et al. 2014a, b). Zusätzlich konnte Photosystem II (PSII) funktional auf solchen Oberflächen immobilisiert werden (Kato et al. 2012; Mersch et al. 2015).

In dieser Studie verwenden wir Cytochrom c (Cyt c) als molekulares Netzwerk für die elektrische Kopplung von PSI-Molekülen mit der Elektrode. Bereits zuvor konnten wir dieses Kontaktierungssystem in Form einer Mono- und Multischicht-Architektur vorstellen (Stieger et al. 2014, 2016). Cyt c adsorbiert auf planarem (El Kasmi et al. 2002; Araci et al. 2008), meso- (Frasca et al. 2010; Liu et al. 2014) und nanostrukturiertem (Schaming et al. 2012) ITO und zeigt eine ausreichend hohe heterogene Elektronentransfergeschwindigkeitskonstante (k_h) auf diesen Materialien. Als logische Konsequenz kombinieren wir das Cyt- c -PSI-System mit einer makroporösen Indium-Zinnoxid-Elektrode (μ ITO), um eine Photobiokathode mit höherer Leistung zu konstruieren. Wir charakterisieren die (photo-) elektrochemischen Eigenschaften der Elektrode hinsichtlich ihrer Effizienz und Skalierbarkeit sowie die Möglichkeiten zur Leistungsverbesserung der Licht-zu-Strom-Umwandlung.

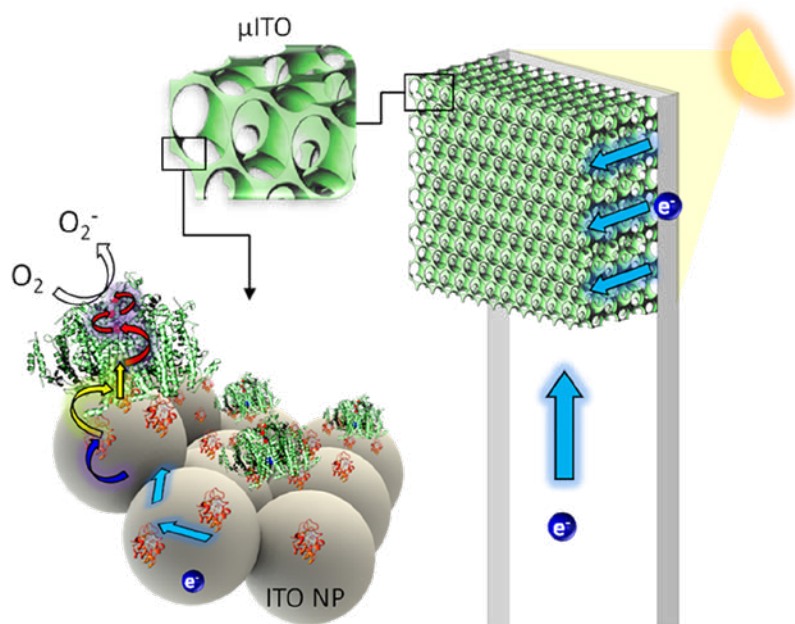


Abb. 1) Schematische Darstellung einer μ ITO-Elektrode mit integriertem Photosystem I (PSI) und Cytochrom c (Cyt c). Die μ ITO-Struktur zeigt eine invers opale makroporöse Struktur mit nanopartikulärer Oberflächenrauigkeit. Cyt c bindet an die Oberfläche und ermöglicht die elektrische Kontaktierung von PSI zur μ ITO-Elektrodenoberfläche. Nach der Lichtanregung fließen Elektronen aus der Basis-ITO-Elektrode in die μ ITO-Struktur (bestehend aus gesinterten ITO-Nanopartikeln [ITO NP]) weiter zu Cyt c , das anschließend PSI reduziert. Das photoangeregte Elektron im PSI kann auf molekularen Sauerstoff übertragen werden. Hellblaue Pfeile zeigen den intrinsischen Elektronentransfer in ITO, der dunkelblaue Pfeil zeigt den heterogenen Elektronentransfer, gelbe Pfeile zeigen den Interprotein-Elektronentransfer und rote Pfeile die intramolekulare Elektronentransferkaskade von PSI.

Ergebnisse und Diskussion

In dieser Studie nutzen wir die Transparenz und Leitfähigkeit von ITO und kombinieren sie mit PSI und Cyt c, um ein funktionelles Photokathodensystem zu entwickeln. In Abb. 1 werden der Elektrodenentwurf und die Elektronentransferwege gezeigt. Zur Herstellung einer dreidimensionalen μ ITO-Elektrode wird eine Mischung aus ITO-Nanopartikeln (ITO_{NP}) und Latexbeads (LB) auf ein ITO-Glas mittels Spin-Coating-Verfahren aufgebracht. Nachdem die Schichten auf der Oberfläche abgeschieden worden sind, erfolgt ein Sintervorgang bei hohen Temperaturen. Durch thermische Zersetzung der LB bildet sich eine invers opale makroporöse Struktur. Die erzeugte Hohlstruktur wird dann zunächst mit PSI inkubiert, gefolgt von einer Inkubation mit Cyt c, woraus sich dann eine grünlich gefärbte Elektrode ergibt. Nach der Belichtung wird ein kathodischer Photostrom erhalten, der bestätigt, dass Elektronen von der planaren ITO-Elektrode zu der abgeschiedenen porösen ITO-Struktur transportiert werden, wodurch das gebundene Cyt c und ferner das PSI reduziert werden. Auf der stromalen Seite des PSI können Elektronen schließlich auf einen Akzeptor in Lösung übertragen werden (hier Sauerstoff, siehe Abb. 1). Die Signalkette wird durch die Lichtanregung von PSI ein- und ausgeschaltet. Zunächst werden die μ ITO-Elektroden mit Rasterelektronenmikroskopie (REM) und zyklischer Voltammetrie (CV) charakterisiert. REM-Messungen zeigen eine regelmäßige Struktur mit kreisförmigen Löchern, die Verbindungen zu der nächsten Schicht von entfernten Latexbeads umfassen (Abb. 2). Es werden homogene Löcher mit einem Durchmesser von $640 \pm 10 \text{ nm}$ ($n = 20$) erhalten. Die Verbindungen zwischen den Schichten sind unterschiedlich groß und reichen von 200 bis 400 nm. Dies gewährleistet den Zugang zu tieferen Schichten des μ ITO auch für große Proteine wie PSI. Die μ ITO-Elektroden können mit einer unterschiedlichen Anzahl von Spin-Coating-Schritten hergestellt werden, was eine definierte Einstellung der Dicke der Elektrodenstruktur ermöglicht. Die mittlere Schichtdicke

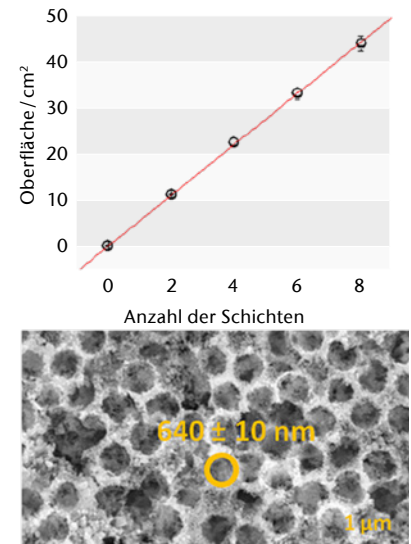
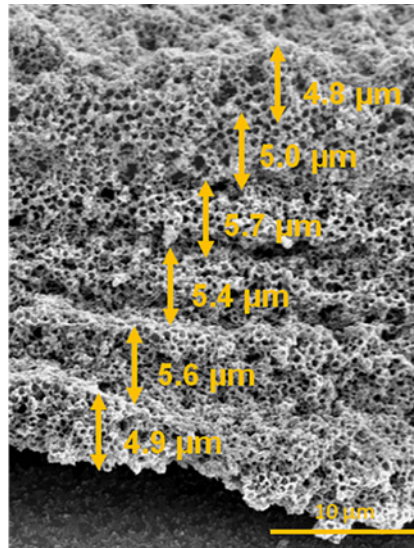


Abb. 2) Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von gesinterten μ ITO-Elektroden, hergestellt durch 6x-Spin-Coating-Schritte (6x- μ ITO). Unten links: Draufsicht auf die 6x- μ ITO-Elektrode. Nach der thermischen Entfernung von Latexbeads kann der Lochdurchmesser auf $640 \pm 10 \text{ nm}$ ($n = 20$) bestimmt werden. Rechts: Seitenansicht der 6x- μ ITO-Elektrode. Eine definierte Trennung zwischen den sukzessiv hinzugefügten Spin-Coating-Schichten mit einer Höhe von $5,2 \pm 0,4 \mu\text{m}$ / Schicht ist sichtbar. Oben links: Die elektroaktive Oberfläche nimmt in Abhängigkeit von der Anzahl der aufgetragenen Schichten zu. Die Oberfläche erhöht sich um $5,5 \pm 0,01 \text{ cm}^2$ / Schicht ($R^2 = 0,999$, $n = 4$).

für einen Spin-Coating-Schritt beträgt $5,2 \pm 0,4 \mu\text{m}$. Die Erhöhung der elektroaktiven Oberfläche kann durch CV-Messungen überprüft werden. Da die Doppelschichtkapazität mit der Elektrodenfläche im Elektrolytkontakt skaliert, wird der elektroaktive Bereich aus dem kapazitiven Strom des planaren ITO und den verschiedenen μ ITOs berechnet. Die Größe der Oberfläche skaliert linear mit der Anzahl der Schichten ($R^2 = 0,999$) mit einer Steigung von $5,5 \pm 0,01 \text{ cm}^2$ / Schicht. Die Ergebnisse aus den CV- und SEM-Messungen zeigen, dass die Oberfläche und die Höhe der μ ITO-Elektroden direkt über die Anzahl der abgeschiedenen Schichten ohne Limitierungen gesteuert werden können. Darüber hinaus sind strukturelle Eigenschaften wie Lochdurchmesser, Schichtverbindungen und Gleichmäßigkeit in allen erzeugten Elektroden hoch konserviert.

Photoelektrochemische Eigenschaften von μ ITO-PSI-Cyt-c-Elektroden

Im Rahmen der Arbeit wurden verschiedene Strategien zur Kombination von PSI und Cyt c mit der 3D-Elektrode untersucht. Das Verhalten dieser Elektroden unter Beleuchtung wurde als Erfolgskriterium verwendet. Neben den Ansätzen der Inkubation der Elektroden in Lösung und des Tropfengusses auf der Struktur wurde die

Reihenfolge der Proteininkubationen und der Proteinkonzentration variiert. Die höchste Photostromdichte kann erreicht werden, wenn das folgende Herstellungsverfahren angewendet wird: Zuerst wird eine konzentrierte PSI-Lösung ($> 20 \mu\text{M}$) auf die Elektrode aufgetropft und für einige Minuten inkubiert, dann wird die Elektrode mit Phosphatpuffer gewaschen. Im nächsten Schritt wird eine 1-mM-Cyt-c-Lösung aufgetropft und für einige Minuten inkubiert, gefolgt von Waschen mit Phosphatpuffer. Nach den Inkubationsschritten zeigt die grünliche Farbe der Elektrode bereits die Bindung von PSI an die μ ITO-Oberfläche an. Der zweite Inkubationsschritt mit Cyt c sorgt für die Bindung des Redoxproteins an PSI und die μ ITO-Oberfläche, was zu einer Verbindung von PSI mit der Elektrode über Cyt c führt. Um den Elektronentransfermechanismus einer solchen μ ITO-PSI-Cyt-c-Elektrode aufzuklären, wurden CV-Experimente durchgeführt. Sie zeigen die direkte Elektrochemie von Cyt c an der μ ITO-Elektrode (Daten nicht gezeigt), die vergleichbar mit Ergebnissen an anderen porösen ITO-Elektroden erhalten wurden (Frasca et al. 2010). Klare Oxidations/Reduktionspeaks sind mit einer Peakseparation von 80 mV und einer vollen Peakbreite bei einer halbmaximalen Peakbreite von 93 mV sichtbar, was als quasi-reversibler heterogener

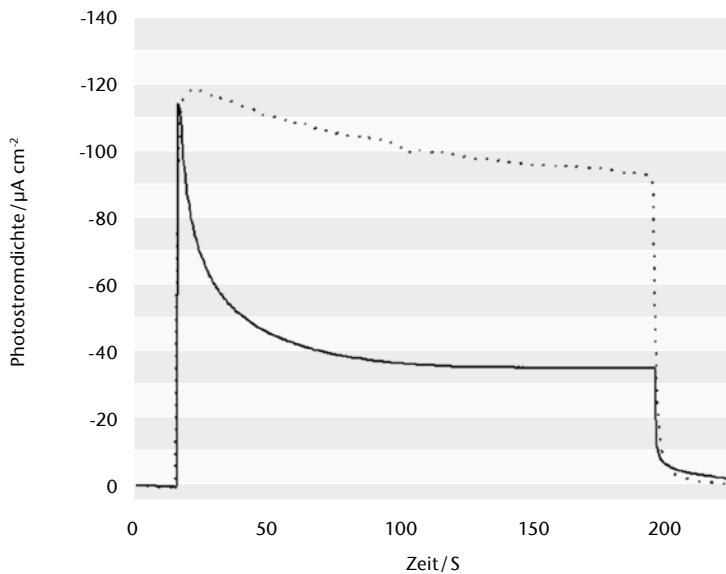


Abb. 3) Photostromdichte einer 6x-µITO-PSI-Cyt-c-Elektrode. Die Experimente wurden bei Raumtemperatur in Phosphatpuffer (5 mM, pH 7) unter Verwendung von weißem Licht (20 mW cm⁻², 3 min) bei einem Potential von -100 mV vs. Ag|AgCl unter konstantem Rühren (gepunktet) und ohne (durchgezogen) durchgeführt. Geometrische Elektrodenfläche: 0,2 cm².

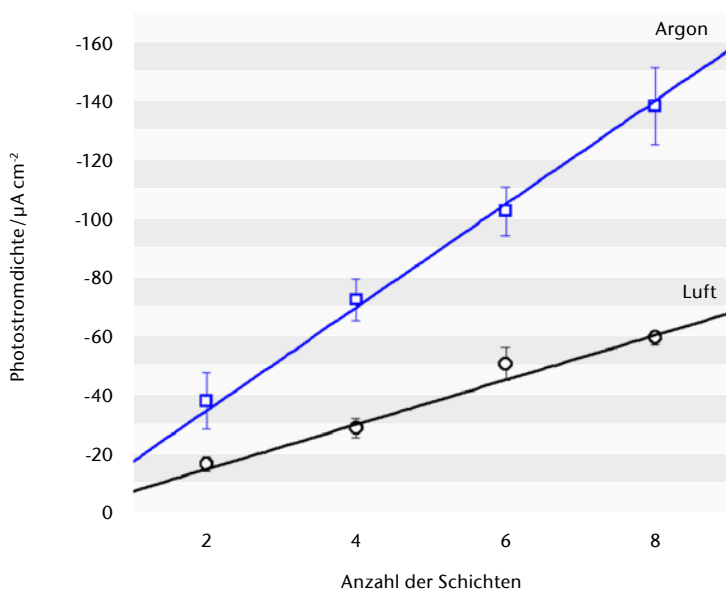


Abb. 4) Photostromdichte in Abhängigkeit von der Anzahl der aufgetragenen µITO-Schichten einer µITO-PSI-Cyt-c-Elektrode und unterschiedlichen Sinterverfahren (P_{Air} = Sintern unter Luft = Kreise, P_{Argon} = Sintern unter Argon = Quadrate). Eine lineare Beziehung zwischen dem Photostrom und der Anzahl der Schichten wird gefunden (P_{Argon}: 17,5 ± 0,4 µA cm⁻² / Schicht, R² = 0,992, P_{Air}: 7,7 ± 0,2 µA cm⁻² / Schicht, R² = 0,989). Experimente wurden bei Raumtemperatur in Phosphatpuffer (5 mM, pH 7) unter Verwendung von weißem Licht (20 mW cm⁻²) bei einem Potential von -100 mV vs. Ag|AgCl (n = 4) durchgeführt. Geometrische Elektrodenfläche: 0,2 cm².

Elektronentransfer des Redoxproteins mit der Elektrode eingeordnet werden kann (Nicholson & Shain 1964). Hierbei ist zu beachten, dass die Elektrochemie von Cyt c nicht durch die Anwesenheit von PSI in der 3D-Elektrodenstruktur gestört wird. Unter Beleuchtung wird ein deutlicher, nur kathodischer katalytischer Strom,

beginnend bei etwa 70 mV, gegen Ag|AgCl nachgewiesen (Daten nicht gezeigt). Dies deutet darauf hin, dass Cyt c durch die Elektrode reduziert wird, um Elektronen weiter auf PSI zu übertragen, wie bereits auf modifiziertem Gold nachgewiesen werden konnte (Stieger et al. 2014, 2016). Für ein besseres Verständnis der Limi-

tierungen innerhalb einer derart komplexen Struktur wurden zwei verschiedene Präparationsverfahren für die µITO-Elektrode untersucht. Die µITO-Elektroden wurden entweder unter Standard-Luftbedingungen mit anschließender Plasma-Reinigung oder unter Argon-Atmosphäre gesintert. Diese Strategie wurde gewählt, da Sauerstoff-Fehlstellen im ITO die Leitfähigkeit und Elektronenmobilität verbessern sollen (Luo et al. 2006).

Abb. 4 zeigt einen Vergleich der nach den beiden Verfahren hergestellten Elektroden. Hier sind die Photostromdichten von µITO-PSI-Cyt-c-Elektroden gegen die Anzahl der bei der Elektrodenherstellung verwendeten µITO-Schichten aufgetragen. Von 2 bis 8 Schichten steigt die Photostromdichte linear an. Das Verfahren unter Argon führt zu höheren Photoströmen (17,5 ± 0,4 µA cm⁻² / Schicht, R² = 0,992, n = 4). Das Sintern unter Luftatmosphäre ergibt ebenfalls definierte Photoströme, jedoch mit deutlich geringerem Stromertrag (7,7 ± 0,2 µA cm⁻² / Schicht, R² = 0,989, n = 4). Die Proteinkonzentration (Cyt c oder PSI) ist in beiden Strukturen sehr ähnlich und kann daher nicht der Grund für die drastische Veränderung der Photostromgröße sein. Die heterogene Elektronentransfergeschwindigkeitskonstante (k_s) von Cyt c an der µITO-Elektrode könnte möglicherweise der Grund für eine höhere Stromdichte der unter Argon hergestellten Elektroden des Photobiohybridsystems sein. Mit der Methode von Laviron (1979) wird ein k_s von 1,1 ± 0,1 s⁻¹ für Argon und 0,54 ± 0,03 s⁻¹ für Luft bestimmt. In diesem System muss folglich die Geschwindigkeit des Elektronentransfers der Elektrode auf Cyt c ein limitierender Schritt in der Elektronentransportkette sein, der durch seine Verbesserung zu höheren Photoströmen führt.

Bei den nächsten Experimenten liegt der Fokus auf der Proteinmenge, die in die µITO-Struktur für verschiedene Schichten integriert werden kann. Die Konzentration von Cyt c wurde mittels CV analysiert, während sich die PSI-Konzentration durch UV/Vis-Absorptionsmessungen bzw. aus der Chlorophyllmenge, die aus der

Elektrode extrahiert werden kann, bestimmen lässt. Abb. 5 zeigt die ermittelten Proteinkonzentrationen im Zusammenhang mit der geometrischen Fläche. Hierbei wurde eine lineare Beziehung sowohl zwischen der Cyt-c- als auch der PSI-Konzentration und der Anzahl der bei der Herstellung der Basiselektrode abgeschiedenen μ ITO-Schichten gefunden. Für PSI kann eine Konzentrationserhöhung bezogen auf die geometrische Fläche von $4,5 \pm 0,2 \text{ pmol cm}^{-2}$ / Schicht ($R^2 = 0,997$, $n = 5$) bestimmt werden, während der Wert für Cyt c $0,46 \pm 0,01 \text{ nmol cm}^{-2}$ / Schicht ($R^2 = 0,998$, $n = 5$) erreicht.

In Bezug auf die elektroaktive Oberfläche (siehe Abb. 2) wird eine Oberflächenbedeckung von $0,2 \pm 0,01 \text{ pmol cm}^{-2}$ für PSI berechnet, die nahe einer vollständigen Monolagen-Belegung liegt. Die gleiche Bestimmung für Cyt c zeigt ebenfalls eine Monolagen-Belegung von $15,5 \pm 0,4 \text{ pmol cm}^{-2}$. Diese Werte belegen, dass beide Proteine die gesamte 3D-Struktur durchdringen können, um so die volle elektroaktive Oberfläche der Elektrode zu nutzen. Die Elektronentransfereffizienz pro Molekül beschreibt die Umsatzzahl (T_e). T_e ist die Anzahl der Elektronen, die von jedem einzelnen Protein pro Sekunde übertragen werden. Das Ergebnis dieser Analyse ist in Abb. 5 dargestellt. Ab mindestens 4x- μ ITO-Schichten wird T_e für beide Proteine konstant, mit einem Wert von $0,42 \pm 0,01 \text{ e}^- \text{ Cyt c}^{-1} \text{ s}^{-1}$ und $35 \pm 3 \text{ e}^- \text{ PSI}^{-1} \text{ s}^{-1}$.

Photophysikalische Eigenschaften von μ ITO-PSI-Cyt-c-Elektroden

In diesem Abschnitt charakterisieren wir die photophysikalischen Eigenschaften der μ ITO-PSI-Cyt-c-Elektrode, um ihr Potential als effiziente, biohybride und transparente Photokathode zu demonstrieren. In Abb. 6 ist die Photostromdichte einer 6x- μ ITO-PSI-Cyt-c-Elektrode gegen die Lichtintensität aufgetragen. Die Michaelis-Menten-Gleichung kann für eine Auswertung der experimentellen Daten verwendet werden. Die einfallenden Photonen dienen als Substrat für das photoaktive PSI. Die Lichtintensität bei halbem Maximum (K_M) ergibt $2,6 \pm 0,2 \text{ mW cm}^{-2}$, und ein maximales Photostrom (J_{max}) von $148 \pm 2 \mu\text{A cm}^{-2}$ wird bestimmt. Die Kooperativität (n) der Lichtabhängigkeit beträgt $1,0 \pm 0,1$. Dies bedeutet, dass die Anregung des PSI durch Photonen in Form paralleler, unabhängiger Einzelereignisse stattfindet. Der aus diesen Experimenten abgeleitete K_M -Wert ist dem eines Cyt-c-/PSI-Monoschichtsystems auf planaren Goldelektroden sehr ähnlich (Stieger et al. 2014) und um mehr als ein Faktor von 2 höher als bei einem Multischichtaufbau (Stieger et al. 2016).

Als nächstes Experiment wurde ein Photoaktionspektrum gemessen und mit dem Absorptionsspektrum von PSI in Lösung und immobilisiert in der μ ITO-Struktur verglichen. Abb. 7 zeigt die auf den Peak bei 680 nm normierten Spektren. Das Photoaktionspektrum folgt der gesamten Wellenlänge

genverteilung von PSI in Lösung sowie für eine 6x- μ ITO-PSI-Cyt-c-Elektrode. Peaks werden bei 680, 620 und 440 nm beobachtet, die jeweils der Q_y , Q_x und der Soret-Bande von Chlorophyll a zuzuordnen sind (Müh & Zouni 2005). Aufgrund der Streuung und der Heterogenität von oberflächenassoziierten Proteinen ist die Absorption in der typischen Grünlucke des PSI der μ ITO-PSI-Cyt-c-Elektrode im Vergleich mit in Lösung befindlichen Proteinen höher. Bei kürzeren Wellenlängen verringert sich der Photostrom analog zum Absorptionsverhalten. Aufgrund der anderen immobilisierten Komponente Cyt c und der hohen Proteinbeladung senken die Soret-Absorptionen bei 410 nm (ferri) und 416 nm (ferro) die effektive Photonen-zu-Ladungsträger-Umwandlung von PSI. Aus den Transmissionsspektren von ITO und μ ITO ist eine Abnahme der Transmission über das sichtbare Lichtspektrum bei kürzeren Wellenlängen erkennbar. Werden beide Spektren verglichen, reduziert sich die Transmission bei 680 nm von 86 % auf 11 % für die 3D-Elektrode (Daten nicht gezeigt). Dies deutet auf einen erhöhten Streueffekt im μ ITO hin.

Die Quanteneffizienz wurde für verschiedene Lichtintensitäten der μ ITO-PSI-Cyt-c-Elektrode berechnet. Hierbei wird die einfallende Licht-zu-Strom-Effizienz als externe Quanteneffizienz (EQE) bezeichnet und ein Spitzenwert von etwa 11 % ($6,6 \%$ am apparenten K_M) bestimmt. Die interne Quanteneffizienz (IQE) repräsentiert das

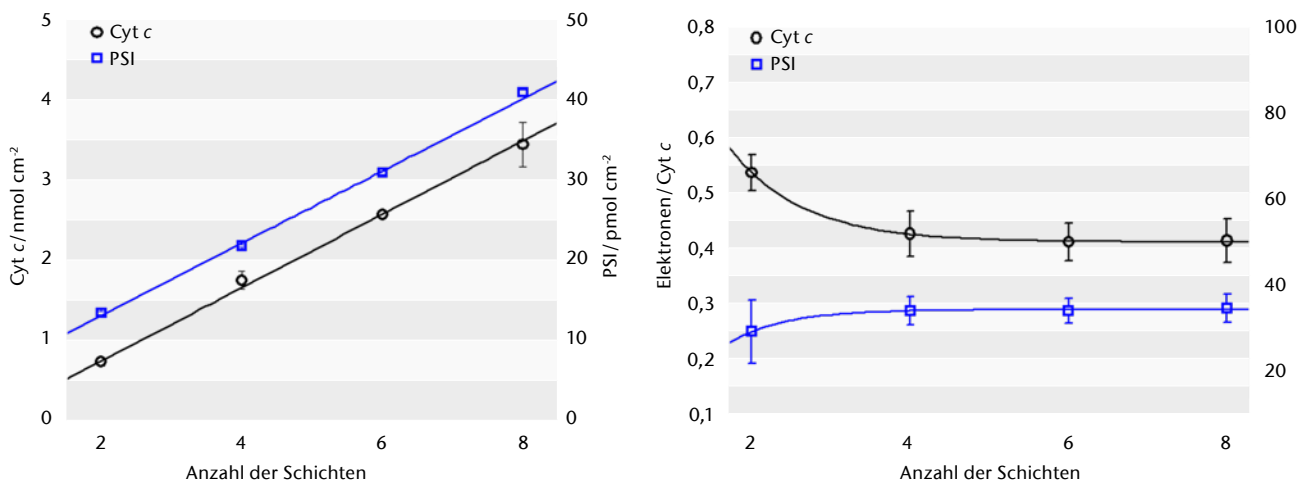


Abb. 5) Proteinkonzentration (links) und Umsatzzahl (rechts) in Abhängigkeit von der Anzahl der μ ITO-Schichten. Es kann eine lineare Beziehung zwischen der Proteinmenge und der Anzahl der Schichten gefunden werden (PSI: $4,5 \pm 0,2 \text{ pmol cm}^{-2}$ / Schicht, $R^2 = 0,997$; Cyt c: $0,46 \pm 0,01 \text{ nmol cm}^{-2}$ / Schicht, $R^2 = 0,998$; $n = 4$). Geometrische Elektrodenfläche: $0,2 \text{ cm}^2$.

Verhältnis zwischen der Anzahl der absorbierten Photonen zu der Anzahl der erzeugten Ladungsträger in einer gegebenen Zeit. Die Anzahl absorbiert Photonen kann ferner aus dem Absorptionsspektrum einer μ ITO-PSI-Cyt-c-Elektrode und dem Lichtquellspektrum berechnet werden. Die Berechnung berücksichtigt nicht, dass aufgrund der Lichtstreuung der mesoporösen Struktur die reale Absorption der Elektrode geringer ist. Eine Auftragung der IQE gegen die Lichtleistung zeigt einen Spitzenwert bei niedrigen Lichtintensitäten von etwa 30 % (und 18 % am apparenten K_M). Diese Werte stellen momentan eine der höchsten gemessenen Quanteneffizienzen von PSI-Elektroden dar (Yehezkeili et al. 2010; Badura et al. 2011a; Gordiuchuk et al. 2014; Beam et al. 2015; Gizzie et al. 2015; Stieger et al. 2016).

Schlussfolgerungen

In dieser Studie wurde eine skalierbare mesoporöse 3D-Elektrodenstruktur erfolgreich mit PSI kombiniert, welches mithilfe des Redoxproteins Cyt c elektrisch kontaktiert wird und zu einer hocheffizienten Photokathode führt. Die Experimente deuten auf eine lineare Skalierbarkeit des Photostroms über verschiedene Schichtdicken der μ ITO-Elektrode bis zu 40 μ m hin. Die Dicke des μ ITO kann bei der Präparation der

Elektrode durch die Anzahl der Spin-Coating-Schritte leicht und reproduzierbar kontrolliert werden, während die elektroaktive Oberfläche der Dicke der 3D-Struktur linear folgt. Durch die schnelle und einfache Präparation von μ ITO lässt sich die Produktionsgeschwindigkeit solcher Elektroden im Vergleich zu anderen Präparationsprotokollen deutlich erhöhen. Darüber hi-

naus ermöglicht das Studium verschiedener Fertigungsverfahren ein tieferes Verständnis der Funktionalität und der limitierenden Elektronentransferschritte der Photobiohybridstruktur. Ferner können PSI und Cyt c gut in die 3D-Elektrodenstruktur integriert werden. Bemerkenswert ist, dass die gesamte innere Elektrodenoberfläche zur Proteinimmobilisierung und Pho-

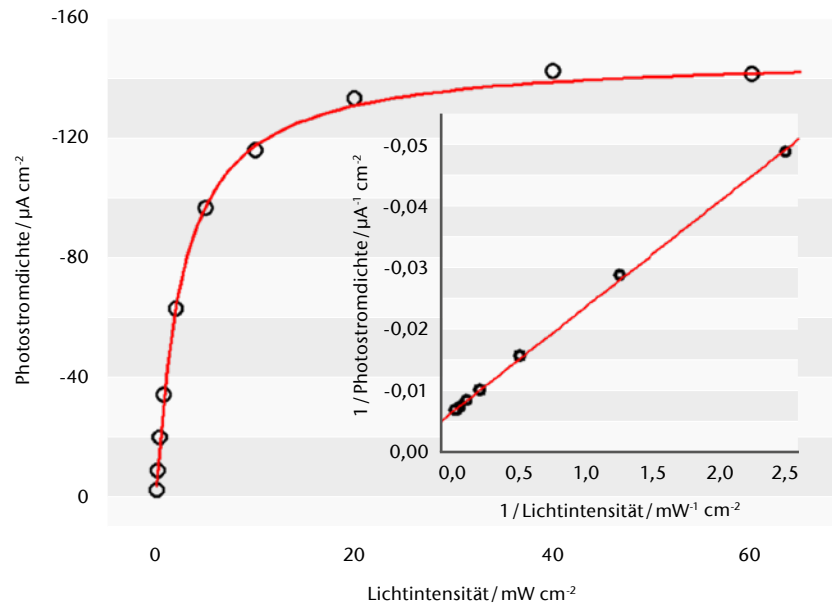


Abb. 6) Photostromdichte einer 6x- μ ITO-PSI-Cyt-c-Elektrode in Abhängigkeit von der Beleuchtungsintensität. Die Daten wurden durch Regression mit der Michaelis-Menten-Gleichung ($K_M = 2,6 \pm 0,2 \text{ mW cm}^{-2}$, $J_{max} = 148 \pm 2 \mu\text{A cm}^{-2}$, $n = 1,0 \pm 0,1$, $R^2 = 0,998$) angepasst. Einsatz: Lineweaver-Burk Plot der gleichen Daten. Experimente wurden bei Raumtemperatur in Phosphatpuffer (5 mM, pH 7) unter Verwendung von weißem Licht bei einem Potential von $-100 \text{ mV vs. Ag|AgCl}$ ($n = 3$) durchgeführt. Geometrische Elektrodenfläche: $0,2 \text{ cm}^2$.

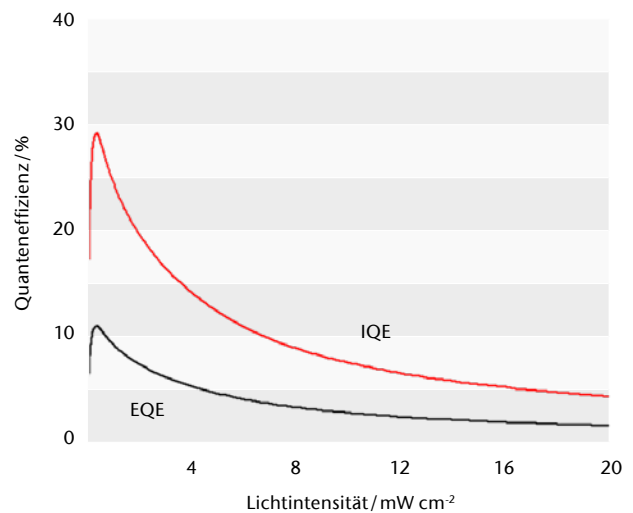
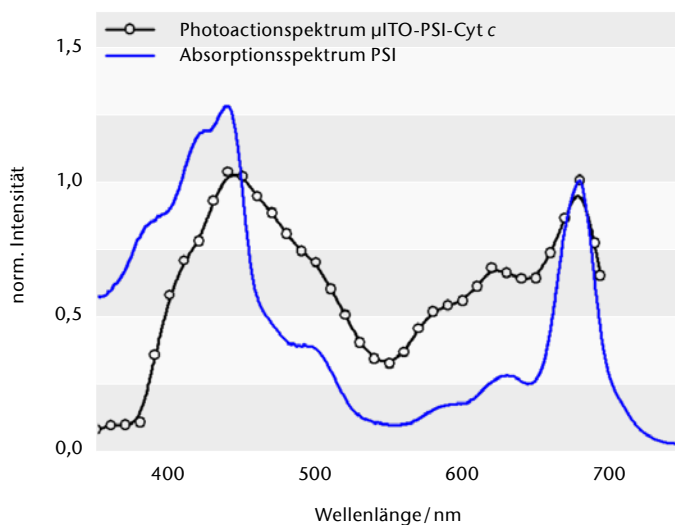


Abb. 7) (Links) Photoaktionspektrum einer 6x- μ ITO-PSI-Cyt-c-Elektrode im Vergleich zum Absorptionsspektrum von PSI in Phosphatpuffer (5 mM, pH 7), normalisiert auf den Peak bei 680 nm. Das Photoaktionspektrum wurde mit monochromatischem Licht (Bandbreite 15 nm, Intensitäten $< 10 \text{ mW cm}^{-2}$) in aerobem Phosphatpuffer (5 mM, pH 7) erhalten. Die Spektren sind die Mittelwerte von drei unabhängigen Messungen. (Rechts) Externe (EQE) und interne (IQE) Quanteneffizienzen einer 6x- μ ITO-PSI-Cyt-c-Elektrode, berechnet für unterschiedliche Lichtintensitäten.

tostrombildung genutzt werden kann. Auf dieser Basis ist es möglich, hohe kathodische Photoströme zu erzeugen, die mit der Anzahl von μITO -Schichten skalierbar sind. Das System zeigt hohe Quanteneffizienzen und folgt den spektralen Eigenschaften von PSI. Der Biohybrid-Ansatz ermöglicht den Aufbau von komplexeren Licht zu Strom umwandelnden Elektroden, z. B. durch die Integration von weiteren Enzymen oder Nanomaterialien für die Umwandlung von Licht in chemische Energie. Die Studie zeigt außerdem, dass das Cyt-*c*-PSI-System auf eine Vielzahl von Materialien und Oberflächen aufgebracht werden kann und Photostromdichten von mehr als $150 \mu\text{A cm}^{-2}$ möglich sind.

Danksagungen

Wir bedanken uns für die Unterstützung dieser Forschung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Deutschland (Biotechnologie 2020+, Projekte: O31A154A+B).

LITERATUR

- Araci ZO, Runge AF, Doherty WJ, Saavedra SS (2008) Correlating molecular orientation distributions and electrochemical kinetics in subpopulations of an immobilized protein film. *J Am Chem Soc* 130:1572–1573. doi: 10.1021/ja710156d
- Badura A, Guschin D, Kothe T (2011a) Photocurrent generation by photosystem 1 integrated in crosslinked redox hydrogels. *Energy Environ Sci* 4:2435. doi: 10.1039/c1ee01126j
- Badura A, Kothe T, Schuhmann W, Rögner M (2011b) Wiring photosynthetic enzymes to electrodes. *Energy Environ Sci* 4:3263. doi: 10.1039/c1ee01285a
- Baker DR, Simmerman RF, Sumner JJ (2014) Photoelectrochemistry of photosystem I bound in nafion. *Langmuir* 30:13650–5. doi: 10.1021/la503132h
- Beam JC, LeBlanc G, Gizzie EA (2015) Construction of a Semiconductor-Biological Interface for Solar Energy Conversion: P-Doped Silicon/Photosystem I/Zinc Oxide. *Langmuir* 31:10002–10007. doi: 10.1021/acs.langmuir.5b02334
- Carmeli I, Frolov L, Carmeli C, Richter S (2007) Photovoltaic Activity of Photosystem I-Based Self-Assembled Monolayer. *J Am Chem Soc* 129:12352–12353. doi: 10.1021/ja073040c
- Ciesielski PN, Faulkner CJ, Irwin MT (2010) Enhanced Photocurrent Production by Photosystem I Multilayer Assemblies. *Adv Funct Mater* 20:4048–4054. doi: 10.1002/adfm.201001193
- Ciesielski PN, Scott AM, Faulkner CJ (2008) Functionalized nanoporous gold leaf electrode films for the immobilization of photosystem I. *ACS Nano* 2:2465–72. doi: 10.1021/nn800389k
- Ciobanu M, Kincaid HA, Lo V (2007) Electrochemistry and photoelectrochemistry of photosystem I adsorbed on hydroxyl-terminated monolayers. *J Electroanal Chem* 599:72–78. doi: 10.1016/j.jelechem.2006.09.019
- Cramer WA, Zhang H, Yan J (2006) Transmembrane traffic in the cytochrome b6f complex. *Annu Rev Biochem* 75:769–90. doi: 10.1146/annurev.biochem.75.103004.142756
- Czechowski N, Lokstein H, Kowalska D (2014) Large plasmonic fluorescence enhancement of cyanobacterial photosystem I coupled to silver island films. *Appl Phys Lett* 105:43701. doi: 10.1063/1.4891856
- Díaz-Quintana A, Leibl W, Bottin H, Sétif P (1998) Electron transfer in photosystem I reaction centers follows a linear pathway in which iron-sulfur cluster FB is the immediate electron donor to soluble ferredoxin. *Biochemistry* 37:3429–39. doi: 10.1021/bi972469i
- Dominguez-Benetton X, Srikanth S, Satyawali Y (2013) Enzymatic Electrolysis: An Overview on the Progress in Enzyme-Electrodes for the Production of Electricity, Fuels and Chemicals. *J Microb Biochem Technol* 5:67. doi: 10.4172/1948-5948.S6-007
- Efrati A, Tel-Vered R, Michaeli D (2013) Cytochrome c-coupled photosystem I and photosystem II (PSI/PSII) photo-bioelectrochemical cells. *Energy Environ Sci* 6:2950. doi: 10.1039/c3ee41568f
- El Kasmi A, Leopold MC, Galligan R (2002) Adsorptive immobilization of cytochrome c on indium/tin oxide (ITO): Electrochemical evidence for electron transfer-induced conformational changes. *Electrochem Commun* 4:177–181. doi: 10.1016/S1388-2481(01)00299-5
- Feifel SC, Stieger KR, Lokstein H (2015) High photocurrent generation by photosystem I on artificial interfaces composed of π -system-modified graphene. *J Mater Chem A* 3:12188–12196. doi: 10.1039/C5TA00656B
- Frasca S, Molero Milan A, Guiet A (2013) Bioelectrocatalysis at mesoporous antimony doped tin oxide electrodes - Electrochemical characterization and direct enzyme communication. *Electrochim Acta* 110:172–180. doi: 10.1016/j.electacta.2013.03.144
- Frasca S, von Graberg T, Feng JJ (2010) Mesoporous Indium Tin Oxide as a Novel Platform for Bioelectronics. *ChemCatChem* 2:839–845. doi: 10.1002/cctc.201000047
- Friebe VM, Delgado JD, Swainsbury DJK (2016) Plasmon-Enhanced Photocurrent of Photosynthetic Pigment Proteins on Nanoporous Silver. *Adv Funct Mater* 26:285–292. doi: 10.1002/adfm.201504020
- Gizzie EA, LeBlanc G, Jennings GK, Cliff DE (2015) Electrochemical Preparation of Photosystem I–Polyaniline Composite Films for Biohybrid Solar Energy Conversion. *ACS Appl Mater Interfaces* 7:9328–9335. doi: 10.1021/acsami.5b01065
- Gordjiuch PI, Wetzelaer G-JAH, Rimmerman D (2014) Solid-State Biophotovoltaic Cells Containing Photosystem I. *Adv Mater* 26:4863–4869. doi: 10.1002/adma.201401135
- Grimme RA, Lubner CE, Bryant DA, Golbeck JH (2008) Photosystem I/molecular wire/metal nanoparticle bioconjugates for the photocatalytic production of H₂. *J Am Chem Soc* 130:6308–9. doi: 10.1021/ja800923y
- Grimme RA, Lubner CE, Golbeck JH (2009) Maximizing H₂ production in Photosystem I/dithiol molecular wire/platinum nanoparticle bioconjugates. *Dalton Trans* 10106–13. doi: 10.1039/b909137h
- Grotjohann I, Fromme P (2005) Structure of cyanobacterial photosystem I. *Photosynth Res* 85:51–72. doi: 10.1007/s1120-005-1440-4
- Hartmann V, Kothe T, Pöller S (2014) Redox hydrogels with adjusted redox potential for improved efficiency in Z-scheme inspired biophotovoltaic cells. *Phys Chem Chem Phys* 16:11936–41. doi: 10.1039/c4cp00380b
- Jordan P, Fromme P, Witt HT (2001) Three-dimensional structure of cyanobacterial photosystem I at 2.5 Å resolution. *Nature* 411:909–17. doi: 10.1038/35082000
- Kato M, Cardona T, Rutherford AW, Reisner E (2012) Photoelectrochemical water oxidation with photosystem II integrated in a mesoporous indium-tin oxide electrode. *J Am Chem Soc* 134:8332–5. doi: 10.1021/ja301488d
- Kincaid HA, Niedringhaus T, Ciobanu M (2006) Entrapment of photosystem I within self-assembled films. *Langmuir* 22:8114–20. doi: 10.1021/la061326+
- Ko BS, Babcock B, Jennings GK (2004) Effect of Surface Composition on the Adsorption of Photosystem I onto Alkanethiolate Self-Assembled Monolayers on Gold. *Langmuir* 20:4033–38. doi: 10.1021/la0356809
- Kothe T, Plumeré N, Badura A (2013) Combination of a photosystem 1-based photocathode and a photosystem 2-based photoanode to a Z-scheme mimic for biophotovoltaic applications. *Angew Chem Int Ed Engl* 52:14233–6. doi: 10.1002/anie.201303671
- Kothe T, Pöller S, Zhao F (2014) Engineered electron-transfer chain in photosystem 1 based photocathodes outperforms electron-transfer rates in natural photosynthesis. *Chemistry* 20:11029–34. doi: 10.1002/chem.201402585
- Laviron E (1979) General expression of the linear potential sweep voltammogram in the case of diffusionless electrochemical systems. *J Electroanal Chem Interfacial Electrochem* 101:19–28. doi: 10.1016/S0022-0728(79)80075-3
- LeBlanc G, Chen G, Gizzie E (2012) Enhanced photocurrents of photosystem I films on p-doped silicon. *Adv Mater* 24:5959–62. doi: 10.1002/adma.201202794
- LeBlanc G, Gizzie E, Yang S (2014) Photosystem I Protein Films at Electrode Surfaces for Solar Energy Conversion. *Langmuir* 30:10990–11001. doi: 10.1021/la500129q
- Leech D, Kavanagh P, Schuhmann W (2012) Enzymatic fuel cells: Recent progress. *Electrochim Acta* 84:223–234. doi: 10.1016/j.electacta.2012.02.087
- Liu Y, Peters K, Mandlmeier B (2014) Electrochimica Acta Macroporous indium tin oxide electrode layers as conducting substrates for immobilization of bulky electroactive guests. *Electrochim Acta* 140:108–115. doi: 10.1016/j.electacta.2014.05.046
- Luo SN, Kono A, Nouchi N, Shoji F (2006) Effective creation of oxygen vacancies as an electron carrier source in tin-doped indium oxide films by plasma sputtering. *J Appl Phys* 100:113701. doi: 10.1063/1.2372571
- Manocchi AK, Baker DR, Pendley SS (2013) Photocurrent generation from surface assembled photosystem I on alkanethiol modified electrodes. *Langmuir* 29:2412–9. doi: 10.1021/la304477u
- Mersch D, Lee CY, Zhang JZ (2015) Wiring of Photosystem II to Hydrogenase for Photoelectrochemical Water Splitting. *J Am Chem Soc* 137:8541–9. doi: 10.1021/jacs.5b03737
- Mershin A, Matsumoto K, Kaiser L (2012) Self-assembled photosystem-I biophotovoltaics on nanostructured TiO₂ and ZnO. *Sci Rep* 2:234. doi: 10.1038/srep00234
- Müh F, Zouni A (2005) Extinction coefficients and critical solubilisation concentrations of photosystems I and II from *Thermosynechococcus elongatus*. *Biochim Biophys Acta* 1708:219–28. doi: 10.1016/j.bbabo.2005.03.005
- Nelson N, Yocum CF (2006) Structure and function of photosystems I and II. *Annu Rev Plant Biol* 57:521–65. doi: 10.1146/annurev.arplant.57.032905.105350
- Nguyen K, Bruce BD (2014) Growing green electricity: progress and strategies for use of photosystem I for sustainable photovoltaic energy conversion. *Biochim Biophys Acta* 1837:1553–66. doi: 10.1016/j.bbabo.2013.12.013

Nicholson RS, Shain I (1964) Theory of Stationary Electrode Polarography. Single Scan and Cyclic Methods Applied to Reversible, Irreversible, and Kinetic Systems. *Anal Chem* 36:706–723. doi: 10.1021/ac60210a007

Ocakoglu K, Krupnik T, van den Bosch B (2014) Photosystem I-based Biophotovoltaics on Nanostructured Hematite. *Adv Funct Mater* 24:7467–7477. doi: 10.1002/adfm.201401399

Operamolla A, Ragni R, Milano F (2015) “Garnishing” the photosynthetic bacterial reaction center for bioelectronics. *J Mater Chem C* 3:6471–6478. doi: 10.1039/C5TC00775E

Plumeré N (2012) Single molecules: A protein in the spotlight. *Nat Nanotechnol* 7:616–7. doi: 10.1038/nnano.2012.175

Sarauli D, Peters K, Xu C (2014a) 3D-electrode architectures for enhanced direct bioelectrocatalysis of pyrroloquinoline quinone-dependent glucose dehydrogenase. *ACS Appl Mater Interfaces* 6:17887–93. doi: 10.1021/am5046026

Sarauli D, Xu C, Dietzel B (2014b) A multilayered sulfonated polyaniline network with entrapped pyrroloquinoline quinone-dependent glucose dehydrogenase: tunable direct bioelectrocatalysis. *J Mater Chem B* 2:3196–3203. doi: 10.1039/c4tb00336e

Sassolas A, Blum LJ, Leca-Bouvier BD (2012) Immobilization strategies to develop enzymatic biosensors. *Biotechnol Adv* 30:489–511. doi: 10.1016/j.biotechadv.2011.09.003

Schaming D, Renault C, Tucker RT (2012) Spectroelectrochemical characterization of small hemoproteins adsorbed within nanostructured mesoporous ITO electrodes. *Langmuir* 28:14065–72. doi: 10.1021/la302913j

Shah VB, Henson WR, Chadha TS (2015) Linker-free deposition and adhesion of Photosystem I onto nanos-

structured TiO₂ for biohybrid photoelectrochemical cells. *Langmuir* 31:1675–82. doi: 10.1021/la503776b

Stieger KR, Ciornii D, Kölsch A (2016) Engineering of supramolecular photoactive protein architectures: the defined co-assembly of photosystem I and cytochrome c using a nanoscaled DNA-matrix. *Nanoscale* 8:10695–10705. doi: 10.1039/C6NR00097E

Stieger KR, Feifel SC, Lokstein H, Lisdat F (2014) Advanced unidirectional photocurrent generation via cytochrome c as reaction partner for directed assembly of photosystem I. *Phys Chem Chem Phys* 16:15667–74. doi: 10.1039/c4cp00935e

Terasaki N, Yamamoto N, Hiraga T (2009) Plugging a molecular wire into photosystem I: reconstitution of the photoelectric conversion system on a gold electrode. *Angew Chem Int Ed Engl* 48:1585–7. doi: 10.1002/anie.200805748

Terasaki N, Yamamoto N, Hiraga T (2006) Fabrication of novel photosystem I–gold nanoparticle hybrids and their photocurrent enhancement. *Thin Solid Films* 499:153–156. doi: 10.1016/j.tsf.2005.07.050

Wang F, Liu X, Willner I (2013) Integration of photoswitchable proteins, photosynthetic reaction centers and semiconductor/biomolecule hybrids with electrode supports for optobioelectronic applications. *Adv Mater* 25:349–77. doi: 10.1002/adma.201201772

Yan X, Faulkner CJ, Jennings GK, Cliffl DE (2012) Photosystem I in Langmuir-Blodgett and Langmuir-Schaefer monolayers. *Langmuir* 28:15080–6. doi: 10.1021/la302611a

Yehezkeili O, Tel-Vered R, Michaeli D (2013) Photosystem I (PSI)/Photosystem II (PSII)-based photo-bioelectrochemical cells revealing directional generation of photocurrents. *Small* 9:1–9. doi: 10.1002/smll.201300051

Yehezkeili O, Wilner OI, Tel-Vered R (2010) Generation of photocurrents by bis-aniline-cross-linked Pt nanoparticle/photosystem I composites on electrodes. *J Phys Chem B* 114:14383–8. doi: 10.1021/jp100454u

Yu D, Wang M, Zhu G (2015) Enhanced photocurrent production by bio-dyes of photosynthetic macromolecules on designed TiO₂ film. *Sci Rep* 5:9375. doi: 10.1038/srep09375

Zhao F, Conzuelo F, Hartmann V (2015) Light Induced H₂ Evolution from a Biophotocathode Based on Photosystem 1 - Pt Nanoparticles Complexes Integrated in Solvated Redox Polymers Films. *J Phys Chem B* 119:13726–31. doi: 10.1021/acs.jpcc.5b03511

AUTOREN

Prof. Dr. habil. Fred Lisdat

Dipl. NanoSc. Kai Stieger

Dr. Sven Christian Feifel

Biosystemtechnik

Technische Hochschule Wildau

Dr. Heiko Lokstein

Department of Chemical Physics and Optics

Charles University Prague, Czech Republic

Prof. Dr. Athina Zouni

Dr. Mahdi Hejazi

Institut für Biologie

Humboldt-Universität zu Berlin

E-Mail für Korrespondenz:

fred.lisdat@th-wildau.de



Image recognition of multi-perspective data for intelligent analysis of gestures and actions

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

Zusammenfassung

Das Projekt BERMUDA konnte im Januar 2015 begonnen und nach knapp drei Jahren im August 2017 erfolgreich abgeschlossen werden. Es wurden ein technischer Aufbau und eine Bildverarbeitungs- und Analysesoftware entwickelt, mit denen sich multiperspektivische Videos aufzeichnen und auswerten lassen. Basierend auf zwei in größerem Abstand gewinkelt positionierten Kameras wurden synchrone Videos sowohl im Labor als auch in realen Umgebungen aufgenommen. Die Auswertung umfasst die Hintergrundeliminierung, die Körperteilklassifikation, ein Clustering, die Zuordnung zu Personen und schließlich die Rekonstruktion der Skelette. Ausgehend von den Skeletten wurden Methoden des maschinellen Lernens zur Erkennung der Haltungen und darauf aufbauend zur Gestenerkennung entwickelt. Beispielfähig konnte die im Sicherheitskontext relevante Handlung des Schlagens mit einer Genauigkeit von 51,3% und einer Trefferquote von 60,6% erkannt werden.

Abstract

The BERMUDA project started in January 2015 and was successfully completed after less than three years in August 2017. A technical set-up and an image processing and analysis software were developed to record and evaluate multi-perspective videos. Based on two cameras, positioned relatively far from one another with tilted axes, synchronized videos were recorded in the laboratory and in real life. The evaluation comprised the background elimination, the body part classification, the clustering, the assignment to persons and eventually the reconstruction of the skeletons. Based on the skeletons, machine learning techniques were developed to recognize the poses of the persons and next for the actions performed. It was, for example, possible to detect the action of a punch, which is relevant in security issues, with a precision of 51.3% and a recall of 60.6%.

1. Introduction

The aim of the project is the automated recognition of actions in a security context, such as violent behavior in public places like airports and train stations. Therefore, 3D data of persons in videos are required. Two methods are available to achieve this, either by the use of depth images generated by infrared light patterns, e.g. Microsoft Kinect (Kinect 2 camera for Windows (Microsoft Corp., Redmond, WA, USA) with OpenNI (<http://structure.io/openni>)), or stereoscopic viewing. The latter technique was extended to multi-perspective viewing in this project. Hence it was possible to position the cameras further from each other, possibly compensating for occlusions of the persons. The image preprocessing was carried out in 2D up to

the different body parts that were detected in the images and assigned to the persons. With a triangulation of corresponding points, the 3D-skeletons of the persons in the videos were obtained. There are some methods known for the analysis of such skeletons with respect to pose recognition for one person (Andriluka et al. 2009, Buys et al. 2014, Tran & Trivedi 2008), for multiple humans (Andriluka et al. 2012, Belagiannis et al. 2014, Luo et al. 2010) and for action recognition (Bigontina et al. 2015, Laptev et al. 2008). The pose of the humans was assigned a pose letter (Zhou et al. 2016) after pose recognition. The pose recognition was done with an artificial neural network. Then, in the style of speech recognition algorithms (Rabiner 1989, Gales & Young 2007, Trentin & Gori 2003), the sequence of the poses,

i.e. letters, was analyzed by hidden Markov models (Kulić et al. 2008) to find the best fitting action or word for the action being observed. As a result, at each point in time the most probable action of the person was obtained.

2. Image preprocessing and skeleton reconstruction

The scope of image preprocessing covers all steps on 2D images up to the point of calculation of the body part joints and centers of gravity. The technical details of the camera set-up are given in section 4. The background elimination, the body part classification and the clustering were written in Java using OpenCV (OpenCV, <https://opencv.org>) and the assignment of body parts to persons and the reconstruction of the

* corresponding author

skeletons were written in Matlab (MathWorks, Natick, MA, USA). First, the humans must be found in the frames of the videos – or vice versa, the background must be eliminated. The background elimination was realized by an OpenCV implementation of Gaussian mixture-based background/foreground segmentation (Zivkovic 2004). The algorithm distinguishes three classes: background, foreground and shadow. Multiple application of the algorithm with different parameters and weightings yielded greyscale foreground probability images. Due to strongly varying light, in some cases a normalization of the image overall intensity was performed. The thresh-

olded foreground pixels were filtered by an OpenCV human detection algorithm and the remaining pixels were subjected to the body part classification.

The body part classification was done pixel-wise on each foreground pixel. The algorithm was based on a decision forest as proposed by Shotton et al. (Shotton et al. 2013). That algorithm was firstly programmed and trained as given there in 3D and secondly extended to 2D data. The 2D body part classification was based on the extraction of silhouettes (Bigontina et al. 2015) of the humans in the videos, i.e. the foreground pixels. The silhouettes were of ternary nature in the simplest case and

of greyscale nature with more runs of the background/foreground segmentation. The training of the decision forests was done with manually classified data. It took several days of computing time on a standard personal computer. The algorithms trained this way assigned one of 21 predefined body parts to each pixel (Gedat et al. 2016). The point clouds that were found for each body part were arranged into different areas of the same class by a clustering process. The clustering was done with a nearest-neighbor search. The resulting clusters were the candidates for the assignment to the skeletons.

In principle there can be more or fewer body part clusters for one body part than humans in the frames of the videos. A selection of the optimal body part clusters and the assignment to the different persons were solved with graph theoretical methods. Initially a graph was defined that describes the human skeleton (Gedat et al. 2016). The graph consists of six part-graphs, that all stem from the neck and emanate either left or right into the head, the arm and the leg, respectively. The best body part clusters of this k-shortest-disjoint paths problem were selected by an adaption of the Suurballe algorithm (Suurballe 1974) for k-shortest-disjoint paths search using a cost function based on heuristic anatomic distances of body parts (Gedat et al. 2016, 2017b).

For an improved anatomical representation, an anatomical correction of the body parts was established. For upper and lower arms and legs, the body part point clouds were processed with a principle component analysis yielding proximal and distal joints of the body parts (Gedat et al. 2016). For all other body parts, the center of gravity of the point cloud was used and shifted with a heuristic metric in medial direction to account for the superficial view of the volumes. At this point of the procedure in each of the (two) multi-perspective images, a number of skeletons had been determined in 2D. The number of skeletons was derived from the number of persons detected by the OpenCV method used for detection of humans in the images. Before the 3D skeleton reconstruction can be applied, an as-

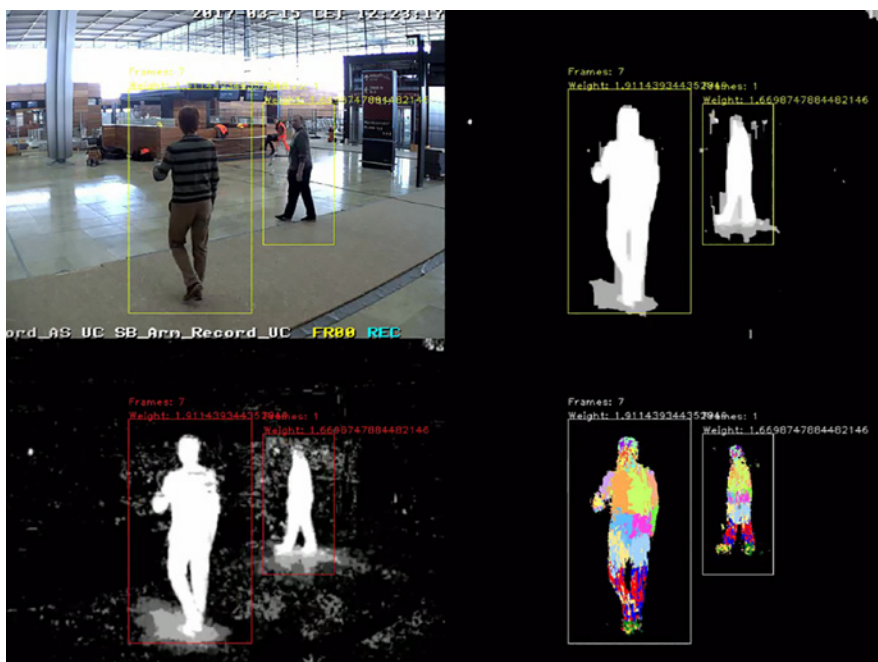


Fig. 1) Example of the preprocessing up to the 2D body part classified image (bottom right) from the BER experiment (see section 4). Original image (top left), background/foreground greyscale image (bottom left) and thresholded background/foreground image (top right). The frames are the bounding boxes from the OpenCV person detection algorithm.

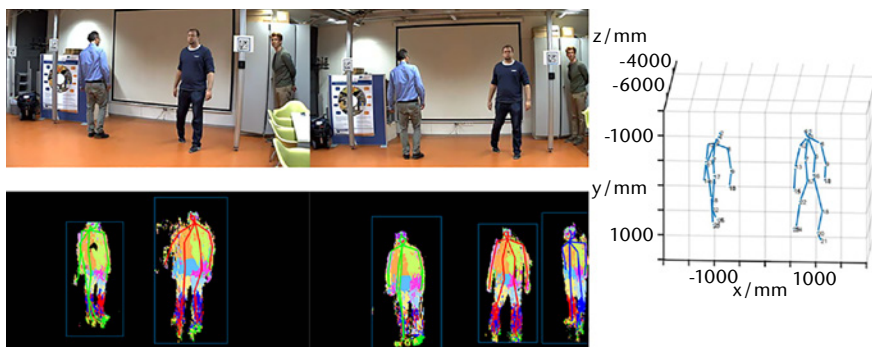


Fig. 2) Example of the skeleton reconstruction from the Lab experiment (see section 4). Left side: Top: left and right camera images. Bottom: Body part classified images with reconstructed skeletons and color code for the assignment of skeletons to persons and person detection bounding boxes. The third person was not detected in the left image. Images are cropped at top and bottom. Right side: The corresponding reconstructed 3D skeletons.

segment of the 2D-skeletons to the humans in the images had to be accomplished. This was done by an estimation of the 3D coordinates of the center of gravity of the skeletons with the height of the OpenCV human detection bounding box as body height and the intercept theorem. Then the Hungarian method, also called the Kuhn-Munkres algorithm, was applied to calculate the minimal global pairwise distance of all skeletons and the skeletons were accordingly assigned to the humans.

Now the reconstruction of the 3D-skeletons could be performed by triangulation of corresponding body part centers and joints. Therefore, the intrinsic and extrinsic matrices of the camera system must be known; see section 4.

To be able to work independently of scale and distance in the following steps, the 21 3D-skeleton coordinates were transformed to 16 angles that characterize the skeletons.

3. Pose and action recognition with machine learning methods

Our pose and action recognition works with skeleton angles as input. These can originate from any applicable first-hand data, i.e. a software model, laboratory videos, or real-life videos acquired with an arbitrary setup of 2D or 3D cameras. For pose and action recognition, Matlab was used, including the neural networks toolbox.

The pose recognition method is based upon a predefined poses alphabet (Gedat et al. 2017a). The poses alphabet is in principle infinite in size and must be adjusted to a set of expected poses in the data to be analyzed. The poses alphabet used in this study is given in Tab. 1.

For the pose recognition, an artificial neural network (ANN) was trained and applied. The ANN consisted of 32 input neurons, one hidden layer of 15 sigmoid neurons and one output layer of 10 softmax neurons (Fig. 4). The 32 input neurons correspond to the 16 skeleton angles and one flag for each angle indicating if it was present in the input vector. The 10 output neurons correspond to the ten poses present in the training data. For train-

Tab. 1: The poses alphabet. Images for each pose are given in Gedat et al. 2017a.

pose letter	pose description
a	walking – right leg in front
b	walking – left leg in front
c	punch – right arm stretched forward
d	punch – left arm stretched forward
e	hook – right arm bent forward
f	hook – left arm bent forward
g	both arms in front of body
i	walking – stand straight on left foot
j	walking – stand straight on left foot
k	stand straight
n	stand – arms bent
o	stand – hands in front of chest
p	stand – left hand in front of chest, right arm bent
q	stand – right hand in front of chest, arm bent

ing of the ANN, key frames (Zhou et al. 2016) of a MOCAP (CMU Graphics Lab Motion Capture Database, <http://mocap.cs.cmu.edu/>) software model (see Section 4) were manually classified according to the poses alphabet in Tab. 1. For the ANN, Matlab default settings were used, i.e. scaled conjugate gradient back propagation, splitting of the data into 70 % training, 15 % testing and 15 % validation on a random choice basis.

This trained ANN delivers the probabilities of the poses from the pose alphabet for any input skeleton. For further processing in the action recognition module, the most probable pose was chosen and saved as a letter in the pose sentence.

As practiced in automated speech recognition, one separate hidden Markov model (HMM) was calculated for each action that shall be detected. A HMM consists of three matrices: the start matrix, the transition matrix and the emission matrix. Given these matrices, a score for the particular action can be calculated. The three matrices

are not based on training but can be readily calculated from classified data. The training data were manually classified with respect to poses from the poses alphabet and actions performed including

- (i.) walking – left step
- (ii.) walking – right step
- (iii.) boxing – right stroke
- (iv.) standing, including various smaller motions.

The matrices were calculated according to the pseudocode in Fig. 3.

For the evaluation of the letter input from the neural network an averaging over three time steps was performed, the scores were multiplied with a heuristic duration-of-action compensating exponential function and a cut-off score was defined for each action, below which it was not further considered for that point in time. After these steps, the action with the greatest score was chosen to be the detected action.

```

for each action  $A_k$ 
  for all frames  $F_i$ 
    if  $F_i$  shows action  $A_k$ 
      if  $F_{i-1}$  not shows  $A_k$ 
        start $_k$ (state( $F_i$ ))++
      if  $F_{i+1}$  shows  $A_k$ 
        transmit $_k$ (state( $F_i$ ), state( $F_{i+1}$ ))++
        emit $_k$ (state( $F_i$ ), emission( $F_i$ ))++
  start $_k$ =start $_k$ /sum(start $_k$ )
  transmit $_k$ =transmit $_k$ /sum(transmit $_k$ )
  emit $_k$ =emit $_k$ /sum(emit $_k$ )

```

Fig. 3) Pseudocode for the calculation of the hidden Markov model matrices. Red font indicates the three matrices needed for the HMMs. The last three lines are normalization to a total probability of 1 for each matrix.

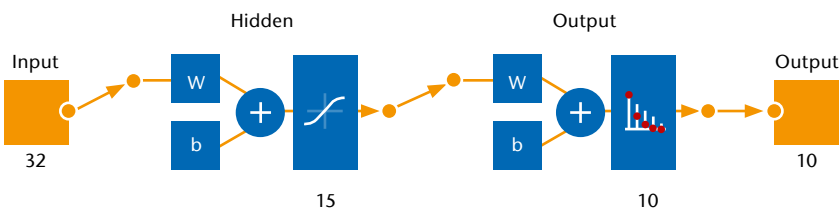


Fig. 4) Schematic Matlab representation of the used artificial neural network with the weights matrices W and biases vectors b .

4. Experiments

I. MOCAP software model

To set up the machine learning tools, a software model of human actions was rendered in Blender (The Blender Foundation, Amsterdam, The Netherlands) for selected MOCAP motions displaying strokes and walking. Therefore, the MOCAP motions, which consist of joint coordinates for each time frame, were scaled down to 3.75 fps with the software *bvhacker* (www.bvhacker.com), given a skin with the software *MakeHuman* (*MakeHuman* team, www.makehuman.org) and eventually rendered in Blender with a texture resembling the color code of the body part classification tool described above from two views in an angle of 45 degrees. For details, see Gedat et al. 2016.

For the training of the ANN 370 key frames of the MOCAP software model were manually classified with respect to the pose of the person. The performance of the training was – depending on the randomly separated training/validation/testing data – around 85 % correct pose assignments.

For the calculation of the HMM matrices 1,891 frames of the MOCAP software model were manually classified with respect to poses and actions performed. For details, see Gedat et al. 2017a.

The results for action recognition from Gedat et al. 2017a with 83.2 % precision and 83.7 % recall are very promising. However, these were achieved with a software model and not real-life data.

II. BER – Real life scenario at the Berlin airport terminal

The software was tested in a real-life scenario at the Berlin International Airport (BER) terminal during the construction period. A set-up was used consisting of two pairs of *Mobotix* (*Mobotix* AG, Langmeil, Germany) MX-S15 dual cameras, each with two L32 lenses. They were mounted pairwise on the ends of 1 m long crossbars mounted on tripods. Each of the MX-S15 was equipped with an embedded Linux operating system which communicated with a browser on a *Lenovo* X230 ThinkPad laptop via LAN-cable. The two connected L32 cameras of each MX-S15 were synchronized by the embedded camera software. The RGB image size was 640 × 480 pixels. This mobile set-up was mounted in the terminal in different arrangements with respect to view angles, distances and heights of the cameras. For each arrangement, a calibration procedure was performed with a checkerboard being recorded in roughly thirty dif-

ferent positions for calculation of the intrinsic and extrinsic matrices of the cameras with a Matlab camera calibration tool. Then a set of predetermined actions, including (i) walking, (ii) waving one hand, (iii) boxing, (iv) avoiding being hit by a stroke, were performed by one to five persons. One example of the BER session is shown in Fig. 1. The data were recorded onsite and transferred to computers in the laboratory for further analysis.

The on-site experiment at BER generated 23.7 GB of image data. The data were used to successfully calibrate the cameras in 5 of 7 set-ups, to develop and to train the 2D body part classifier, to deal with synchronization issues and to develop methods for the assignment of the skeletons to persons (see above in section 3).

Ultimately, it was not possible to satisfactorily process the data with respect to action recognition, but some key issues could be learned for the preparation of the final laboratory session: (i) varying background light must be avoided, (ii) background color similar to foreground color should be avoided (where possible), (iii) synchronization of the cameras must be improved for camera heads not connected to the same camera board, (iv) overlap of humans must be avoided, because they would be merged into one common bounding box.

III. Lab - Real life movies in the laboratory

With the knowledge obtained from the BER session, a laboratory set-up was realized that could be used for real life laboratory action recognition of punches. One pair of L32 camera lenses with a *Mobotix* MX-S15 camera was mounted in multi-perspective arrangement with an angle of approximately 30 degrees and a mutual distance of about 2 meters about 3 to 5 meters away from the spot of action to be recorded. Light from outside the laboratory was excluded by blinds. Clothing was chosen not to have the color of the background. Three volunteers performed, first separately, then jointly predetermined actions, namely, (i) standing, (ii) walking, and (iii) boxing. One example of the Lab session is shown in Fig. 2.

Six movies were recorded, the first four with one single person performing the actions for training the machine learning algorithms, the fifth with the persons performing the actions one after the other and the sixth with the persons acting at the same time. The two latter were intended for testing of the method after the training phase had been finished.

The training of the ANN with the new data yielded an accuracy of only 30 %. After ignoring left and right (i.e. accounting for symmetry), an increase to 50 % was possible. Further improvement was not possible. However, with the use of the Blender software model, trained ANN and HMM punches could be well detected in the fifth video of the Lab session. Only scenes with at least 10 consecutive valid skeletons were evaluated with respect to overlap between manual classification and calculated action. The results of the action detection are given in Tab. 2. There was some variance in the accuracy of the method with respect to the three humans in the videos. The results are given in Fig. 5.

Although the accuracy was not high enough to detect all strokes and only strokes, the results indicate that it is possible to use the proposed method for action recognition. However, further work is necessary.

5. Discussion and outlook

The action recognition with the software model (precision 83.2 % and recall 83.7 %) was very effective compared to values in previous studies. Kang and Wildes report a mean accuracy for various algorithms applied to the Human Motion Data-

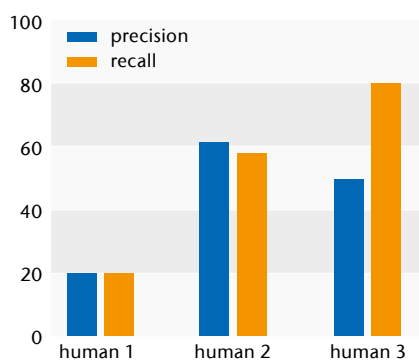


Fig. 5) The accuracy of the method for the three humans in the video.

Tab. 2: Results of the action recognition. N is the number of punches in the movie, TP is true positive, FP is false positive and FN is false negative.

N	TP	FP	FN	precision	recall
33	20	19	13	51.3	60.6

base (HMDB51, see (Kang & Wildes 2016)) of 62.7 ± 6.4 %, to the University of Central Florida data (UCF101, see (Kang & Wildes 2016)) a mean accuracy of 88.5 ± 7.4 % and to the Stanford University's Sports-1M dataset (Sports-1M, see (Kang & Wildes 2016)) of 67.0 ± 8.6 % (Kang & Wildes 2016). However, the values obtained with the software model are not directly comparable to those given by Kang and Wildes, because in this experiment idealized data were used that exhibited minimal flaws. But it can be deduced from the good accuracy that the method proposed here, combining a neural network with hidden Markov models and all preprocessing steps, is in principle capable of doing the job of action recognition.

The hidden Markov model appears to operate in the way of a smoothing filter in the time domain. For example, the pose sentence obtained from the neural network for one walking action was $\text{posesentence}\{1\} = \text{'bjiii-jaaaaajjcbnbbiiijaaaanajbbbbbiiiaa'}$ and the corresponding action recognition was $\text{actions}\{1\} = \text{'--llrrrrrrrrllllllllllrrrrrrrrrrllllllrrrr'}$ with 'l' representing a left step and 'r' a right step. Although there are some deviations from the ideal walking pose sentence, composed of sequences like b i a j b i a j and so on, the action recognition correctly gives alternating left and right steps. The two dashes at the beginning of the pose sentence are due to the averaging over three time steps.

Comparing the results of the laboratory experiment to the values given by Kang and Wildes, the accuracy of 51.3 % precision and 60.6 % recall is not far from literature values. However, a drastically minimized action repertoire – detecting only punches – was used. Idealized laboratory conditions were also applied to minimize errors. On the other hand, the unwanted conditions which should be avoided to make the system work more reliably could be learned from the BER experiment.

In the next step, the idealizations that were necessary to detect actions in the laboratory environment must be reduced by transferring the duty to the background/foreground segmentation and to the classification algorithm. The background/foreground segmentation must be independent of the color of clothing, while changing light must be compensated. The body part classification must work on silhouettes containing more than one person that can in principle not be separated in 2D images. Also, the people detection algorithm, which did not find all persons and also had several false positives, should be improved. Further, the range of actions to be detected must be enlarged step by step, implying also an extension of the poses alphabet.

The detection of strokes in the laboratory experiment was achieved with the machine learning tools trained and calculated from the software model. Novel training with the laboratory data did not result in good accuracy. On the other hand, the variance in accuracy for the three humans in the Lab experiment may indicate only restricted applicability of the models trained with artificial data. It remains to be elucidated whether learning from idealized data is superior to learning from flaw-prone real-world data.

Acknowledgement

This work was supported by the Federal Ministry of Education and Research in the program FHprofUnt, support code 13FH009PX3.

The MOCAP data used in this project was obtained from mocap.cs.cmu.edu. The database was created with funding from NSF EIA-0196217.

REFERENCES

- Andriluka M, Roth S, Schiele B (2009) Pictorial structures revisited: People detection and articulated pose estimation. In: 2009 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (CVPR Workshops), Miami, FL, pp 1014–1021. doi: 10.1109/CVPR.2009.5206754
- Andriluka M, Roth S, Schiele B (2012) Discriminative Appearance Models for Pictorial Structures. *Int J Comput Vis* 99(3):259–280. doi: 10.1007/s11263-011-0498-z
- Belagiannis V, Amin S, Andriluka M, Schiele B, Navab N, Ilic S (2014) 3D Pictorial Structures for Multiple Human Pose Estimation. In: 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Columbus, OH, USA, pp 1669–1676. doi: 10.1109/CVPR.2014.216
- Bigontina A, Herrmann M, Hoernig M, Radig B (2015) Human Body Part Classification in Monocular Soccer Images. In: Paulus D, Fuchs C, Droege D (eds) Proceedings of the 9th Open German-Russian Workshop on Pattern Recognition and Image Understanding. 2014, Koblenz. Active Vision Group, Koblenz, pp 128–131
- Buys K, Cagniard C, Baksheev A, Laet T de, Schutter J de, Pantofaru C (2014) An adaptable system for RGB-D based human body detection and pose estimation. *Journal of Visual Communication and Image Representation* 25(1):39–52. doi: 10.1016/j.jvcir.2013.03.011
- Gales M, Young S (2007) The Application of Hidden Markov Models in Speech Recognition. *FNT in Signal Processing* 1(3):195–304. doi: 10.1561/20000000004
- Gedat E, Fechner P, Fiebelkorn R, Vandenhousten R (2016) Multiple human skeleton recognition in RGB and depth images with graph theory, anatomic refinement of point clouds and machine learning. In: 2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Conference proceedings, Budapest, Hungary. IEEE, Piscataway, NJ, pp 627–631. doi: 10.1109/SMC.2016.7844310
- Gedat E, Fechner P, Fiebelkorn R, Vandenhousten R (2017a) Human action recognition with hidden Markov models and neural network derived poses. In: 2017 IEEE 15th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics (SISY), Subotica, Serbia. IEEE, pp 157–162. doi: 10.1109/SISY.2017.8080544
- Gedat E, Fechner P, Fiebelkorn R, Vandenhousten R (2017b) Szenenanalyse und Unterscheidung der Skelette mehrerer Menschen in digitalen Bildern mit Graphentheorie durch eine k-kürzeste-disjunkte-Wege-Suche. *Wissenschaftliche Beiträge* 21:31–35. doi: 10.15771/0949-8214_2017_4
- Kang SM, Wildes RP (2016) Review of Action Recognition and Detection Methods. arXiv:1610.06906 [cs.CV]. Accessed 07 Dec 2017
- Kulić D, Takano W, Nakamura Y (2008) Incremental Learning, Clustering and Hierarchy Formation of Whole Body Motion Patterns using Adaptive Hidden Markov Chains. *The International Journal of Robotics Research* 27(7):761–784. doi: 10.1177/0278364908091153
- Laptev I, Marszalek M, Schmid C, Rozenfeld B (2008) Learning realistic human actions from movies. In: 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Anchorage, AK, USA, pp 1–8. doi: 10.1109/CVPR.2008.4587756
- Luo X, Berendsen B, Tan RT, Veltkamp RC (2010) Human Pose Estimation for Multiple Persons Based on Volume Reconstruction. In: 2010 20th International Conference on Pattern Recognition (ICPR), Istanbul, Turkey, pp 3591–3594. doi: 10.1109/ICPR.2010.876
- Rabiner LR (1989) A tutorial on hidden Markov models and selected applications in speech recognition. *Proc. IEEE* 77(2):257–286. doi: 10.1109/5.18626
- Shotton J, Girshick R, Fitzgibbon A, Sharp T, Cook M, Finocchio M, Moore R, Kohli P, Criminisi A, Kipman A, Blake A (2013) Efficient human pose estimation from single depth images. *IEEE Trans Pattern Anal Mach Intell* 35(12):2821–2840. doi: 10.1109/TPAMI.2012.241
- Suurballe JW (1974) Disjoint paths in a network. *Networks* 4(2):125–145. doi: 10.1002/net.3230040204
- Tran C, Trivedi MM (2008) Human body modelling and tracking using volumetric representation: Selected recent studies and possibilities for extensions. In: 2008 Second ACM/IEEE International Conference on Distributed Smart Cameras (ICDSC), Palo Alto, CA, USA, pp 1–9. doi: 10.1109/ICDSC.2008.4635733
- Trentin E, Gori M (2003) Robust combination of neural networks and hidden Markov models for speech recognition. *IEEE Trans Neural Netw* 14(6):1519–1531. doi: 10.1109/TNN.2003.820838
- Zhou L, Li W, Ogunbona P (2016) Learning a pose lexicon for semantic action recognition. In: 2016 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME), Seattle, WA, USA, pp 1–6. doi: 10.1109/ICME.2016.7552882
- Zivkovic Z (2004) Improved adaptive Gaussian mixture model for background subtraction. In: Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, 2004. ICPR 2004, Cambridge, UK, 28-31 Vol.2. doi: 10.1109/ICPR.2004.1333992

AUTHORS

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

Jan Vandenhousten
ixellence GmbH Wildau

E-Mail for correspondence:
egbert.gedat@th-wildau.de



Theorie der Modenlinienspektroskopie zur optischen Charakterisierung von Polymerschichten

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

Zusammenfassung

Die Modenlinienspektroskopie kann zur hochpräzisen Charakterisierung von Polymerschichten bezüglich des Brechungsindex verwendet werden. Das vorliegende Manuskript behandelt die Theorie der Modenlinienspektroskopie und beginnt dabei mit den theoretischen Grundlagen eines planaren Wellenleiters, die zum Verständnis der Modenlinienspektroskopie notwendig sind. Die hier präsentierten expliziten Herleitungen können genutzt werden, um die Modenlinienspektroskopie so zu modifizieren, dass auch die Messung des Pockelseffektes möglich ist. Eine Anwendungsmöglichkeit soll in der zukünftigen Bestimmung des Pockelskoeffizienten bestehen, der für die Weiterentwicklung von polymerbasierten elektrooptischen Modulatoren benötigt wird. Zudem werden der Aufbau und die experimentelle Herangehensweisen beschrieben und die Brechungsindexbestimmung wird exemplarisch am Beispiel einer Wirt-Gast-Polymerschicht demonstriert.

Abstract

M-Line spectroscopy can be used for high precision measurements of polymer layers. The present manuscript deals with the theory of m-line spectroscopy and thus begins with the theoretical background of a planar waveguide structure, which is necessary for a deeper understanding of m-line spectroscopy. The explicit derivations presented here can be used to modify the m-line spectroscopy in such a way that the measurement of the Pockels effect is also possible. One application is to be obtained in the future configuration of the Pockels coefficients, which is needed to optimize electro-optical modulators. In addition, the set-up and the experimental approach are described. Finally, a host-guest polymer layer is experimentally characterized in terms of the refractive index.

1. Einführung

Die Entwicklung photonischer Bauelemente in integrierten Schaltkreisen ist zu einem großen Teil auf die Möglichkeiten der Materialherstellung, der Probenstrukturierung und der Entwicklung sowie Kombination optischer Polymersysteme zurückzuführen, die neue Baukonzepte für ultraschnelle elektrooptische Modulatoren ermöglichen. Wellenleiter auf Polymerbasis eröffnen völlig neue Möglichkeiten für das Design und die Herstellung integrierter Optiken. So können beispielsweise ganze Schaltkreise über Verfahren wie Printed Electronics auf flexible Substrate gedruckt werden. Eine neue Entwicklung der letzten 15 Jahre ist die Silizium-Organik-Hybrid-Technologie (Gould et al. 2011; Alloatti et al. 2014; Korn et al. 2014). Diese Technologie

nutzt CMOS-Herstellungsprozesse, um Siliziumwellenleiter zu strukturieren. Dieser Wellenleiter wird anschließend mit einem Polymer mit nichtlinearen optischen Eigenschaften (Steglich et al. 2015). Durch die Verbindung von Siliziumtechnologie und funktionellen Polymeren sind extrem energieeffiziente optische Schalter und Modulatoren herstellbar (Steglich et al. 2016). Polymere mit einer hohen nichtlinearen optischen Suszeptibilität sind relativ kostengünstig herstellbar und leicht zu verarbeiten, was sie für industrielle Anwendungen interessant macht. Es ist daher notwendig, geeignete nichtlineare optische Polymermaterialien zu finden und zu charakterisieren. Dies impliziert auch, dass Vergleichskriterien und Messverfahren zur Charakterisierung solcher Polymerschichten entwickelt und evaluiert werden.

Im Rahmen des Projektes HOPBIT (Hybride Silizium-organische Photonik für die hochbitratige Datenübertragung) der TH Wildau sollen verschiedene Polymersysteme hinsichtlich ihrer optischen und elektrooptischen Eigenschaften untersucht werden. Dies beinhaltet die Untersuchung verschiedener Wirt-Gast-Systeme bestehend aus optischen Polymermatrizen und konventionellen sowie neuartigen optisch nichtlinearen Chromophoren. Die Modenlinienspektroskopie wurde dafür ausgewählt, weil sie den Brechungsindex bis auf die vierte Nachkommastelle genau bestimmen kann. In diesem Manuskript werden notwendige Grundlagen der Modenlinienspektroskopie vermittelt und ihre Vor- und Nachteile sowie mögliche Modifikationen bzw. Verbesserungen diskutiert. Am Beispiel eines Wirt-Gast

* korrespondierender Autor

Polymersystems, das aus dem Chromophor Dispersrot 1 und der Polymermatrix Polycarbonat besteht, wird der Brechungsindex bei verschiedenen Wellenlängen gemessen und daraus die Dispersion bestimmt.

2. Theorie planarer Wellenleiter

Zur Charakterisierung optischer Polymerschichten mittels Modenlinienspektroskopie ist es zweckmäßig, diese sie als planare Wellenleiter zu betrachten. Zum Verständnis der Messmethoden und der physikalischen Vorgänge während der Messungen wird in diesem Abschnitt die Theorie des planaren Wellenleiters beschrieben. Eine explizite Herleitung, wie sie in diesem Abschnitt ausgeführt ist, ist in keiner von der den Autoren bekannten Literatur nicht zu finden. Einzelne theoretische Beschreibungen sind gibt es jedoch mit einem anderen Bezug in Standardwerken wie in Saleh & Teich 2008 oder Hecht 2014 zu finden.

Die Führung einer elektromagnetischen Welle in einem dielektrischen Material mittels Totalreflexion ist das Grundprinzip eines planaren Wellenleiters. Aufgrund der Totalreflexion wird ein Lichtstrahl in dem Wellenleiter so geführt, dass keine Feldenergie an die umgebenden Medien abgegeben wird. Das heißt, es gibt keine Leistungsverluste an den Schichtoberflächen. Solch ein Wellenleiter besteht, wie in Abb. 1 zu sehen ist, im einfachsten Fall aus einer dielektrischen Schicht mit dem Brechungsindex n_f und der Dicke d , welche die sich zwischen zwei Dielektrika mit den Brechungsindizes n_c und n_s befindet.

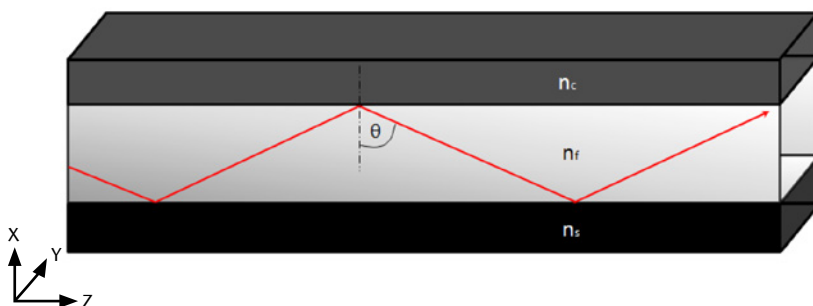


Abb. 1) Schematische Darstellung einer planaren Wellenleiterstruktur.

2.1 Strahlenverlauf in planaren Wellenleitern

Bedingung für die Totalreflexion ist, dass die Wellenleiterschicht einen höheren Brechungsindex als ihre Umgebung haben muss, $n_f > n_{c,s}$. Des Weiteren ist Voraussetzung, dass der Reflexionswinkel Θ größer ist als der sogenannte kritische Winkel Θ_g der Totalreflexion. Es folgt die Beziehung:

$$\sin \theta > \sin \theta_g = \frac{n_{c,s}}{n_f} \quad (2.1)$$

Daraus ergibt sich die Bedingung, dass die Tangentialkomponente der einfallenden Ausbreitungskonstante, welche die als Propagationskonstante β bezeichnet wird, größer ist als die Ausbreitungskonstante einer freien Welle im angrenzenden Medium. Die Propagationskonstante gibt an, wie sich die Phase der Welle in eine bestimmte Raumrichtung ändert. β gibt also die Phasenänderung der Welle in z-Richtung an. Damit lautet die Totalreflexionsbedingung:

$$\beta = n_f k_0 \sin \theta > n_{c,s} k_0 \quad (2.2)$$

Im Folgenden wird ein Lichtstrahl, der sich in der (x,z)-Ebene unter dem Winkel Θ relativ zur x-Achse ausbreitet, durch seinen Wellenvektor k beschrieben. k_0 ist die Ausbreitungskonstante und λ die Wellenlänge des Lichtstrahls im Vakuum. Die Komponenten des Wellenvektors k sind in Abb. 2 zu sehen und werden wie folgt beschrieben:

$$k_x = k \cos \theta \quad (2.3)$$

$$k_y = 0 \quad (2.4)$$

$$k_z = k \sin \theta \quad (2.5)$$

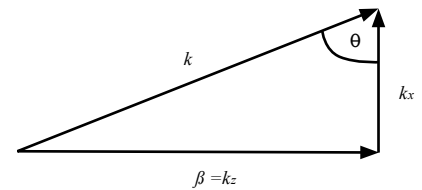


Abb. 2) Wellenvektorkomponenten

Dabei gilt $\beta = k_z$ und $k = n_f k_0$. Eine ebene Welle breitet sich im Wellenleiter mit der Phasengeschwindigkeit $v_{ph} = \frac{c_0}{n_f}$ mit dem Winkel Θ aus, wobei c_0 die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist. Grundsätzlich ist jeder Winkel möglich, solange die Totalreflexionsbedingung 2.2 eingehalten wird. Dadurch können, wie in Abb. 3 zu sehen ist, beliebig viele Strahlengänge entstehen. Jedoch interferieren die reflektierten Wellen nur bei bestimmten Reflexionswinkeln. Abhängig von Wellenleiterdicke und Brechungsindex entstehen stabile propagierende Wellen, die auch Moden genannt werden. Wellenleiter mit nur einem Strahlengang bzw. einer Mode werden als Monomodalen-Wellenleiter bezeichnet. Bei mehreren Moden wird der Wellenleiter als Multimoden-Wellenleiter bezeichnet. Planare Wellenleiter sind Multimoden-Stufenindex-Wellenleiter. Bei dieser Art von Wellenleitern ändert sich der Brechungsindex sprunghaft beim Übergang an den Grenzflächen zwischen dem hochbrechenden Kern (core) und dem niedrigbrechenden Mantel (cladding). Moden höherer Ordnung, also Strahlengänge mit kleinem Reflexionswinkel Θ , breiten sich langsamer aus als Moden niedrigerer Ordnung, da die Strahlen Wege unterschiedlicher Länge zurücklegen müssen. Abb. 3 zeigt diesen Effekt, der als Modendispersion oder auch intermodale Dispersion bezeichnet wird.

2.2 Eigenmoden planarer Wellenleiter

Aufgrund der Wellennatur des Lichts können sich Moden nur in bestimmten Winkeln ausbilden. Wellen können miteinander interferieren und sich dabei verstärken (konstruktive Interferenz) oder abschwächen bzw. gegenseitig auslöschen (destruktive Interferenz). Eine Lichtwelle kann also nur bei konstruktiver Interferenz in einem

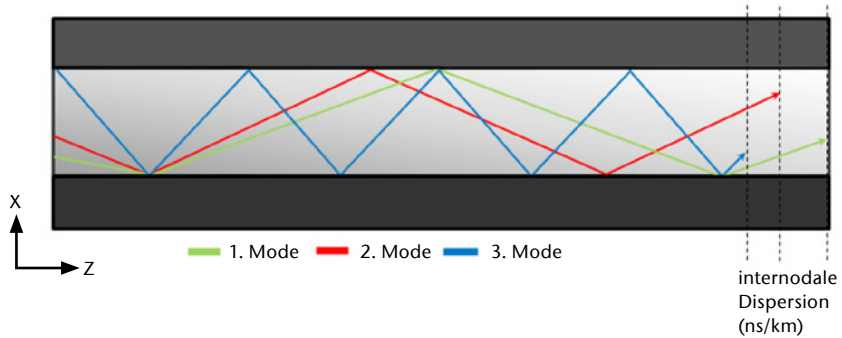


Abb. 3) Strahlengänge ausbreitungsfähiger Moden in einem planaren Wellenleiter.

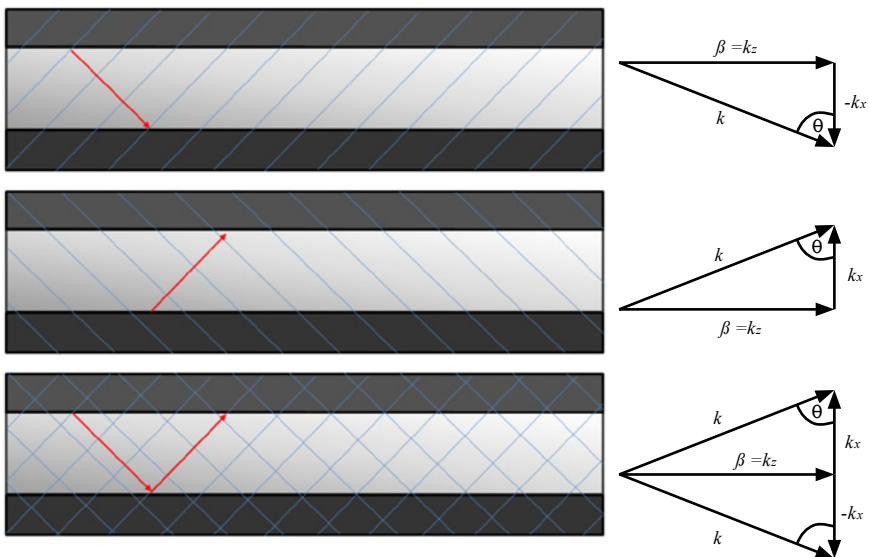


Abb. 4) Superposition zweier Felder in einem Wellenleiter, deren Wellenvektoren die gemeinsame Tangentialkomponente β haben.

Wellenleiter geführt werden. Voraussetzung dafür ist die sogenannte Selbstkonsistenzbedingung.

Bei der Totalreflexion an einer dielektrischen Grenzfläche wird die Welle vom Einfallswinkel abhängig phasenverschoben. Diese Phasenverschiebung liegt im Bereich von $\varphi = 0$ beim kritischen Winkel bis $\varphi = \pi$ bei streifendem Einfall. Grund dafür ist das evaneszente Feld.

Da die Welle durch Totalreflexion in dem Wellenleiter an zwei Grenzflächen hin- und her reflektiert wird, kann das Feld in der Wellenleiterschicht als eine Superposition zweier Planwellen beschrieben werden, die durch Reflexion an den beiden Grenzflächen der Wellenleiterschicht ineinander übergehen. Jede dieser Planwellen besitzt, bei Vernachlässigung der Amplitude, die folgende Form:

$$e^{-i[n_f k_0 (\pm x \cos \theta + z \sin \theta) - \omega t]} = e^{-i(n_f k_0 \pm x \cos \theta)} e^{-i(\beta z - \omega t)} \tag{2.6}$$

Selbstkonsistenzbedingung ist eine definierende Eigenschaft der Eigenmoden eines Wellenleiters und legt die erlaubten Ausbreitungswinkel fest. Aufgrund der Superposition stellt die Welle in x-Richtung eine stehende Welle dar. In z-Richtung breitet sie sich mit der Ausbreitungskonstante β und der Phasengeschwindigkeit v_{ph} aus. Im Folgenden wird exemplarisch mit einer TE-polarisierten Welle gearbeitet, und die Ergebnisse für TM-polarisierte Wellen werden nur angegeben, da die Herleitungen prinzipiell gleich sind.

Mit Gleichung 2.6 ist der Phasenterm einer im Film geführten (in y-Richtung homogenen) Welle gegeben. Damit folgt die Selbstkonsistenzbedingung für die phasenrichtige Überlagerung der x-Komponenten der Teilwellen nach Hin- und Rücklauf der Welle zwischen den beiden optischen Grenzflächen:

$$2k_0 n_f d \cos \theta - \phi_{TE}^c(\theta) - \phi_{TE}^s(\theta) = m \cdot 2\pi \tag{2.7}$$

$$2k_0 n_f d \cos \theta - \phi_{TE}^c(\theta) - \phi_{TE}^s(\theta) = m \cdot 2\pi$$

$\phi_{TE}^c(\theta)$ ist die Phasenverschiebung infolge der Reflexion einer TE-polarisierten Welle an der Grenzfläche zwischen zwei Dielektrika, in diesem Fall zwischen dem Film und dem Cladding, und ist abhängig vom Einfallswinkel θ (Miller 1969). Gleiches gilt für die Phasenverschiebung zwischen Film und Substrat $\phi_{TE}^s(\theta)$. Für den Fall eines symmetrischen Wellenleiters ($n_c = n_s$) gilt für die Phasenverschiebung an den Grenzflächen: $\phi_{TE}^c(\theta) + \phi_{TE}^s(\theta) = 2\phi_{TE}^{c,s}(\theta)$. Der erste Term ($2k_0 n_f d \cos \theta$) in Gleichung 2.7 ist, wie in Abb. 5 zu sehen, die Phasenverschiebung zwischen den beiden Punkten A und B. Dies kann aus folgender Beziehung hergeleitet werden:

$$\phi_{AB} - \phi_{AC} = \frac{4\pi d n_f}{\lambda} = 2k_0 n_f d \cos \theta \tag{2.8}$$

Die Phasenverschiebung von TM-Polarisierten polarisierten Wellen unterscheidet sich nur geringfügig. Um die Phasenverschiebung $\phi_{TE}^{c,s}$ zu erhalten, wird zunächst der Amplitudenreflexionsfaktor r_{TE} bzw. r_{TM} betrachtet. Sie ergeben sich mit θ als Einfallswinkel und α als Brechungswinkel aus den Maxwell'schen Gleichungen zu:

$$r_{TE} = \frac{n_f \cos \theta - n_{c,s} \cos \alpha}{n_f \cos \theta + n_{c,s} \cos \alpha} = \frac{n_f \cos \theta - \sqrt{n_{c,s}^2 - n_f^2 \sin^2 \theta}}{n_f \cos \theta + \sqrt{n_{c,s}^2 - n_f^2 \sin^2 \theta}} \tag{2.9}$$

$$r_{TM} = \frac{n_{c,s} \cos \theta - n_f \cos \alpha}{n_{c,s} \cos \theta + n_f \cos \alpha} = \frac{n_f \cos \theta - n_f \sqrt{n_{c,s}^2 - n_f^2 \sin^2 \theta}}{n_f \cos \theta + n_f \sqrt{n_{c,s}^2 - n_f^2 \sin^2 \theta}} \tag{2.10}$$

Für den Fall $\theta \geq \theta_g$ werden die Wurzeln imaginär und die reellen Amplitudenreflexionsfaktoren zu komplexen Zahlen. Damit ergibt sich der Amplitudenreflexionsfaktor einer TE-polarisierten Welle zu:

$$r_{TE} = \frac{n_f \cos \theta + i \sqrt{n_f^2 \sin^2 \theta - n_{c,s}^2}}{n_f \cos \theta - i \sqrt{n_f^2 \sin^2 \theta - n_{c,s}^2}} \quad (2.11)$$

Die Abkürzungen

$$\tilde{a} = n_f \cos \theta \quad (2.12)$$

$$\tilde{b} = \sqrt{n_f^2 \sin^2 \theta - n_{c,s}^2} \quad (2.13)$$

führen zur Definition des halben Phasensprungs:

$$\tan\left(\frac{\phi_{TE}^{c,s}}{2}\right) = \frac{\tilde{b}}{\tilde{a}} \quad (2.14)$$

Daraus folgt, dass $\phi^{c,s}$ der jeweilige Phasensprung einer TE-polarisierten Welle an einem dielektrischen Medium ist. Für TM-polarisierte Wellen gilt analog dazu:

$$\tan\left(\frac{\phi_{TM}^{c,s}}{2}\right) = \frac{n_f^2 \tilde{b}}{n_{c,s}^2 \tilde{a}} \quad (2.15)$$

Damit wird auch klar, dass die Amplitudenreflexionsfaktoren bei Totalreflexion den Betrag eins haben müssen, denn es gilt:

$$r_{TE} = \frac{\tilde{a} + i\tilde{b}}{\tilde{a} - i\tilde{b}} = \frac{\sqrt{\tilde{a}^2 + \tilde{b}^2} e^{i\phi_{TE}^{c,s}}}{\sqrt{\tilde{a}^2 + \tilde{b}^2} e^{-i\phi_{TE}^{c,s}}} = e^{i2\phi_{TE}^{c,s}} = \cos(2\phi_{TE}^{c,s}) + i \sin(2\phi_{TE}^{c,s}) \quad (2.16)$$

Im Allgemeinen gibt es mehrere Lösungen für die Selbstkonsistenzbedingung 2.7, da in einem Multimoden-Wellenleiter mehrere Moden mit jeweils verschiedenen Modenwinkeln existieren. Jede dieser Moden besitzt einen diskreten Modenwinkel θ_M und damit auch eine diskrete Ausbreitungskonstante:

$$\beta_m = n_f k_0 \sin(\theta_M) \quad (2.17)$$

sowie eine jeweilige Phasengeschwindigkeit:

$$v_{ph}^m = \frac{\omega}{\beta_m} = \frac{c_0}{n_f \sin(\theta_M)} = \frac{c_0}{n_{eff}} \quad (2.18)$$

Der sogenannte effektive Brechungsindex n_{eff} ist demnach definiert als:

$$n_{eff} = n_f \sin(\theta_M) \quad (2.19)$$

Die Definition des effektiven Brechungsindex mag zwar anfänglich trivial erscheinen, doch seine Bedeutung ist sehr komplex. Auf den ersten Blick suggeriert das Wort „Brechungsindex“ eine Beziehung allein zum Material, obwohl der Begriff des effektiven Brechungsindex sowohl mit dem Material als auch mit der Mode verknüpft ist. Das heißt, für jede Mode als ausbreitungsfähige Welle existiert ein anderer effektiver Brechungsindex, obwohl das Material des Wellenleiterfilms jeweils dasselbe bleibt. Aus der Selbstkonsistenzbedingung 2.7 folgt, dass die Ausbreitungswinkel mit den Phasensprüngen an den Grenzflächen des Wellenleiterfilms verknüpft sind, diese aber ihrerseits von den Brechzahlen von Deckschicht und Substrat abhängen, wie die Gleichungen 2.14 und 2.15 verdeutlichen. Der effektive Brechungsindex ist also eine modenspezifische Größe, die von allen Brechzahlen der Wellenleiterstruktur abhängt. Die effektiven Brechungsindizes der einzelnen Moden können auch als Eigenwerte des Wellenleiters betrachtet werden. Bedingt durch Gleichung 2.1 gelten dabei folgende Relationen:

$$n_{c,s} \leq n_{eff} \leq n_f \quad (2.20)$$

Die Existenz eines effektiven Brechungsindex führt zur Realisierung von integriert-optischen Bauelementen, die den Lichtweg auch in der Ausbreitungsrichtung (Richtung der Ausbreitungskonstante β_m) beeinflussen.

Um Aussagen über die Ausbreitungsfähigkeit von Moden zu machen, ist es informativ, entweder die Ausbreitungskonstante $\beta(\omega)$ in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz ω der Welle oder, davon abgeleitet, den sogenannten Phasenparameter B als Funktion des Filmparameters V aufzutragen.

Phasen- und Filmparameter sind folgendermaßen definiert (Reider 2013):

$$B = \frac{n_{eff}^2 - n_s^2}{n_f^2 - n_s^2} \quad (2.21)$$

$$V = k_0 d \sqrt{n_f^2 - n_s^2} \quad (2.22)$$

Der Filmparameter V kann wegen $V \propto k_0 = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{c_0} \nu$ als normierte Frequenz oder Filmdicke und der Phasenparameter B entweder als normierte Ausbreitungskonstante oder normierter effektiver Brechungsindex bezeichnet werden. In beiden Definitionen fehlt noch die Abhängigkeit von der Deckschicht, also dem Cladding. Sie wird in einem weiteren Parameter, dem sogenannten Asymmetrieparameter A_{TE} bzw. A_{TM} für TE- und TM-Wellen, berücksichtigt:

$$A_{TE} = \frac{n_s^2 - n_c^2}{n_f^2 - n_s^2} \quad (2.23)$$

$$A_{TM} = \frac{n_f^2 n_s^2 - n_c^2}{n_c^2 n_f^2 - n_s^2} \quad (2.24)$$

Mit diesen Parametern lässt sich die Selbstkonsistenzbedingung 2.7 in

$$V\sqrt{1-B} = m \cdot \pi + \tan^{-1} \frac{B}{\sqrt{1-B}} + \tan^{-1} \frac{B+A}{\sqrt{1-B}} \quad (2.25)$$

für TE- oder TM-Wellen umformen. Eine graphische Darstellung von B als Funktion von V wird als normiertes Dispersionsdiagramm bezeichnet. Jede Kurvenschar steht dabei für eine ausbreitungsfähige Mode und die Kurven innerhalb einer Schar entsprechen verschiedenen Asymmetrieparametern. Existieren für eine definierte Filmdicke d , die auf der Abszisse zu einem bestimmten Wert des Filmparameters führt, mehrere Moden, so haben die Moden mit kleinerem m die größeren effektiven Brechungsindizes. Außerdem ist noch festzuhalten, dass alle Moden mit $m > 0$ erst oberhalb einer bestimmten Grenzfrequenz ausbreitungsfähig sind. Anhand der

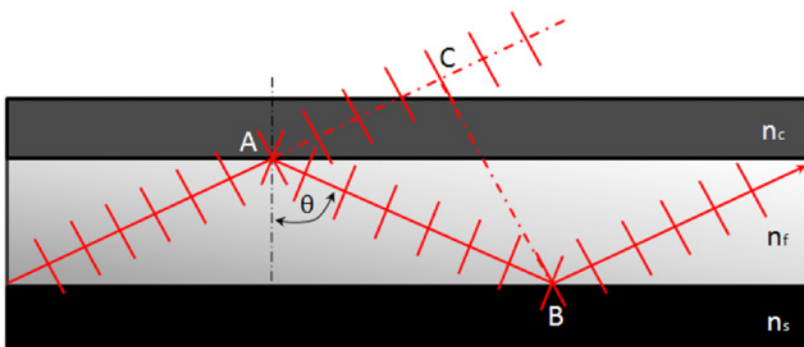


Abb. 5) Schematische Darstellung der Superposition zweier Felder in einem Wellenleiter.

Selbstkonsistenzbedingung 2.25 und mit Hilfe der definierten Parameter, können folgende Möglichkeiten abgeleitet werden, den effektiven Brechungsindex einer bestimmten Mode in einer Wellenleiterstruktur zu vergrößern:

- Erhöhung der Filmdicke d ,
- Erhöhung der Materialbrechzahl der Deckschicht und des Substrats, n_c und n_s , zur Verringerung der Asymmetrie,
- Erhöhung der Materialbrechzahl des Wellenleiterfilms n_f .

Diese Abhängigkeiten kann können zum Beispiel bei der Herstellung von Filmlinsen und Streifenwellenleitern zu Nutzen gemachtgenutzt werden. Die normierte Grenzfrequenz V_m der Moden ergibt sich aus Gleichung 2.25 für $B = 0$. Für $m = 0$ erhält man die normierte Grenzfrequenz der Grundmode:

$$V_0 = \tan^{-1} \sqrt{A_{TE}} \quad (2.26)$$

Daraus folgt, dass die normierte Grenzfrequenz der Grundmode nur bei symmetrischen Wellenleitern null beträgt. Die normierte Grenzfrequenz höherer Moden ist gegeben durch:

$$V_m = V_0 + m \cdot \pi \quad (2.27)$$

Damit ergibt sich für $V_0 \ll V_m$ ein näherer Ausdruck für die Anzahl der ausbreitungsfähigen TE-Wellen mit:

$$M = \frac{V_m}{\pi} = \frac{2d}{\lambda} \sqrt{n_f^2 - n_s^2} \quad (2.28)$$

Die Selbstkonsistenzbedingung 2.7 kann für den Fall eines symmetrischen Wellenleiters auch noch in eine etwas kompaktere Form umgeschrieben werden. Dazu werden üblicherweise zwei weitere Parameter definiert (Reider 2013):

$$u = dk_0 \sqrt{n_f^2 - n_{eff}^2} \\ = dk_0 n_f \cos \theta = d \sqrt{k_0^2 n_f^2 - \beta^2} \quad (2.29)$$

$$w = dk_0 \sqrt{n_{eff}^2 - n_s^2} = d \sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_s^2} \quad (2.30)$$

so dass $u^2 + w^2 = V^2$ gilt. Mit diesen normierten Werten lautet Gleichung 2.14:

$$\tan(\phi_r) = \frac{w}{u} \quad (2.31)$$

Die Selbstkonsistenzbedingung 2.7 lautet nun:

$$\tan(u - m \cdot \pi) = \frac{w}{u} \quad (2.32)$$

bzw. mit $u^2 + w^2 = V^2$:

$$\tan(u - m \cdot \pi) = \frac{\sqrt{V^2 - u^2}}{u} \quad (2.33)$$

In dieser Gleichung ist bei gegebenem Wellenleiter und gewählter Wellenlänge die normierte Frequenz V konstant und die beiden Parameter u und w hängen nur von β und damit nach Gleichung 2.17 von dem diskreten Modenwinkel $\sin \theta_m$ ab. Werden alle Parameter eingesetzt und wird die Beziehung für den Grenzwinkel der Totalreflexion

$$\sin \theta_g = \frac{\sqrt{n_f^2 - n_s^2}}{u} \quad (2.34)$$

genutzt, so erhält man folgenden Ausdruck für die Selbstkonsistenzbedingung eines symmetrischen Wellenleiters (Reider 2013):

$$(dn_f k_0 \sin \theta - m \cdot \frac{\pi}{2}) = \sqrt{\frac{\sin^2 \theta_g}{\sin^2 \theta} - 1} \quad (2.35)$$

3. Theoretische Grundlagen der Modenlinienspektroskopie

Planare Wellenleiter können durch ihren Satz ausbreitungsfähiger Moden hinsichtlich ihrer Schichtdicke und ihres Filmbrechungsindex charakterisiert werden (Monneret et al. 2000). Jede Mode ist durch ihren effektiven Brechungsindex gekennzeichnet, der für Wellenleiter mit homogenem Brechungsindexverlauf durch den reellen Filmbrechungsindex und den Ausbreitungswinkel der Mode gegeben ist:

$$n_{eff,m} = n_f \sin(\theta_M) \quad (3.1)$$

Die effektiven Brechungsindizes der geführten Moden lassen sich über das in der integrierten Optik häufig genutzte Verfahren der Modenlinienspektroskopie ermitteln, das auf der selektiven Anregung einzelner Wellenleitermoden mit Hilfe eines hochbrechenden Prismas basiert. Eine Prin-

zipdarstellung der Prismenkopplung ist in Abb. 6 gezeigt. Ein Laserstrahl trifft unter einem in einem bestimmten Winkel auf das hochbrechende Prisma und wird dabei über das Prisma in den Wellenleiterfilm eingekoppelt. Aufgrund der Konsistenzbedingung nach Gleichung 2.7 kann der Laserstrahl allerdings nur bei bestimmten Winkeln, den sogenannten Kopplungswinkeln θ_M , in den Wellenleiter eingekoppelt werden.

Um diese diskreten Winkel θ_M zu ermitteln, wird der Winkel α so lange variiert, bis eine ausbreitungsfähige Mode angeregt wird. Der Kopplungswinkel ist jener Winkel, bei dem die nicht in die Schicht eingekoppelte Intensität ein Minimum besitzt. In Abb. 7 ist ein Beispiel für den Intensitätsverlauf einer Polycarbonatschicht zu sehen. Der effektive Brechungsindex der angeregten Mode ist abhängig von dem gemessenen Winkel α_m . Durch das Snellius'sche Brechungsgesetz und mit Hilfe von trigonometrischen Beziehungen kann Gleichung 3.1 so umgeschrieben werden, dass der effektive Brechungsindex nur noch von dem Brechungsindex des Prismas n_p , dem Prismawinkel ϑ und dem gemessenen Winkel α abhängt (Ulrich & Torge 1973):

$$n_{eff,m} = n_p \left[\frac{\pi}{2} - \frac{\vartheta}{2} + \sin^{-1} \left(\frac{\sin \alpha_m}{n_p} \right) \right] \\ = n_p \left[\varepsilon + \sin^{-1} \left(\frac{\sin \alpha_m}{n_p} \right) \right] \quad (3.2)$$

Mit Gleichung 3.2 und Gleichung 2.25 erhält man ein Gleichungssystem, welches das iterativ zu lösen ist. Dadurch lässt lassen sich der Filmbrechungsindex n_f und die Schichtdicke d des untersuchten Wellenleiters berechnen. Es ist allerdings dabei allerdings zu beachten, dass mindestens zwei Moden notwendig sind, da das Gleichungssystem sonst unterbestimmt ist. Die für das jeweilige Polymer typischen Modellparameter V , B und A sind nur von dem effektiven Brechungsindex n_{eff} abhängig. Die Modellparameter werden also aus den experimentellen Daten extrahiert und durch das Gleichungssystem numerisch angepasst. Zum Lösen des Gleichungssystems sind allerdings Startwerte für d und n_{eff} nötig. Als Näherungswert für die Filmschichtdicke kann die Probe vorher mit einem geeigneten Messmittel, wie z. B.

mit einem Profilometer, vermessen werden. Indem Gleichung Gleichung 2.28 umgestellt wird, ist es mit der gemessenen Schichtdicke möglich, eine gute Näherung für den Filmbrechungsindex zu erhalten (Ulrich & Torge 1973):

$$n_f = \sqrt{\left(\frac{M\lambda}{2d}\right)^2 + n_s^2} \quad (3.3)$$

4. Experimenteller Aufbau der Modenlinienspektroskopie

Der experimentelle Aufbau der Modenlinienspektroskopie ist in Abb. 8 schematisch dargestellt. Der Laserstrahl wird durch einen Chopper pe-

riodisch unterbrochen und über eine Linse auf eine Photodiode gelenkt. Da die gemessene Intensität sehr schwach sein kann, befindet sich zwischen Computer und Photodiode noch ein Lock-Inn-Verstärker. Die einzelnen Komponenten der Messanordnung werden im Folgenden genauer beschrieben:

1. **Laser:** Es können verschiedene Lasertypen verwendet werden, um den Brechungsindex in Abhängigkeit von der Wellenlänge (Dispersionsverhalten) zu messen.
2. **Polarisator:** Der Laserstrahl muss linear polarisiert werden, da-

mit der Brechungsindex und die Schichtdicke polarisationsabhängig berechnet werden können.

3. **Blende:** Die Blende dient der Begrenzung des Laserstrahldurchmessers, um Inhomogenitäten am Rand des Strahlprofils zu unterbinden.

4. **Linsen:** Mit Hilfe von Linsen wird der Laserstrahl auf das Prisma bzw. auf den Photodetektor fokussiert.

5. **Prisma:** Das Prisma dient zur Einkopplung des Laserstrahls in den Filmwellenleiter. Das verwendete Prisma sollte möglichst hochbrechend sein. Ein symmetrisches Prisma eignet sich gut für aufgedampfte oder aufgesputterte Filme mit leichten Inhomogenitäten, wobei das Substrat dünn und flexibel sein kann.

6. **Drehtisch:** Der Drehtisch ist mit einem Goniometer verbunden, womit die exakte Lage des Prismas zum Laserstrahl bestimmt werden kann. Er besitzt separate Positioniereinheiten, mit dem denen das Prisma und der Detektor einzeln oder gemeinsam angesteuert werden können.

7. **Detektor:** Mittels einer Photodiode wird die Intensität des reflektierten Laserstrahls in Abhängigkeit des von Winkels α aufgenommen.

8. **Lock-In in-Amplifier:** Der Lock-In in-Amplifier dient zur Verstärkung des Signals an der Photodiode und ist mit einem Computer verbunden, der diese Signale auswertet.

5. Experimenteller Ablauf der Modenlinienspektroskopie

Der experimentelle Ablauf der Modenlinienspektroskopie kann in folgende Punkte zusammengefasst werden:

1. Zunächst wird die Intensität des Laserstrahls gemessen. Dabei fährt der Drehtisch den gewünschten Winkelbereich ab und der Photodetektor nimmt die Intensität des Laserstrahls auf.

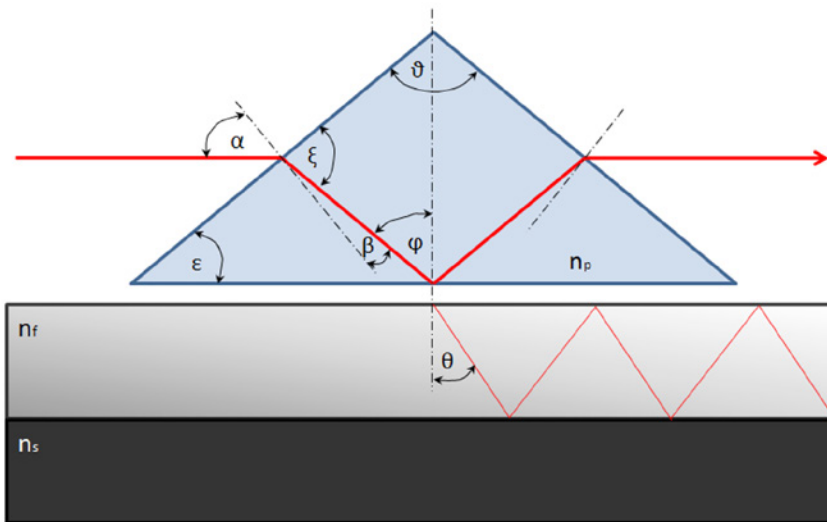


Abb. 6) Prinzip der Prismenkopplung: Über ein hochbrechendes Prisma wird ein Laserstrahl bei einem bestimmten Winkel (Kopplungswinkel) in den Wellenleiter eingekoppelt.

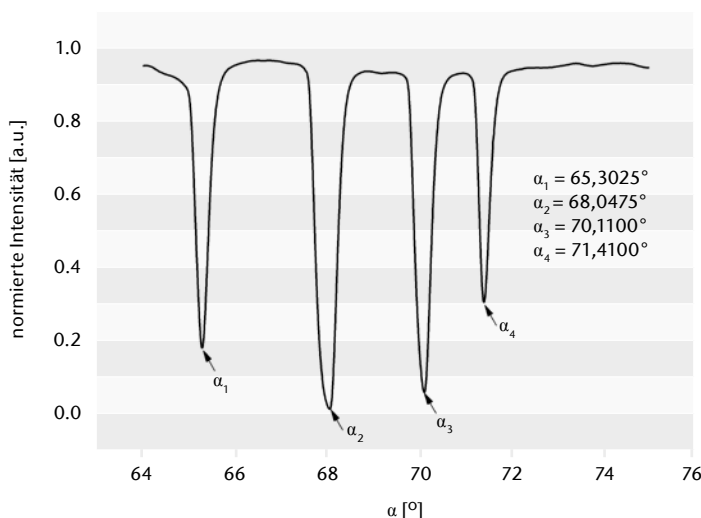


Abb. 7) Charakteristischer Intensitätsverlauf der Modenlinienspektroskopie. Bei dem Winkel, bei dem die Intensität abfällt, kann sich durch konstruktive Interferenz eine Mode ausbilden. Der Wellenleiter besteht aus einer Polycarbonatschicht auf einem Glassubstrat (BK7) und wurde mit einem Nd:YAG Laser vermessen.

2. Als nächstes müssen die Winkel α_m bestimmt werden, bei denen die Intensität ein Minimum besitzt (siehe Abb. 7).
3. Mit diesen Winkeln werden die effektiven Brechungsindizes aus Gleichung 3.2 berechnet.
4. Außerdem ist noch ein Startwert für die Schichtdicke nötig. Diese muss mit einem geeigneten Verfahren wie z. B. einem Profilometer oder einem Atomkraftmikroskop ermittelt werden.
5. Handelt es sich um eine Probe mit unbekanntem Brechungsindex, kann mit Hilfe der Schichtdicke ein Startwert für den Filmbrechungsindex berechnet werden. Wenn der Brechungsindex allerdings bekannt ist, kann diese Gleichung auch für die Schichtdicke umgestellt werden, so dass diese nicht extra ermittelt werden muss.
6. Jetzt ist es möglich, dass Gleichungssystem iterativ aus den experimentell ermittelten Messwerten zu lösen und damit einen exakten Wert für die Schichtdicke und den Filmbrechungsindex zu erhalten.
7. Da es Messwertabweichungen aufgrund von Inhomogenitäten im Material an den einzelnen Messpunkten geben kann, sollten mehrere Punkte auf der Probe gemessen und anschließend statistisch mit einer geeigneten Software ausgewertet werden.

6. Experimentelle Ergebnisse

In diesem Abschnitt soll exemplarisch eine Messung des Brechungsindex bei verschiedenen Wellenlängen demonstriert werden. Brechungsindex und Absorption sind wellenlängenabhängig, was in der Optik als Dispersion bezeichnet wird. Das Dispersionsverhalten von optischen Polymeren kann mit der Modenlinienspektroskopie durch den Einsatz unterschiedlicher Laser gemessen werden. Für den Spektralbereich von 400 bis 1.600 nm ist die Cauchy-Näherung eine sehr gute Näherung für das Dispersionsverhalten

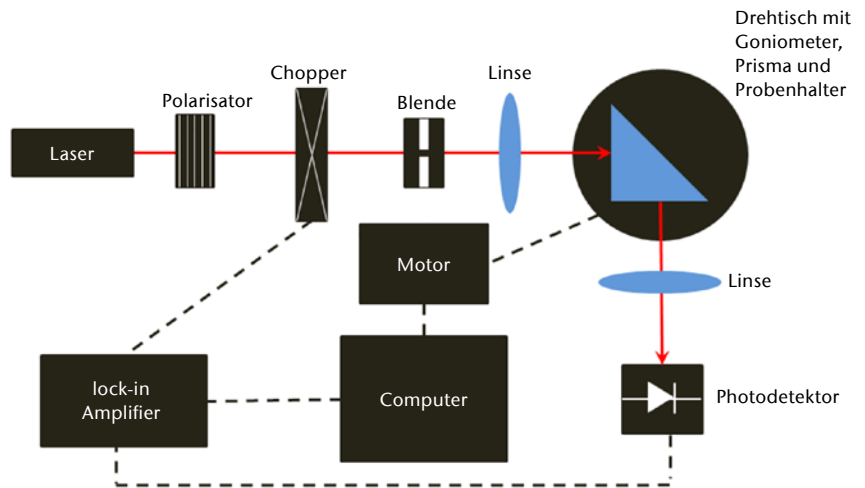


Abb. 8) Schematischer Aufbau der Modenlinienspektroskopie. Der Laserstrahl wird polarisiert und auf das Prisma fokussiert, auf dem sich die Probe befindet. Nach der Reflexion am Prisma wird die nicht in die Schicht eingekoppelte Intensität des Laserstrahls über einen Photodetektor gemessen.

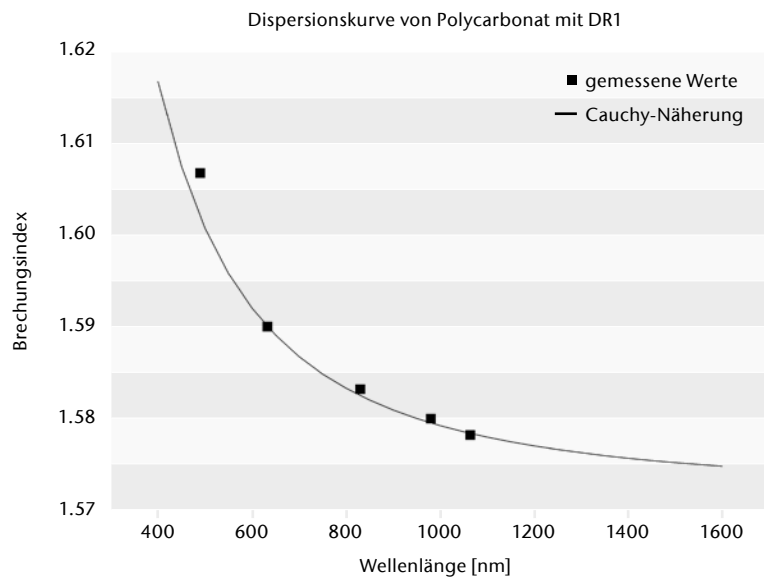


Abb. 9) Brechungsindizes von Polycarbonat mit DR1 (5 Massenprozent) bei verschiedenen Wellenlängen und eine durch die Cauchy-Näherung angepasste Dispersionskurve.

und wird auch im Folgenden verwendet. Die hier präsentierten Messergebnisse sind nicht auf ihre Reproduzierbarkeit geprüft und dienen lediglich zur experimentellen Veranschaulichung der Modenlinienspektroskopie. Zur Berechnung des Brechungsindex und der Schichtdicke ist es bei der Modenlinienspektroskopie nötig, die transzendente Gleichung der Selbstkonsistenzbedingung 2.25 zu lösen. Dazu ist allerdings ein Startwert für die Schichtdicke Voraussetzung. Dieser wurde mit einem DEKTAK DEKTAK-150 150-(Veeco-)Profilometer ermittelt. Das Profilometer arbeitet taktil mit einer Diamantspitze, welche die einen

Radius von 12,5 μm besitzt. Die Probe wird elektromechanisch unter der Diamantspitze bewegt, um so ein Höhenprofil zu erstellen. Die gemessene Schichtdicke beträgt 3,552 μm . Abb. 9 zeigt den gemessenen Brechungsindex von Polycarbonat mit Dispersrot Dispersrot 1 (5 Massenprozent) bei verschiedenen Wellenlängen und eine durch die Cauchy-Näherung angepasste Dispersionskurve. Die größte Fehlerquelle liegt darin, dass die Probe an das Prisma gedrückt werden muss, so dass eine Einkopplung des Lichts in die Polymerschicht möglich ist. Dadurch kann sich jedoch die Schichtdicke leicht verringern, was zu

einem systematischen Fehler führt. Frühere Arbeiten haben eine theoretische Genauigkeit des Messverfahrens von $\Delta\alpha = 10^{-5}$ demonstriert (Monneret et al. 2000). Der Einfluss des Anpressdrucks auf die absolute Genauigkeit des Messverfahrens muss noch in weiteren Studien geprüft werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die theoretischen Grundlagen der Modenlinienspektroskopie wurden in diesem Skript beschrieben. Durch die explizite Betrachtung planarer Wellenleiter konnten die wesentlichen Formeln und Gleichungen für TE- und TM-polarisiertes Licht hergeleitet werden. Die daraus abgeleitete Selbstkonsistenzbedingung in einem planaren Wellenleiter wurde genutzt, um die Schichtdicke und den Brechungsindex zu berechnen. Dazu wurden mit der Modenlinienspektroskopie bei verschiedenen Wellenlängen die Intensitätsverteilungen in Abhängigkeit vom Einfallswinkel gemessen. Eine explizite Anleitung zur experimentellen Ermittlung der Intensitätsverteilungen sowie eine Näherungsformel zur Berechnung der minimalen Schichtdicken wurden beschrieben und theoretisch hergeleitet. Durch die Betrachtung der einzelnen Polarisationszustände (TE und TM) kann auch die optische Anisotropie mit Hilfe der Modenlinienspektroskopie bestimmt werden. In dieser Arbeit wurde exemplarisch anhand einer Polymerschicht die Ermittlung des Brechungsindex demonstriert. Die Schichtdicke wurde dabei mit einem Profilometer gemessen. Unsere Ergebnisse zeigen zwar die hochpräzise Messung des Brechungsindex, müssen jedoch auf ihre Reproduzierbarkeit in zukünftigen Arbeiten geprüft werden.

Weitere Forschungsarbeiten an der TH Wildau werden sich mit der theoretischen und experimentellen Bestimmung des Pockelseffektes von nichtlinear optischen Polymeren mittels der Modenlinienspektroskopie beschäftigen. Dieser Effekt ist für eine effektive Weiterentwicklung von elektrooptischen Modulatoren, insbesondere für die Schaltgeschwindigkeit und den Spannungsbedarf, von wesentlicher Bedeutung. Dazu können die hier präsentierten theoretischen Grundlagen

genutzt werden, um die Brechungsindexänderung in Abhängigkeit von einem elektrischen Feld zu bestimmen. So kann der Pockelseffekt, also die Änderung des Brechungsindex durch Anlegen eines elektrischen Feldes, mit Gleichung 3.2 bestimmt werden, wenn der Brechungsindex vor und nach dem Anlegen des elektrischen Feldes gemessen wird. Ein besonderer Vorteil ist, dass auch die Dispersion, also die Wellenlängenabhängigkeit, des Pockelseffektes analog zu dem Beispiel in Abb. 9 gemessen werden kann. Des Weiteren soll in Zukunft auch die Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex durch die Modenlinienspektroskopie bestimmt werden. Dafür wird der Probenhalter mit einem Heizelement modifiziert.

LITERATUR

- Alloatti L, Palmer R, Diebold S, Pahl KP, Chen B, Dinu R, Fournier M, Fedeli J-M, Zwick T, Freude W, Koos C, Leuthold J (2014) 100 GHz silicon-organic hybrid modulator. *Light Sci Appl* 3(5):e173. doi: 10.1038/lisa.2014.54
- Gould M, Baehr-Jones T, Ding R, Huang S, Luo J, Jen AK-Y, Fedeli J-M, Fournier M, Hochberg M (2011) Silicon-polymer hybrid slot waveguide ring-resonator modulator. *Opt Express* 19(5):3952–3961. doi: 10.1364/OE.19.003952
- Hecht E (2014) *Optik*. De Gruyter Studium. De Gruyter, Berlin. ISBN: 978-3110526646
- Korn D, Jazbinsek M, Palmer R, Baier M, Alloatti L, Yu H, Bogaerts W, Lepage G, Verheyen P, Absil P, Guenter P, Koos C, Freude W, Leuthold J (2014) Electro-Optic Organic Crystal Silicon High-Speed Modulator. *IEEE Photonics J* 6(2):1–9. doi: 10.1109/JPHOT.2014.2314113
- Miller SE (1969) *Integrated Optics. An Introduction*. Bell System Technical Journal 48(7):2059–2069. doi: 10.1002/j.1538-7305.1969.tb01165.x
- Monneret S, Huguet-Chantôme P, Flory F (2000) m-lines technique. Prism coupling measurement and discussion of accuracy for homogeneous waveguides. *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 2(3):188–195. doi: 10.1088/1464-4258/2/3/304
- Reider GA (2013) *Photonik. Eine Einführung in die Grundlagen*, 3. Aufl. Springer, Wien. ISBN: 978-3709115206
- Saleh BEA, Teich MC (2008) *Grundlagen der Photonik*, 2., vollst. überarb. und erw. Aufl. Lehrbuch Physik. Wiley-VCH, Weinheim. ISBN: 978-3527406777
- Steglich P, Mai C, Stolarek D, Lischke S, Kupijai S, Villringer C, Pulwer S, Heinrich F, Bauer J, Meister S, Knoll D, Casalboni M, Schrader S (2015) Novel Ring Resonator Combining Strong Field Confinement With High Optical Quality Factor. *IEEE Photon Technol Lett* 27(20):2197–2200. doi: 10.1109/LPT.2015.2456133
- Steglich P, Mai C, Stolarek D, Lischke S, Kupijai S, Villringer C, Pulwer S, Heinrich F, Bauer J, Meister S, Knoll D, Casalboni M, Schrader S (2016) Partially slotted silicon ring resonator covered with electro-optical polymer. In: Vivien L, Pavesi L, Pelli S (eds), *Sunday 3 April 2016*, Brussels, Belgium. *SPIE Proceedings*. SPIE, 98910R. doi: 10.1117/12.2217725
- Ulrich R, Torge R (1973) Measurement of thin film parameters with a prism coupler. *Appl Opt* 12(12):2901–2908. doi: 10.1364/AO.12.002901

AUTOREN

Dr. Patrick Steglich*
Dr. Viachaslau Ksianzou
Claus Villringer, M.Eng.**
Silvio Pulwer, M.Eng.**
Prof. Dr. Sigurd Schrader
Forschungsgruppe für Photonik, Laser & Plasmatechnologien
Technische Hochschule Wildau

* Gastwissenschaftler am Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik IHP

** University of Rome „Tor Vergata“

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



Einsatz der Brennstoffzelle als Netzersatzanlage sicherheitsrelevanter Digitalfunkstationen im Feldtest

Denny Ragusch*, Michael Jergović, Lutz B. Giese und Siegfried Rolle

Zusammenfassung

Es wird anhand des Förderprojekts „Wasserstoff-Netzersatzanlagen der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) des Landes Brandenburg“ des Zentraldienstes der Polizei des Landes Brandenburg die Praxistauglichkeit von Brennstoffzellen-Netzersatzanlagen untersucht. Marktreife und kommerziell verfügbare Brennstoffzellen wurden in 115 sicherheitsrelevanten Digitalfunkstationen im Flächenland Brandenburg als Ersatz von wartungsintensiven und umweltproblematischen Dieselgeneratoren für die (Not-)Stromversorgung installiert. Diese Netzersatzanlagen sind für eine Überbrückungszeit von 72 h unter realen Bedingungen ausgelegt und wurden im Feldtest, parallel zum realen Betrieb, über einen längeren Einsatzzeitraum (ca. 2 Jahre) auf ihre Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit hin untersucht. Die Anforderungen an und die Realisierung der Brennstoffzellen-Netzersatzanlagen sowie die Feldtest-Versuchsplanung und deren Ergebnisse werden beschrieben und diskutiert. Die Praxistauglichkeit wird mit einer hohen Verfügbarkeit über 97 % und einer Funktionszuverlässigkeit von mehr als 95 % erfolgreich bestätigt. Die Entwicklung weiterer Komponenten wird empfohlen.

Abstract

On the basis of the funding project "Hydrogen Based Backup Power Systems of Public Authorities and Organizations with Security Tasks (BOS) of the German Federal State of Brandenburg" of the Central Police's Services of the German Federal State of Brandenburg, the practicability of fuel-cell backup power systems is investigated. Within this project, market-ready and commercially available fuel-cell systems were installed in 115 security-relevant digital telecommunication units in the Federal State of Brandenburg as a replacement for maintenance-intensive and environmentally-hazardous diesel generators for (emergency) power supply. These emergency power systems are designed for a bridging time of 72 hours under real conditions and have been tested for their reliability and availability over a longer period of operation (approx. 2 years) in the field test, simultaneously with real operation. The requirements and realization of the fuel cell backup power systems as well as the field test planning and their results are described and discussed. The practicability is successfully confirmed with a high availability of more than 97 % and a functional reliability of more than 95 %. Additional development requirements for further components are recommended.

1. Einführung und Zielstellung

Die konventionelle Netzersatzanlage (NEA) mit Dieselgenerator ist wartungsintensiv (Kurtz et al. 2015) und umweltproblematisch (Gagge 2008), zudem sind langfristig Preissteigerungen des Dieseltreibstoffs infolge der global begrenzten Verfügbarkeit zu erwarten. Eine umweltfreundliche Alternative stellt die Brennstoffzellen-NEA (BZ-NEA) dar (Serincan 2016). Sie ist unter anderem wartungsarm, zuverlässig, nahezu geräuschlos im Betrieb und durch einfache Erweiterung des Brennstofflagers flexibel in der Überbrückungszeitdauer (Nordin &

Lindemark 1999). Die BZ-NEA übernimmt bei einem Stromausfall die Notstromversorgung und ist von der unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) zu unterscheiden. Während der Umschaltung auf den Notstrombetrieb kann es beispielsweise bei der NEA zu einem kurzfristigen Spannungsabfall kommen. Eine USV ist zudem in der Regel nur für wenige Minuten bis einige Stunden Überbrückungszeit ausgelegt, die NEA je nach Anwendungsfall für einen längeren Überbrückungszeitraum. Ziel dieses Beitrags ist es, die Praxistauglichkeit der BZ-NEA zu überprüfen.

Betriebserfahrungen und Feldtestmessdaten wurden im Polizeiprojekt „W-NEA BOS BB – Wasserstoff-Netzersatzanlagen der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben des Landes Brandenburg“ (Förderkennzeichen: 03BS224) im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms „Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie“ gewonnen. Neben der Durchführung eines Feldtests zur Demonstration der Praxistauglichkeit der BZ-NEA war die Marktvorbereitung ein wesentliches Projektziel. Wissenschaftlich-technisch wurde das Projekt durch die Technische Hochschule Wildau (THWi) begleitet. Der Einsatz

der Brennstoffzelle erfolgte unter realen Betriebsbedingungen als Netzersatzanlage in sicherheitsrelevanten Digitalfunkstationen der Polizei im Land Brandenburg. Ein solcher Digitalfunkstandort ist beispielhaft in der Abb. 1 gezeigt. Kurzel (2016) bestimmte folgende relevante Parameter für die Praxistauglichkeit: Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umwelteinfluss. Im Feldtest wurden die Parameter Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit untersucht. Die Sicherheit der Anlagen ist gegeben, da nach den entsprechenden gesetzlichen Vorschriften die Anlagen abgenommen wurden. Alle Anlagen wurden natürlich belüftet, so dass keine aufwändige Sicherheitstechnik insbesondere zum Explosionsschutz installiert werden musste. Auf Grund der im Vergleich zur konventionellen Diesel-NEA deutlich geringeren Wartungs- und Betriebskosten für die Brennstoffzellensysteme (Gagge 2008) können trotz höherer Anschaffungskosten die Anlagen wirtschaftlich betrieben werden (Kurtz et al. 2015). Dieselgeneratoren müssen regelmäßig gewartet und betrieben werden, um die Verfügbarkeit



Abb. 1) Foto eines BOS-Digitalfunkmasts mit zugehörigem Funksystemtechnik-Container. Quelle: Projektorganisation Digitalfunk BOS Brandenburg

sicherzustellen. Die BZ-NEA wird nur einmal im Jahr gewartet (Gagge 2008). Der Brennstoff kann mittels regenerativ erzeugten Stroms nachhaltig hergestellt werden. Weiterhin kann der Wasserstoff nicht das Erdreich verunreinigen, wie dies bei Diesel-Leckagen möglich ist. Die Abgase bestehen aus unschädlichem Wasserdampf und die Geräuschentwicklung der Brennstoffzellensysteme ist im Vergleich zum Dieselgenerator geringer. Die Praxistauglichkeit der BZ-NEA ist in den Punkten Sicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umwelteinfluss somit belegt.

2. Anforderungen und Beschreibungen der untersuchten Brennstoffzellen-Netzersatzanlagen

115 Standorte wurden im Feldtest auf drei Anbieter (A, B und C) verteilt. Die wesentlichen Anforderungen an die Brennstoffzellen-Netzersatzanlagen im Feldtest waren:

- geringe Aufstellfläche der NEA samt Treibstofflager
- Vandalismussicherheit
- plausible Service- und Logistikkonzepte
- minimale Überbrückungszeit eines Stromausfalls von 72 h
- Möglichkeit des Brennstoffwechsels während des NEA-Betriebs
- elektrotechnische Einbindung zur vollständigen Ersetzung des Stromnetzes
- Nennleistung für mindestens 2.500 Betriebsstunden
- Aufnahme diverser Umweltmessdaten, wie Lufttemperatur, Luftdruck und Luftfeuchte, für statistischen Auswertungen
- übergreifendes Monitoringsystem

Alle installierten Brennstoffzellen-Netzersatzanlagen basierten auf PEM-Brennstoffzellen, die direkt mit Wasserstoff aus Druckgasflaschen betrieben wurden. PEM steht für Proton Exchange Membrane und ist ein häufig eingesetzter Brennstoffzellentyp in vielen Anwendungsbereichen. Für den Betrieb der Brennstoffzellen war ein parallel geschalteter NEA-Akkumulator, insbesondere zum Start der Brennstoffzelle und zur Abdeckung von Leistungsspitzen, notwendig. Die Anbieter setzten entsprechend

den gestellten Anforderungen unterschiedliche bauliche Konzepte um. Anbieter A mit einem „Outdoor-Gehäuse“, das alle wesentlichen BZ-NEA-Komponenten samt Monitoringsystem enthielt, wird beispielhaft in der Abb. 2 gezeigt. Anbieter B entwickelte eine eigene vandalismussichere Einhausung, die als Anbau an die Funkcontainerwand montiert wurde. Sie enthielt die Wasserstoff-Druckgasflaschen und die Brennstoffzellenmodule. Der BZ-NEA-Akkumulator, die weiteren elektrotechnischen Komponenten und das Monitoringsystem wurden direkt im Funkcontainer untergebracht. Anbieter C erweiterte den Funkcontainer um einen Anbau, der die wesentlichen BZ-NEA-Komponenten einschließlich Monitoringsystem enthielt.

Die minimale Überbrückungszeit eines Stromausfalls von 72 h wurde mittels zweier Wasserstoffgebinde mit automatischer Umschaltung, welche unter anderem einen Druckgasflaschentauch während des BZ-NEA-Betriebs erlaubte, realisiert. Die Flaschenanzahl wurde entsprechend der Systemparameter ausgelegt. Durch die automatische Umschaltung ist es mit entsprechendem Druckgasflaschentauch möglich, die BZ-NEA weit über die 72 h hinaus kontinuierlich zu betreiben.

Die elektrotechnische Einbindung erfolgte in der Weise, dass bei einem Stromausfall, detektiert durch einen Phasenwächter, nach 15 Minuten die BZ-NEA die Stromversorgung übernahm. Kürzere Stromausfälle wurden von der vorhandenen Funktechnik mit integrierter USV überbrückt. Das EVU-Netz wurde im BZ-NEA-Betrieb durch insgesamt drei redundant ausgeführte Wechselrichter, die aus der Brennstoffzellen-Gleichspannung eine 230 V-Wechselspannung erzeugten, vollständig ersetzt. Eine schematische Darstellung zeigt die Abb. 3. Die elektrische Last ergab sich im Feldtest maßgeblich aus der Funksystemtechnik und der Klimaanlage. Die Klimaanlage war zum Schutz der Funksystemtechnik so eingestellt, dass die Temperatur im Inneren des Digitalfunkcontainers nicht weniger als 10°C und nicht mehr als 32°C betrug. Aus vorangegangenen Untersuchungen wurden die erforderlichen Nennleistungen der BZ-NEA bestimmt, die in

der Tab. 1 mit der Anzahl der untersuchten Anlagen je Anbieter aufgeführt sind. Anbieter A und C verwendeten an allen Standorten ein baugleiches Brennstoffzellensystem mit jeweils zwei FutureE-Jupiter-48-V-Brennstoffzellenmodulen (JU FCU 2.0 48V-23) mit je 2,5 kW maximaler Ausgangsleistung. Hauptbestandteil des Monitoring- und Steuerungssystems der Anbieter A und C war der Heliocentris „Energymanager“. Anbieter B verwendete Brennstoffzellenmodule der Firma ReliOn Inc., für die Nennleistungen „2,5 kW“ und „3 kW“ jeweils ein Brennstoffzellenmodul „ReliOn E-2500“ und ein „ReliOn E-1100“. Bei den Anlagen mit „3,5 kW“ Nennleistung wurden zwei „ReliOn E-2500“ Brennstoffzellenmodule verwendet. Das Monitoring- und Steuerungssystem basierte auf dem „Sitemanager“ der GENEREX System GmbH. Hauptaufgabe der Monitoringsysteme im Feld war die Übertragung des aktuellen BZ-NEA-Status, des vorhandenen Brennstoffvorrats mit Abschätzung der minimalen Überbrückungszeit und der System- und Umweltmessdaten sowie die Alarmierung bei Notstrombetrieb. Die Messdaten wurden verschlüsselt über das Mobilfunknetz an die jeweiligen zentralen Datenbankserver der Anbieter gesendet.

3. Feldtest Versuchsprogramm und Datenauswertung

Der Feldtest wurde in zwei Betriebsphasen aufgeteilt. Die erste Phase „Betrieb I“ begann direkt nach der erfolgreichen Installation und Inbetriebnahme der jeweiligen BZ-NEA für einen Zeitraum von 24 Wochen. Die Anlagen wurden in dieser Phase wöchentlich entsprechend dem Versuchsprogramm getestet, um Anlagenfehler frühzeitig festzustellen. In der Betriebsphase „Betrieb II“ wurden die Tests monatlich durchgeführt. Alle Tests waren Stromausfallsimulationen, wobei der Testbeginn variierte und bei folgenden Tests jeweils um eine Stunde verschoben wurde. Das öffentliche Netz wurde wie bei einem realen Stromausfall getrennt. Die Dauer der Stromausfallsimulationen wurde wie folgt festgelegt: kurze Stromausfälle dauerten 30 Minuten, lange Stromausfälle 240 Minuten und zwei kurz hintereinander auftretende Stromausfälle je



Abb. 2) Foto eines geöffneten „Outdoor-Gehäuses“ von Anbieter A; links im Bild sind die Druckgasflaschen in Rot zu erkennen, rechts im Bild die zwei Brennstoffzellenmodule mit Controller, drei Wechselrichter, die Monitoringhardware und der NEA-Akkumulator. Quelle: AdKor GmbH

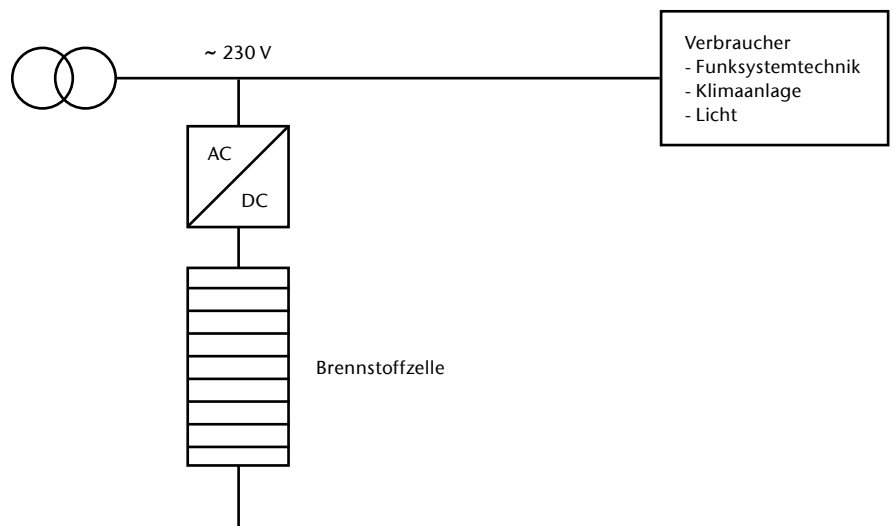


Abb. 3) Schematische Darstellung der elektrotechnischen Einbindung der Netzersatzanlage. Die Netzersatzanlage stellt mittels Wechselrichtern 3-Phasen je 230 V zur Verfügung.

Tab. 1: Übersicht der Anzahl installierter Brennstoffzellen-Netzersatzanlagen je Anbieter und Nennleistung

Nennleistung	Anzahl der Brennstoffzellen-Netzersatzanlagen-Standorte		
	Anbieter A	Anbieter B	Anbieter C
3,5 kW	6	4	3
3,0 kW	18	14	11
2,5 kW	27	21	11
Gesamtanzahl:	51	39	25

30 Minuten mit 15 Minuten Pause dazwischen. In der Tab. 2 sind die einzelnen Versuchsgruppen aufgeführt. Die Anlagen der Versuchsgruppe V-00 wurden neben den realen Stromausfällen nicht zusätzlich getestet. Die Versuchsgruppen V-00 bis V-03 entsprachen jeweils 10 % der Anlagen je Anbieter. Die Versuchsgruppe V-04 war je Anbieter ein Sonderstandort mit zusätzlicher Messtechnik für weiterführende Untersuchungen. Die Versuchsgruppe V-05 beinhaltete alle restlichen Standorte. Ziel der Versuchsplanung war im Wesentlichen die Bestimmung der Verfügbarkeit und der Zuverlässigkeit, aber auch die Bestimmung des Brennstoffverbrauchs und des Betriebsverhaltens unter besonderen Betriebsbedingungen, wie der Betrieb im Hochsommer oder im Winter.

Die Verfügbarkeit (Arnold 2008: 868) beschreibt die zeitliche Einsatzbereitschaft der Anlagen in Prozent und wird definiert als:

$$\text{Verfügbarkeit} = \frac{\text{Summe der geplanten Betriebszeiten} - \text{Summe der Ausfallzeiten}}{\text{Summe der geplanten Betriebszeiten}} \cdot 100\%$$

Die Nichtverfügbarkeit eines Brennstoffzellenmoduls und Wartungsarbeiten, bei denen das System nicht verfügbar war, wurden den Ausfallzeiten angerechnet.

Die Betriebszeit der BZ-NEA setzt sich aus funktionsbedingten Wartezeiten (das öffentliche Netz ist vorhanden) und aus ereignisbezogenen Betriebszeiten (der Strom fällt aus) zusammen. Eine ereignisbezogene Funktionszuverlässigkeit (Arnold 2008: 866) ist daher zweckmäßig. Als störungsfreie Funktion wurde der folgende Ablauf definiert:

- Erkennen des Stromausfalls (real oder zu Testzwecken)
- erfolgreiche Notstromversorgung
- fehlerfreier Betrieb der Brennstoffzellenmodule
- erfolgreiches Zurückschalten auf das öffentliche Netz

$$\text{Funktionszuverlässigkeit} = \frac{\text{Anzahl Funktionsfähig}}{\text{Anzahl Funktionsfähig} + \text{Anzahl Funktionsunfähig}} \cdot 100\%$$

Der Brennstoffvorrat je Wasserstoffgebinde wurde durch die Monitoringsysteme näherungsweise mittels des Druck-

gasflaschenvolumens und des Wasserstoffdrucks im Gebinde sowie der Außentemperatur bestimmt. Das Wasserstoffgas wurde dabei als ideales Gas angenommen. Da sich der Wasserstoff bei den vorliegenden Betriebsbedingungen nicht wie ein ideales Gas verhält, wurde mittels der Methode nach Zheng et al. (2016) das reale Wasserstoffvolumen bestimmt. Die Abb. 4 verdeutlicht diesen Sachverhalt. Das Wasserstoffvolumen, berechnet unter der Annahme des idealen Gases, weicht bei einer Gastemperatur von 15°C und einem Gasdruck im Bereich von 60 bis 300 bar circa von 5 bis zu 20 % vom realen Gas ab. Zur Bestimmung des Wasserstoffverbrauchs wird das gemessene reale Wasserstoffvolumen zweier Zeitpunkte auf Normbedingungen umgerechnet und die Differenz gebildet. Zusammen mit der von den Brennstoffzellen gewandelten elektrischen Energie in dieser Zeitspanne kann der reale Verbrauch in Normliter pro Minute und Kilowatt mit den Herstellerangaben verglichen werden.

4. Ergebnisse und Diskussion

In der Tab. 3 sind die zusammengefassten Ergebnisse der Verfügbarkeitsuntersuchung dargestellt. Die mittlere Verfügbarkeit in Prozent aller BZ-NEA betrug während der Projektlaufzeit über 97 %. Die Unterschiede der mittleren Verfügbarkeit der nahezu baugleichen Anlagen der Anbieter A und C mit 99,6 % (A) und 97,4 % (C) sind durch organisatorische Abläufe zu begründen. Anbieter A erkannte und behob Störungen selbstständig, während Anbieter C vereinbarungsgemäß erst auf die Störungsmeldungen durch den Betreiber reagierte. In den einzelnen Versuchsgruppen sind keine gravierenden Unterschiede der Verfügbarkeit erkennbar. Durch die Behebung vorhandener Softwarefehler bei den Systemen der Anbieter A und C kann die Verfügbarkeit zudem weiter gesteigert werden. Im Wesentlichen sind neben menschlichem Versagen (beispielsweise nicht geöffnete Druckgasflaschen) und den wenigen ausgetauschten Brennstoffzellenmodulen defekte elektrische Umschaltanlagen und undichte 300-bar-Wasserstoff-

Tab. 2: Übersicht der Versuchsgruppen mit Stromausfall-Simulationsdauern in den jeweiligen Betriebsphasen.

Woche (Betrieb-I) Monat (Betrieb-II)	V-00	V-01	V-02	V-03	V-04	V-05
1	-	30 min	30 min	30 min	240 min	30 min
2	-	30 min	30 min	30 min 15 min Pause 30 min	30 min	30 min
3	-	30 min	30 min	30 min	30 min 15 min Pause 30 min	30 min
4	-	30 min 15 min Pause 30 min	240 min	240 min	30 min	30 min

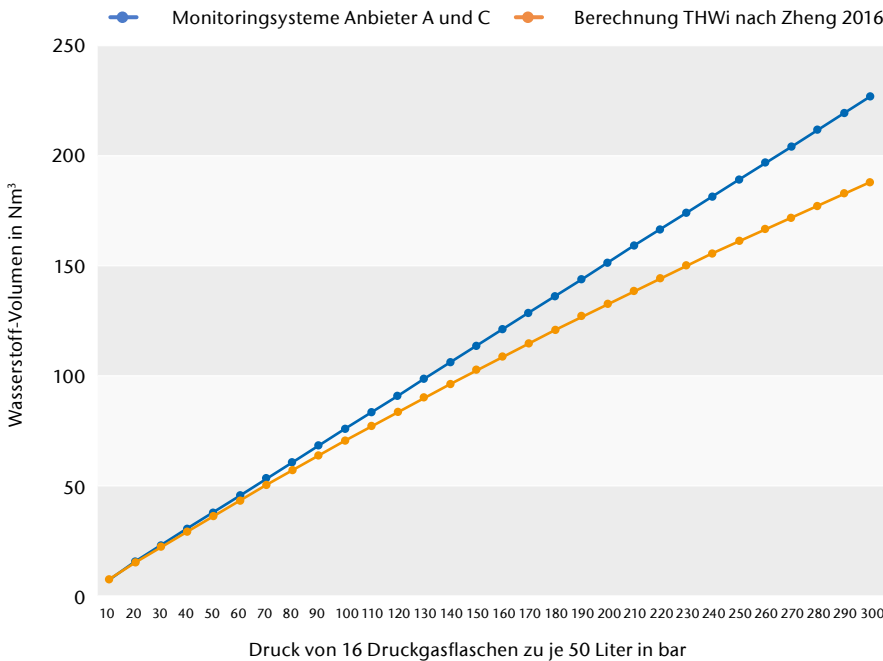


Abb. 4) Vergleich der Wasserstoff-Volumenberechnung durch das Monitoringsystem von Anbieter A und C (Annahme ideales Gas) gegenüber der Berechnung durch die THWi (reales Gas) nach Zheng et al. 2016; 16 Druckgasflaschen zu je 50 Liter; Berechnung für eine Gastemperatur von 15°C..

armaturen verfügbarkeitsmindernd aufgefallen. Alle Monitoringsysteme konnten schleichende Wasserstoffleckagen nicht detektieren. Die Service- und Logistikkonzepte wurden durch die Logistikexperten der Gruppe von Herrn Prof. Dr.-Ing. Sonntag der THWi als plausibel eingestuft, so dass keine Minderung der Verfügbarkeit durch Brennstoffmangel zu erwarten ist. Die zusammengefassten Ergebnisse der Funktionszuverlässigkeit je Anbieter und auswertbarer Kalenderwochen sind in der Tab. 4 dargestellt.

Die Funktionszuverlässigkeit konnte während des Projektverlaufs auf mehr als 95 % in der Betriebsphase II verbessert werden und ist vergleichbar mit Werten aus der Literatur, z. B. Serincan (2016) und Kurtz et al. (2015). Brennstoffzellenmodule der Anbieter A und C fielen teilweise auf Grund von geringen Standortlasten aus. Während eines Tests trat dabei meist in einem der zwei BZ-Modulen ein Fehler auf. Obwohl der Standort während der Testzeit durch ein BZ-Modul versorgt wurde, wurde ein solcher Test als nicht

funktionsfähig gewertet, da bei einem längeren Stromausfall die Versorgung unter Umständen nicht gewährleistet wäre. Weiterhin gab es ein Softwareproblem mit der Selbsttestroutine, die sich unter Umständen nicht beendete, automatisch abgebrochen wurde und dann wieder neu startete. Einige Softwarefehler wurden während der Projektlaufzeit behoben. Die Funktionszuverlässigkeit kann daher durch weitere Softwareupdates noch signifikant erhöht werden. Auffälligkeiten in den einzelnen Versuchsgruppen waren nicht erkennbar. Das System vom Anbieter B arbeitete sehr zuverlässig mit einer Funktionszuverlässigkeit von 99,89 % über die gesamte Projektlaufzeit. Bei den Untersuchungen zum Betrieb im Winter mit Temperaturen um 0°C und im Sommer um die 35°C, dem Druckgasflaschentausch während des BZ-NEA-Betriebs, der Simulation eines 72 Stunden-Stromausfalls und eines großflächigen Stromausfalls aller Anlagen je Anbieter funktionierten die Brennstoffzellen bis auf die bekannten Fehler ohne Minderung der Verfügbarkeit und Funktionszuverlässigkeit. Eine signifikante Degradation der Brennstoffzellenmodule konnte im Zeitraum des Feldtests nicht beobachtet werden.

Die Berechnungen der Verfügbarkeit und Funktionszuverlässigkeit erfolgten nur für die auswertbaren Kalenderwochen im gesamten Projektverlauf. Es ergaben sich folgende Mittelwerte der auswertbaren Kalenderwochen in

Tab. 3: Übersicht der im Feldtest kumulierten Betriebs- und Ausfallzeiten, sowie der ermittelten BZ-NEA-Verfügbarkeiten aus den auswertbaren Messdaten.

	Summe der geplanten Betriebszeiten in h	Summe der Ausfallzeiten in h	BZ-NEA Verfügbarkeit in %
Anbieter A			
Betriebsphase-I	184940	676	99,63
Betriebsphase-II	713541	2887	99,59
Projektverlauf	898481	3563	99,6
Anbieter B			
Betriebsphase-I	131172	361	99,72
Betriebsphase-II	362951	175	99,95
Projektverlauf	494123	536	99,89
Anbieter C			
Betriebsphase-I	98593	3032	96,92
Betriebsphase-II	369623	9132	97,53
Projektverlauf	468216	12164	97,4

Prozent je Standort: Anbieter A 95,8 %, Anbieter B 68 % und Anbieter C 97,6 %. Die Messdaten der identischen Monitoringsysteme A und C waren nahezu vollständig auswertbar. Datenlücken entstanden im Wesentlichen durch ein größeres Update der Software. Das Monitoringssystem vom Anbieter B hatte Softwareprobleme im Datenmanagement, so dass historische Messdaten teilweise nicht auswertbar waren. Dies betraf hauptsächlich die Kalenderwochen, in denen keine Tests durchgeführt wurden. Von 1.567 geplanten Tests (Anbieter B) konnten jedoch 1.475 ausgewertet werden. Insgesamt waren je Anbieter (A/B/C) 2.037, 1.475 und 1.177 Tests auswertbar.

Der durchschnittliche Untersuchungszeitraum der BZ-NEA betrug 2 Jahre und 1 Monat. Die durchschnittliche BZ-NEA-Testlaufzeit betrug etwa 1 Stunde je Monat zuzüglich der Selbsttests und sonstigen Notstromfällen. Die akkumulierten ereignisbezogenen BZ-NEA-Betriebszeiten der auswertbaren Kalenderwochen je Anbieter (A/B/C) betrugen: 2.272 h, 2.587 h und 1.200 h. Auffällig ist Anbieter B mit einer BZ-NEA-Betriebszeit von 2.587 h, welche sich aus 1.388 h THWi-Tests, 151 h sonstigen Notstromfällen und 1.048 h an Selbsttest zusammensetzt. Im Vergleich zu den anderen Anbietern, wurde im Verlaufe des Projektes ein

festes Selbsttestintervall von 14 Tagen mit 45 min Betrieb bei nahezu Nennleistung gefordert. Dieses starre Selbsttestschema hatte einen hohen Wasserstoffverbrauch zur Folge. Über die Projektlaufzeit wurden von den Brennstoffzellen der Anbietern (A/B/C) in Summe 1.619 kWh, 3.938 kWh und 952 kWh an elektrischer Energie bereitgestellt.

Der BZ-NEA-Verbrauch wurde bei allen Systemen zu ca. $14 \frac{NI}{min \cdot kWh}$ berechnet. Die Berechnung des Brennstoffverbrauchs erfolgte nur näherungsweise, da die Wasserstoffgastemperatur im Feldtest nicht direkt gemessen werden konnte. Es wurde angenommen, dass die Wasserstoffgastemperatur auf Grund der natürlichen Belüftung der Umgebungstemperatur entspricht. Die Herstellerangaben konnten trotz dieser Einschränkung bestätigt werden.

5. Schlussfolgerungen

Eine hohe Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der BZ-NEA-Anlagen wurde erfolgreich demonstriert. Entwicklungsbedarf wurde aufgedeckt bei der Detektion von schleichenden Leckagen, der Dichtheit von 300 bar-Wasserstoffarmaturen und den Selbsttestroutinen zur Verfügbarkeitssteigerung. Die Ergebnisse und gesammelten Erfahrungen aus dem Feldtest bestätigen, dass der kommerzielle

Einsatz der Brennstoffzelle als Netzeratzanlage sicherheitsrelevanter Digitalfunkstationen die Praxistauglichkeit erreicht hat.

Tab. 4: Übersicht der ereignisbezogenen Anlagen-Funktionszuverlässigkeiten der jeweiligen Anbieter aus den auswertbaren Messdaten

	Summe der Ereignisse (THWi-Test, Selbsttest und Notstrombetrieb)	Summe Funktionsfähig	Funktionszuverlässigkeit in %
Anbieter A			
Betriebsphase-I	1220	1171	95,98
Betriebsphase-II	1984	1936	97,58
Projektverlauf	3204	3107	96,97
Anbieter B			
Betriebsphase-I	1251	1250	99,92
Betriebsphase-II	2286	2283	99,87
Projektverlauf	3537	3533	99,89
Anbieter C			
Betriebsphase-I	611	562	91,98
Betriebsphase-II	1101	1052	95,55
Projektverlauf	1712	1614	94,28

LITERATUR

Arnold D (ed) (2008) Handbuch Logistik, 3. Aufl. VDI-Buch. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. ISBN: 9783540729297

Gagge JP (2008) PEM fuel cells versus diesel generators – which solution to pick? In: INTELEC 2008 - 2008 IEEE 30th International Telecommunications Energy Conference, San Diego, CA, pp 1–5. doi: 10.1109/INTLEC.2008.4664062

Kurtz J, Saur G, Sprik S (2015) Hydrogen Fuel Cell Performance as Telecommunications Backup Power in the United States. Technical Report NREL/TP-5400-60730, Denver

Kurzel O (2016) Praxisnahe Eignungsuntersuchung von PEM-Brennstoffzellen für Netzersatzanlagen. Bachelorarbeit, Technische Hochschule Wildau

Nordin H, Lindemark B (1999) System reliability, dimensioning and environmental impact of diesel engine generator sets used in telecom applications. In: 1999 Intelec, 9/6/1999 - 9/6/1999, Copenhagen, Denmark. I E E E, Piscataway, ISBN: 0-7803-5624-1, p 377. doi: 10.1109/INTLEC.1999.794095

Serincan MF (2016) Reliability considerations of a fuel cell backup power system for telecom applications. Journal of Power Sources 309:66–75. doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.01.083

Zheng J, Zhang X, Xu P, Gu C, Wu B, Hou Y (2016) Standardized equation for hydrogen gas compressibility factor for fuel consumption applications. International Journal of Hydrogen Energy 41(15):6610–6617. doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.03.004

AUTOREN

Prof. Dr. rer. nat. Siegfried Rolle
Dr. rer. nat. Lutz B. Giese
Dipl.-Ing. Michael Jergović
M. Eng. Dipl.-Ing. (FH) Denny Ragusch
Labor für Regenerative Energietechnik
Technische Hochschule Wildau

E-Mail für Korrespondenz:
denny.ragusch@th-wildau.de



Schutzverhalten von weichballistischem ultrahochmolekularem Polyethylen

Michael Hendrix*, Michael Herzog

Zusammenfassung

Diese Publikation befasst sich mit dem Langzeitverhalten der Schutzeigenschaften von weichballistischem ultrahochmolekularem Polyethylen. Vorrangig soll die Frage geklärt werden, ob dieses Material qualitätsmindernde Erscheinungen im Schutzverhalten aufweist, die mit seinem fortschreitenden Alter einhergehen. Um diese Frage zu klären, wurden anhand zahlreicher Beschussversuche an polizeilichen Schutzwesten und Prüfmustern statistisch verlässliche Daten gesammelt und anschließend unter verschiedenen Blickwinkeln ausgewertet. Ein wesentliches Ergebnis der Untersuchungen ist, dass sich die Schutzeigenschaften von weichballistischem ultrahochmolekularem Polyethylen zumindest über einen Zeitraum von 30 Jahren nicht nennenswert ändern.

Abstract

This publication deals with the long-term behavior of the ballistic protection of ultra high molecular weight polyethylene. It aims to answer the question, whether ballistic material shows significant signs of a deterioration that comes with preceding age. To answer that question numerous shooting tests with bulletproof vests and test samples were made to collect statistically reliable data. The data then have been evaluated from different point of views. An essential result of the tests is that no appreciable deterioration of the ballistic protection can be recognized with preceding age up to 30 years.

1. Einführung

Schutzsysteme aus weichballistischen Materialien spielen in vielen Lebensbereichen aufgrund ihres geringen Gewichts bei hohem Schutz eine immer größer werdende Rolle. Basis sind zumeist Hochleistungsfasern, die auch für Seile und Gurte im Sport- und Freizeitbereich oder für Faserverbundwerkstoffe genutzt werden. Ein bekanntes Beispiel eines ballistischen Schutzsystems sind polizeiliche Schutzwesten (siehe z. B. Technische Richtlinie „Ballistische Schutzwesten“ aus dem Jahr 2008 (Polizeitechnisches Institut der Deutschen Hochschule der Polizei 2008)). Materialien für weichballistische Anwendungen spielen aber nicht nur als wesentlicher Bestandteil von Schutzkleidung eine Rolle, sondern werden zum Beispiel auch für den hartballistischen Schutz zur Panzerung von Fahrzeugen und in zunehmendem Maße auch zur passiven Gefahrenab-

wehr bei terroristischen Anschlägen eingesetzt (siehe z. B. Prüfung von ballistischem Material für Sonder-schutzfahrzeuge bei Frieß 2006). Die Wirkungsweise von weichballistischen Materialien lässt sich grob folgendermaßen beschreiben: Wenn ein Geschoss auf eine mehrlagige Struktur aus reißfestem (weichballistischem) Gewebe oder Gelege trifft, wird die kinetische Energie des Geschosses abgebaut, indem das Geschoss beim Durchdringen der einzelnen Gewebe- bzw. Gelegelagen diese zerstört oder dehnt, wobei auch am Geschoss (je nach Typ z. T.) beträchtliche Verformungsarbeit geleistet wird. Nach dem Durchdringen mehrerer Lagen hat das Geschoss seine kinetische Energie vollständig abgegeben und bleibt stecken. Weichballistische Materialien werden hauptsächlich zum Schutz vor Kurzwaffengeschossen oder beschleunigten Metallsplintern eingesetzt.

Schutzsysteme aus weichballistischen Materialien enthalten als wirksame Komponente zumeist Gewebe aus hochfesten synthetischen Fasern auf der Basis aromatischer Polyamide (Aramide) oder Gelege auf der Basis von ultra-hochmolekularem Polyethylen (UHMW-PE). Das Langzeitverhalten von Aramid-Geweben hatten wir schon vor einiger Zeit analysiert (Geßner & Hendrix 2014). Im Folgenden sollen die Ergebnisse systematisch durchgeführter Langzeituntersuchungen an Polyethylen-Gelegen dargestellt werden. Zur Klärung der stofflichen Mechanismen, die einer möglichen altersbedingten Änderung der Schutzwirkung von ultra-hochmolekularem Polyethylen zugrunde liegen, wurden Beschussversuche an Prüfmustern und polizeilichen Schutzwesten durchgeführt. Umfassend untersucht wurden Schutzwesten und Prüfmuster unterschiedlichen Alters, hergestellt aus dem Gelege SB21 und dem Gelege

* korrespondierender Autor

SB115. Beide Gelege sind UHMW-PE UD (ultra high molecular weight polyethylene unidirectional) von DSM Dyneema®. DSM produziert das UHMW-PE-Pulver, die Faser und das Gelege selbst. Dyneema® ist ein eingetragenes Warenzeichen der Royal DSM N.V. Der prinzipielle Versuchsaufbau für die Beschussversuche ist der VPAM APR 2006 zu entnehmen (Vereinigung der Prüfstellen für angriffshemmende Materialien und Konstruktionen 2010: 28).

Die Westen-Einschübe waren mit 34 Lagen SB21 bzw. 46 Lagen SB115 ausgestattet – die getragenen Westen können je nach Produktspezifikation der Westenhersteller zum Zeitpunkt der Herstellung eine abweichende Anzahl von Lagen aufweisen (die Lagenanzahl wurde manuell überprüft). Einschübe mit 34 Lagen SB21 waren eine Entwicklung für die Schutzklasse SK 1 nach der Technischen Richtlinie Schutzwesten aus dem Jahr 2000 (Polizeitechnisches Institut der Deutschen Hochschule der Polizei), Einschübe mit 46 Lagen SB115 waren eine Entwicklung für die Schutzklasse SK 1 nach der Technischen Richtlinie Schutzwesten aus dem Jahr 2008 (Polizeitechnisches Institut der Deutschen Hochschule der Polizei).

2. Künstliche Alterung

Die künstliche Alterung von 40x40 cm-Prüfmustern aus SB21-Gelegen und aus SB115-Gelegen wurde durchgeführt, indem die Prüfmuster eine Zeit lang hängend im Wärmeschrank bei einer konstanten Temperatur von 75°C und Gleichgewichtsluftfeuchtigkeit aufbewahrt wurden. Das entsprechend erreichte Alter hängt von der Verweildauer im Wärmeschrank ab und lässt sich für SB21 dem Arrhenius-Plot aus Fig. 2 der Publikation von Chabba et al. 2007 entnehmen. Legt man denselben Alterungsmechanismus zugrunde – wozu es aufgrund der chemischen Struktur keine Vorbehalte gibt –, kann dieser Arrhenius-Plot auch für SB115 verwendet werden. Insgesamt wurden 8 Prüfmuster aus SB21 und 8 Prüfmuster aus SB115

Tab. 1: Das Gelege SB21 basiert auf dem Garn SK76, das Gelege SB115 auf dem Garn SK99. Nachfolgend sind einige Parameter dieser Garne und des entsprechenden Geleges angeführt (DSM Dyneema 2017):

	SK99	SK76
Titer	880 dtex	1760 dtex
Zugfestigkeit	40–45 cN/dtex	34–37 cN/dtex
Dichte	0,970–0,980 g/cm ³	0,970–0,980 g/cm ³
Bruchdehnung	3,5 %	3,5 %
	SB21	SB115
Grammatur	140–150 g/m ²	75–84 g/m ²

künstlich gealtert, wobei jeweils 4 Prüfmuster 8 Wochen lang und 4 Prüfmuster 16 Wochen lang im Wärmeschrank verweilten. Dem Arrhenius-Plot ist zu entnehmen, dass einer Verweildauer von 8 Wochen bei 75°C ein simuliertes Alter von 15 Jahren, einer Verweildauer von 16 Wochen bei 75°C ein simuliertes Alter von 30 Jahren entspricht.

3. Beschussversuche an Westen und Prüfmustern

3.1 Vorbereitende Arbeiten

Bevor die uns zur Verfügung stehenden älteren (schon getragenen) Schutzwesten beschossen wurden, wurden die Westen auf Beschädigungen hin untersucht, die Lagen gezählt und weitere relevante Parameter ermittelt. Für die dann wirklich beschossenen Westen sind noch zusätzlich die RAL-Farbwerte sowie der Beschussort (Mellrichstadt oder DSM) angegeben. Die Schutzwesten wurden in der Schutzhülle, aber ohne Schockabsorber, beschossen.

Zusätzlich zu den Schutzwesten wurden auch Prüfmuster mit den Maßen 40 x 40 cm beschossen. Die Prüfmuster wurden teilweise künstlich gealtert: „8 Wochen bei 75°C gelagert“ entspricht einem simulierten Alter von 15, „16 Wochen bei 75°C gelagert“ einem simulierten Alter von 30 Jahren.

Gelege aus ultra-hochmolekularem Polyethylen ändern mit zunehmendem Alter ihre Farbe. Nach Informationen von DSM Dyneema wird diese Farbänderung durch die Matrix und nicht durch das Garn verursacht. Neuwertige Gelege haben einen RAL-Wert von 9003, was der Farbe „Signalweiß“ entspricht. Mit zunehmendem Alter geht die Farbe ins Gelbliche über. Zum Beispiel ist eine 15 Jahre alte Schutzweste, hergestellt aus SB21, etwas gelber als reinweiß (Letzteres entspricht dem RAL-Wert 9010).

Da auch Prüfmuster aus dem Gelege SB115 untersucht wurden (SB115 ist ein recht neues Produkt, die Markteinführung erfolgte 2012), war man darauf angewiesen, künstlich zu altern, da entsprechend natürlich gealtertes Material noch nicht vorliegt. Unter Verwendung des vorliegenden Arrhenius-Plots und gestützt durch den Vergleich der künstlich und natürlich gealterten Westen aus SB21 sollte die künstliche Alterung der natürlichen Alterung weitgehend entsprechen. Zur Absicherung wurden auch Prüfmuster aus SB21 künstlich gealtert und anhand des RAL-Wertes mit entsprechend natürlich gealterten Schutzwesten verglichen. Bei allen 15 Jahre künstlich gealterten Prüfmustern aus SB21 ist die Farbe sehr ähnlich den entsprechend natürlich gealterten Schutzwesten (etwas gelber als reinweiß). Bei einem

30 Jahre künstlich gealterten Prüfmuster aus SB21 ist der RAL-Wert 1015, was der Farbe „Hellelfenbein“ entspricht. Zusätzlich ist bei 30 Jahre künstlich gealterten Gelegen aus SB21 auf der Prüfmusteroberfläche eine größere Anzahl von maisgelben Spots zu beobachten.

Die Farben für Gelege aus SB115 sind die folgenden:

0 Jahre alt	9003 Signalweiß
15 Jahre alt	9010 Reinweiß
30 Jahre alt	etwas heller als 1013 (Perlweiß)

Für die Beschussversuche bei DSM wurde als Plastilin Caran d’Ache benutzt. Als Geschosse wurden verwendet: 9 mm, VM-Sintox, 8 g, verzinnt aus der Charge 10535GESCH.

3.2 Beschussversuche an Westen und Prüfmustern aus SB21

Ein Maß zur Bestimmung der Schutzeigenschaften eines ballistischen Schutzsystems ist die Bestimmung der V50-Grenzgeschwindigkeit. Dieser V50-Wert ist die Geschwindigkeit eines Geschosses, bei der die Wahrscheinlichkeit eines Durchschusses bei 50 % liegt. Zur Berechnung des Wertes gibt es unterschiedliche Methoden. Im Rahmen der in diesem Kapitel geschilderten Untersuchungen wurden die Beschusstests nach STANAG 2920 (NATO Standardization Agency 2003) durchgeführt. Dabei wird das ballistische Paket an maximal 12 fest definierten Positionen auf dem Paket beschossen. Die V50-Grenzgeschwindigkeit berechnet sich aus dem arithmetischen Mittel von drei Durch- und drei Steckschüssen, wobei allerdings die Differenz zwischen der höchsten und der niedrigsten dieser sechs Geschossgeschwindigkeiten nicht mehr als 40 m/s betragen darf. Als weitere Regel kommt hinzu, dass der Durchschuss mit der niedrigsten und der Steckschuss mit der höchsten Geschwindigkeit auf jeden Fall mit in die Berechnung des V50-Wertes einzubeziehen sind.

Die Abb. 1 zeigt den nach STANAG 2920 ermittelten Wert der V50-Grenzgeschwindigkeit für eine größere Anzahl von Schutzwesten und Prüf-

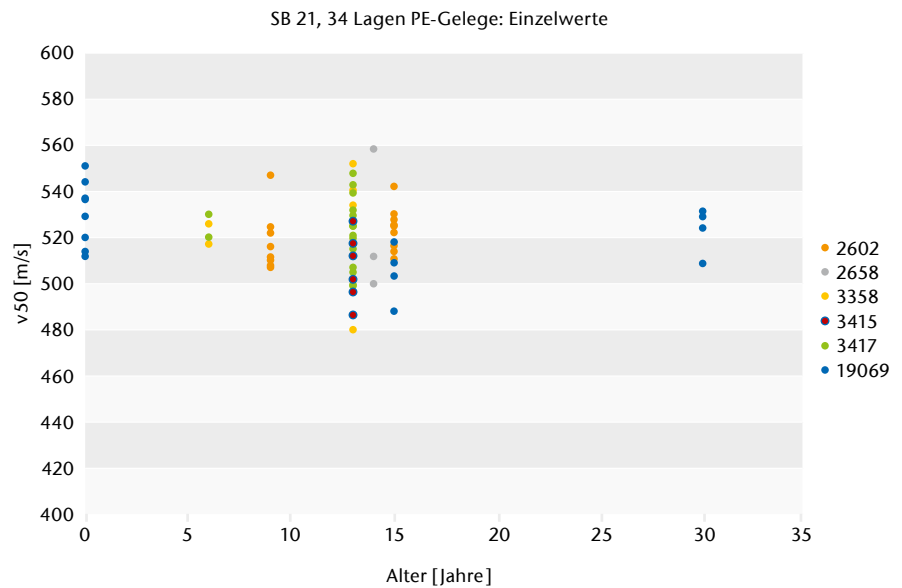


Abb. 1) V50-Werte von unterschiedlichen Produktionschargen aus SB21 in Abhängigkeit vom Alter. Die Standardabweichung für die V50-Werte liegt in der Größenordnung 10 bis 15 m/s.

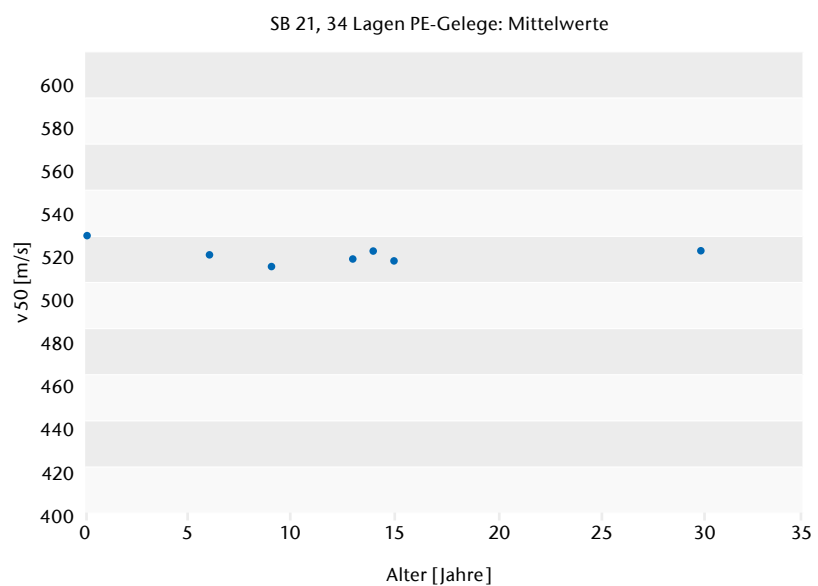


Abb. 2) V50-Werte (Mittelwerte über alle Produktionschargen aus SB21) in Abhängigkeit vom Alter. Die Standardabweichung für die V50-Werte liegt in der Größenordnung 3 bis 5 m/s.

mustern unterschiedlicher Produktionschargen aus SB21 in Abhängigkeit von ihrem Alter. Die einzelnen Produktionschargen sind farblich unterschiedlich markiert. Die Prüfmuster 19069 sind künstlich gealtert worden (15 und 30 Jahre).

Die Mittelwerte (arithmetisches Mittel) der V50-Grenzgeschwindigkeiten für alle Produktionschargen zusammen genommen zeigt die Abb. 2.

Zusammenfassend lässt sich feststellen:

1. Die V50-Grenzgeschwindigkeit nimmt mit zunehmendem Alter der Prüflinge de facto nicht ab.
2. Künstliche und natürliche Alterung zeigen sowohl bei den RAL-Werten als auch bei den Beschussversuchen kein signifikant verschiedenes Verhalten – die gewählte künstliche Alterungsmethode bildet (im Zeit- und Scharmittel) die Summe der in-

dividuellen Belastungen (z. B. Temperatur, Wechselfeuchtigkeit, Tragehäufigkeit und damit einhergehende komplexe mechanische Belastung etc.) in der jeweiligen Westen-Historie gut ab.

Resümee

Beschussversuche nach STANAG 2920 an vielen Westen einer Produktionscharge und eines Alters mit anschließender Mittelwertbildung liefern sinnvolle Aussagen über die V50-Grenzgeschwindigkeit und insbesondere über ausbleibende Änderungen der V50 mit zunehmendem Alter. Im Rahmen dieser Untersuchungen lassen sich mit Hilfe dieser Vorgehensweise bis zu einem simulierten Alter von 30 Jahren keine altersbedingten Änderungen der V50-Grenzgeschwindigkeit bei UHMW-PE DU von DSM Dyneema feststellen.

3.3 Beschussversuche an Prüfmustern aus SB115

Wie schon bei den Schutzwesten und Prüfmustern aus SB21 wurden im Rahmen der in diesem Kapitel geschilderten Untersuchungen die Beschusstests nach STANAG 2920 auch an Prüfmustern aus SB115 durchgeführt. Dabei wird das ballistische Paket an maximal 12 fest definierten Positionen auf dem Paket beschossen. Die V50-Grenzgeschwindigkeit berechnet sich aus dem arithmetischen Mittel von drei Durch- und drei Steckschüssen, wobei die Differenz zwischen der höchsten und der niedrigsten dieser sechs Geschossgeschwindigkeiten nicht mehr als 40 m/s betragen darf. Als weitere Regel kommt hinzu, dass der Durchschuss mit der niedrigsten und der Steckschuss mit der höchsten Geschwindigkeit auf jeden Fall mit in die Berechnung des V50-Wertes einzubeziehen sind.

Die Abb. 3 zeigt den nach STANAG 2920 ermittelten Wert der V50-Grenzgeschwindigkeit für Prüfmuster aus SB115 in Abhängigkeit von ihrem Alter. Die Prüfmuster sind teilweise künstlich gealtert worden (15 und 30 Jahre).

Die Mittelwerte (arithmetisches Mittel) der V50-Grenzgeschwindigkeiten zeigt die Abb. 4.

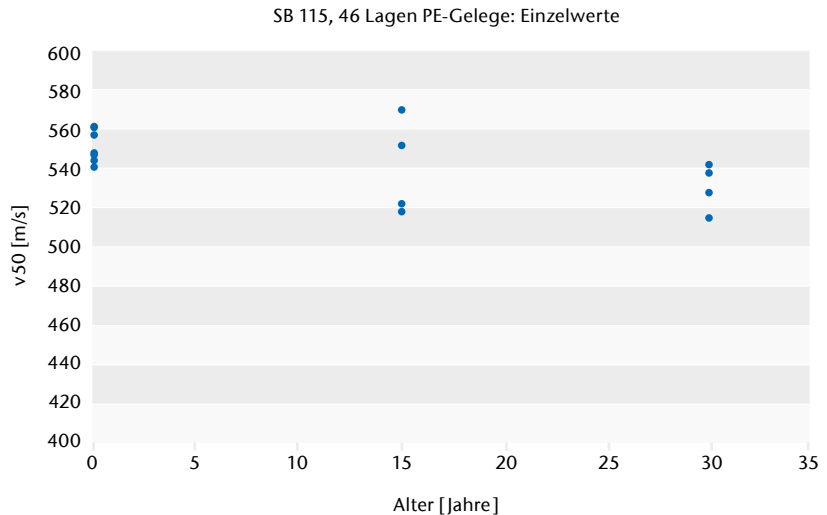


Abb. 3) V50-Werte von Prüfmustern aus SB115 in Abhängigkeit vom Alter. Die Standardabweichung für die V50-Werte liegt in der Größenordnung 10 bis 15 m/s.

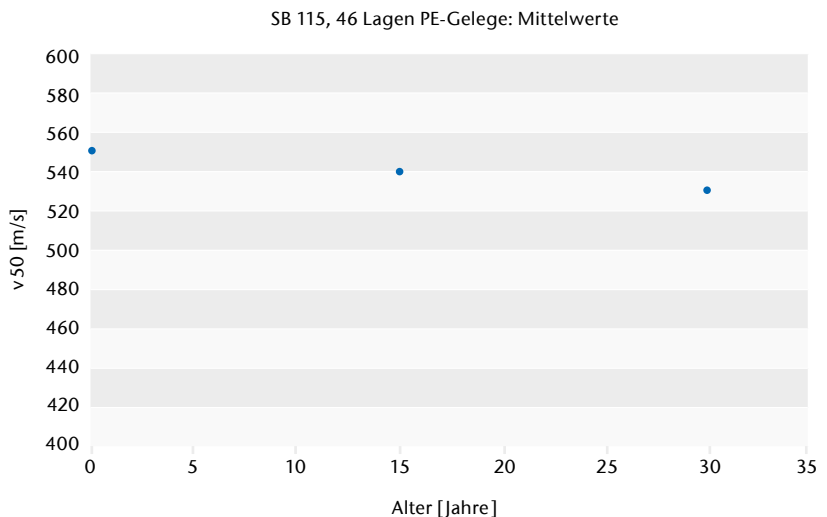


Abb. 4) V50-Werte (Mittelwerte über alle Prüfmuster aus SB115) in Abhängigkeit vom Alter. Die Standardabweichung für die V50-Werte liegt in der Größenordnung 5 bis 7 m/s.

Zusammenfassend lässt sich feststellen:

Die V50-Grenzgeschwindigkeit nimmt mit zunehmendem Alter der Prüflinge nicht ab (der leichte Abfall über 30 Jahre von 20 m/s ist statistisch nicht signifikant).

Resümee

Beschussversuche nach STANAG 2920 an vielen Westen einer Produktionscharge und eines Alters mit anschließender Mittelwertbildung liefert sinnvolle Aussagen über die V50-Grenzgeschwindigkeit und insbesondere über Änderungen der V50 mit zunehmendem Alter. Im Rahmen dieser Untersuchungen lassen sich mit Hilfe dieser Vorgehensweise bis zu ei-

nem simulierten Alter von 30 Jahren keine altersbedingten Änderungen der V50-Grenzgeschwindigkeit bei UHMW-PE DU von DSM Dyneema feststellen.

4. Zertifizierung von alten Schutzwesten nach SK 1 in Mellrichstadt

Zertifiziert nach SK 1 wurden ca. 15 Jahre alte Schutzwesten nach der Technischen Richtlinie „Ballistische Schutzwesten“ aus dem Jahr 2000 (Polizeitechnisches Institut der Deutschen Hochschule der Polizei) im Beschussamt Mellrichstadt. Unter anderem wurden die folgenden Ergebnisse erreicht, die insgesamt zu der Zertifi-

zierung nach SK 1 führten.

1. Entfernung = 10 m,
Auftreffwinkel = 90°,
Trefferbild TR 2000,
5 Steckschüsse,
Temperatur = 21°C
2. Entfernung = 10 m,
Auftreffwinkel = 25°,
Trefferbild TR 2000,
3 Steckschüsse,
Temperatur = 21°C
3. Entfernung = 10 m,
Auftreffwinkel = 90°,
Trefferbild TR 2000,
3 Steckschüsse,
Temperatur = 70,0°C
4. Entfernung = 10 m,
Auftreffwinkel = 90°,
Trefferbild TR 2000,
3 Steckschüsse,
Temperatur = -20°C
5. Entfernung = 0 m,
Auftreffwinkel = 90°,
Trefferbild TR 2000,
3 Steckschüsse,
Temperatur = 21°C
6. Grenzwertermittlung,
Entfernung = 5 m,
Auftreffwinkel = 90°,
Prüfungsart = TR 12/2003
Temperatur = 21°C,
V50 = 512 m/s,
VDelta = 31 m/s

Die Raumtemperatur betrug bei allen Beschüssen 21°C bei einer Luftfeuchtigkeit von 39 %. Das Geschoss war in jedem Fall die 9 mm-Luger DM 41 CN 36.

5. Fazit

Die Beschussversuche an Schutzwesten bzw. Prüfmustern sowohl aus SB21 als auch aus SB115 zeigen hinsichtlich der V50-Grenzeschwindigkeit keine nennenswerte Änderung mit zunehmendem Alter. Der V50-Wert von UHWM-PE UD, hergestellt von DSM Dyneema, bleibt bis zu einem simulierten Alter von 30 Jahren nahezu konstant. Ältere Schutzwesten bzw. Prüfmuster wurden nicht untersucht.

Im Beschussamt Mellrichstadt wurden

ca. 15 Jahre alte Schutzwesten aus SB21 nach SK 1 beschossen. Mit den Ergebnissen von 6 dieser Westenteile wurde eine komplette Zertifizierung nach SK 1 TR2000 durchgeführt.

Insgesamt zeigen weder die von uns durchgeführten Beschussversuche noch die in Mellrichstadt durchgeführte Zertifizierung eine wesentliche Abnahme der ballistischen Schutzeigenschaften mit zunehmendem Probenalter. Die von uns durchgeführten Beschussversuche lassen erkennen, dass die ballistischen Schutzeigenschaften bis zu einem simulierten Alter von 30 Jahren im Wesentlichen erhalten bleiben.

Die Ergebnisse wurden der Fachöffentlichkeit mit einem Vortrag im Rahmen der Fachkonferenz des Polizeitechnischen Instituts der Deutschen Hochschule der Polizei 2017 vorgestellt:

M. Herzog, M. Hendrix: Langzeitverhalten von weichballistischem hochmolekularem Polyethylen, Deutsche Hochschule der Polizei, Fachkonferenz Waffen- und Gerätewesen, 02.03.2017, Nürnberg

LITERATUR

Chabba S, van Es M, van Klinken EJ, Jongedijk MJ, Vanek D, Gijssman P, van der Waals ACLM (2007) Accelerated aging study of ultra high molecular weight polyethylene yarn and unidirectional composites for ballistic applications. *J Mater Sci* 42(8):2891–2893. doi: 10.1007/s10853-007-1617-7

DSM Dyneema (2017) Personal Armour Applications. https://www.dsm.com/products/dyneema/en_GB/applications/personal-armor.html. Accessed 14 Dec 2017

Frieß R (2006) Prüfung von ballistischem Material für Sonderschutzfahrzeuge. *Polizei Verkehr Technik*(4):1–4

Geßner E, Hendrix M (2014) Einfluss der Alterung und weiterer externer Faktoren auf die Schutzwirkung von Aramidgeweben. *Polizei Verkehr Technik*(2):37–40

NATO Standardization Agency (2003) STANAG 2920. Ballistic Test Method for Personal Armour Materials and Combat Clothing, 2nd edn., Brüssel

Polizeitechnisches Institut der Deutschen Hochschule der Polizei (2008) Ballistische Schutzwesten. Technische Richtlinie, Münster

Vereinigung der Prüfstellen für angriffshemmende Materialien und Konstruktionen (2006) Prüfrichtlinie Ballistische Schutzwesten. VPAM BSW 2006, Münster

Polizeitechnisches Institut der Deutschen Hochschule der Polizei (2000) Ballistische Schutzwesten. Technische Richtlinie, Münster

AUTOREN

Prof. Dr. Michael Hendrix
Prof. Dr. Michael Herzog
Technische Hochschule Wildau

E-Mail für Korrespondenz:
michael.hendrix@th-wildau.de



Untersuchung der kapazitiven Auswirkungen einer Variation im Personaleinsatz in der Handgepäck-Nachkontrolle einer Flughafen-Sicherheitskontrollspur am Beispiel des BER-Layouts

Andreas G. Hotes*, Benjamin Fischer

Zusammenfassung

Dieser wissenschaftliche Beitrag stellt die Untersuchung einer modernen Sicherheitskontrollspur für Passagiere und Handgepäck dar, wie sie unter anderem am Flughafen Berlin-Brandenburg Willy Brandt (BER) Anwendung finden wird. Nach einer Beschreibung der Verfahrensabläufe einer Sicherheitskontrolle entsteht unter Verwendung realer Passagierparameter und analysierter Prozesszeiten mit der Simulationssoftware CAST Terminal ein detailliertes Modell, mit dem die Passagierkapazität der Kontrollspur untersucht und ein eventueller Engpass lokalisiert werden kann. Durch zielgerichtete Veränderungen in der Personalbesetzung der Handgepäck-Nachkontrolle sollen daraus folgende kapazitive Auswirkungen bei einer Betrachtung unterschiedlicher Szenarien unter Variation der Alarmrate der Handgepäckprüfanlage untersucht werden. Mit steigender Alarmrate verschiebt sich der Kapazitätsengpass aus der Gepäckaufnahme in die Handgepäck-Nachkontrolle, was den Einsatz eines zweiten Nachkontrolleurs erforderlich macht.

Abstract

The paper comprises a simulative analysis of a modern security control lane for passengers and hand luggage as will apply at Berlin-Brandenburg Airport Willy Brandt. After a description of the procedures of a security control, a detailed model will be built utilizing the simulation software, CAST Terminal, and using real passenger parameters and process times to analyze the capacity of the control lane and locate a possible bottleneck. Due to purposive staff changes in the second hand luggage control, capacitive effects could be studied in consideration of different alarm rates of the baggage screening system. With an increasing alarm rate the capacitive bottleneck moves from luggage pick-up to second hand luggage control, which makes it necessary to employ a second security inspector.

1. Einführung und Ziel der Untersuchung

In den Jahren 2012 bis 2016 betrug der Passagierzuwachs deutscher Verkehrsflughäfen durchschnittlich 2,4 % (Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen 2016, 2015, 2014, 2013, 2012) pro Jahr. Dadurch werden die Abfertigungseinrichtungen vieler Flughäfen ständig vor neue kapazitive Herausforderungen gestellt. Ein hier sehr relevanter und aufgrund der aktuellen Terrorbedrohung immer wichtiger werdender Bereich sind die Passagier-Sicherheitskontrollen nach § 5 Luftverkehrsgesetz. Behörden stehen da-

bei immer wieder vor der Aufgabe, die nachgefragte Kapazität bei Einhaltung höchster Sicherheitsanforderungen bereitzustellen.

Da bereits bestehende Kontrollspuren nur eine begrenzte Fläche zur Verfügung haben, sind Erweiterungen nicht immer umsetzbar und, wenn realisierbar, zumeist kostenintensiv. In diesem Beitrag soll der Fokus deshalb auf die kapazitiven Auswirkungen von unterschiedlichen Personalzahlen am Beispiel der Handgepäck-Nachkontrolle gelegt werden. Es soll untersucht werden, welche Kapazitäten bei einem bzw. bei zwei Nachkontrolleuren pro Kontrollspur erreicht werden können.

Für das Layout sollen die modernen Kontrollspuren des Flughafens BER als Vorbild dienen, die bereits heute zum Teil an den Flughäfen Berlin-Tegel und -Schönefeld zum Einsatz kommen.

2. Methodisches Vorgehen

Zu Beginn der Untersuchung sollen mit Hilfe von Literatur einige theoretische Grundlagen zu Gesetzen und Verantwortlichkeiten in der Luftsicherheit geklärt werden, um dann genauer auf die einzelnen Bereiche einer Sicherheitskontrolle einzugehen. Für die Untersuchung soll ein Simulationsmodell mit der Software CAST

* korrespondierender Autor

Terminal entwickelt werden. Um eine Sicherheitskontrolle zu simulieren, werden detaillierte Informationen zu den gesetzlichen und prozessualen Gegebenheiten der Sicherheitskontrollen benötigt. Informationen zu den gesetzlichen Kontrollregelungen sind im Anhang des Nationalen Luftsicherheitsprogramms beschrieben und nicht öffentlich zugänglich, weshalb hier nicht detailliert auf diese Regelungen eingegangen werden kann.

Weiter benötigt das Simulationsmodell zur Abbildung der Prozesse eine Vielzahl an Parametern des realen Systems. Passagierparameter, wie bspw. die durchschnittlich benötigte Gepäckwannenanzahl und die einzelnen Prozesszeiten, werden aus realen Messungen übernommen (Fischer 2017: 37–56). Bezüglich der Alarmrate der (Hand)Gepäckprüfanlage (GPA) werden plausible Annahmen getroffen, da auch diese Informationen nicht frei zugänglich sind.

Mit Hilfe der gesammelten Informationen erfolgt die Abbildung der einzelnen Prozesse in der Software. Anschließend soll die Mitarbeiterzahl in der Nachkontrolle gezielt variiert werden und die Unterschiede im Durchsatz sollen anhand des zugehörigen Auswertetools, des CAST Log Analyzer, ausgewertet werden.

3. Rechtliche Grundlagen zur Luftsicherheit an deutschen Verkehrsflughäfen

Die Europäische Union definiert Luftsicherheit als „Maßnahmen und [...] Ressourcen, die dazu dienen, die Zivilluftfahrt vor unrechtmäßigen Eingriffen zu schützen, die die Sicherheit [...] gefährden“ (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union 2008: 74). Die Anschläge des 11. Septembers 2001 zogen erstmalig EU-weite Regelungen zur Luftsicherheit nach sich (Kroschwald 2012: 26). In der heute geltenden Verordnung (EG) 300/2008 sind die Grundsätze für die europäische Luftsicherheit geregelt (vgl. Europäische Kommission 2016). Wie diese Forderungen umzusetzen sind, regelt die Durchführungsverordnung (EU) 2015/1998, die unter anderem die Durchführung von Passagier- und Handgepäckkontrollen beschreibt (vgl. Europäische Kommission 2015).

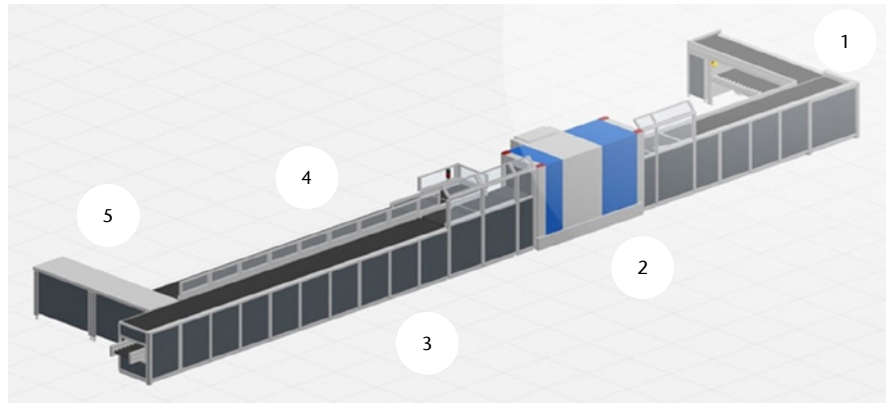


Abb. 1) Layout einer Sicherheitskontrolllinie der Firma Smith Detection (Convario 2017).

Auf nationaler Ebene regelt das Luftsicherheitsgesetz unter anderem die Zuständigkeiten und Befugnisse der Luftsicherheitsbehörden (vgl. Luftsicherheitsgesetz 2005). § 3 bildet dabei die Grundlage für das Recht der zuständigen Behörde, in besonderen Lagen selbst Maßnahmen zu definieren, um die Sicherheit der Luftfahrt zu gewährleisten (Kroschwald 2012; Luftsicherheitsgesetz 2005). Dies gibt dem Bundesministerium des Innern die Möglichkeit, je nach Bedrohungslage Luftsicherheitsanordnungen zu erlassen (Bundesministerium des Innern & Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung 2010: 24).

Nach § 16 Abs. 2 Luftsicherheitsgesetz (LuftSiG) stellt das jeweilige Bundesland die zuständige Luftsicherheitsbehörde. Absatz 3a jedoch überlässt dem Bund die Möglichkeit, diese Aufgaben auch selbst auszuführen. Dies hat der Bund in einigen Ländern getan und die Bundespolizei als zuständige Luftsicherheitsbehörde benannt (vgl. Kroschwald 2012: 51f.). In diesen Fällen hat die Bundespolizei nach § 5 Abs. 1 LuftSiG das Recht, Passagiere und ihr Handgepäck vor dem Zugang zu Sicherheitsbereichen zu durchsuchen oder in anderer Weise zu kontrollieren. Durch die sogenannte Beleihung kann diese Befugnis auch an Privatdienstleister weitergegeben werden (vgl. Luftsicherheitsgesetz 2005: § 16a Abs. 1).

4. Passagier- und Handgepäckkontrollen

4.1 Aufgabe von Sicherheitskontrollen

Durch die Passagier- und Handgepäckkontrollen an Flughäfen soll sicherge-

stellt werden, dass keine verbotenen Gegenstände in den Sicherheitsbereich gelangen. Personen können mit Metalldetektorsonden, Sicherheitsscannern oder durch eine Durchsuchung per Hand kontrolliert werden, Handgepäckstücke hingegen durch normale Röntgengeräte, Sprengstoffdetektoren (EDS) oder ebenfalls per Handdurchsuchung (vgl. Europäische Kommission 2015: 15–17). Zu den verbotenen Gegenständen zählen alle schusswaffenähnlichen Gegenstände, explosive Gegenstände, spitze oder scharfe Gegenstände, Schlagwaffen oder Werkzeuge (vgl. Europäische Kommission 2015: 20f.).

Infolge von Anschlägsversuchen mit Flüssigsprennstoffen regulierte die Europäische Kommission im Jahr 2006 die Mitnahme von Flüssigkeiten im Handgepäck (Geminn 2014: 32). Auch wenn Flüssigkeiten nicht per se verbotene Gegenstände sind, unterliegen sie einer Volumenbeschränkung, da es unter anderem kapazitiv aus Sicht des Gesetzgebers nicht möglich erscheint, alle Flüssigkeiten zu kontrollieren.

4.2 Ablauf der Passagier-Sicherheitskontrolle am Beispiel des BER-Layouts

Im Jahr 2015 wurden im Terminal C des Flughafens Schönefeld neue Sicherheitskontrolllinien errichtet (Flughafen Berlin Brandenburg 2015). Deren Layout entspricht in weiten Teilen dem Layout der Sicherheitskontrollen am Flughafen Berlin Brandenburg BER, das durch die verschobene Eröffnung bisher noch keine Verwendung fand. Das in Abb. 1 dargestellte Layout zeichnet sich durch die rechtwinklig angeordneten Vorbereitungs- und Nachkontrollbereiche (1 und 5) sowie

die getrennten „In Ordnung“- und „Nicht in Ordnung“-Bänder (3 und 4) hinter der GPA (2) aus. Eine Kontrollspur beschreibt eine Kontrolllinie für das Handgepäck inkl. des Bereiches der Passagierkontrolle.

4.2.1 PASSAGIERVORBEREITUNG

Der Passagier betritt die Sicherheitskontrolle im Vorbereitungsbereich (1) und passiert die abgebildete Kontrolllinie aus seiner Sicht links. Die Passagiervorbereitung umfasst folgende Teilprozesse:

1. Ablegen von Handgepäckstücken
2. Entfernen von Gegenständen aus den Hosentaschen
3. Ablegen von Jacken
4. Separieren von größeren elektronischen Geräten und erlaubten Flüssigkeiten
5. Ggf. Beseitigung verbotener Gegenstände

Im kapazitiv optimalen Fall entnimmt der Passagier die Wanne selbstständig aus der Wannentnahme und bereitet sich den Regelungen entsprechend vor. Der Einweiser unterstützt ihn dabei und weist auf zu separierende Flüssigkeiten oder größere elektronische Geräte hin. An Flüssigkeiten, Aerosolen und Gels (LAG) dürfen nur solche zu medizinischen Zwecken, zu diätetischen Zwecken (inkl. Babyahrung), solche in manipulations-sicheren Beuteln (STEB) und LAG in Behältern, deren Volumen nicht größer als 100 Milliliter ist und die sich in einem durchsichtigen, wiederverschließbaren Beutel mit einem Volumen von höchstens einem Liter befinden, mitgeführt werden (Europäische Kommission 2015: 16f.). Erlaubte Flüssigkeitsbehältnisse mit einem Fassungsvermögen von über 100 Milliliter, die nicht auf der Luftseite des jeweiligen Flughafens erworben und in einem STEB verpackt wurden, müssen in gesonderte LAG-Wannen gelegt und mit Flüssigsprenstoffdetektoren (LEDS) überprüft werden (Europäische Kommission 2015: 18).

4.2.2 Passagierkontrolle

Nicht in der Abb. 1 dargestellt ist der Personenkontrollbereich. Nachdem die Passagiere ihr Handgepäck abgelegt haben, durchlaufen sie einen Sicherheitsscanner oder eine Metall-detektorsonde. Der Scanner hat den Vorteil, dass er Objekte generell detektiert, die in irgendeiner Weise eine Abweichung zu den normalen Körperkonturen inkl. Bekleidung darstellen. Dahinter werden sie vom Personenkontrollkoordinator entweder zur Gepäckaufnahme weitergeleitet oder zu einem der Personenkontrollere. Die Personenkontrollere stehen in den jeweils drei Diskretionselementen pro Spur, die einen gewissen Blickschutz für die Durchsuchung bieten sollen.

4.2.3 Handgepäckkontrolle

Ein bewährtes Verfahren der Handgepäckkontrolle bildet die Bewertung des von der GPA erstellten Röntgenbildes. Ein vom Röntgenbildauswerter als sicher eingestuftes Handgepäck wird auf dem „In Ordnung“-Band (IO-Band) (3) weitertransportiert, von dem der Passagier seine Gegenstände wieder aufnehmen und die leeren Wannen in das Rückführsystem geben kann (siehe Abb. 1).

Sollten die Gegenstände vom Röntgenbildauswerter nicht als sicher eingestuft werden, wird die Wanne über eine Weiche auf das „Nicht in Ordnung“-Band (NIO-Band) (4) gefahren und dort zur Nachkontrollstelle (5) transportiert. Pro Kontrollspur gibt es zwei Nachkontrollplätze mit je einem Tisch und Monitor, an dem sich der Kontrolleur das Röntgenbild des jeweiligen Handgepäckstücks aufrufen kann. Durch die seitliche Anordnung der Plätze blockieren Passagiere mit nachzukontrollierendem Handgepäck nicht die Wege der anderen.

Hinter der Kontrollspur werden einige Passagiere bzw. deren Handgepäck einer zusätzlichen Kontrolle mittels Sprengstoffspurendetektoren (ETD) unterzogen. Dabei werden bestimmte Stellen mit einem Wischstreifen beprobt und dieser dann ausgewertet. Diese Kontrolle erfolgt entweder nach einer festgelegten Quote (zufallsbestimmt) oder bei einem Verdachtsfall (NIO).

5. Erstellung des Simulationsmodells unter Verwendung von CAST Terminal

5.1 Kurzvorstellung der Simulationssoftware CAST Terminal

Eine Simulation ist „ein möglichst realitätsnahes Nachbilden von Geschehen der Wirklichkeit“ (Lackes et al. o. J.). Das heißt, man vereinfacht die Eigenschaften eines Systems und erzeugt damit ein Modell. An diesem Modell untersucht man dann die gewünschten Prozesse und verwendet die Ergebnisse, um das reale System entsprechend anzupassen (vgl. Lackes et al. o. J.).

Am Markt gibt es verschiedene Softwareanbieter, wie Simio LLC, FlexSim Software Products, Inc. oder die Airport Research Center GmbH, die Programme zur Erstellung von dreidimensionalen Discrete Event Simulations im Portfolio haben, die für Terminalsimulationen anwendbar sind. Vorrangig die Airport Research Center GmbH hat sich mit CAST Terminal explizit auf die Simulation von Flughafen-Terminalprozessen spezialisiert und enthält bereits vordefinierte luftfahrtspezifische Objekte und Eigenschaften in den Bibliotheken. Auch die International Air Transport Association (IATA) und das Airport Council International (ACI) greifen bei ihren Untersuchungen auf die Software zurück (Renner 2016).

Bei CAST Terminal handelt es sich um eine Multi-Agent-Free-Flow-Software, in der sich jeder Passagier selbstständig gemäß seinen Eigenschaften („Attribute“) durch die Simulation bewegt und Aufgabenlisten abarbeitet. In der Prozessdarstellung bietet die Software bei der Eingabe von Vorgangszeiten übliche Verteilungsfunktionen an, um reale Wahrscheinlichkeiten abbilden zu können.

5.2 Festlegung der Systemgrenzen

Vor der Erstellung eines Simulationsmodells muss das darzustellende System definiert werden. Ein System sind dabei Objekte, die interagieren (vgl. Horton 2001). In dieser Simulation sollen die Prozesse aller Bereiche innerhalb einer Kontrollspur nach dem BER-Layout vereinfacht dargestellt werden.

Für einige Teilprozesse wird lediglich die Prozessdauer berücksichtigt, statt den gesamten Ablauf zu simulieren. Auf die Darstellung der Prozesse außerhalb der eigentlichen Spur, also die ETD-Kontrollen, sowie auf Kontrollen in Detektionsräumen und Nachkontrollkabinen soll in dieser Untersuchung verzichtet werden. Sowohl Passagiere als auch die Luftsicherheitsassistenten werden hingegen Teil des Systems, die jedoch nicht alle als aktiv handelnde Objekte in die Simulation eingebunden werden.

5.3 Modellieren der Kontrollspur

CAST Terminal beinhaltet nur einige spezifische Objekte einer Sicherheitskontrollspur. Alle anderen Objekte müssen durch funktionale Elemente nachgebildet werden, die durch ihre Geometrien, Interaktionszeiten und bedingungen die realen Objekte verkörpern. Grundsätzlich wurden für die Modellierung folgende Elemente berücksichtigt:

1. **Bag Drops (Gepäckabwürfe)**, an denen eine Person ihr Gepäck auf ein anderes Element befördern kann
2. **Object Packer (Objektpacker)**, die Gepäckstücke bspw. in eine Gepäckwanne legen
3. **Object Configurators (Objekt-konfiguratoren)**, die Objekten, in diesem Fall den Wannern, bestimmte Eigenschaften geben
4. **Conveyor Elements (Fördererelemente)**, die die Wannern in einer konstanten Geschwindigkeit transportieren
5. **Filter**, die Objekte nach einer definierten Bedingung auf unterschiedliche weitere Objekte aufteilen
6. **Pick-up Belts (Aufnahmebänder)**, an denen während des Transports Gepäckstücke von Personen aufgenommen werden können
7. **Walk-throughs (Tore)**, die von Personen zu passieren sind

8. **Counters**, an denen sich Personen für eine bestimmte Zeit aufzuhalten haben

Diese Elemente ermöglichen zusammen die Darstellung der Prozesse einer Sicherheitskontrolle, wie sie in Abb. 2 zu sehen ist. Hinzu kommen zwei grundlegende Elemente einer Simulation: Ein Element zum Erstellen und Definieren der Passagiere – der Person Flow Generator (Personenflussgenerator) – und der Exit zum Entfernen der Passagiere aus dem Modell. Die Dimensionierung der Objekte erfolgt anhand einer im Programm hinterlegten Zeichnung in Anlehnung an den BER.

5.4 Abbilden der Kontrollprozesse

Die Passagiere werden in einer konstanten Rate generiert. Hierbei wird gewährleistet, dass eine stetige Nachfrage besteht, um die maximale Kapazität ermitteln zu können. Im Person Flow Generator werden die ersten Tokens, so werden die abzuarbeitenden Aufgaben genannt, zum Betreten der Kontrollspur an die Passagiere vergeben. Weitere Tokens für die einzelnen Kontrollvorgänge bekommen die Passagiere an den Objekten, an denen sie Transaktionen durchführen. So ist es möglich, Passagieren aufgrund von Wahrscheinlichkeiten unterschiedliche Aufgaben zu geben. Vor dem Zugang zur Kontrollspur müssen die Passagiere einen Walk-through passieren. Dieser sorgt dafür, dass nur

eine bestimmte Anzahl von Passagieren im Vorbereitungsbereich ist.

5.4.1 Passagierkontrolle

Wie in Abb. 3 zu erkennen, befinden sich auf dem Rollenelement des Vorbereitungsbereiches zwei Inputs für Gepäckwannen. Um diese zu bedienen, gibt es zwei Bag Drops, in denen die Vorbereitungsdauern in Abhängigkeit von der Handgepäckzahl hinterlegt sind. Nach Ablauf der Dauer bewegen sich die Handgepäckstücke des Passagiers durch den Bag Drop in den Object Packer. Dort werden sie in Gepäckwannen gelegt, welche wiederum im Object Configurator den tatsächlichen Maßen angepasst werden.

Der Object Packer verwendet pro Handgepäckstück nur eine Wanne. Um die durchschnittlich benötigte Wannenzahl pro Passagier abzubilden, werden von einer bestimmten Anzahl Passagiere zusätzliche „leere“ Wannern in Tray Drops (Wannenabwürfe) gelegt. Damit die Passagiere kein Gepäck auf das Rollenelement legen können, wenn dieses durch einen Stau belegt ist, wurde die Bedingung gesetzt, dass der Object Configurator dazu frei sein muss. Danach begeben sich die Passagiere zum in Abb. 4 dargestellten Walk-through. Damit dieser einen Sicherheitsscanner abbildet, wurde eine entsprechende Verweildauer hinterlegt. Während des Durchlaufens entscheidet sich, ob ein Passagier zur Nachkontrolle muss oder direkt den Token zur Gepäckaufnahme zugewiesen bekommt.

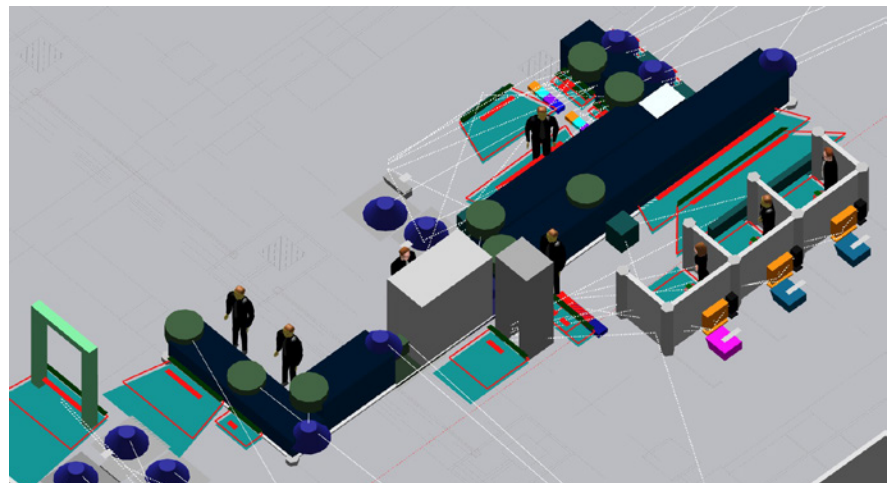


Abb. 2) Überblick über die mit CAST Terminal modellierte Kontrollspur.

Hinter dem Walk-through befinden sich zwei Info-Counter, einer für männliche und einer für weibliche Passagiere. Ist der Info-Counter für das jeweilige Geschlecht belegt, kann der Passagier den Walk-through nicht betreten. Damit der Passagier den Info-Counter verlassen kann, muss der Kontrollcounter eines Diskretionselements frei und der zugehörige Kontrollleur gleichgeschlechtlich sein. Nach Ablauf der Kontrolldauer wechselt der Personenkontrollleur von dem in Abb. 4 orangenen zum schwarzen Counter. Daraufhin bekommt der Passagier den Token zur Gepäckaufnahme.

5.4.2 Handgepäckkontrolle

Der GPA ist eine Delay Unit vorgelagert, in der die Röntgenbildauswertedauer hinterlegt wird. Anhand der Farbe der Gepäckwanne erkennt die Delay Unit, ob es sich um eine normale oder eine LAG-Wanne handelt, und vergibt mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eine Nachkontrolleeigenschaft. Anschließend bewegt sich die Wanne in den in Abb. 5 dargestellten Filter und wird von dort bei Vorhandensein einer Eigenschaft durch den Output, der mit dem NIO-Band verbunden ist, bewegt.

Am Nachkontroll-Info-Counter bekommt der Nachkontrollleur in sehr kurzen Zeitabständen immer wieder den Token zur Aufnahme einer Wanne. Voraussetzung dafür, dass eine Wanne vom Band genommen wird, ist, dass mindestens ein Nachkontrollplatz frei ist. Ist dies der Fall, gibt das NIO-Band einen Token zu dem Tray Drop aus, der mit dem entsprechenden Kontrolltisch verbunden ist. In dem Moment, in dem die Wanne auf dem Tisch auftaucht, kann der Token zur Gepäckaufnahme bedient werden, und der Passagier mit der PAX-ID des Handgepäckstücks wird an den Kontrolltisch herantreten.

Bei der normalen Nachkontrolle beginnt die Aktionszeit, wenn der Passagier dort angekommen ist. Der Kontrollleur bleibt so lange dort stehen, bis das Gepäck aus der Wanne genommen wurde. Erst danach beginnt die eigentliche Gepäckaufnahmedauer am Gepäckaufnahme-Counter. Durch die Trennung dieses Prozesses vom Kontrollprozess wird sichergestellt,

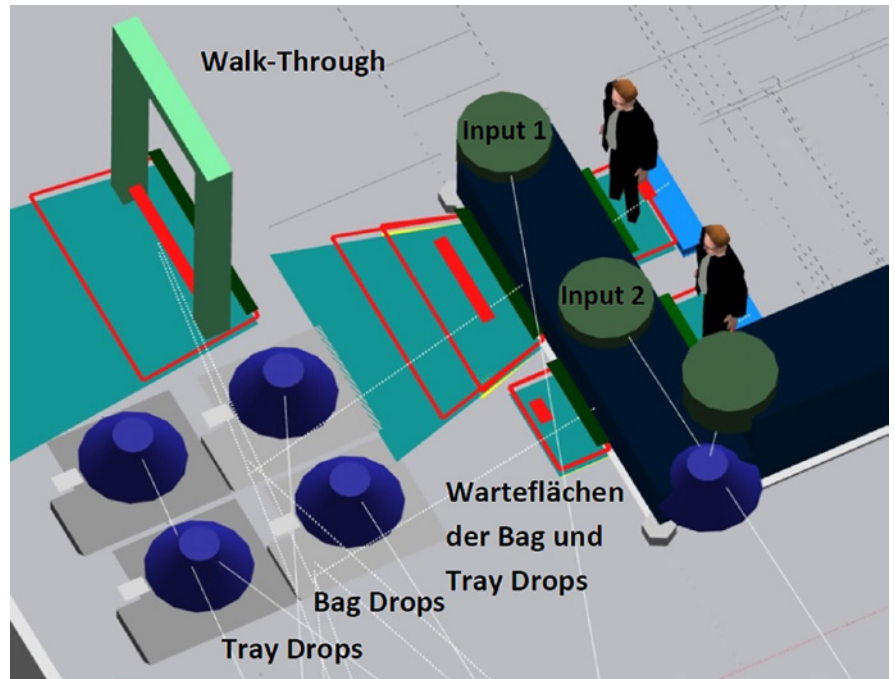


Abb. 3) Mit CAST Terminal modellierter Vorbereitungsereich.

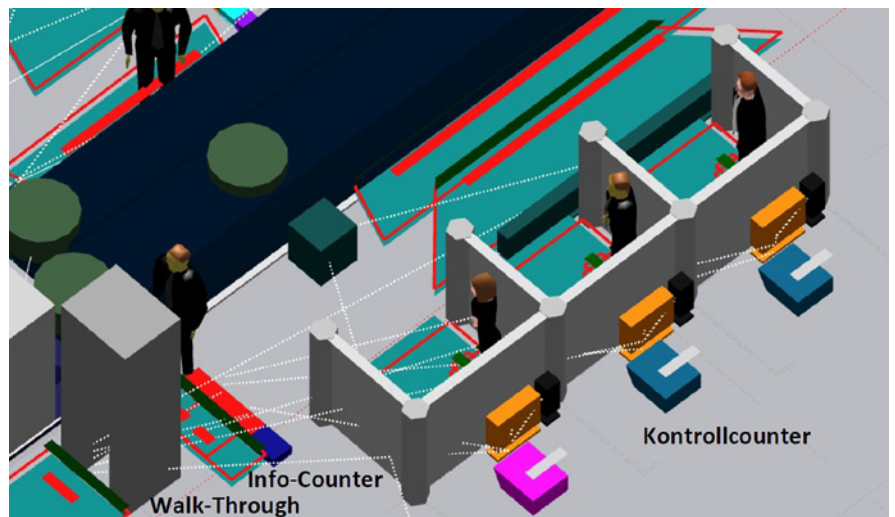


Abb. 4) Mit CAST Terminal modellierter Personenkontrollbereich.

dass der Luftsicherheitsassistent bereits in den nächsten Kontrollvorgang einbezogen werden kann.

Bei der LAG-Kontrolle bekommt er nach dem Ablegen der Wanne einen Token, an den orangenen LAG-Kontroll-Counter zu wechseln. Anders als bei der normalen Nachkontrolle kann er hier sofort anfangen, die Aktion durchzuführen, da er dazu nicht auf den Passagier warten muss. Lediglich das Ende der Aktion hat die Bedingung, dass der Passagier am Kontrolltisch steht. Nach dem Ende einer jeden Kontrolle bekommt der Kontrollleur den Token, erneut zur Wannenaufnahme bzw. zum Info-Counter zu gehen.

Bekommt das Handgepäckstück in der Delay Unit keine Eigenschaft zugewiesen, wird es vom Filter zunächst auf ein einfaches Förderband und dann weiter auf das Aufnahmeband geschickt. Vom Förderband können die Passagiere kein Gepäck entnehmen. Dies ist notwendig, um den dort in der Realität installierten Übergriffschutz darzustellen. Wenn sich das Handgepäckstück eines Passagiers noch nicht auf dem Aufnahmeband oder dem Nachkontrolltisch befindet, geht dieser automatisch zur Gepäckaufnahme-Info. Dort wird in sehr kurzen Abständen immer wieder der Token zur Gepäckaufnahme vergeben. Je nach

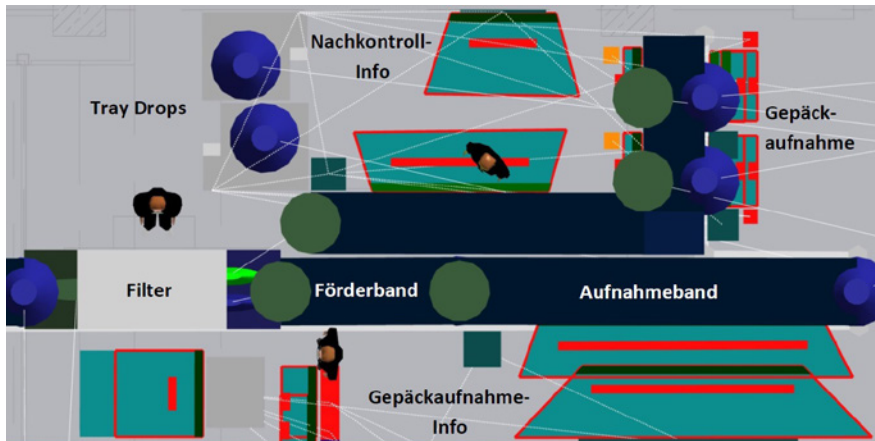


Abb. 5) Draufsicht auf den mit CAST Terminal modellierten Nachkontroll- und Gepäckaufnahmebereich.

Anzahl der aufzunehmenden Handgepäckstücke wird am Aufnahmeband eine unterschiedliche Aktionszeit vergeben.

5.5 Einbindung der Parameter

Im Person Flow Generator werden die Geschlechterverteilung der beiden Berliner Flughäfen aus dem Jahr 2017 sowie die im realen Betrieb am Flughafen Schönefeld gemessenen Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Handgepäckanzahl der Passagiere und deren benötigte Wannenzahl hinterlegt (Fischer 2017: 36–39, 44). Wie viele Passagiere sich gleichzeitig vorbereiten und wie viele gleichzeitig ihr Gepäck aufnehmen können, wird durch die benötigte Wannenzahl pro Passagier und die Wannemaße in Bezug zur Länge des jeweiligen Rollenelements ermittelt (Fischer 2017: 44f., 57). Diese Werte werden an den Bag Drops und dem Aufnahmeband hinterlegt. Der Prozentsatz der Wannenzahl, die im Object Configurator blau eingefärbt und somit von der GPA als LAG-Wannen identifiziert werden, wurde ebenfalls aus diesen Zählungen übernommen (Fischer 2017: 39).

An den einzelnen Stationen der Kontrolle werden im Realbetrieb gemessene Prozesszeiten hinterlegt. Die Dauer und die Anzahl der Passagiere in der Passagiervorbereitung hängen zusätzlich noch von der Anzahl der Einweiser ab (Fischer 2017: 37–56). Die Alarmrate der GPA bestimmt die Arbeitsbelastung der Handgepäck-Nachkontrolleure. Hierfür wird auf

die Auswertung von Sterchi und Schwaninger (Sterchi & Schwaninger 2015) zurückgegriffen, die drei verschiedene Gruppen Röntgenbildauswerter miteinander verglichen. Die Fehlalarmrate, also Alarme, die keine verbotenen Gegenstände aufdeckten, sank dabei mit steigender Anzahl an Trainingsstunden von durchschnittlich 4,9 über 4 auf 2,5 % (Sterchi & Schwaninger 2015). Zusätzlich muss zu diesen Werten der Prozentsatz berechtigter Alarme von 1,23 % addiert werden (Sterchi & Schwaninger 2015). Unklar ist allerdings, unter welchen Bedingungen die Werte aufgenommen wurden. Wenn die Werte mit Testobjekten ermittelt wurden statt im realen Betrieb, hat bereits die Auswahl der Objekte einen immensen Einfluss auf die Ergebnisse und spiegelt keine realen Werte wider. Allein durch die Flüssigkeitsbeschränkung ist davon auszugehen, dass der tatsächliche Prozentsatz berechtigter Alarme durch das Missachten dieser Regelungen über 1,23 % liegt. Da dieser Prozentsatz aber nicht veröffentlicht wird, soll eine Untersuchung mehrerer Alarmraten vorgenommen werden. So soll zum einen die niedrigste Alarmrate nach Sterchi & Schwaninger von rund 4 % untersucht werden, zum anderen soll der höchste Wert von rund 6 % um 10 Prozentpunkte nach oben korrigiert werden, da nach eigenen Beobachtungen nicht von einer höheren Wahrscheinlichkeit auszugehen ist, mit der eine Gepäckwanne zur Nachkontrolle geschickt wird. Somit ergeben sich drei zu untersuchende Szenarien: eine Alarmrate von 4 %, eine von 16 % und als „mittlerer Wert“ eine von 10 %. Die

Alarmrate des Sicherheitsscanners hingegen ist für diese Untersuchung weniger relevant. Laut Bundesregierung liegt sie bei ca. 49 % (Bundesregierung 2015: 8).

6. Durchführung der Simulation

Nur wenn an allen Positionen genügend Mitarbeiter zur Verfügung stehen, kann die theoretische maximale Kontrollkapazität der Spur genutzt werden. Welche Mitarbeiterzahl in der Handgepäck-Nachkontrolle als genügend betrachtet werden kann, soll hier untersucht werden. Da in der vorgegebenen Konfiguration der Sicherheitskontrolllinie nur zwei Nachkontrolltische zur Verfügung stehen, ist die Mitarbeiterzahl auf maximal zwei begrenzt. An den Positionen der Einweiser und der Personenkontrolleure soll die theoretische Maximalbesetzung unterstellt werden, um die höchstmögliche Kapazität für die jeweilige Handgepäck-Nachkontrollbesetzung zu ermitteln. Es ist dabei wichtig festzustellen, dass die maximale Personalausstattung an anderen Positionen die Gesamtkapazität nicht negativ beeinflusst, also z. B. der Kontrollprozess nicht durch zu viel Personal behindert wird.

Um die Kontrollspuren unter Volllast beurteilen zu können, muss es erst zu einem Aufstauen der Passagiere am Einlass kommen. Dazu soll die Anlaufphase fünf Minuten betragen. Erst danach werden die Werte in die Auswertung einbezogen.

Aufgrund der bei dieser Art der Simulation verwendeten Wahrscheinlichkeitsverteilungen in Verbindung mit den notwendigen Zufallszahlen ist es systemimmanent, dass sich die Simulationsdurchgänge, selbst bei sonst gleichen Eingangsdaten, hinsichtlich der Ergebnisse immer leicht unterscheiden. Durch eine Erhöhung der Zahl der Simulationsläufe kann die Aussagequalität der Ergebnisse verbessert werden, jedoch steigt damit auch der Bearbeitungsaufwand deutlich an. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher die Zahl der Simulationsdurchläufe auf drei pro Szenario beschränkt. Danach werden die Passagierzahlen ausgewertet, die den Exit der Simulation innerhalb der betrachteten Stunde passiert haben.

7. Auswertung der Simulation

Bei einer Alarmrate der GPA von 4 % unterscheiden sich die beiden mittleren Durchsatzzahlen nur geringfügig. Das liegt daran, dass bei dieser Rate ein Nachkontrolleur allein nicht voll ausgelastet ist. Dies sieht man deutlich an der Nutzung des Nachkontroll-Info-Counters, an dem sich die Kontrolleure aufhalten, wenn sie keine zu kontrollierenden Wannen haben oder beide Nachkontrolltische besetzt sind. Ist ein Nachkontrolleur allein, ist dieser in 52 % der Zeit am Info-Counter, also nur zu 48 % ausgelastet. Bei zwei Nachkontrolleuren ist mindestens einer in 83 % der Zeit nicht beschäftigt. Die 17 %, in denen beide arbeiten, sorgen nur für einen geringen Anstieg des Durchsatzes um rund neun Passagiere und hauptsächlich dafür, dass die durchschnittliche Wannenanzahl auf dem NIO-Band sinkt, da die Wannen schneller weggenommen werden.

Die Kapazität wird bei dieser Alarmrate nicht durch die Nachkontrolle begrenzt, sondern dadurch, dass in durchschnittlich 56 % der Zeit das IO-Band voll ist. Auf das IO-Band passen in der Simulation maximal sieben Wannen, auf das NIO-Band maximal fünf. Sobald entweder das IO- oder das NIO-Band die maximale Anzahl an Wannen erreicht hat, kommt es zum Wannenstau, der sich bis in den Vorbereitungsbereich fortpflanzen kann, sodass die Passagiere sich nicht mehr vorbereiten können.

Bei einer GPA-Alarmrate von 10 % würde der Durchsatz bei einem Nachkontrolleur um elf Passagiere sinken, bei zwei Nachkontrolleuren bleibt er relativ stabil. Das liegt daran, dass ein Nachkontrolleur allein zu 94 % ausgelastet wäre. Durch die hohe Arbeitsbelastung schafft es ein Nachkontrolleur nicht, die Last auf dem NIO-Band abzubauen. Es kommt dazu, dass in 22 % der Zeit das NIO-Band voll ist und nur noch in 37 % das IO-Band. Das liegt daran, dass das IO-Band in der Zeit, in der es zu einem Stau durch das NIO-Band kommt, nicht volllaufen kann.

Die zusätzliche Arbeitskraft eines zweiten Nachkontrolleurs würde hingegen dafür sorgen, dass das NIO-Band nicht mehr vollläuft. Das IO-Band bildet dann wieder den alleinigen Kapazitätsengpass und ist in 49 % der Zeit

Tab. 1: Mit CAST Log Analyser bestimmter Durchsatz einer Kontrollspur in Abhängigkeit der Nachkontrolleurzahl bei 4 % Alarmrate der GPA, Gegenüberstellung von je 3 Simulationsläufen.

				Mittelwert
Durchsatz mit 1 Nachkontrolleur [Passagiere/h]	154	147	163	155
Durchsatz mit 2 Nachkontrolleuren [Passagiere/h]	163	160	170	164

Tab. 2: Mit CAST Log Analyser bestimmter Durchsatz einer Kontrollspur in Abhängigkeit der Nachkontrolleurzahl bei 10 % Alarmrate der GPA, Gegenüberstellung von je 3 Simulationsläufen.

				Mittelwert
Durchsatz mit 1 Nachkontrolleur [Passagiere/h]	146	126	160	144
Durchsatz mit 2 Nachkontrolleuren [Passagiere/h]	167	172	161	167

Tab. 3: Mit CAST Log Analyser bestimmter Durchsatz einer Kontrollspur in Abhängigkeit der Nachkontrolleurzahl bei 16 % Alarmrate der GPA, Gegenüberstellung von je 3 Simulationsläufen.

				Mittelwert
Durchsatz mit 1 Nachkontrolleur [Passagiere/h]	73	67	95	78
Durchsatz mit 2 Nachkontrolleuren [Passagiere/h]	152	157	127	145

voll. Der etwas kleinere Wert im Vergleich zu den 56 % bei einer Alarmrate von 4 % kommt durch die insgesamt geringere Anzahl Wannen auf dem IO-Band bei einer höheren Alarmrate zustande.

Bei einer Alarmrate von 16 % ist ein alleiniger Nachkontrolleur in 100 % der Zeit beschäftigt. Das führt dazu, dass das NIO-Band in 90 % der Zeit voll belegt ist. Es folgt der Einbruch des Durchsatzes durch die resultierenden Wannenstaus. Wird ein weiterer Nachkontrolleur eingesetzt, kann der Engpass durch Staus in der Nachkontrolle zumindest auf 50 % reduziert werden. Der Engpass wechselt bei dieser Konstellation immer wieder zwischen der Nachkontrolle und der Gepäckauf-

nahme, da auch das IO-Band in 24 % der Zeit komplett belegt ist. Dennoch kann auf diese Weise der Durchsatz fast verdoppelt werden.

Bei einer Alarmrate von 10 % und einem Nachkontrolleur ist das NIO-Band zwar deutlich weniger häufig voll, jedoch wird der Stau bei zwei Nachkontrolleuren doppelt so oft durch die Wegnahme einer Wanne kurzzeitig aufgelöst. So ist es möglich, dass zwei Nachkontrolleure bei einer Alarmrate von 16 % fast denselben Durchsatz erreichen wie ein Nachkontrolleur bei einer Alarmrate von 10 %.

8. Fazit

Die Erstellung des Simulationsmodells fand unter Beachtung der Verfahrensabläufe und gesetzlichen Anforderungen statt. Dennoch war es aufgrund des sehr hohen Simulationsaufwandes notwendig, die Abbildung einiger Kontrollprozesse zu vereinfachen. Die Bestimmung der Parameter basierte hauptsächlich auf gemessenen Werten. Für die Alarmrate der GPA wurden verschiedene Szenarien betrachtet, um deren Einfluss auf die Nachkontrolllast und die Kapazität in Abhängigkeit von der Mitarbeiterzahl zu quantifizieren.

Die zu wählende Personalbesetzung in der Nachkontrolle ist stark von der Alarmrate der GPA abhängig. Die Kapazität der simulierten Spur liegt bei einer Alarmrate bis ca. 10 % bei rund 165 Passagieren pro Stunde. Bei kleinen Alarmraten bis ca. 4 % kann diese Kapazität fast durch einen einzelnen Nachkontrolleur gewährleistet werden. Darüber hinaus kann nur ein weiterer Mitarbeiter diese Kapazität aufrechterhalten. Hier bildet die Gepäckaufnahme den maßgeblichen Kapazitätsengpass. Ab einer Alarmrate zwischen 10 und 16 % wird jedoch die Kontrolllast in der Nachkontrolle sehr groß. Der Engpass der gesamten Kontrolllinie verschiebt sich mehr und mehr in den Bereich der Nachkontrolle. Mit nur einem Nachkontrolleur sinkt die Kapazität überdurchschnittlich schnell. Zwei Nachkontrollkräfte können diesen Effekt erheblich reduzieren, wie die vorliegende Simulation zeigt.

Das gewählte Beispiel der Nachkontrolle macht exemplarisch deutlich, dass ein Simulationsmodell unter Verwendung von CAST Terminal sehr gut dazu geeignet ist, auch Fragestellungen zu beantworten, die nicht allein im technischen Bereich angesiedelt sind, sondern den Personaleinsatz betreffen. Es kann damit auch hier eine wertvolle Unterstützung bieten.

LITERATUR

Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (2012) ADV-Monatsstatistik 12/2012. <http://adv.aero/wp-content/uploads/2016/02/12-2012-ADV-Monatsstatistik.pdf>. Accessed 15 Dec 2017

Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (2013) ADV-Monatsstatistik 12/2013. <http://adv.aero/wp-content/uploads/2016/02/12-2013-ADV-Monatsstatistik.pdf>. Accessed 15 Dec 2017

Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (2014) ADV-Monatsstatistik 12/2014. http://adv.aero/wp-content/uploads/2016/02/12.2014_ADV-Monatsstatistik.pdf. Accessed 15 Dec 2017

Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (2015) ADV-Monatsstatistik 12/2015. <http://adv.aero/wp-content/uploads/2016/07/12.2015-ADV-Monatsstatistik.pdf>. Accessed 15 Dec 2017

Arbeitsgemeinschaft Deutscher Verkehrsflughäfen (2016) ADV-Monatsstatistik 12/2016. <http://adv.aero/wp-content/uploads/2017/02/12.2016-ADV-Monatsstatistik.pdf>. Accessed 14 Dec 2017

Bundesministerium des Innern, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (2010) Nationales Luftsicherheitsprogramm. NLS P

Bundesregierung (2015) Drucksache 18/5445. Antwort auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Jan Korte, Wolfgang Gehrcke, Annette Groth, weiterer Abgeordneter und der Fraktion DIE LINKE. Vertragsverletzungsverfahren der Europäischen Kommission wegen unzureichender Überwachung von Sicherheitskontrollen an Flughäfen

Convario (2017) Checkpoint-Konfigurator für Smiths Detection. https://www.convario.net/loesungen/3d_konfigurator/checkpoint_konfigurator. Accessed 15 Dec 2017

Europäische Kommission (2015) Durchführungsverordnung (EU) 2015/1998. Zur Festlegung detaillierter Maßnahmen für die Durchführung der gemeinsamen Grundstandards für die Luftsicherheit

Europäische Kommission (2016) Sicherheit in der Zivilluftfahrt: EU-weite Vorschriften. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/LSU/?uri=CELEX:32008R0300>. Accessed 15 Dec 2017

Europäisches Parlament, Rat der Europäischen Union (2008) Verordnung (EG) Nr. 300/2008. Über gemeinsame Vorschriften für die Sicherheit in der Zivilluftfahrt und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 2320/2002

Fischer B (2017) Untersuchung der Auswirkungen technologischer und operationeller Konzepte auf die zukünftige Kontrollkapazität der Passagier- und Handgepäckkontrollen am Flughafen Berlin Brandenburg. Masterarbeit, Technische Hochschule Wildau

Flughafen Berlin Brandenburg (2015) Berlin Airport News November 2015. <http://www.berlin-airport.de/de/unternehmen/aktuelles/newsletter/newsletter-archiv/2015/2015-11/index.php>. Accessed 15 Dec 2017

Geminn CL (2014) Rechtsverträglicher Einsatz von Sicherheitsmaßnahmen im öffentlichen Verkehr, Aufl. 2014. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden. ISBN: 9783658053536

Horton G (2001) Discrete-Event Simulation. Introduction to Simulation WS01/02. http://isgwww.cs.uni-magdeburg.de/~graham/its_01/lectures/04-DESimulation-1.pdf. Accessed 15 Dec 2017

Kroschwald S (2012) Sicherheitsmaßnahmen an Flughäfen im Lichte der Grundrechte. Zugl.: Kassel, Univ., Masterarbeit. Forum Wirtschaftsrecht, Bd. 11. Kassel Univ. Press, Kassel. ISBN: 978-3-86219-318-9

Lackes R, Siepermann M, Rottmann H, Auer BR, Lübbecke M (o. J.) Stichwort Simulation. Version 14. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/55029/simulation-v14.html>. Accessed 15 Dec 2017

(2005) Luftsicherheitsgesetz.

Renner J (2016) One vision. Airport World(3):46–47

Sterchi Y, Schwaninger A (2015) A First Simulation on Optimizing EDS for Cabin Baggage Screening Regarding Throughput. http://www.casra.ch/uploads/txtvpublications/YaSt_AdSc_ICCST2015.pdf. Accessed 15 Dec 2017

AUTOREN

Andreas G. Hotes, Dipl.-Ing.
Benjamin Fischer, B.Eng.
Airlinemanagement & Aviation Security
Luftfahrttechnik / Luftfahrtlogistik
Technische Hochschule Wildau

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



Citizen Science – Die Rolle des Bürgers in der Wissenschaft

Frank Hartmann* und Dana Mietzner

Zusammenfassung

Die Wissenschaft öffnet sich in zunehmendem Maße anderen gesellschaftlichen Teilbereichen und unter dem Schlagwort Citizen Science (Bürgerwissenschaft) verstärkt auch Bürgerinnen und Bürgern. Ein solcher Öffnungsprozess ist, wie die gegenwärtige wissenschaftliche Diskussion zeigt, weder theoretisch noch praktisch unproblematisch. In diesem Beitrag werden deshalb zunächst verschiedene theoretisch-konzeptionelle Ansätze skizziert, die mit dem Thema Bürgerwissenschaft im Zusammenhang stehen, um die unterschiedlichen Facetten der Diskussion zu verdeutlichen. Des Weiteren beabsichtigen die Autorin und der Autor vor allem Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unterschiedlicher Disziplinen und Forschungsrichtungen für Chancen und Grenzen des Konzepts Bürgerwissenschaft und seiner praktischen Umsetzung in verschiedenen Formen zu sensibilisieren. Schließlich werden vor dem Hintergrund der theoretisch-konzeptionellen Diskussionen Anforderungen an den Aufbau eines bürgerwissenschaftlichen Panels an Hochschulen als mögliches Instrument von Citizen Science spezifiziert.

Abstract

Science increasingly opens up to other societal subsystems – including citizens – and labeled as Citizen Science (Bürgerwissenschaft). Current scientific discussions show that such an opening process is neither theoretically nor practically without problems. This article therefore presents different theoretical-conceptual approaches, which are related to the topic of citizen science, in order to illustrate the different facets of the discussion. Furthermore, the authors intend to sensitize scientists and scholars of various disciplines and research areas for the opportunities and limitations of the concept of citizen science and its practical implementation in various forms. Finally, against the background of the theoretical-conceptual discussions, requirements for the establishment of a citizen science panel at Institutions of Higher Education are specified as a possible tool of Citizen Science.

Einleitung

Das Innovationsmanagement in der unternehmerischen Praxis hat sich in den vergangenen Jahren von „Open Innovation“ (Öffnung von Innovationsprozessen gegenüber Partnern und externe Verwertung von F&E-Ergebnissen und Innovationen) über „Open Local Innovation“ (Öffnung von Unternehmen für die Zusammenarbeit mit kommunalen Verwaltungen) bis hin zu „Open Collaborative Innovation“ (Einbezug von Bürgern in Innovationsprozesse) und „Free Innovation“ (Bürger als Innovatoren) entwickelt (Chesbrough 2003: 180; Reichwald & Piller 2009; Baldwin & von Hippel 2011; von Hippel 2017).

Im Wissenschaftsbereich zeichnet sich eine ähnliche Entwicklung ab. Während sich die Wissenschaft gegenüber der Wirtschaft längst geöffnet hat, erodieren die Grenzen auch zu anderen gesellschaftlichen Teilbereichen, und die Wissenschaft beginnt nun, sich unter dem Schlagwort „Bürgerwissenschaft“ bzw. „Citizen Science“ verstärkt Laien und zivilgesellschaftlich organisierten Bürgerinnen und Bürgern zu öffnen (Wissenschaft im Dialog o. J.). Für Hochschulen mit ihren spezifischen Funktionen und Ressourcen im Wissenschaftssystem ergeben sich hiermit neue Herausforderungen und Chancen, die weiter auszuloten sind.

Dieser Beitrag erhebt nicht den Anspruch einer umfassenden Literaturanalyse, er hat vielmehr den Charakter einer erklärenden und argumentativen Abhandlung mit dem Ziel, eine eigene Perspektive auf den Untersuchungsgegenstand Bürgerwissenschaft (Citizen Science) zu entwickeln. Es werden verschiedene theoretisch-konzeptionelle Ansätze skizziert, die mit dem Thema Bürgerwissenschaft im Zusammenhang stehen. Damit sollen (1) unterschiedliche Facetten der Diskussion verdeutlicht, (2) eine Sensibilisierung für Chancen und Grenzen des Konzepts Bürgerwissenschaft erreicht und (3) die Grundlage für die Konzipierung eines Instrumentes geschaffen werden, mit dessen Un-

terstützung Bürgerinnen und Bürger schrittweise in die Forschung einer Hochschule eingebunden werden können. Dazu werden vor allem theoretische Konzepte zum Thema Open Science und Citizen Science systematisiert, aber auch Ansätze aus dem Bereich der Bürgerbeteiligung als Form der Partizipation an politischen Entscheidungen, hier insbesondere zu Bürgerpanels, betrachtet. Vor diesem Hintergrund werden die Anforderungen an den Aufbau eines bürgerwissenschaftlichen Panels an einer Hochschule spezifiziert, was als Grundlage für den Aufbau und die Moderation des Panels dient.

1. Konzeptioneller Hintergrund

In diesem Abschnitt wird die Öffnung des Wissenschaftssystems überwiegend aus der internen Perspektive der Wissenschaft thematisiert. Dabei werden wissenschaftstheoretische und auch wissenschaftspolitische Ansätze (Open Science) aufgegriffen. Weiterhin werden Ansätze vorgestellt, die steigende Partizipationsansprüche von Bürgerinnen und Bürgern zum Ausgangspunkt nehmen, um eine weitere Öffnung des Wissenschaftssystems zu begründen (Citizen Science) (Finke 2014: 208).

Dabei ist zu berücksichtigen, dass zwar einzelne Stränge im wissenschaftlichen Diskurs erkennbar sind, am deutlichsten jener, der sich von den Konzepten „Post Normal Science“ (Funtowicz & Ravetz 1993) und „Mode 2“ (Gibbons 1994) bis hin zum Ansatz der „Transformativen Wissenschaft“ (Schneidewind & Singer-Brodowski 2014) im Jahr 2014 durchzieht. Insgesamt betrachtet ist die Diskussion jedoch sehr vielschichtig, hochaktuell und offen, wie jüngst die Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis mit ihrem Spezialheft zum Thema „Open Science zwischen Hype und Disruption“ gezeigt hat (Grunwald 2017).

Schließlich wird in verkürzter Form auf politische Beteiligungsformate verwiesen, insbesondere auf das Format des Bürgerpanels, um auch aus dieser Perspektive Anregungen für den Aufbau eines bürgerwissenschaftlichen Panels an Hochschulen zu gewinnen.

1.1 Open Science

Aus wissenschaftstheoretischer und wissenschaftspolitischer Sicht sind es vor allem zwei Arbeiten, die eine breite und anhaltende Diskussion um die moderne Wissenschaft angestoßen haben und mit dem Thema Citizen Science in engem Zusammenhang stehen. Funtowicz und Ravetz (1993) lenkten mit ihrem Artikel „Science for the Post-Normal Age“ den Blick auf einen systemischen, synthetischen und humanistischen Ansatz des Verständnisses von Wissenschaft, im Unterschied zu einer von ihnen als reduktionistisch und analytisch bezeichneten Welt-sicht, in der immer tiefer spezialisierte Wissenschaftler immer weiter analytisch segmentierte Systemelemente untersuchen und dabei eine umfassende Sicht auf gesellschaftliche Unsicherheiten und Risiken verlieren. Sie nahmen für die 90er Jahre an, dass sich die Wissenschaft in einer umfassenden „Transition“ befindet, einhergehend mit verstärkter Partizipation und zunehmender Toleranz von Diversität hinsichtlich der zum Einsatz kommenden Methoden (Funtowicz & Ravetz 1993). Das Konzept wurde unter dem Schlagwort *Post Normal Science*, das auf den von Thomas Kuhn 1962 eingeführten Begriff der Normal Science Bezug nahm, bekannt (Kuhn 1962). Ein Jahr später folgte die Arbeit „The New Production of Knowledge: The Dynamics of Science and Research in Contemporary Societies“, mit der Gibbons et al. die Diskussion um neue Formen der Wissensproduktion aufgriffen und vertieften (Gibbons 1994). Sie trugen die Begründung einer radikalen Transformation der Wissensproduktion und des Forschungsprozesses vor und markierten diesen Ansatz mit dem Schlagwort *Mode 2*. In diesem Konzept findet eine neue Art der Wissensproduktion statt, in der Gesellschaft, Markt und weitere Akteure direkte Bestandteile der Wissensproduktion sind, die in starkem Maße kontextualisiert und durch Transdisziplinarität gekennzeichnet ist.

Drei damals immer offensichtlicher gewordene Trends gaben Anlass, das traditionelle Wissenschaftsverständnis, einhergehend mit der Annahme einer weitgehenden Autonomie der Wissenschaftler und ihrer Institutio-

nen, zu hinterfragen. Es wurde ers-tens deutlich, dass Forschung in zunehmendem Maße über das externe Setzen von Forschungsprioritäten gesteuert wird. Zweitens schritt die Kommerzialisierung der Forschung weiter fort und damit die Verschränkung von Wissenschaft und Wirtschaft. Drittens schließlich rückte die Problematik der Rechenschaftspflichtigkeit und Verantwortlichkeit von Wissenschaft und Forschung gegenüber der Gesellschaft in den Fokus der öffentlichen Debatte. Für das Konzept Mode 2 waren und sind, trotz wissenschaftlicher Kritik an ihm, die folgenden Ansätze konstitutiv:

1. Hervorgehoben wird die Rolle des *Anwendungskontextes* für Forschung, in dem ein wissenschaftliches Problem entsteht und darauf bezogene Methodologien entwickelt, Ergebnisse disseminiert und Nutzen definiert werden (Nowotny et al. 2003: 186). Darüber hinaus erweiterten sie ihren Ansatz um den Begriff der *Agora*, die als problemgenerierende und problemlösende Umwelt verstanden wird, in der die Kontextualisierung der Wissensproduktion stattfindet. Die *Agora* wird verstanden als „domain of primary knowledge production through which people enter the research process, and where Mode 2 knowledge is embodied in people and projects“ (Nowotny et al. 2003: 192).
2. Im Konzept Mode 2 spielt die *Transdisziplinarität* eine hervorgehobene Rolle. Darunter wird die Fähigkeit der Mobilisierung verschiedener theoretischer Perspektiven und praktischer Methodologien zur Problemlösung verstanden. Der kreative Akt liegt hierbei in der Kapazität und Fähigkeit, diese Perspektiven und Methodologien zu mobilisieren und zu managen (Nowotny et al. 2003: 186).
3. Hervorgehoben wird die zunehmende *Diversität von Orten* der Wissensproduktion und Typen von Wissen, insbesondere auch im Zusammenhang mit neuen Technologien der Kommunikation und Interaktion (Nowotny et al. 2003: 186).

4. Forschung wird im Paradigma von Mode 2 hochgradig *reflexiv*. Forschungsprozesse werden dialogisch, es entsteht eine intensive Kommunikation zwischen Forschenden und Forschungsgegenstand. Eine Konsequenz daraus ist die Notwendigkeit, die Rechenschaftspflichtigkeit/Verantwortlichkeit von Wissenschaft und Forschung zu überdenken. Die Folgen des neu produzierten Wissens können nicht mehr nur außerhalb der Forschung thematisiert werden, weil die Problemlösungsumwelten die Themenauswahl, das Forschungsdesign und die Anwendungen bereits beeinflusst haben (Nowotny et al. 2003: 187).
5. Mode 2 ist mit neuen Formen der *Qualitätssicherung* verbunden. Peers können nicht mehr zuverlässig identifiziert werden, da disziplinenübergreifend gearbeitet wird und am Forschungsprozess unterschiedliche Akteursgruppen beteiligt sind, etwa Wissensproduzenten unterschiedlichster Couleur, Broker, Disseminatoren und Nutzer. Es gibt für die Qualitätsmessung keine eindeutigen Kriterien mehr, und es ist erforderlich zu lernen, mit multiplen Definitionen von Qualität umzugehen (Nowotny et al. 2003).

Bereits diese knappe Skizzierung des Konzepts Mode 2 verweist auf dessen Aktualität für den organisierten Einbezug von Bürgerinnen und Bürgern in Forschungsprozesse. Hierbei spielen alle fünf konstitutiven Merkmale eine Rolle.

An dieses Konzept schließen neuere wissenschaftliche Arbeiten und forschungspolitische Aktivitäten auf internationaler und nationaler Ebene unter dem Schlagwort *Open Science* an. Es handelt sich um ein *neues Paradigma*, wie Forschung betrieben wird, und um eine *Strategie, um Wissenschaft mittels Digitalisierungsmaßnahmen effizienter zu gestalten* (Vohland & Göbel 2017; Franzen 2016). Diese beiden Aspekte kommen auch in der entsprechenden Definition der EU-Kommission aus dem Jahr 2016 zum Ausdruck: "Open Science repre-

sents a new approach to the scientific process based on cooperative work and new ways of diffusing knowledge by using digital technologies and new collaborative tools. The idea captures a systematic change to the way science and research have been carried out for the last fifty years: shifting from the standard practices of publishing research results in scientific publications towards sharing and using all available knowledge at an early stage in the research process" (Europäische Kommission 2016: 33). Weiter ausdifferenziert wird das Konzept Open Science in der gegenwärtigen deutschen Diskussion von Riehm und Nentwich durch die Herausarbeitung von vier Dimensionen, mit denen Offenheit bzw. Öffnung von Wissenschaft in Zusammenhang gebracht wird (Riehm & Nentwich 2017). Offenheit von Wissenschaft bezieht sich demnach (1) auf die formale Kommunikation, wobei der offene Zugang zu wissenschaftlichen Daten, Informationen und Publikationen angesprochen ist. Offenheit bezieht sich (2) auf den Teilnehmerkreis der Kommunikation. Eine Öffnung üblicherweise vertraulicher Kommunikationsprozesse, z.B. in wissenschaftlichen Netzwerken, erzeuge mehr Transparenz und wissenschaftliches Arbeiten werde leichter und diskriminierungsfrei nachvollziehbar. Offenheit betrifft (3) die Wissensproduktion selbst. Es gehe um den Abbau hierarchischer und disziplinärer Grenzen der Wissenschaft. Offenheit bezieht sich (4) schließlich auf den Transfer des erzeugten Wissens, wobei es um Fragen der Wirksamkeit der Anwendung der Ergebnisse von Forschung geht (Riehm & Nentwich 2017).

Reichmann (2017) bringt in die aktuelle Debatte um Open Science zwei Erweiterungen aus der soziologischen Perspektive ein. Zum einen geht es um die Öffnung von Strukturen des Wissenschaftssystems, die über eine Öffnung des Zugangs zu wissenschaftlichem Wissen im Zuge neuer digitaler Publikationsstrukturen weit hinausgeht. Das betrifft beispielsweise die Frage der Öffnung sozialer Strukturen von wissenschaftlichen Communities oder auch von Kooperationsstrukturen, die seiner Meinung nach mehr oder weniger offen oder geschlossen

sein können (Reichmann 2017: 44). Zum anderen möchte er den in der Wissenschaftssoziologie etablierten Kulturbegriff für Open Science nutzbar machen. Aus seiner Sicht eröffnet die Betrachtung von *Open Science als Wissenskultur* zusätzliche Perspektiven. Dies bedeutet, die Praxis der Wissenschaften in den Blick zu nehmen, weil auch unterschiedliche Wissenskulturen zur Schließung oder Öffnung von Wissenschaft beitragen können (Reichmann 2017: 44). Eine solche Sichtweise hat zur Konsequenz, dass ein universaler Begriff von Open Science nicht sinnvoll erscheint. Es geht vielmehr um differenzierte Betrachtungen von Open Science in Abhängigkeit von speziellen Praktiken, die auf Wissenskulturen basieren. Das heißt, die Öffnung der Wissenschaft schlägt sich in konkreten Wissenschaftspraxen nieder. Insofern ist Open Science lokal verankert und sozial differenziert. Die strukturellen und kulturellen Kontextbedingungen für Open Science unterscheiden sich und müssen berücksichtigt werden. Auch in dieser Perspektive ergeben sich zahlreiche Schnittmengen zum eingangs vorgestellten Konzept Mode 2.

Franzen nennt in diesem Zusammenhang die folgenden „Denkschulen“, die jeweils unterschiedliche Aspekte der Öffnung von Wissenschaft im Fokus haben. Das betrifft die Zugänglichkeit wissenschaftlichen Wissens (Demokratische Schule), die Gestaltung von Wissenschaft (Pragmatische Schule), die Verfügbarkeit von Wissen und Ergebnissen über webbasierte Plattformen (Schule der Infrastrukturen), die Zugänglichkeit für Bürgerinnen und Bürger (Schule der Öffentlichkeit) sowie die Messung wissenschaftlichen Impacts mit alternativen Bewertungssystemen (Schule der Bewertung) (Franzen 2016: 281). Hier wird erstmalig die Perspektive des Bürgers aufgeführt, andere, bereits angelegte Perspektiven werden von Franzen vertieft.

Diese verschiedenen Perspektiven aufgreifend argumentiert Dickel, wenn er im Zusammenhang mit Open Science eine „Erosion der Wissenschaft als professionell geschlossene Sphäre“ infolge der „Umstellung wissenschaftlicher Kommunikation auf

elektronisch-digitale Verbreitungswege und der damit verknüpften normativ ausgeflaggt Programmatik einer weitgehenden Öffnung der Wissensrezeption (Open Access) und Wissensproduktion (Citizen Science)“ antizipiert (Dickel 2017). Er hält eine allmähliche Entgrenzung des Wissenschaftssystems für möglich, ähnlich wie Schneidewind, der ein Wissenschaftsverständnis vertritt, in dem Wissenschaft nicht nur Transformationsprozesse in der Gesellschaft beobachtet und beschreibt, sondern diese aktiv mitgestaltet (Schneidewind 2015: 88).

Der Ansatz der *Transformativen Wissenschaft* wurde erstmalig 2014 von Schneidewind und Singer-Brodowski in die Diskussion gebracht. Er baut auf verschiedenen Arbeiten zur Transdisziplinarität, der Aktions- und Interaktionsforschung und der Forschung zu Mode 2 auf (Schneidewind & Singer-Brodowski 2014). Berücksichtigung finden im Konzept nach Schneidewind auch Ansätze zu Reallaboren oder der zivilgesellschaftlichen Beteiligung. Insofern handelt es sich um einen Ansatz, der in hohem Maße integrativ ist. Er zielt auf die *institutionelle Entgrenzung des Wissenschaftssystems und dessen Öffnung* „gegenüber anderen Orten der wissenschaftlichen Wissensproduktion“ (Schneidewind 2015: 89). Mit dieser Entgrenzung ist die institutionelle Re-Justierung des bestehenden Wissenschaftssystems verbunden, um „dieses angesichts massiver gesellschaftlicher Umbrüche in neuer Form auf die Gesellschaft zu beziehen“ (Schneidewind 2015: 91). Um das Konzept der Transformativen Wissenschaft ist in den vergangenen Jahren eine lebhafte Diskussion entstanden, ähnlich wie um das Konzept Mode 2. Als prominentester Vertreter und umfassendster Kritiker kann wohl Peter Strohschneider angesehen werden. Seine Fundmentalkritik richtet sich insbesondere auf vier Merkmale Transformativer Wissenschaft:

- An erster Stelle steht der Vorwurf der Orientierung am Schema „Problem und Lösung“ (Strohschneider 2014: 179).

Er argumentiert mit der Partialität des Themas (Strohschneider 2014: 180)

und reduktionistischen Auswirkungen auf das Wissenschaftsverständnis. Die Kritik gipfelt im Vorwurf der Vereinseitigung des Zusammenhangs von Verstehen und Gestalten, was zu einem Privilegieren der praktischen Nützlichkeit gegenüber anderen, eher indirekten Effekten von Wissenschaft führe (Strohschneider 2014: 180).

- An zweiter Stelle geht es um die Kritik des Konzeptes der Transdisziplinarität.

Der Vorwurf besteht hier darin, dass Gesellschaft durch Mitwirkung zum integralen Bestandteil der wissenschaftlichen Wissensproduktion würde. Infolge dessen käme es zu einer Substitution der Strukturierungsleistungen einer disziplinären Wissenschaftsordnung (Strohschneider 2014: 181).

- Drittens geht es in der Kritik um den Status wissenschaftlichen Wissens.

Dieser Status bestimme sich im Ansatz der Transformativen Wissenschaft weniger im Rahmen eines wissenschaftlichen Wahrheitsdiskurses als vielmehr im Nützlichkeitsbereich (Strohschneider 2014: 181). Hervorgehoben wird auch das der Wissenschaft immanente Prinzip des methodischen Zweifels, das die Unterscheidung zwischen wissenschaftlichem und nicht wissenschaftlichem Wissen ermögliche. Strohschneider beschreibt in diesem Zusammenhang unter Bezugnahme auf Hoffmann (Hoffmann 2013) die Gefahr, dass im Falle des Außerkraftsetzens des Prinzips des methodischen Zweifels das irreversible Faktum, das auf dauerhafte Anerkennung pocht, im Modus Transformativer Wissenschaft an Macht gewinnt (Strohschneider 2014: 181).

- Viertens wendet er sich gegen das Argument der Ent-Differenzierung.

Seiner Meinung nach wird im Ansatz der Transformativen Wissenschaft das Prinzip der funktionalen Differenzierung nicht als Möglichkeitsbedingung verstanden, sondern als krisenhaftes Problem moderner Gesellschaften be-

schrieben (Strohschneider 2014: 182). Im Vordergrund des Konzepts stehe die Entgrenzung des Wissenschaftssystems statt komplizierter Grenzverhandlungen zwischen Wissenschaftssystem und anderen gesellschaftlichen Teilbereichen (Strohschneider 2014: 182). Schließlich sieht Strohschneider aufgrund der Entdifferenzierung die Gefahr der Einschränkung des Raums des Politischen und dessen Verdrängung durch Wissenschaft, da die Transformative Wissenschaft den Anspruch erhebe, die Transformation der Gesellschaft selbst zu betreiben.

In den Repliken auf diese Kritik, vorgelesen von Schneidewind und Grunwald, wird, neben der Bezugnahme auf die einzelnen Kritikpunkte, an zentraler Stelle darauf verwiesen, dass es der Transformativen Wissenschaft keineswegs darum gehe, das gesamte traditionelle Wissenschaftssystem durch ein neues, an der Nützlichkeit orientiertes und von der Wissenschaftlichkeit abgekehrtes Paradigma zu ersetzen, sondern dass es um notwendige Erweiterungen und eine Neujustierung des Systems gehe, wobei global ohnehin nicht von einer einheitlichen Wissenschaft ausgegangen werden könne (Grunwald 2015; Schneidewind 2015). Grunwald zieht in diesem Zusammenhang die Parallele zum Entstehen der Technikwissenschaften und zu deren erfolgreicher Durchsetzung und Etablierung im Wissenschaftssystem im 19. Jahrhundert, ohne dieses zu ersetzen.

1.2 Citizen Science als „Spezialfall“ von Open Science

Wurden im ersten Teil zum konzeptionellen Hintergrund grundsätzliche wissenschaftstheoretische und wissenschaftspolitische Diskussionen der Öffnung des Wissenschaftssystems als ein Diskussionsstrang skizziert, werden im Folgenden Ansätze beschrieben, die stärker auf die steigenden Ansprüche von Akteuren (insbesondere Bürgerinnen und Bürgern) auf Beteiligung in unterschiedlichen Teilbereichen der Gesellschaft generell und an der Wissenschaft im Speziellen fokussieren. Dabei geht es nicht so sehr um die Frage der Ausdifferenzierung unterschiedlicher gesellschaftlicher Teilbereiche. Es geht vielmehr darum, in

welcher Weise und in welchem Maße diejenigen Menschen partizipieren können, die nicht zu den die Teilbereiche unmittelbar konstituierenden Leistungsträgern gehören. Damit rückt, auch bezogen auf das Teilsystem Wissenschaft, die Akteursperspektive in den Vordergrund (Vohland & Göbel 2017). Es handelt sich hierbei um emanzipatorische Fragestellungen zur Mobilisierung alternativer Formen von Expertise. Bezieht man Beteiligung auf die Einbeziehung von Nichtwissenschaftlern in Forschungsprozesse, ist man beim Konzept von Citizen Science als einem „Spezialfall“ von Open Science angelangt.

Für das Verständnis von Citizen Science sind Ansätze aus der Rollen- und Professionalisierungstheorie interessant (Mayntz 1988; Stichweh 1988). So beschreibt beispielsweise Gerhards in seinem bekannt gewordenen Artikel „Der Aufstand des Publikums“ aus dem Jahr 2001 die sich verändernde Rolle des Publikums seit den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts bis 1989 in verschiedenen gesellschaftlichen Teilsystemen. Er greift hierbei auf den systemtheoretischen Ansatz von Luhmann zurück und verbindet ihn mit der o. g. Rollen- und Professionalisierungstheorie sowie der Organisationssoziologie. Der Ausgangspunkt der für Citizen Science relevanten Überlegungen besteht in der Annahme, dass Teilsysteme einer strukturellen Absicherung durch spezifische Rollen bedürfen (Mayntz 1988: 20). An erster Stelle sind hier die sogenannten Leistungsrollen zu nennen. „Mediziner, Pädagogen, Politiker, Juristen, Künstler, Sportler, Wissenschaftler sind Berufsrollenträger innerhalb der jeweiligen Teilsysteme, die die Handlungsrationalität zum Ausdruck bringen und damit strukturell absichern“ (Gerhards 2001: 165). Für viele gesellschaftliche Teilsysteme wie Wirtschaft oder Politik haben sich jedoch nicht nur Leistungsrollen ausgebildet, sondern auch komplementär hierzu Publikumsrollen entwickelt. „Diese Publikumsrollen ermöglichen die Inklusion der Gesamtbevölkerung in die Teilsysteme und definieren die Möglichkeit der Partizipation der Bevölkerung an den verschiedenen Teilsystemen“ (Gerhards 2001: 166). Nach Gerhards hängen die Partizipationschancen von

bestimmten Rollenerwartungen ab. Relevant sind allein die Fähigkeiten einer Person, die aus der Sicht eines Teilsystems durch die Leistungsrollen als relevant definiert werden. Das Publikum erhält deshalb Zugang zum Teilsystem erst über den selektiven Zugriff durch die Leistungsträger (Gerhards 2001: 166).

Basierend auf diesem theoretischen Konstrukt weist Gerhards, zumindest für einen bestimmten Zeitraum, nach, dass sich das Verhältnis von Leistungs- und Publikumsrollen im Zeitverlauf gewandelt hat. „Die Rechte und Inklusionsansprüche der Laien sind im Verhältnis zu den Autoritätsrollen in fast allen gesellschaftlichen Teilbereichen gestiegen, die Reduktion auf einen recht selektiven Rollenzuschnitt ist aufgeweicht worden, Bürger melden sich als Personen zu Wort, ein Aufstand des Publikums hat stattgefunden“ (Gerhards 2001: 167). In seinem Beitrag beschreibt er den Prozess der Umcodierung (Umkehr einer binären Leitdifferenz) des Verhältnisses von Publikums- und Leistungsrollen in verschiedenen Teilbereichen, so auch im Bereich der Politik. Hier ist das Publikum durch die Rolle als Staatsbürger in das politische System eingebunden (1) durch die Möglichkeit der Mitbestimmung über relevante Themen und die Möglichkeit, Träger der Leistungsrollen auszuwählen (Inputseite). Eingebunden ist es aber auch (2) als Abnehmer der getroffenen Entscheidungen (Outputseite). Das Publikum kommuniziert mit den Vollzugsorganen des politischen Systems (Gerhards 2001: 175). Gerhards zeigt dezidiert auf, wie sich seit den 1960er Jahren sowohl auf der Inputseite die geforderten Mitsprachemöglichkeiten des Publikums deutlich erweitert haben als auch auf der Outputseite Inklusionsansprüche der Bürger gestiegen sind. Im Ergebnis, so seine Schlussfolgerung, wurde die Idee eines aktiven Bürgers in die Handlungsrationalität des politischen Systems eingebaut. Das Wissenschaftssystem wurde in diesem Zusammenhang von Gerhards als gesellschaftlicher Teilbereich, der für eine zunehmende Inklusion von Bürgerinnen und Bürgern relevant ist, ausgespart – sicher auch deshalb, weil in differenzierungstheoretischer Sicht das Wissenschaftssystem durch besondere Merkmale gekennzeichnet ist, die den

Zugang erschweren.

Vor einem ähnlichen theoretischen Hintergrund diskutieren Dickel und Franzen 2015 das Problem der Demokratisierung von Wissensproduktion und Wissensrezeption (Dickel & Franzen 2015) und schließen damit in gewisser Weise die „Lücke“ von Gerhards. Ihre Arbeit wird von der These geleitet, dass sich Konturen neuer wissenschaftlicher Inklusionsprofile herausbilden, die auf ein alternatives Publikum und die Inklusion von Nichtwissenschaftlern in die Wissensproduktion hinweisen. Sie knüpfen an die differenzierungstheoretisch begründete Geschlossenheit des Wissenschaftssystems an, gehen aber davon aus, dass diese sich praktisch aufzulösen scheint.

Auch Dickel und Franzen verweisen zunächst auf Leistungsrollen, die teilsystemspezifisch an Professionsgemeinschaften und die Mitgliedschaft in Organisationen gebunden sind, auf der einen Seite und auf Publikumsrollen auf der anderen Seite. Darüber hinaus referenzieren sie auf die Ausprägung sekundärer Leistungsrollen, wie sie beispielsweise in der Funktion des Kritikers oder des Amateurs zum Ausdruck kommen. Im klassischen differenzierungstheoretischen Verständnis ist Wissenschaft durch die Besonderheit gekennzeichnet, dass es keine konstitutiven Publikumsrollen gibt. Vereinfacht gesprochen ist die Wissenschaft sich ihr eigenes Publikum. Laien oder Bürger sind von der Teilhabe am Teilsystem weitgehend ausgeschlossen. Ihnen wird höchstens eine generelle Publikumsrolle zuerkannt. Die Beteiligung von Laien bleibt auf Formen indirekter Inklusion beschränkt und bezieht sich auf Bildungsangebote seitens der Wissenschaft und den Medienkonsum im Zusammenhang mit Wissenschaft (Dickel & Franzen 2015: 9).

Dickel und Franzen unternehmen nun den Versuch, diese exklusiven Strukturen zu relativieren. Ihrer Meinung nach kristallisieren sich neue, mediatisierte, funktionale Beziehungen zwischen Wissenschaftlern und Nichtwissenschaftlern heraus (Dickel & Franzen 2015: 2). Mit Verweis auf Weingart gehen sie davon aus, dass die medienvermittelte Inklusion eines generellen Publikums an Stärke gewinnt (Dickel

& Franzen 2015: 9). Neue Inklusionsmodi werden insbesondere im wissenschaftlichen Publikationswesen gesehen, was die Autoren zu der These führt, dass sich eine neue, sekundäre Publikumsrolle entwickelt, die allmählich systeminternes Handeln zu konditionieren beginnt. Diese sekundäre Publikumsrolle entwickelt sich einerseits über die Herausbildung eines konstitutiven wissenschaftlichen Publikums und andererseits über die Wiederbelebung des Amateurforschers. Für beide Tendenzen spielen digitale Technologien als Enabler eine wichtiger Rolle (Dickel & Franzen 2015: 18). Aber auch auf der Seite der Leistungsrollen (etablierter Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie Wissenschaftseinrichtungen) werden ihrer Meinung nach Differenzierungen sichtbar, entweder als bessere Alternative zu den primären Leistungsrollen oder als Dienstleister für diese primären Leistungsrollen. Für beide, Publikumsrollen und Leistungsrollen, nehmen Dickel und Franzen ein Spannungsverhältnis an, das durch die beiden Pole Gegenstrukturalität und Integration gebildet wird. Auf der Seite der Gegenstrukturalität geht es um Alternativen zu Organisationen und Professionen in einem gesellschaftlichen Teilsystem. Für den Bereich der Wirtschaft werden in Anlehnung an Al-Ani als Beispiel Freie Produzenten im Sinne digital organisierter Produktionsgemeinschaften erwähnt (Dickel & Franzen 2015: 21; Al-Ani 2013). Im Bereich der Wissenschaft verweisen Dickel und Franzen immer wieder auf die sogenannten Biohacker als Communitys, in denen die dezentralen Infrastrukturen von Bürgerforschern selbst getragen werden (Dickel & Franzen 2015: 22). Am Pol der Gegenstrukturalität entstehen so alternative Strukturen der Wissensproduktion jenseits etablierter wissenschaftlicher Institutionen, auch wenn die Autoren dies eher als seltene Nischen verstehen und damit relativieren. Am Pol der Integration entwickeln Laien spezifische Publikumsrollen unterschiedlichen Integrationsgrades, vom Datensammler bis zum Mitarbeiter in anwendungsorientierten Forschungsprojekten, und werden so produktiv für wissenschaftliche Organisationen bzw. für primäre Leistungsrollenträger (Dickel

& Franzen 2015: 27).

Die Autoren lösen sich schließlich vom klassischen differenzierungstheoretischen Systemkonzept, indem sie davon ausgehen, dass die traditionelle Form der funktionalen Differenzierung durch technisch vermittelte Netzwerkstrukturen überlagert wird, die Integrations- und Koordinierungsfunktionen übernehmen. Sie nähern sich insofern den eingangs genannten Open-Science-Konzepten an, ohne jedoch so weit zu gehen, von einer Demokratisierung der Wissenschaft zu sprechen. Sie gehen damit über das ursprüngliche und in der Diskussion auch immer wieder durchscheinende Verständnis von Citizen Science hinaus, in dessen Mittelpunkt Unterstützungsleistungen für die Wissenschaft in der Datenaufnahme und Datenanalyse stehen (Vohland & Göbel 2017) und Citizen Science lediglich als Form der Wissenschaftskommunikation und -bildung ausgewiesen wird.

Insgesamt hat die Diskussion um Citizen Science ein Stadium erreicht, in dem der Übergang hin zu einem Verständnis, dem zufolge sich Bürgerinnen und Bürger in zunehmendem Maße direkt an Forschungsprozessen beteiligten, vollzogen ist (Häußermann & Heidingsfelder 2017). Sie fungieren in diesem Verständnis nicht nur als Beobachterinnen und Beobachter oder Sammlerinnen und Sammler von Daten, sondern werfen selbst Forschungsfragen auf und untersuchen diese gemeinsam mit Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern. Entsprechend dominieren sehr allgemeine, aber auch zum Teil breite *Definitionen von Citizen Science*. Sanz et al. beispielsweise definieren Citizen Science wie folgt: "Citizen Science refers to the general public engagement in scientific research activities when citizens actively contribute to science either with their intellectual effort or surrounding knowledge or with their tools" (Sanz et al. 2015).

Im deutschen Grünbuch zu Citizen Science wird ein sehr breites Verständnis von Citizen Science vertreten. Als Merkmale von Citizen Science werden hier genannt:

- „Aufnahme zivilgesellschaftlicher Fragestellungen in die Wissenschaft und Förderung der

Handlungsfähigkeit der Teilnehmenden, um als Gemeinschaft zu agieren und auch auf zukünftige Herausforderungen gemeinsam reagieren zu können

- Hinwendung zu problemorientierten Lösungsansätzen auf der Basis von vernetzten wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Erkenntnissen auf lokaler, regionaler, nationaler und internationaler Ebene
- Möglichkeit zur Generierung und Verdichtung großskalierter qualitativer und quantitativer Datensätze und Erkenntnisse über große Gebiete oder längere Zeiträume
- Erhebung von Informationen und Zusammenhängen aus den verschiedenen Fachrichtungen
- Vertiefung des Verständnisses für Wissenschaft und Forschung in der Bevölkerung
- Möglichkeit zu zivilgesellschaftlichem Engagement und gesteigerten Mitsprachemöglichkeiten der Bevölkerung bei Anliegen von Wissenschaft und Forschung
- Austausch und Zugang zu Wissen für die wissenschaftliche und gesellschaftliche Gemeinschaft
- Stärkung eines „Gemeinschaftsgefühls“ (GEWISS 2016)

Eine besondere Facette in der Diskussion um Bürgerwissenschaft bilden Hochschulen. Schneidewind verweist darauf, dass sich eine starke Bürgerwissenschaft dann besonders gut entwickeln kann, wenn es *enge Verknüpfungen mit Hochschulen* gibt. Dies hat mehrere Gründe: Hochschulen sind (1) Hotspots für junge, offene und neugierige studierende Bürgerinnen und Bürger mit gesellschaftlich relevanten Fragestellungen, die zum Ausgangspunkt für Forschung gemacht werden können und das Potenzial besitzen, disziplinäre Grenzen zu überschreiten. Hochschulen sind (2) regional verortet und haben eine wichtige Entwicklungsfunktion für

ihr regionales Umfeld. Diese Funktion ist nicht nur auf den unmittelbaren ökonomischen und technologischen Transfer in die Wirtschaft bezogen. Unter dem Schlagwort „Third Mission“ haben Hochschulen auch eine Funktion im Hinblick auf den Transfer von Wissen in weitere regionale Kontexte wie etwa Verwaltung, Bildung und Kultur, Wohnen und Mobilität. In Hochschulen ist es (3) möglich, „den Methodentransfer weit über naturwissenschaftliche Beobachtungsmethoden auszuweiten. Die Vermittlung von Methoden der empirischen Sozialforschung, von ethnographischen Feldzugängen, von ökonomischen Modellen – all das lässt sich in der gemeinsamen Bearbeitung von Citizen Science-Fragestellungen entwickeln. Es eröffnet auch Perspektiven einer erweiterten Form von ‚offener Hochschule‘, in der Bürgerwissenschaftler Angebote zum Methodenerwerb wahrnehmen können“ (Schneidewind 2014).

Schneidewind verweist auch nachdrücklich darauf, dass neben einzelnen Bürgern zivilgesellschaftliche Organisationen wichtige Partner für Bürgerwissenschaft sind und Hochschulen deren Potenzial durch einen institutionalisierten Austausch mit der organisierten Zivilgesellschaft stärker nutzen sollten (Schneidewind 2014).

1.3 Bürgerbeteiligung an politischen Entscheidungsprozessen

Ein weiterer Diskussionsstrang der für die Konzipierung eines bürgerwissenschaftlichen Panels von Interesse ist, ist der der Bürgerbeteiligung, wobei die Beteiligung von Bürgerinnen und Bürgern an politischen Entscheidungsprozessen gemeint ist. Auch wenn es hier um Beteiligung in einem anderen gesellschaftlichen Teilsystem als dem der Wissenschaft geht, lassen sich möglicherweise Erfahrungen aus diesem Teilbereich für den der Wissenschaft und die Konzipierung und den Betrieb eines bürgerwissenschaftlichen Panels nutzen.

Nach Pfenning und Benninghaus erfolgte die Partizipation an politischen Entscheidungsprozessen früher im Wesentlichen über formale (Parteien) und informale Wege (Bürgerinitiativen) (Pfenning & Benninghaus 2009).

Bei Bürgerbeteiligung im Sinne von partizipativer Demokratie bzw. deliberativer Demokratie hingegen stehen heute weniger direktdemokratische Ansätze oder formalrechtliche Anforderungen aus Verwaltungsverfahren an die Beteiligung von Betroffenen im Vordergrund (Nanz & Fritsche 2012: 2). Vielmehr geht es „um den Erhalt und die Rückgewinnung politischer Handlungsspielräume sowie um die Schaffung neuer Orte deliberativer Mitbestimmung“ (Nanz & Fritsche 2012: 11). Die Besonderheit neuer Formen der Bürgerbeteiligung besteht darin, dass in dialogischen Verfahren Bürger, zivilgesellschaftliche Akteure und Entscheidungsträger frühzeitig zusammengebracht werden (Nanz & Fritsche 2012: 12). Zentral ist dabei ein zeitweise projektbezogenes Engagement im losen institutionellen Rahmen auf der Basis freiwilliger Bereitschaft. Es gebe ein Mosaik institutioneller Optionen und individueller Opportunitäten für eine derartige Beteiligung.

Beobachtbar ist weiterhin ein Trend hin zur lokalen und zeitlich begrenzten Interessenwahrnehmung von Bürgerinnen und Bürgern (Pfenning & Benninghaus 2009: 2). Formen des bürgerschaftlichen Engagements sind zunehmend themenbezogen, zeitlich begrenzt, weniger an politische Parteien gebunden und direkter auf persönliche Interessen zugeschnitten (Nanz & Fritsche 2012: 11). Hieran anknüpfend lassen sich *Bürgerpanels* als spezifische Verfahren der Bürgerbeteiligung herausstellen (Nanz & Fritsche 2012). Anknüpfend an ein Panelverständnis der empirischen Sozialforschung wird ein Bürgerpanel als eine regelmäßig stattfindende Befragung repräsentativ ausgewählter Bürgerinnen und Bürger verstanden. Während Citizens' Panels in Großbritannien weit verbreitet sind, sind sie in Deutschland nach Klages jedoch kaum bekannt (Klages et al. 2008). Bürgerpanels kommen in unterschiedlichen Anwendungsbereichen, etwa der Kommunalpolitik, zum Einsatz. Als Beispiel kann das Modellprojekt Bürgerpanel des Deutschen Forschungsinstituts für öffentliche Verwaltung (FöV) Speyer dienen, das in vier Städten umgesetzt wurde. Zusammenfassend lässt sich ein Bürger-

panel verstehen als

- ein Instrument oder eine Form der Bürgerbeteiligung neben Bürgerversammlungen, Foren, oder Nachbarschaftsprojekten,
- ein Format, das auf die Beteiligung an politischen, insbesondere kommunalen Entscheidungsprozessen in unterschiedlichsten gesellschaftlichen Handlungsfeldern (z. B. Umwelt, Kultur, Alter, Schule) zielt,
- ein übergreifender Ansatz, um Begrenzungen anderer Formen zu reduzieren (d. h. geringe Beteiligungsschwellen zu haben, große Teile der Bevölkerung zu erreichen),
- ein Instrument zur Verbesserung der Informationsversorgung der demokratisch gewählten Interessenvertretungen sowie von Verwaltungen und schließlich als
- ein Mittel zum Eröffnen neuer Kommunikationsmöglichkeiten zwischen Politik und Bürger (Stiftung Mitarbeit).

2. Spezifikationen für ein bürgerwissenschaftliches Panel

Bürgerwissenschaft hat zahlreiche Gemeinsamkeiten mit Open Science oder Transformativer Wissenschaft (s. Abschnitt 1). Gleichwohl sind auch kritische Einwände und Bedenken gegenüber dem Konzept oder seiner Überhöhung für die Konzipierung bürgerwissenschaftlicher Verfahren zu bedenken. Dies betrifft insbesondere die Problematik der Sicherung wissenschaftlicher Qualität. Für die Konzipierung bürgerwissenschaftlicher Vorhaben ist auch die weiter oben aufgegriffene Idee des Spannungsfeldes zwischen den beiden Polen Gegenstrukturalität und Integration von großer Relevanz. Prinzipiell können bürgerwissenschaftliche Vorhaben entlang der gesamten Achse, die sich zwischen Integration und Gegenstrukturalität aufspannt, angesiedelt werden. Im Zusammenhang mit dem Gedanken der Qualitätssicherung wird sich bürgerwissenschaftliche For-

schung jedoch wahrscheinlich nicht vorrangig am Pol der Gegenstrukturalität etablieren. Die Zusammenarbeit mit Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie mit wissenschaftlichen Institutionen dürfte eine Leitplanke für entsprechende Vorhaben sein. Ein Panel wird in diesem Zusammenhang als ein Instrument der Beteiligung von Bürgerinnen und Bürgern an durch Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler geplanten und durchgeführten Forschungsprozessen verstanden.

Anknüpfend an die Vorstellung, dass es Transformativer Wissenschaft um die Lösung gesellschaftlicher Probleme gemeinsam mit Wissensträgern unterschiedlicher „Herkunft“ geht, geraten Forschungsprojekte in den Blick, die einen Anwendungsbezug haben. In vielen Fällen sind solche problemlösungsbezogenen Vorhaben interdisziplinär angelegt und finden ihre transdisziplinäre Erweiterung durch die Einbindung von Akteuren aus dem Anwendungskontext und/oder von Bürgerinnen und Bürgern mit unterschiedlichen Wissenshintergründen, seien sie aus dem Bereich des Alltagswissens und der Alltagserfahrung oder auch aus dem der jeweiligen Profession.

Die Beteiligung von Bürgerinnen und Bürgern ist auch bei Vorhaben ohne direkten Anwendungsbezug sinnvoll und möglich, etwa wenn es um die Unterstützung der Wissenschaft bei der Erhebung von Daten geht, was Finke als *Citizen Science light* bezeichnet (Finke 2014). Hier standen bisher naturwissenschaftliche Fragestellungen im Mittelpunkt. Aktuelle Beispiele aus der BMBF-Projektlandschaft sind die Unterstützung bei der Beobachtung heimischer Tier- und Pflanzenbestände oder neue Messmöglichkeiten für Umweltparameter. Auch die Sammlung von Daten zum Landleben sowie die Analyse der Plastikbelastungen von Sedimenten sind Beispiele für aktuell geförderte Citizen-Science-Projekte des Zuschnitts *Citizen Science light* (Wissenschaft im Dialog o. J.).

Diese Art der Bürgerwissenschaft wird allerdings höchstwahrscheinlich nicht den Schwerpunkt der Beteiligung von Bürgerinnen und Bürgern im konkreten Fall einer Hochschule mit starker ingenieur-wissenschaftlich-technischer,

ökonomischer/managementseitiger und verwaltungsorientierter Ausrichtung bilden. Hier rücken eher Themen in den Vordergrund, die auf die Lösung gesellschaftlicher Problemlagen gerichtet sind und eine direkte Einbeziehung der Bürgerinnen und Bürger als sinnvoll erscheinen lassen. Auch hier gibt es Projektbeispiele, die derzeit vom BMBF gefördert werden. In einem dieser Projekte geht es um die Frage, wie Hörhilfen für ein selbstbestimmtes Hören aussehen, sich anhören und anfühlen sollen. In einem anderen werden offene Innovationslabore in den Bereichen Sensorik, virtuelle Realität und Nachhaltigkeitskommunikation etabliert, in denen sich Bürgerinnen und Bürger an der Formulierung relevanter Forschungsfragen beteiligen können. Strategien für eine bessere Nahrungsmittelproduktion in der Stadt und die Erfassung der lokalen Lebensqualität in Quartieren sind Beispiele für Projekte mit starkem Regionalbezug. Auch die Frage, wie soziale Praktiken des Reparierens und Selbermachens erfolgreich angeeignet und in den Alltag der Menschen integriert werden können, ist kürzlich Gegenstand eines Citizen-Science-Projektes des Zuschnitts *Citizen Science proper* geworden (Wissenschaft im Dialog o. J.).

Diese letztgenannten Beispiele zeigen den Suchraum auf, der für Projekte eines bürgerwissenschaftlichen Panels besonders geeignet ist, ohne Projekte der Art *Citizen Science light* von vornherein auszuschließen. Natürlich sollten bürgerwissenschaftliche Panels für unterschiedliche Arten von Befragungen zur Verfügung stehen, ebenso für das Usability Testing von wissenschaftlich-technischen Leistungsangeboten. Sie können sich an Kreativmethoden in Lab-Umgebungen zur Ideengenerierung ebenso beteiligen wie an der Konzipierung und Umsetzung von Prototypingstrategien.

Um die Möglichkeit der Einflussnahme von Citizen Science auf das Agenda Setting für die Forschung zu veranschaulichen, sei an dieser Stelle auf das EU-Projekt „Citizen and Multi-Actor Consultation“ im „Horizon-2020-Projekt“ verwiesen, an dem 38 Partner aus 30 EU-Ländern teilnahmen, die zwischen Oktober 2016 und Februar 2017 Workshops mit 1.500 Bürgern

organisierten. In deren Ergebnis konnten 170 Visionen herausgearbeitet werden, die nach anschließender Bearbeitung und Clusterung zu 23 vorgeschlagenen Forschungsthemen und 40 Empfehlungen an die Politik führten (University of Malta 2017).

Wie eingangs erläutert und wie die vorgenannten Beispiele z. T. zeigen, steht Open Science in engem Zusammenhang mit der *Digitalisierung als Enabler*. Sie ermöglicht neue Formen der Aufnahme und Gewinnung von Daten durch Bürgerinnen und Bürger, beispielsweise über digitale mobile Endgeräte, die Datenanalyse und -auswertung, die Dokumentation der Analyseergebnisse sowie die Kommunikation zwischen den Beteiligten über räumliche Distanzen hinweg. Aus diesem Grund spielt die Entwicklung einer digitalen Plattform für den Aufbau und Betrieb eines bürgerwissenschaftlichen Panels eine wichtige Rolle. Sie soll den Zugang zu den Beteiligten und die Kommunikation im Prozess ermöglichen. Darüber hinaus spielt sie eine wichtige Rolle für die Ergebnisdokumentation und die Sicherung der Transparenz der Prozesse. Auch Akteure, die nicht zum Panel gehören bzw. nicht in ein Forschungsvorhaben involviert sind, sollen die Möglichkeit des Zugangs zu den entsprechenden Informationen erhalten.

Gleichwohl agiert die Hochschule stets in einem *regionalen Umfeld* und verfügt über vielfältige Potenziale, um sich an der Lösung regionaler Problemlagen zu beteiligen (Schneidewind 2014; Technische Hochschule Wildau 2017). Aus diesen Gründen sollten insbesondere Bürgerinnen und Bürger aus dem regionalen Umfeld der Hochschule in ein bürgerwissenschaftliches Panel einbezogen werden, was neben den digitalen Aspekten der Kommunikation auch analoge Formate vor Ort ermöglicht. Was die Art der Problemlagen betrifft, so kommen als Themen sowohl spezifisch regionale Problemlagen als auch überregionale Problemlagen in Betracht, jeweils mit spezifischen Zugängen, Akteureinbindungen, Umsetzungsmöglichkeiten und Verbreitungswegen.

Wenn das bürgerwissenschaftliche Panel als Instrument der Öffnung der Hochschule für bürgerwissenschaftliches Engagement konzipiert wird, so

sollte es eine möglichst stabile *personelle Zusammensetzung* aufweisen, damit es nicht nur für die Bearbeitung gleicher Themenstellungen, sondern auch für wechselnde Fragestellungen genutzt werden kann. Dies entspricht weitgehend der ursprünglichen Funktion eines Panels als „gleichbleibender Kreis von Auskunftssubjekten (Personen, Betrieben), bei denen über einen längeren Zeitraum hinweg Messungen (Beobachtung, Befragung) zu gleichen Themen in der gleichen Methode und zu den jeweils gleichen Zeitpunkten vorgenommen werden“ (Wübbenhorst o. J.). Panels können jedoch nicht nur für unterschiedliche Fragestellungen genutzt werden, sondern sie sollten auch in einem Maße flexibel sein, dass sie für spezifische Themenstellungen in ihrer Zusammensetzung modifiziert werden können.

In der empirischen Sozialforschung spielt bei Panels häufig die Frage der Repräsentativität eine wichtige Rolle, vor allem bei Befragungen. Bei dem hier beabsichtigten bürgerwissenschaftlichen Panel ist dies nicht der Fall, da das Panel keine Stichprobe darstellt, die befragt werden soll und in ihrer Zusammensetzung den Merkmalen einer Grundgesamtheit möglichst ähnlich sein muss. Das bürgerwissenschaftliche Panel soll nicht nur passiver Adressat von wissenschaftlichen Fragen sein, sondern sich aktiv an bestimmten Forschungsthemen beteiligen. Für die Auswahl und Ansprache von Bürgerinnen und Bürgern spielen daher andere *Anforderungen* als die der Repräsentativität eine Rolle. Zu nennen wären das Interesse an wissenschaftlichen Fragestellungen und Methoden, das Gespür für die Analyse von Problemen und das Finden von Problemlösungsansätzen, die Aufgeschlossenheit gegenüber Neuem in Kombination mit der Fähigkeit zu Kritik und Selbstreflexion, die hier an vorderer Stelle stehen. Solche Eigenschaften sind auch wichtig, um Ansprüchen an Wissenschaftlichkeit in der Zusammenarbeit mit Teams aus Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie anderen Akteuren, etwa aus Wirtschaft und Verwaltung, genügen zu können. Das schließt auch die Kommunikationsfähigkeit gegenüber Wissenschaftle-

rinnen und Wissenschaftlern ein. Aus ganz praktischen Gründen kommen Anforderungen an Mobilität und digitale Erreichbarkeit hinzu.

Bei der Konzipierung und Umsetzung eines bürgerwissenschaftlichen Panels spielen nicht nur Anforderungen an Bürgerinnen und Bürger eine Rolle, sondern auch *Anforderungen an diejenigen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler*, die das Panel im Interesse der Hochschule etablieren und betreiben wollen. An erster Stelle sei die Fähigkeit zur verständlichen Darstellung wissenschaftlicher Inhalte genannt, aber auch die Bereitschaft, mit Laien zusammenzuarbeiten. Hinzu kommt die *Notwendigkeit der Einbindung der Panelaktivitäten in die Transferstrategie* der Hochschule. Sie ergänzen traditionelle Formen des Technologietransfers und eröffnen ihm zugleich neue Zugänge und Formate, indem sie auf die Einbindung und Zusammenbindung unterschiedlicher Akteursgruppen gerichtet sind. Damit geht einher, dass der Panelbetrieb ein internes Scouting für geeignete Themenfelder ebenso erfordert wie ein externes Scouting.

3. Fazit

Bürgerwissenschaftliche Panels in der hier skizzierten Form sind aus der Literatur bisher nicht bekannt. Die genannten Merkmale und Funktionen des Panels machen eine *aufwendige Panelpflege* erforderlich, auch wenn das Panel nicht so umfänglich wie ein typisches Bürgerpanel im Bereich der Politik ist. Ebenso anspruchsvoll sind die *Anforderungen an die Konzeption der Projekte*, ihre auf den Prinzipien der Wissenschaftlichkeit basierende Umsetzung sowie die Dokumentation der Ergebnisse. Den Ausgangspunkt für den Panelaufbau sollte ein *konsensfähiges Basisthema* der Hochschule bilden, wobei interessierte Bürgerinnen und Bürger in die konkrete Ausgestaltung einzubeziehen sind. Im unmittelbaren Sinn von Citizen Science wäre es wünschenswert, die Öffnung einer Hochschule für Bürgerinnen und Bürger in einem Aktionsforschungsansatz zu konzipieren, in dem dieser Prozess selbst zum Gegenstand wissenschaftlicher Betrachtung der beteiligten Akteure

gemacht wird. “The research needed for social practice can best be characterized as research for social management or social engineering. It is a type of action-research, a comparative research on conditions and effects of various forms of social action, and research leading to social action. Research that produces nothing but books will not suffice” (Lewin 1946: 202f.). Zu diesem Ansatz gehört ein hohes Maß an Reflexivität und damit auch die Thematisierung der mit einem bürgerwissenschaftlichen Panel verbundenen Nachteile und Risiken. Zu nennen sind hier beispielsweise die hohe Selektivität der Auswahl, die geringe Größe und die variierende Zusammensetzung des Panels.

In der Literatur zum Themenfeld Citizen Science wird häufig von einem großen Interesse der Bürgerinnen und Bürger an der Teilhabe an Wissenschaft ausgegangen (Wissenschaft im Dialog o. J.). Einer von *Wissenschaft im Dialog* durchgeführten Befragung unter 1.004 deutschen Bürgerinnen und Bürgern zufolge waren immerhin ein Drittel bereit, an einem Citizen-Science-Projekt mitzuarbeiten (Wissenschaft im Dialog 2014: 3). Ob ein solches Interesse tatsächlich nachhaltig und auch in einzelnen Regionen vorhanden ist, bleibt im Prozess zu prüfen und stellt aus praktischer Sicht das wohl größte Risiko für den Aufbau eines bürgerwissenschaftlichen Panels dar.

Um im weiter oben genannten anschaulichen Bild „komplizierter Grenzverhandlungen zwischen Wissenschaft und Gesellschaft statt Entgrenzung“ von Strohschneider zu bleiben, geht es beim Aufbau eines bürgerwissenschaftlichen Panels an einer Hochschule um eine systematische und wissenschaftlich begleitete „Grenzöffnung“. Bürgerinnen und Bürger sind bei geöffneten Grenzen nicht mehr nur auf eine generelle Publikumsrolle festgelegt, sondern sie können in eine neue und spezifische Publikumsrolle als konstitutiv Beteiligte hineinwachsen.

LITERATUR

- Al-Ani A (2013) Freie Produzenten: Die neuen Organisationsformen der Wirtschaft. In: Al-Ani A (ed) *Widerstand in Organisationen. Organisationen im Widerstand*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, ISBN: 978-3-531-18789-1, pp 115–141. doi: 10.1007/978-3-531-18790-7_5
- Baldwin C, Hippel Ev (2011) Modeling a Paradigm Shift. From Producer Innovation to User and Open Collaborative Innovation. *Organization Science* 22(6):1399–1417. doi: 10.1287/orsc.1100.0618
- Chesbrough HW (2003) Open innovation. The new imperative for creating and profiting from technology. Harvard Business School Press, Boston, Mass. ISBN: 9781578518371
- Dickel S (2017) Öffnung für alle. *TATuP* 26(1-2):55–59. doi: 10.14512/tatup.26.1-2.55
- Dickel S, Franzen M (2015) Wissenschaft im digitalen Wandel: Demokratisierung von Wissensproduktion und Wissensrezeption? Discussion Paper SP III 2015–601, Berlin
- Europäische Kommission (2016) Open innovation, open science, open to the world. A vision for Europe. Publications Office of the European Union, Luxembourg. ISBN: 978-92-79-57346-0
- Finke P (2014) Citizen Science. Das unterschätzte Wissen der Laien, Dt. Erstaug. Oekom-Verl., München. ISBN: 3865814662
- Franzen M (2016) Open Science als wissenschaftspolitische Problemlösungsformel? In: Simon D, Knie A, Hornbostel S, Zimmermann K (eds) *Handbuch Wissenschaftspolitik*, 2nd edn. Springer Reference Sozialwissenschaften. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-05455-7, pp 279–296
- Funtowicz SO, Ravetz JR (1993) The Emergence of Post-Normal Science. In: Schomberg R von (ed) *Science, Politics and Morality. Scientific Uncertainty and Decision Making. Theory and Decision Library*. Springer Netherlands, Dordrecht, ISBN: 978-94-015-8143-1, pp 85–123
- Gerhards J (2001) Der Aufstand des Publikums / The Rebellion of the Citizens. *Zeitschrift für Soziologie* 30(3):463. doi: 10.1515/zfsoz-2001-0301
- GEWISS (2016) Citizen Science Strategie 2020 für Deutschland. Grünbuch
- Gibbons M (1994) The new production of knowledge. The dynamics of science and research in contemporary societies, First publ. 1994. Reprinted. Sage Publ, London. ISBN: 0803977948
- Grunwald A (2015) Transformative Wissenschaft - eine neue Ordnung im Wissenschaftsbetrieb? *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 24(1):17–20. doi: 10.14512/gaia.24.1.5
- Grunwald A (2017) Editorial. *TATuP* 26(1-2):3. doi: 10.14512/tatup.26.1-2.3
- Häußermann JJ, Heidingsfelder M (2017) Offen, verantwortlich und verantwortlich offen. *TATuP* 26(1-2):31. doi: 10.14512/tatup.26.1-2.31
- Hippel Ev (2017) Free innovation. ISBN: 978-0-262-03521-7
- Hoffmann C (2013) Die Arbeit der Wissenschaften, 1. Aufl. Diaphanes, Zürich, Berlin. ISBN: 978-3-03734-423-1
- Klages H, Daramus C, Masser K (2008) Bürgerbeteiligung durch lokale Bürgerpanels. Theorie und Praxis eines Instruments breitenwirksamer kommunaler Partizipation. Modernisierung des öffentlichen Sektors, Bd. 32. Ed. Sigma, Berlin. ISBN: 978-3-8360-7232-8
- Kuhn TS (1962) The Structure of scientific revolutions, 2nd ed., enlarged. International encyclopedia of unified science Foundations of the unity of science, ; No. 2. Chicago Univ. Press, Chicago, Ill. ISBN: 0-226-45803-2
- Lewin K (1946) Action Research and Minority Problems. *Journal of Social Issues* 2(4):34–46. doi: 10.1111/j.1540-4560.1946.tb02295.x
- Mayntz R (1988) Funktionelle Teilsysteme in der Theorie sozialer Differenzierung. In: Mayntz R, Rosewitz B, Schimank U, Stichweh R (eds) *Differenzierung und Verselbständigung. Zur Entwicklung gesellschaftl. Teilsysteme*. Campus-Verl., Frankfurt/Main•New York, ISBN: 3593340305, pp 11–44
- Nanz P, Fritsche M (2012) *Handbuch Bürgerbeteiligung. Verfahren und Akteure, Chancen und Grenzen. Schriftenreihe / Bundeszentrale für Politische Bildung, Bd. 1200. Bundeszentrale für Politische Bildung, Bonn. ISBN: 978-3838902005*
- Nowotny H, Scott P, Gibbons M (2003) Introduction. 'Mode 2' Revisited: The New Production of Knowledge. *Minerva* 41(3):179–194. doi: 10.1023/A:1025505528250
- Pfenning U, Benninghaus C (2009) Partizipativer Wandel - methodischer Wandel: Neue und klassische Formen der Bürgerbeteiligung im Vergleich. Newsletter. Newsletter Wegweiser Bürgergesellschaft
- Reichmann W (2017) Open Science zwischen sozialen Strukturen und Wissenskulturen. *TATuP* 26(1-2):43–48. doi: 10.14512/tatup.26.1-2.43
- Reichwald R, Piller FT (2009) Interaktive Wertschöpfung. Open Innovation, Individualisierung und neue Formen der Arbeitsteilung, 2nd edn. Lehrbuch. Gabler, Wiesbaden. ISBN: 978-3-8349-9440-0
- Riehm U, Nentwich M (2017) Open Science aus Perspektive der Technikfolgenabschätzung. *TATuP* 26(1-2):11–17. doi: 10.14512/tatup.26.1-2.11
- Sanz FS, Holoher-Ertl T, Kieslinger B, Garcia FS, Silva CG (2015) White Paper on Citizen Science for Europe.
- Schneidewind U (2014) Bürgeruniversität spiegelt den Dialogwunsch: Konzept der „Bürgerhochschule“. Ein Katalysator für eine starke Bürgerwissenschaft. *Wissenschaftsmanagement*(3):20–23
- Schneidewind U (2015) Transformative Wissenschaft - Motor für gute Wissenschaft und lebendige Demokratie. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* 24(2):88–91. doi: 10.14512/gaia.24.2.5
- Schneidewind U, Singer-Brodowski M (2014) Transformative Wissenschaft. Klimawandel im deutschen Wissenschafts- und Hochschulsystem, 2nd edn. Metropolis-Verl., Marburg. ISBN: 9783731610571
- Stichweh R (1988) Differenzierung des Wissenschaftssystems. In: Mayntz R, Rosewitz B, Schimank U, Stichweh R (eds) *Differenzierung und Verselbständigung. Zur Entwicklung gesellschaftl. Teilsysteme*. Campus-Verl., Frankfurt/Main•New York, ISBN: 3593340305
- Stiftung Mitarbeit Das Bürgerpanel. <https://www.buergergesellschaft.de/mitentscheiden/methoden-verfahren/meinungen-einholen-buergerinnen-und-buergeraktivieren/das-buergerpanel>. Accessed 09 Jan 2018
- Strohschneider P (2014) Zur Politik der Transformativen Wissenschaft. In: Brodacz A, Herrmann D, Schmidt R, Schulz D, Schulze Wessel J (eds) *Die Verfassung des Politischen. Festschrift für Hans Vorländer*, Aufl. 2014. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, ISBN: 9783658047849, pp 175–192
- Technische Hochschule Wildau (2017) Innovation Hub 13. Fast Track to Transfer. <http://innohub13.de/>. Accessed 09 Jan 2018
- University of Malta (2017) CIMULACT – HORIZON 2020 Project. Citizen and Multi-Actor Consultation on Horizon 2020. https://www.um.edu.mt/create/eu_projects/cimulact. Accessed 09 Jan 2018
- Vohland K, Göbel C (2017) Open Science und Citizen Science als symbiotische Beziehung? *TATuP* 26(1-2):1824. doi: 10.14512/tatup.26.1-2.18
- Wissenschaft im Dialog (2014) *Wissenschaftsbarometer 2014*.
- Wissenschaft im Dialog (o. J.) Bürger schaffen Wissen. Die Citizen Science Plattform. <http://www.buerger-schaffenwissen.de/>. Accessed 09 Jan 2018
- Wübbenhorst K Panel (o. J.). <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/3313/panel-v6.html>. Accessed 09 Jan 2018

AUTOREN

Dr. phil. Frank Hartmann
Prof. Dr. rer. pol. Dana Mietzner
Forschungsgruppe Innovations- und Regionalforschung
Technische Hochschule Wildau

E-Mail für Korrespondenz:
frank.hartmann@th-wildau.de



Beruflich Qualifizierte auf dem Weg ins Studium

Xenia Valeska Jeremias, Katja Wenger*, Birgit Sellmer

Zusammenfassung

Für beruflich Qualifizierte ist der Weg in die Hochschulen und Universitäten in den letzten Jahren einfacher geworden. Die heterogenen Wege der beruflich Qualifizierten ins Studium werden wir in diesem Artikel beleuchten und aufzeigen, wie wir in unseren Mathematikvorkursen an die Vorkenntnisse unserer Studieninteressierten anknüpfen. Eine unter beruflich qualifizierten Studieninteressierten durchgeführte Befragung soll mehr Aufschluss darüber geben, über welche unterschiedlichen Wege und aus welchen persönlichen Gründen beruflich Qualifizierte ein Studium aufnehmen. Da Mathematik im Studium gerade für beruflich Qualifizierte meist eine große Hürde darstellt, hat die Technische Hochschule Wildau ihr Vorkursangebot auf die heterogener werdende Studierendenschaft angepasst.

Abstract

In recent years, the entry into universities for professionally qualified people has become more simple. This article will shed light on the heterogeneous paths of the vocationally qualified into study and show how in our mathematics pre-courses we build on the previous knowledge of our prospective students. A survey carried out among prospective professionally qualified students should provide more information about the different ways in which vocationally qualified students start their studies and for which personal reasons they do so. Because mathematics is usually a major hurdle, especially for the professionally qualified, the University of Applied Sciences Wildau has adapted its preliminary course offerings to the more heterogeneous student body.

Neben Studierenden mit schulischer Hochschulzugangsberechtigung und internationaler Bildungserfahrung bilden Studierende mit beruflicher Hochschulzugangsberechtigung einen Teil der vielfältigen Studierendenschaft der Technischen Hochschule Wildau. In diesem Beitrag werden die heterogenen Wege der beruflich Qualifizierten ins Studium beleuchtet und es wird aufgezeigt, wie in den Mathematikvorkursen an die Vorkenntnisse von Studieninteressierten angeknüpft wird bzw. wie stärker auf die unterschiedlichen Bedarfe ausgerichtete Mathematikvorkurse den Studienerfolg unterstützen können. Wir stellen folgende Fragen in den Mittelpunkt, die wir im Laufe des Beitrags erläutern wollen:

- Mit welchen unterschiedlichen Voraussetzungen, Bildungshintergründen und in welchen Lebenssituationen kommen beruflich Qualifizierte an die Hochschule?

- Was motiviert beruflich Qualifizierte dazu, ein Studium aufzunehmen?
- Wie kann in der Studienvorbereitung auf die unterschiedlichen Eingangsvoraussetzungen reagiert werden?

Durchlässigkeit in Brandenburg

Mit beruflich Qualifizierten sind nach dem Hochschulrecht Studierende gemeint, die keine schulische Hochschulzugangsberechtigung erworben haben. Häufig wird der Begriff jedoch weit gefasst ist, weil er auch beruflich qualifizierte Abiturient*innen mit Berufserfahrung einschließt (vgl. Wolter et al. 2015). Dieser weiter gefassten Definition wird in diesem Beitrag gefolgt. Die Kultusministerkonferenz empfahl im Jahr 2009 mit dem Beschluss zum Hochschulzugang für beruflich qualifizierte Bewerber*innen, die Zugangsbedingungen zu den Hochschulen

für diejenigen ohne schulische Hochschulzugangsberechtigung zu vereinfachen.

In Brandenburg ist es bereits seit 1991 unter strengen Voraussetzungen möglich, mit beruflicher Qualifikation ein Studium aufzunehmen (Gesetz über die Hochschulen des Landes Brandenburg (Brandenburgisches Hochschulgesetz – BbgHG) 1991: § 30 Abs. 3). Bewerber*innen mussten ein Mindestalter von 24 Jahren, eine geeignete abgeschlossene Berufsausbildung und mehrjährige Berufserfahrungen nachweisen. Auch Absolvent*innen der Meisterprüfung konnten sich für das Studium bewerben. Erfüllten Studieninteressierte diese Voraussetzungen, wurden sie zu einer fachrichtungsbezogenen Eignungsprüfung zugelassen.

Die Hürden des Zugangs zur Hochschule wurden in Brandenburg im Jahr 2008 abgebaut. Interessierte, die eine bestandene Meisterprüfung oder eine gleichwertige Berechtigung nachwie-

sen, konnten ein Studium aufnehmen. Mit einer für das beabsichtigte Studium geeigneten erfolgreich abgeschlossenen Berufsausbildung und einer anschließenden mindestens zweijährigen Berufserfahrung konnte ein Studium aufgenommen werden (vgl. Knopp & Peine 2012). Welche Berufsausbildung für welchen Studiengang geeignet sei, wurde gesetzlich nicht näher geregelt.

Die letzte Veränderung der gesetzlichen Grundlage trat 2014 in Kraft: Bewerber*innen mit bestandener Meister- oder Technikerprüfung, mit Fortbildungsabschluss oder vergleichbaren Abschlüssen verfügen nach § 9 BbgHG über eine allgemeine Hochschulzugangsberechtigung. Ihre berufliche Qualifikation wird damit dem höchsten Schulabschluss der Bundesrepublik Deutschland gleichgestellt. Sie erhalten die uneingeschränkte Zulassung zum Studium an Universitäten und Hochschulen (Brandenburgisches Hochschulgesetz (BbgHG) 2014).

Als Hauptgründe für die politisch motivierte Durchlässigkeit der Hochschulen werden die im internationalen Ländervergleich der „Organisation for Economic Cooperation and Development“ (OECD) zu geringe Akademikerquote und das durch den demographischen Wandel in Deutschland befürchtete Defizit an hochqualifizierten Fachkräften angeführt. „Die Hochschulen müssten auch deshalb neue Potenziale erschließen, weil sich die Studiennachfrage nach dem Höhepunkt der doppelten Abiturientenjahrgänge (2013) aus demographischen Gründen rückläufig entwickeln würde. Dies gelte insbesondere für Hochschulen in demographisch und ökonomisch schrumpfenden Regionen“ (Wolter et al. 2014). Als ein weiteres Argument gilt die Europäisierung der Bildungspolitik. Im Bologna-Prozess wird unter „lebenslangem Lernen“ eine umfassende hochschulpolitische Strategie begriffen, Hochschulen für neue Zielgruppen zu öffnen, das Studium zu flexibilisieren und auf die spezifischen Bedürfnisse einer ver-

änderten Klientel auszurichten. Die Gleichwertigkeit zwischen beruflicher und akademischer Bildung, die bis dato in Deutschland nicht gegeben war, wurde bildungspolitische Zielsetzung (vgl. Elsholz 2015).

Die politisch geforderte Gleichstellung der Bildungswege und die damit zunehmende Durchlässigkeit treffen in den Hochschulen und Universitäten teilweise auf heftigen Widerstand. Gegner dieser Veränderungen befürchten zum einen, ohne Abitur fehle die nötige Studierfähigkeit; zum anderen vermuten sie einen Ansturm auf die akademische Bildung. Weiterhin nehmen sie an, die zunehmende Vielfalt der Studierenden wirke als Gegenpol einer „Elitenausbildung“ (vgl. Wolter et al. 2014; Hanft 2015; Seidel 2014).

Die Erfahrungen mit beruflich Qualifizierten an der TH Wildau in Beratung und Vorbereitungskursen zeigen, dass dies eine Gruppe mit besonderen Bedarfen ist, aber auch mit besonderen Kompetenzen. Zu diesen zählen ein hohes Maß an Berufserfahrung, praktische Kompetenzen, eine häufig im Berufsleben erwachsene Motivation, ein Studium aufzunehmen, und damit eine starke Zielorientierung. Im Folgenden wird eine Befragung beruflich qualifizierter Studieninteressierter dargestellt, die an der TH Wildau im Rahmen eines Beratungsangebots durchgeführt wurde. Sie soll einen Eindruck von den Lebenslagen beruflich qualifizierter Studieninteressierter vermitteln und die Motivlagen zur Aufnahme eines Studiums in den Vordergrund rücken.

Beruflich qualifizierte Studieninteressierte an der TH Wildau

Insgesamt gab es im Bundesgebiet in den zurückliegenden zwei Jahrzehnten einen Wachstumstrend bei Studienanfänger*innen ohne Allgemeine Hochschulreife und ohne Fachhochschulreife. Ihr bundesweiter Anteil an allen Studierenden im ersten Semester erhöhte sich von 0,6 % im Jahr 1997 auf 2,8 % im Jahr 2014. Ins-

gesamt hält sich die Quote beruflich Qualifizierter jedoch bundesweit unter 3 %. Gleichwohl können drei Ballungszentren in Deutschland einen höheren Anteil an Studienanfänger*innen ohne Allgemeine Hochschulreife und ohne Fachhochschulreife nachweisen: Hamburg (4,47 %), Nordrhein-Westfalen (4,28 %) und Berlin (3,42 %) (vgl. Nickel & Schulz 2017). Die hohe Siedlungsdichte in diesen urbanen Räumen, aber auch Strategien in Bezug auf beruflich Qualifizierte haben vermutlich zu diesem Anstieg geführt. In Hamburg und Berlin wurden beispielsweise Vorabquoten bei der Studienplatzvergabe in Höhe von 3–10 % für Studienbewerber*innen ohne schulische Hochschulzugangsberechtigung eingeführt.

Im Rahmen der Beratung des Projekts „Studienstart 2.0 // Mobile Beratung für beruflich Qualifizierte“¹ nahmen im akademischen Jahr 2016/2017 insgesamt 51 Personen (davon 12 weiblich und 39 männlich) an einer Befragung teil. Die Ergebnisse der Umfrage sind nicht repräsentativ.

Zunächst erfassten wir soziographische Daten, um die soziale Heterogenität zu bestimmen. Unter denen, die das Beratungsangebot „Studienstart 2.0“ in Anspruch nahmen, waren deutlich mehr männliche Studieninteressierte, nämlich 76 %. Im Vergleich zum Geschlechterverhältnis der Gesamtstudierendenzahlen (Verteilung der Studierenden 2016/17: männlich 3.786, weiblich 1.384; das entspricht männlich 63 % und weiblich 37 %) sind also deutlich mehr männliche Ratsuchende an einem Studium aus dem Beruf heraus interessiert. Der Anteil der Männer liegt bei nicht traditionellen Studierenden auch nach der Untersuchung von Wolter et al. (2015) über jenem in der Gesamtgruppe der Studierenden. So waren 55 % der nicht traditionellen Studienanfänger*innen im Studienjahr 2013 männlich. Warum der Anteil der Männer höher ist als der Frauenanteil, ist bisher noch unklar (vgl. Wolter et al. 2015).

Dass beruflich qualifizierte Studieninteressierte in der Kategorie Alter über dem Durchschnitt der Studierenden

¹ Das Projekt „Studienstart 2.0 // Mobile Beratung für beruflich Qualifizierte“ wurde von Dr. Andreas Preiß initiiert und durch den Europäischen Sozialfonds und das Land Brandenburg im Zeitraum von Mai 2015 bis Februar 2018 gefördert.

insgesamt (23,9 Jahre [vgl. Midden-dorff et al. 2013]) liegen, ist nicht ver-wunderlich (siehe Abb. 1). Bemerkens-wert ist aber die Erkenntnis, dass 41 % der Befragten zwischen 25 und 31 Jah-ren und 24 % zwischen 32 und 38 Jah-ren alt sind. Demnach strebt der größ-te Teil beruflich Qualifizierter erst nach längerer Berufstätigkeit ein Studium an. Dies impliziert einen mehrjährigen Abstand zum letzten Schulbesuch und verweist damit auf einen speziellen Bedarf an Angeboten für den Einstieg ins Studium. Insbesondere das Auffri-schen schulischer Mathematikkennt-nisse ist bei diesen Rahmenbedingun-gen häufig notwendig.

Studienanfänger*innen über 25 Jahre befinden sich üblicherweise unmittel-bar vor bzw. in der Phase der Familien-planung und sind im Alter von 32 und 38 Jahren wahrscheinlich in Familien-verantwortung gebunden. So stehen sie mit dem Start in das Studium vor der Herausforderung, das Studium mit der Familie und häufig auch mit dem Beruf zu vereinbaren. Die beruflich qualifizierten Studieninteressierten leben zu 19,6 % mit Kindern. Bei tradi-tionell Studierenden studieren hinge-gen nur 5 % mit Kindern (vgl. Midden-dorff et al. 2013).

Für ein Studium bis 2 Jahre nach der Be-rufsausbildung entscheiden sich 34 % der Befragten. Das sind diejenigen, die über eine schulische Hochschulzu-gangsberechtigung verfügen. Am häu-figsten nehmen die beruflich qualifi-zierten Studierenden nach 5–10 Jahren ein Studium auf. Insgesamt wird deut-lich, dass sie häufig viele Jahre berufstä-tig sind, bevor sie sich für ein Studium entscheiden (siehe Abb. 2).

Über 70 % der befragten Studieninter-essierten nutzen ihre berufliche Quali-fikation, d. h. die Berufsausbildung und zwei Jahre Berufserfahrung, als Hoch-schulzugangsberechtigung bzw. den Meister- oder Technikerabschluss, um ein Studium aufnehmen. Etwa 30 % ha-ben vor der Berufstätigkeit eine schuli-sche Hochschulzugangsberechtigung, also das Abitur oder die Fachhochschul-reife, erworben (siehe Abb. 3).

Das Bild der Befragten wird abgerun-det durch die Frage, welche Berufsaus-bildungen die Studieninteressierten mit beruflicher Qualifikation zuvor ab-geschlossen hatten. Am häufigsten (11 von 51) wurde eine Ausbildung zur

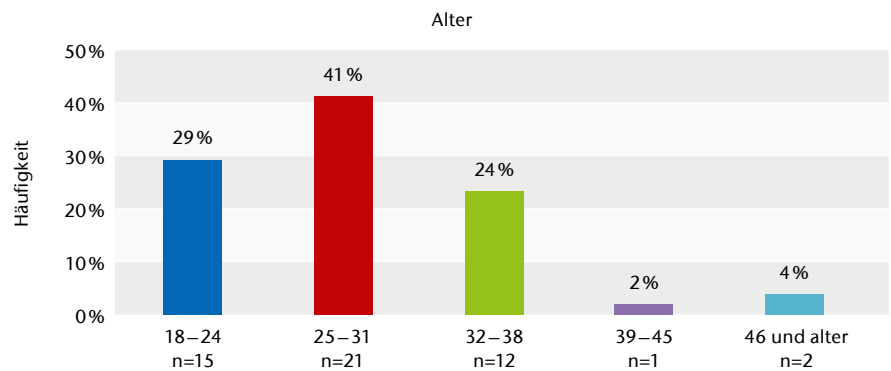


Abb. 1) Alter der befragten Studieninteressierten mit beruflicher Qualifikation, n = 51 (eigene Darstellung).

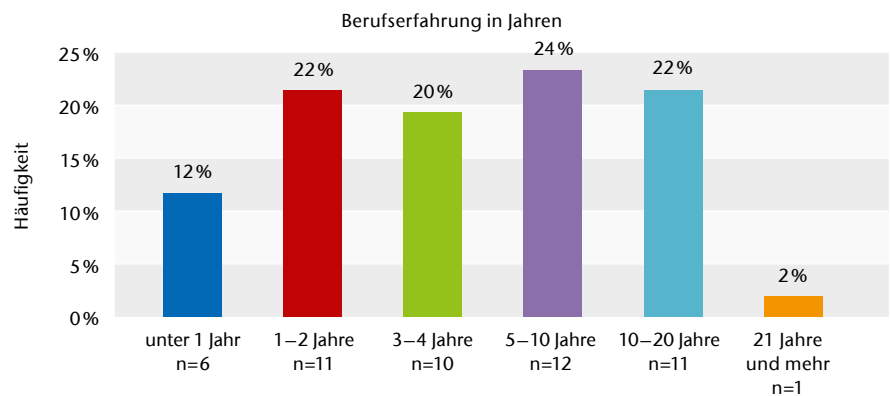


Abb. 2) Berufserfahrung der befragten Studieninteressierten mit beruflicher Qualifikation, n = 51 (eigene Darstellung).

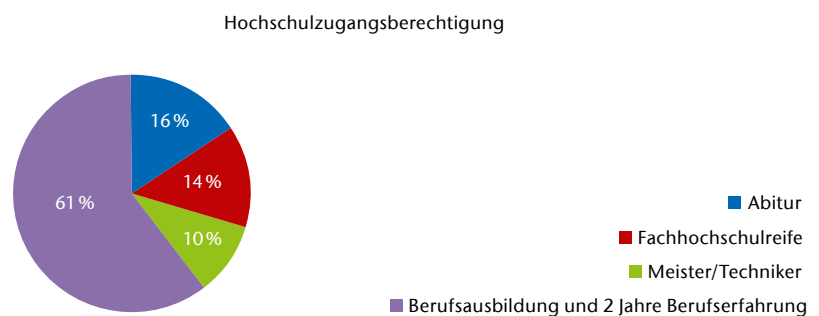


Abb. 3) Hochschulzugangsberechtigung der befragten Studieninteressierten mit beruflicher Qualifikation, n = 51 (eigene Darstellung).

Kauffrau/zum Kaufmann beendet, gefolgt von Mechaniker*innen (9 von 51) und Elektriker*innen (9 von 51).

Kernelement der Befragung war die Studienmotivation, die in einer offenen Frage erhoben wurde. Dies ist vor allem auch deswegen relevant, weil fehlende Motivation als einer der drei Hauptgründe für den Studienabbruch genannt wird (vgl. Heublein et al. 2009). Aus den Antworten auf die offene Frage „Was motiviert Sie, ein Studium aufzunehmen?“ wurden nach dem Konzept der Inhaltsanalyse vier

Motivkategorien (siehe Abb. 4) abgeleitet (vgl. Mayring 2010).

Motiv „beruflich aufsteigen“

Über das Studium eine bessere Aus-sicht auf dem Arbeitsmarkt allgemein zu erlangen oder ganz konkret im ak-tuellen Unternehmen eine bestimmte höhere Position einnehmen zu kön-nen, dies erhoffen sich die meisten Studieninteressierten mit beruflicher Qualifikation. Im Mittelpunkt dieses Motivs stehen bessere Aussichten für die Zukunft und die Änderung der

beruflichen Stellung in einem Unternehmen. Wie die beruflichen Perspektiven aussehen sollen, bleibt bei vielen eher unkonkret. Es wird aber ein Änderungswunsch deutlich: „bessere berufliche Möglichkeiten“, „angenehmere Arbeit“, „bessere Stellung auf dem Arbeitsmarkt“, „bessere Arbeitsplätze“ und „berufliches Vorankommen“ sind einige Beispielaussagen der Befragten. Teilweise wird ein Handlungs- und Veränderungsdruck als dahinterliegender Motivator beschrieben: „jetziger Stand nicht bis Rente machbar (körperlich)“. Mit der Veränderung der beruflichen Perspektiven verbinden die Befragten den Wunsch, beruflich aufzusteigen: „berufliche Aufstiegschancen“, „evtl. eine Führungsposition“, „größere Aufstiegschancen“. Dabei werden nur vereinzelt berufliche Perspektiven explizit benannt: „Prüfingenieur bei der technischen Untersuchung werden“ bzw. „Chance auf eine Fachtechniker-Stelle“.

Motiv „Sich beruflich weiterbilden“

Im Mittelpunkt dieses Motivs steht die berufliche (Weiter-)Bildung bzw. die Veränderung der eigenen Person durch das Erlernen theoretischen und praktischen Wissens im Studium. Diese Studieninteressierten wollen ihre fachlichen Kenntnisse erweitern. Das Studium wird als Weiterbildungsoption in der beruflichen Entwicklung gesehen. Folgende Beispielaussagen machen dies deutlich: „berufliche und fachliche Weiterbildung“, „Weiterbildung + Qualifizierung“. Es geht neben dem beruflich-fachlichen auch allgemein um den Ausbau des Wissenstandes: „neues Wissen erlernen“, „viel neues Wissen“, „Interessen an Bildung“, „Wissensaufbau“ sowie „Wunsch nach mehr Wissen & Erfahrung“.

Motiv „Herausforderungen suchen“

Beruflich Qualifizierte suchen durch ein Studium neue Herausforderungen, „Gehirnfutter“ und eine fordernde Tätigkeit. Die aktuelle Beschäftigung ist nicht in gewünschtem Maße anspruchsvoll, sodass ein Bedürfnis nach Herausforderungen als Motivlage entsteht: „mehr gefordert werden“, „neue Herausforderungen“, „Gehirnfutter“, „anschließend eine anspruchsvolle Tätigkeit ausüben“ sowie „arbeiten auf technisch höherem Niveau“.

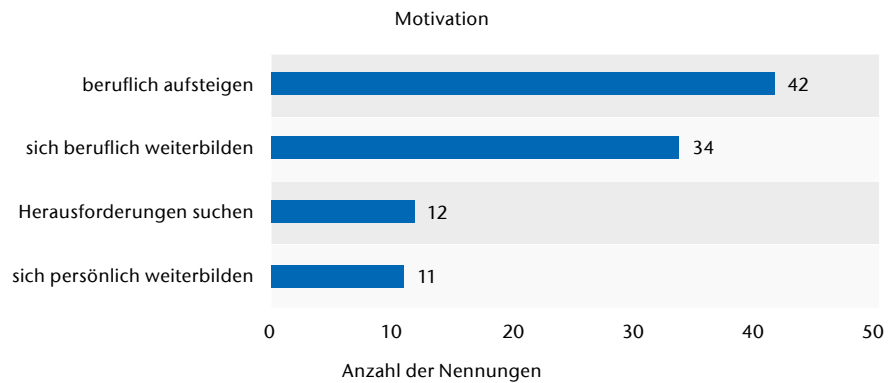


Abb. 4) Motivation der befragten Studieninteressierten, Mehrfachnennungen, n=51 (eigene Darstellung)

Motiv „sich persönlich weiterbilden“

Beim Motiv „sich persönlich weiterbilden“ steht die Person im Mittelpunkt. Als relativ allgemeines persönliches Ziel nennen die Befragten „persönliche Weiterbildung“ und „persönliche Weiterentwicklung“. Einige der zukünftigen Studierenden mit beruflicher Qualifikation nennen ganz konkret das Ziel „Selbstverwirklichung“. Das Studium wird als Möglichkeit gesehen, die eigenen Fähigkeiten und Talente zu nutzen, um die Persönlichkeit zu entfalten.

Die Beschreibung der Motivlagen beruflich qualifizierter Studieninteressierter zeigt deutlich die hohe Motivation und die Zielorientierung bei der Studienorientierung und kurz vor Aufnahme des Studiums (vgl. auch Burchard 2017). In Verbindung mit den Kompetenzen, die die beruflich Qualifizierten aus ihrer Berufserfahrung einbringen, kann die Ausgangslage dieser Zielgruppe im Vergleich zu traditionell Studierenden als vergleichsweise positiv angesehen werden. Insbesondere lässt sich aus den Motiven „beruflich weiterbilden“ und „beruflich aufsteigen“ ein zielgerichtetes und beharrliches Hinarbeiten auf den Studienabschluss ableiten. Außerdem kann angenommen werden, dass der Wunsch nach kognitiven Herausforderungen zu der Bereitschaft führt, sich intensiv mit Studieninhalten auseinanderzusetzen. Demgegenüber bedeutet die längere Berufstätigkeit vor Aufnahme des Studiums, dass diese Studierenden in Modulen mit einem Theorieschwerpunkt (z. B. Mathematik) stärkere Unterstützung benötigen. Auf beide Aspekte sollte bei der Gestaltung der Studienvorbereitung verstärkt eingegangen werden.

Die TH Wildau bietet bereits Studiengänge an, die mit einer Berufstätigkeit kombiniert werden können. In diesen Studiengängen ist in allen Modulen die Ergänzung durch Online-Lernmaterialien vorgesehen, sodass auf das Bedürfnis der Berufstätigen nach zeit- und ortsunabhängigem Lernen eingegangen wird. Zudem bietet die Hochschule für alle Studienanfänger*innen in der Studieneingangsphase verschiedene Wege, um den Übergang ins Studium gut vorzubereiten. So können beruflich Qualifizierte an einem Vorsemester teilnehmen und Studienvorbereitungskurse belegen. Auch das Beratungsangebot im Studium umfasst mit individueller Mathematik- oder Lernberatung sowie mit dem Studiencoaching Möglichkeiten, sich persönlich beim Studienstart begleiten zu lassen. Ein Beispiel für eine bereits erprobte Umsetzung eines differenzierten Angebots für diese Zielgruppe stellen die Vorbereitungskurse für Mathematik dar. Dieses Konzept soll daher im Folgenden genauer beschrieben werden. In der Studienorganisation und in der Angebotsstruktur wäre darüber hinaus jedoch noch eine Reihe von Veränderungen und Innovationen denkbar, um an die Potenziale der beruflich Qualifizierten noch besser anknüpfen zu können. Darauf wird im letzten Abschnitt eingegangen.

Studienvorbereitung in Mathematik

Da Mathematik im Studium für viele Studierende eine große Hürde darstellt, hat die TH Wildau ihr Vorkursangebot in diesem Fach auf die heterogener werdende Studierendenschaft angepasst. Hochschulen setzen sich schon seit längerem mit der heterogener werdenden Studierendenschaft

auseinander (vgl. Hanft 2015). Betrachtet man die Studierendenschaft unter Berücksichtigung verschiedener Heterogenitätsdimensionen (soziodemographische Merkmale, Motivation etc.), wird klar, dass beruflich Qualifizierte nur einen kleinen Teil einer insgesamt heterogenen Gruppe ausmachen. Als Folge der größer werdenden Heterogenität wurden bildungspolitisch verschiedene Maßnahmen initiiert, welche sich hauptsächlich auf die Gestaltung der Studieneingangsphase konzentrieren. Beispielsweise wurden bereits in den 1980er Jahren erste Mathematikvorkurse eingerichtet (vgl. Abel & Weber 2014). Aktuell zielen mehr als zwei Drittel der im Qualitätspakt Lehre geförderten Hochschulprojekte auf eine Verbesserung der Studieneingangsphase ab. Dabei wird Heterogenität vielfach als Auslöser für abnehmende Studierfähigkeit angesehen. Dem soll mit verschiedenen Maßnahmen wie Beratungsangeboten, Brückenkursen oder Tutorien begegnet werden (vgl. Hanft 2015). Im Folgenden werden die Ausgangssituation und der aktuelle Stand der Vorkurse an der TH Wildau beschrieben.

Ausgangssituation und Vorüberlegungen

Bis ins Jahr 2012 gab es zwei Mathematikvorkurse, einen für angehende Wirtschaftsstudierende und einen für angehende Ingenieurstudierende, die fünf bzw. sechs Tage dauerten. Gedanklicher Ausgangspunkt dieser Kurse war der „klassische“ Bildungsweg, bei dem die Teilnehmenden nach Abitur und evtl. einem Jahr Unterbrechung ein Studium aufnehmen und daher eine gewisse Auffrischung der Mathematikkenntnisse, aber auch nicht mehr, benötigen. In diesen Kursen wurde der Mathematikstoff der Mittel- und Oberstufe überblicksartig behandelt. Umfangreiche betreute Übungsanteile waren nicht integriert. Solche Übungsanteile sind aber essentiell, um sich die mathematischen Inhalte nachhaltig erschließen zu können, da nur durch Üben und Wiederholen eine fundierte Auseinander-

setzung mit den Inhalten stattfindet. Dies trifft insbesondere auf angehende Studierende, die nicht den „klassischen“ Bildungsweg beschritten haben, zu. Da beruflich Qualifizierte die Schule mindestens fünf Jahre vor Studienbeginn abgeschlossen haben müssen, liegt der letzte Mathematikunterricht notwendigerweise länger zurück. Wissen und Fähigkeiten, die nicht regelmäßig genutzt werden, gehen aber schnell verloren, sodass die Aktivierung von nötigem Vorwissen für das Studium bei dieser Zielgruppe einen höheren Aufwand bedeutet. Dies gilt vor allem, weil Vorwissen, an das beim Lernen angeknüpft werden kann, einer der wichtigsten Einflussfaktoren für erfolgreiches Lernen ist (vgl. Krause & Stark 2006). Ein letzter Aspekt, der die Notwendigkeit einer ausführlichen Mathematikvorbereitung begründet, ist, dass beruflich Qualifizierte keine gymnasiale Oberstufe durchlaufen haben, bestimmte Themen (wie Differenzial-, Integral- und Vektorrechnung) ihnen also komplett unbekannt sind. Hier muss das Vorwissen, an das andere anknüpfen können, im Studienvorbereitungskurs erst aufgebaut werden.

Anpassung des Vorkursangebots

Um diesen neuen Zielgruppen besser gerecht zu werden, wurde u. a. im Rahmen des Qualitätspakt-Projekts „SOS – Strukturierung und Optimierung des Selbststudiums“² das Vorbereitungsangebot breiter aufgestellt: Es werden nunmehr sechs unterschiedlich lange Mathematikvorkurse angeboten. Statt sich an den gewünschten Studienrichtungen zu orientieren, liegt der Fokus nun auf den unterschiedlichen Niveaus der Vorkenntnisse, die die zukünftigen Studierenden mitbringen.³ Zudem wird auf die zeitlichen Möglichkeiten der angehenden Studierenden, die teilweise neben Studienvorbereitung bzw. Studium arbeiten oder Betreuungsverpflichtungen haben, Rücksicht genommen. Die Inhalte, die in den verschiedenen Kursen angeboten werden, gleichen sich; Unterschiede bestehen in der Dauer bzw.

Intensität, mit der diese Inhalte behandelt werden, sowie in der Lehr-/Lernform. So werden einige beispielsweise im Blended-Learning-Format, also als Präsenzkurs mit integrierten Online-Phasen, angeboten. Ein Online-Test, der auf der Hochschul-Website veröffentlicht ist, dient als Entscheidungshilfe, welcher Kurs der passende ist.

Im Folgenden werden die nun angebotenen Kurse beschrieben:

- **Mathematikmodul im Vorsemester:** Im Rahmen des Vorsemesters des TH-College (<https://www.th-wildau.de/vorsemester>) ist Mathematik ein Kernmodul. Es umfasst ähnliche Inhalte, wie sie nachfolgend für den Mathematik-Intensivkurs beschrieben werden.

Nach der Pilotphase im Projekt SOS wurde das breitere Vorkursangebot verstetigt, sodass es nun – wie auch die Vorkurse in anderen Fächern – vom Technologietransfer- und Weiterbildungszentrum e. V. an der TH Wildau (TWZ e. V., www.th-wildau.de/studienvorbereitungskurse) kostenpflichtig angeboten wird.

- **Mathematik-Intensivkurs, werktags und Mathematik-Intensivkurs, samstags:** Diese Kurse im Blended-Learning-Format wurden speziell mit dem Fokus auf nicht traditionell Studierende eingerichtet. Während der vier Kurswochen wechseln sich Präsenzaktivitäten (Vorlesungen und Tutorien) mit strukturierten Online-Phasen ab. Der Vorteil dieser Lehr-/Lernform ist – neben der Hinführung auf studentische Lerntechniken – die individuelle Anpassung des Übungsaufwands an die eigenen Bedürfnisse gerade in den Online-Phasen, die von fachlich kompetenten Ansprechpersonen betreut werden. Außerdem erhöht sich dadurch die Vielfalt der Methoden, mit denen die mathematischen Inhalte vermittelt werden, sodass unterschiedlichen kognitiven Herangehensweisen

² Gefördert vom BMBF unter dem Förderkennzeichen 01PL11042 im Rahmen des Qualitätspakts Lehre.

³ Dies ist auch deswegen sinnvoll, weil diejenigen, die das Studium direkt nach der Schule beginnen, dort ebenfalls keine fachspezifische Mathematik gelernt haben.

Rechnung getragen wird. Aber auch während der Präsenzphasen wird viel Wert auf umfangreiche Übungen gelegt. Da der Anteil berufsbegleitend Studierender an der TH Wildau recht hoch ist und diese Studierenden unter der Woche arbeiten gehen, muss es eine Variante des Kurses geben, die am Samstag stattfindet, um auch dieser Zielgruppe eine Mathematikvorbereitung zu ermöglichen. Das ist insbesondere deswegen wichtig, weil berufsbegleitend Studierende ja bereits einen Beruf erlernt haben und deswegen nicht direkt von der Schule kommen können. Der Aktivierungsaufwand für das nötige Vorwissen ist daher entsprechend höher.

- **Mathematik-Crashkurs:** Dieser Kurs entspricht (bis auf die nicht mehr vorhandene Aufteilung nach Studiengängen) den bereits vor 2012 bestehenden Vorkursen. Er zielt auf Studienanfänger*innen, die direkt von der Schule kommen bzw. nur eine kurze Unterbrechung des Lernweges hatten, sodass die Aktivierung des nötigen Wissens üblicherweise unkompliziert und mit wenig Aufwand zu bewerkstelligen ist.

Eine Teilnehmerin des Mathematik-Intensivkurses 2017 hatte ihren mittleren Schulabschluss im Jahr 1992 gemacht. Die Differenzialrechnung war für sie völlig neu, da dies ein mathematischer Inhalt der Oberstufe ist. Nach der entsprechenden Vorlesung erklärte sie auf Nachfrage, sie sei vom Verstehen noch so weit entfernt, dass sie nicht mal Fragen zu diesem Thema stellen könne. Durch intensives Arbeiten und Üben in der Online-Phase schaffte sie es innerhalb von 1,5 Tagen, 100 % der Punkte in einem Online-Test zu einfachen Ableitungen zu erreichen!

- **Mathematik-Last-Minute-Kurs, vormittags und Mathematik-Last-Minute-Kurs, nachmittags:** Da erfahrungsgemäß nicht alle Studierenden, deren Vorkenntnisse einer Auffrischung bedürfen, tatsächlich an einem Vorbereitungskurs vor Studienbeginn teilnehmen⁴, gibt es in diesen Kursen, die an den ersten drei Samstagen des Semesters stattfinden, eine weitere Möglichkeit, sich benötigte Mathematikfähigkeiten anzueignen. Die Kurse werden von Studierenden durchgeführt und gleichen daher einem Tutorium, in dem viel anhand von Fragen der Teilnehmenden gearbeitet wird. Im Laufe des Kurses vermischen sich die klassischen Vorkursinhalte mit den Inhalten des Semesters, da diejenigen, die Defizite beim Vorwissen haben, üblicherweise auch mit den Semesterinhalten Schwierigkeiten haben.

Ein Teilnehmer des Mathematik-Intensivkurses 2016 hatte seinen mittleren Schulabschluss im Jahr 1987 gemacht. Es war – gerade zu Beginn – deutlich zu erkennen, dass ihm die mathematischen Inhalte, die im Vorkurs durchgearbeitet wurden, große Schwierigkeiten bereiteten. Im Laufe der vier Wochen des Kurses konnten diese Schwierigkeiten zwar nicht ausgeräumt, doch aber immerhin gemindert werden, was sich u. a. darin zeigte, dass er begann, Fragen zu stellen. Durch den Besuch diverser Tutorien im Semester schaffte er es, die Mathematik I-Klausur im ersten Versuch zu bestehen!

Aus unserer Erfahrung sind das Mathematikmodul im Vorsemester sowie die Mathematik-Intensivkurse besonders empfehlenswert für beruflich qualifizierte Studienanfänger*innen, da sie nicht (nur) wochentags, sondern auch am Wochenende angeboten werden,

eine intensive, länger andauernde Beschäftigung mit der Mathematik ermöglichen und verschiedene Lernformen (z. B. durch das Blended-Learning-Format) unterstützen.

Flankiert wird dieses neue Vorkurssystem durch Unterstützungsangebote im Studium, die ebenfalls vom Projekt SOS initiiert wurden: So wurde in den letzten Jahren ein Tutoriensystem aufgebaut, das Studierenden aller Studiengänge die Möglichkeit bietet, im Semester niedrigschwellig Hilfe in Mathematik zu erhalten. Zudem wird seit WiSe 15/16 eine Mathematikberatung angeboten, die beispielsweise zu der Frage berät, wie die Studienvorbereitung am besten gelingen kann oder wie die Vorbereitung auf eine Nachprüfung gestaltet werden sollte. Dieses Beratungsangebot ist eng mit den weiteren Beratungsangeboten der Hochschule verzahnt.

Fazit und Ausblick

Die TH Wildau hat in den vergangenen Jahren – insbesondere bei Beratung und Studienvorbereitung – viel getan, um den Bedürfnissen der heterogener werdenden Studierendenschaft Rechnung zu tragen. Inwieweit diese Maßnahmen den Studienerfolg beeinflussen, wird sich erst in einigen Jahren zeigen. Bislang stehen alle Studierenden, die an der Beratung „Studienstart 2.0“ und den veränderten Vorkursen teilgenommen haben, erst am Beginn bzw. in der Mitte ihres Studiums. Folgt man Hanft (2015), sind diese Angebote ein guter erster Schritt, dem allerdings weitere folgen sollten. Auch die Berücksichtigung der organisationalen Ebene im Studium ist demzufolge notwendig, damit verschiedenste Gruppen ihr Studium erfolgreich absolvieren können.

Die Befragung der beruflich qualifizierten Studieninteressierten an der TH Wildau konnte zeigen, dass diese Gruppe der Studierenden besondere Bedarfe hat, aber auch Ressourcen durch Berufserfahrung und eine zielgerichtete Studienmotivation einbringt. Die Kenntnis der Motivlagen der beruflich Qualifizierten wird z. B. für die Studierendengewinnung ge-

⁴ Das liegt nicht immer an einer Fehleinschätzung des eigenen Vorwissens in Mathematik, sondern auch daran, dass insbesondere nicht traditionell Studierende häufig vor Studienbeginn noch andere Verpflichtungen (wie Arbeit oder Betreuungsaufgaben) haben oder erst zu Studienbeginn in die Region ziehen.

nutzt. Passgenaue Angebote im Sinne eines Weiterbildungs- bzw. Studienangebots, die sich an den Bedarfen und Stärken ausrichten, können den Anteil der beruflich Qualifizierten an den Studieninteressierten signifikant erhöhen. Im Folgenden wird daher für eine Flexibilisierung des Studiums und eine innovative Gestaltung der Module plädiert. Die TH Wildau ist hier mit dem Teilzeitstudium bereits einen Schritt gegangen, da ein Teilzeitstudium leichter mit beruflichen und familiären Verpflichtungen zu vereinen ist.

Um den Zugang zum Studium niedrigschwelliger zu gestalten, würden sich Zertifikatsmodule anbieten, die auf ein (späteres) Studium anrechenbar sind. So könnten die Motive „sich beruflich weiterbilden“ und „Herausforderungen suchen“ eine Entsprechung im Angebot finden. Für das Motiv „sich persönlich weiterbilden“ könnten ebenfalls entsprechende Zertifikatsmodule aufgelegt werden, beispielsweise aus dem Bereich der Personalentwicklung. Dadurch wäre es möglich, flexibel ein Studium auszuprobieren, bevor eventuell die Berufstätigkeit aufgegeben wird und damit die Lebensplanung umgestellt werden muss.

Sowohl bei der Entwicklung der Studiencurricula als auch bei der Modulgestaltung sollte stärker an die Erfahrungen und Kompetenzen aus den Berufsfeldern angeknüpft werden, beispielsweise dadurch, dass im ersten Semester Module enthalten sind, die für beruflich Qualifizierte eine Brücke zu ihren Berufserfahrungen herstellen. Dies würde auch den übrigen Studierenden helfen, die – gerade in den Ingenieurstudiengängen – vielfach über Schwierigkeiten mit den theoretischen Grundlagenmodulen in den ersten Semestern berichten. Insgesamt ist ein praxisbezogener Einblick in das Studienfach zu Beginn günstig für die Motivation aller Anfänger*innen.

Schließlich sollte geprüft werden, ob es Sinn macht, analog zu dem Vorbereitungsangebot für Mathematik weitere passgenaue Angebote, insbesondere für theoriebasierte „Wissensmodule“, zu entwickeln. Die zunehmende Heterogenität der Studierenden macht es vor dem Hintergrund der gewünschten Durchlässigkeit wahrscheinlich, dass „nullte“ Semester und ähnliche

Angebote für einen fließenden Übergang ins Studium zum Standard an den Hochschulen werden.

LITERATUR

Abel H, Weber B (2014) 28 Jahre Esslinger Modell – Studienanfänger und Mathematik. In: Bausch I, Biehler R, Bruder R, Fischer PR, et al. (eds) Mathematische Vor- und Brückenkurse. Konzepte, Probleme und Perspektiven. Konzepte und Studien zur Hochschuldidaktik und Lehrerbildung Mathematik. Springer Spektrum, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-03064-3, pp 9–19. doi: 10.1007/978-3-658-03065-0_2

Banscherus U, Kamm C, Otto A (2015) Information, Beratung und Unterstützung von nicht-traditionellen Studierenden. Angebote der Hochschulen und deren Bewertung durch die Zielgruppe. In: Hanft A, Zawacki-Richter O, Gierke WB (eds) Herausforderung Heterogenität beim Übergang in die Hochschule. Waxmann, Münster New York, NY, ISBN: 978-3-8309-3100-3, pp 81–96

(2014) Brandenburgisches Hochschulgesetz (BbgHG).

Burchard A (2017) Auch ohne Abitur an der Uni erfolgreich. Nicht-traditionelle Studierende haben kaum schlechtere Noten als klassische, brechen aber öfter ab. <http://www.tagesspiegel.de/wissen/studieren-ohne-abitur-auch-ohne-abitur-an-der-uni-erfolgreich/20735028.html>. Accessed 09 Jan 2018

Elsholz U (2015) Überwindung der Trennung zwischen beruflicher und akademischer Bildung? Bildungstheoretische, bildungspolitische und didaktische Herausforderungen. In: Elsholz U (ed) Beruflich Qualifizierte im Studium. Analysen und Konzepte zum Dritten Bildungsweg, 1st edn. wbv, Bielefeld, ISBN: 3763956050, pp 245–260

(1991) Gesetz über die Hochschulen des Landes Brandenburg (Brandenburgisches Hochschulgesetz - BbgHG).

(2008) Gesetz über die Hochschulen des Landes Brandenburg (Brandenburgisches Hochschulgesetz - BbgHG).

Hanft A (2015) Heterogene Studierende - homogene Studienstrukturen. In: Hanft A, Zawacki-Richter O, Gierke WB (eds) Herausforderung Heterogenität beim Übergang in die Hochschule. Waxmann, Münster, New York, NY, ISBN: 978-3-8309-3100-3, pp 13–28

Heublein U, Hutzsch C, Schreiber J, Sommer D, Besuch G (2009) Ursachen des Studienabbruchs in Bachelor- und in herkömmlichen Studiengängen. Ergebnisse einer bundesweiten Befragung von Exmatrikulierten des Studienjahres 2007/08. HIS: Projektbericht

Knopp L, Peine F-J (eds) (2012) Brandenburgisches Hochschulgesetz. Handkommentar, 2nd edn. Nomos, Baden-Baden. ISBN: 978-3-8329-7324-7

Krause U-M, Stark R (2006) Vorwissen aktivieren. In: Mandl H, Friedrich HF (eds) Handbuch Lernstrategien. Hogrefe, Göttingen, ISBN: 3801718131, pp 38–49

Mayring P (2010) Qualitative Inhaltsanalyse. Grundlagen und Techniken, 11., aktualisierte und überarb. Aufl. Pädagogik. Beltz, Weinheim, Basel. ISBN: 9783407255334

Middendorff E, Apolinarski B, Poskowsky J, Kandulla M, Netz N, Naumann H, Buck D (2013) Die wirtschaftliche und soziale Lage der Studierenden in Deutschland 2012. 20. Sozialerhebung des Deutschen Studentenwerks durchgeführt durch das HIS-Institut für Hochschulforschung

Nickel S, Schulz N (2017) Update 2017: Studieren ohne Abitur in Deutschland Überblick über aktuelle Entwicklungen, CHE AP 195. CHE Arbeitspapier. Centrum für Hochschulentwicklung gGmbH, Gütersloh. ISBN: 978-3-941927-80-3

Seidel S (2014) Defizitär oder produktiv: Die Heterogenität der Studierenden. In: Seidel S, Wielepp F (eds) Diverses. Heterogenität an der Hochschule. Institut f. Hochschulforschung Wittenberg, Lutherstadt Wittenberg, ISBN: 978-3-937573-42-7, pp 6–21

Wolter A, Banscherus U, Kamm C, Otto A, Spexard A (2014) Durchlässigkeit zwischen beruflicher und akademischer Bildung als mehrstufiges Konzept. Bilanz und Perspektiven. Beiträge zur Hochschulforschung(4):8–39

Wolter A, Dahm G, Kamm C, Kerst C, Otto A (2015) Nicht-traditionell Studierende in Deutschland - Werdegänge und Studienmotivation. In: Elsholz U (ed) Beruflich Qualifizierte im Studium. Analysen und Konzepte zum Dritten Bildungsweg, 1st edn. wbv, Bielefeld, ISBN: 3763956050, pp 11–34

AUTOREN

Dr. Xenia Valeska Jeremias
Katja Wenger
Birgit Sellmer
Technische Hochschule Wildau

E-Mail für Korrespondenz:
katja.wenger@th-wildau.de



The Directive on Antitrust Damages Actions and the European Leniency Program

Carsten Kunkel*, Giovanni Figá-Talamanca, Martina Semmler

Zusammenfassung

Die Europäische Kronzeugenregelung ist eines der wichtigsten Instrumente des Europäischen Wettbewerbsrechts. Kartellmitgliedern werden Anreize geboten, damit sie illegale, für den Wettbewerb schädliche, geheime Absprachen gegenüber der Europäischen Kommission offenlegen. Ausschlaggebend für die Teilnahme am Kronzeugenprogramm ist für Kartelle unter anderem, ob ein in Aussicht stehender vollständiger oder teilweiser Erlass der Geldbuße das Risiko von zivilrechtlichen Schadensersatzansprüchen überwiegt. Seitens der Europäischen Kommission müssen Anreize zur Teilnahme am Kronzeugenprogramm, aber auch eine wirksame Rechtsdurchsetzung für Geschädigte implementiert werden. Mit der Kartellschadensersatzrichtlinie soll eine harmonisierte, effektive Durchsetzung von Schadensersatzansprüchen gewährleistet werden. Dieser Beitrag kommt zu dem Schluss, dass die Stärkung der Durchsetzung zivilrechtlicher Ansprüche nicht konsequent umgesetzt werden konnte, da eine gewisse Diskrepanz zwischen dem Schutzzweck der Richtlinie und der Erhaltung des Europäischen Kronzeugenprogramms besteht.

Abstract

The European Leniency Program constitutes an important part of the anti-cartel enforcement and thus of the protection of sound competition. By offering incentives to cartel members, illegal detrimental agreements can be detected and penalized in order to stop infringement of the internal market. Companies willing to participate in the European Leniency Program however have to evaluate whether the offered incentives, i.e. full or partial immunity from fines, outweighs the possible risk resulting from private enforcement. With the Directive on Antitrust Damages Actions, the harmonized, effective enforcement of antitrust damage claims shall be ensured. The possibility of private enforcement constitutes a major threat to leniency applicants. It is the European Commissions' task and challenge to design an anti-cartel enforcement providing sufficient incentives for whistleblowers, while concurrently strengthening individuals suffering from cartels. The results show the dilemma and contradiction between the protection of the individual by strengthening the private enforcement and the need for an appealing leniency program.

1. Introduction

Cartels are a major threat to the internal market since they break competition law. By their nature, cartels have a negative influence on the market because they limit the competition that normally regulates the market. As a result, companies participating in cartels limit the pressure for participants on the market to remain competitive. Cartel agreements cause even more damage to the economy if they are concluded on a multinational level. According to Article 101 TFEU, all agreements between undertakings,

decisions by associations of undertakings and concerted practices which may affect trade between member states and which have as their object or effect the prevention, restriction or distortion of competition within the internal market are prohibited. All agreements or decisions between undertakings which are prohibited according to Article 101 I TFEU shall be automatically void (Article 101 II TFEU). To be more precise, all agreements and/or concerted practices which are concluded between two or more competitors, designed to coordinate their competitive behavior on the market

and/or to influence the market, e.g. through illegal price-fixing or sharing of markets¹, are prohibited. However, if the prerequisites of Article 101 III TFEU are fulfilled (i.e. either block exemption or decision in an individual case), the exemption rule is applicable, i.e. the provisions of Article 101 I TFEU will be declared inapplicable. In order to benefit from an exemption under Article 101 III TFEU the agreement between undertakings or concerted practice has to contribute to the improvement of the production or distribution of goods or promotion of

¹ Commission Notice on Immunity from fines and reduction of fines in cartel cases, 2006/C 298/11, 1.

technical or economic progress, while allowing consumers a fair share of the resulting benefit. However, the agreement, decision or concerted practice may not impose restrictions which are not indispensable to the attainment of these objectives and also may not eliminate competition in respect of a substantial part of the goods in question (Ezrachi 2016). Cartels cannot be subsumed under Article 101 III TFEU since they constitute the most serious violation of the prohibition according to Article 101 TFEU. Irrespective of the legal consequence of invalidity of any agreement or decision prohibited under Article 101 I TFEU, further legal consequences have to be observed, i.e. from both the European Union and national legislation. Article 101 II TFEU does not include any stipulations on civil penalties (e.g. indemnities). At national level, several legal consequences may apply, such as claims for removal, injunctive relief or indemnity. However, in the absence of European Union law², it is the common position of the ECJ³ that any individual can rely on a breach of Article 101 I TFEU in front of a national court and claim indemnity for any damage suffered due to the cartel infringement⁴. This has been practice for many years. In order to achieve far-reaching harmonization on the secondary law of the member states in this regard, the European Commission published a Green Paper in 2005⁵, followed by a White Paper in 2008⁶, which then resulted in the issue of Directive 2014/104/EU⁷. With this Directive on Antitrust Damages Actions, the European legislator set out coordinated rules governing actions for damages under national law for infringement of competition law of the member states and of the European Union, as of 26th November 2014. By their means, directives have to be

transposed into the national laws of the member states according to Article 288 TFEU, since they are part of the secondary law of the European Union. The Directive thus only provides the minimum requirements to be transposed into national laws. The member states were obligated to transpose the Directive into respective national laws until 27th December 2016 (Article 21 I Directive). In Germany, the transposition of the Directive into national law has been fulfilled with the 9. GWB Novelle⁸, which became effective on 9th June 2017.

This article deals with the question whether the special stipulations included for leniency applicants are sufficient and also lenient enough towards cartelists considering cooperating voluntarily with the European Commission and/or national competent authorities by providing significant information on the existence of and their role within the cartel, independently of the other cartelists involved. Furthermore, it is weighed whether the aim to protect and strengthen leniency programs is at the detriment of the protection of the individual suffering damages of antitrust infringements, as the actual protective purpose of the Directive.

2. Purposes of the Directive

The Dilemma of the Detection of Cartels

Anti-cartel enforcement is crucial for the European Union to maintain sound competition in the internal market. As the responsible institution for competition in the European Union, the European Commission focusses on the detection of illegal detrimental agreements, the punishment of

cartel members and the cessation of infringements of the internal market. As a matter of principle, the secrecy of the cartel itself is an inherent part of each cartel. Hence, the willingness of a cartel member to blow the whistle is indispensable for the detection of any and all cartels. However, companies will only take the risk to reveal a cartel if the associated incentives are appealing enough compared to the related risks. This sums up the dilemma of the detection of cartels. Whereas they are secret by their means, they can and will only be detected if a participating company decides the incentives are appealing enough to take the associated risks. Solution methods to this dilemma are leniency programs. Leniency programs⁹ constitute an important part of anti-cartel enforcement. By offering incentives to cartel members, illegal detrimental agreements can be detected and penalized in order to stop the infringement of the internal market. Whereas on the one hand, the possibility of total or partial immunity from fines is appealing to cartel members, they also have to consider whether the incentives offered outweigh the possible risk of private enforcement after participation in the leniency program. Since decisions of the European Commission are binding for all national courts (Recital 2 Directive), the application for leniency equates to an admission of guilt, which can in turn also be the basis for private enforcement. As a consequence, plaintiffs in a civil suit can refer to the decision of the European Commission as proof for the infringement of competition law and claim for the damages caused to them by such an infringement (Recital 3 Directive). For the most part, the civil suit focusses on questions of causality and the amount of damages to be awarded (Rother 2017).

² Directive 2014/104/EU of the European Parliament and of the Council of 26 November 2014 on certain rules governing actions for damages under national law for infringements of the competition law provisions of the Member States and of the European Union, L 349/1, Recital 11.

³ ECJ 20.09.2001, C-453/99, 24; ECJ 13.07.2006, C-295/04 to C-298/04, 59; ECJ 14.06.2011, C-360/09, 28; ECJ 06.11.2012, C-199/11, 41; ECJ 06.06.2013, C-536/11, 23; ECJ 05.06.2014, C-557/12, 23.

⁴ ECJ 20.09.2001, C-453/99, 24.

⁵ Green Paper of 19.12.2005 on damages actions for breach of the EC antitrust rules, COM(2005) 672.

⁶ White Paper of 2 April 2008 on damages actions for breach of the EC antitrust rules, COM (2008) 165.

⁷ Directive 2014/104/EU of the European Parliament and of the Council of 26 November 2014 on certain rules governing actions for damages under national law for infringements of the competition law provisions of the Member States and of the European Union, L 349/1, in the following "Directive".

⁸ Neuntes Gesetz zur Änderung des Gesetzes gegen Wettbewerbsbeschränkungen, BGBl I p. 1416.

⁹ Besides the European Leniency Program, which has been established by the European Union in 1996, several national leniency programs are also applicable such as the German Leniency Program. For a detailed overview see also the list of National Competition Authorities which operate a leniency program as of November 2012: http://ec.europa.eu/competition/ecr/leniency_programme_nca.pdf.

Therefore, the decision to apply for leniency is also always associated with considering the risk for the leniency applicant to be solely liable for the damages caused by the whole cartel because the leniency applicant will, other than cartelists who are not willing to cooperate with the European Commission, hardly decide for an appeal procedure in case full immunity is granted (Bulst 2008). As a result, the leniency applicant has a higher risk of becoming the defendant of private enforcement. The leniency applicant thus risks being the sole cartelist to be held liable for the infringement of the whole cartel (Bulst 2008). It has to be noted that within the concept of joint liability, the leniency applicant could indeed subsequently claim damages from the other cartelists, but, considering that the risk of litigation and insolvency is always with the plaintiff, this constitutes yet another risk for the leniency applicant who decided to blow the whistle (Schröter & van der Hout 2015). Another major fear among cartelists is that the information provided within the leniency application may be used as evidence for private enforcement proceedings. In conclusion, it is self-evident that these risks influence the willingness of a cartelist to file a leniency application.

Strengthening of Private Enforcement

The infringement of European antitrust law causes damage per se to the internal market. Cartels limit the competition which normally regulates the market. As a result, cartelists limit the pressure for participants on the market to remain competitive. Therefore, there is no longer the necessity to develop new products or to improve the quality of the products because the concerned companies can rely on their market share, which is secured by the cartel, to name only one example. For the consumer, illegal practices result

in less competitiveness on the market, which in turn may result in artificial prices¹⁰. Individuals suffering damages resulting from such infringements are protected according to Article 101 and 102 TFEU since those regulations stipulate rights for the individual that have to be enforced by national courts (Recital 3 Directive). Regardless of this right that already existed under the primary law of the European Union, the minority of victims of infringements of competition law claims for damage compensation in civil suits (Schröter & van der Hout 2015). Various reasons can be found for that. However, the main aspect discouraging individuals from claiming antitrust damage are the difficulties related to evidence. It therefore can be stated that the access to evidence for the infringement of competition law is of crucial importance for any individual claiming damages resulting from this infringement (Keßler 2015). Therefore, as a matter of fact, the subjective rights to private enforcement of antitrust damages have to be protected.

In conclusion, two things have to be considered simultaneously in the design of European Competition law. On the one hand, the incentives provided for cooperation with the European Commission within the scope of leniency need to be appealing enough to convince cartelists to blow the whistle. On the other hand, subjective rights under European law, such as awarding damages to the victims of infringements of competition law, have to be protected. Those aspects were also considered and finally determined during the development of the Directive. As a result, the Directive finally (after nine years and several attempts) implemented European primary law¹¹ – namely, the principle that any individual who suffered damages due to an infringement of competition law can claim such damages within civil suits – into European secondary law. The influence of private enforce-

ment on the effectiveness of leniency programs was already acknowledged with the Green Paper¹² on antitrust damages actions, followed by the White Paper¹³ and now has finally resulted in the Directive (Keßler 2015).

3. Lenient Leniency?

The European legislator pursued two objectives with the Directive: First, it shall be ensured that victims of antitrust infringements can claim their suffered damages effectively; second, the interrelation between private and public enforcement shall be optimized¹⁴.

The Directive focusses on removing procedural obstacles in private damage actions to ensure protection of all individuals concerned, e.g. by awarding compensation to individuals for suffered damages (Recital 3 Directive). It has been underlined that existing divergence of applicable national rules regarding the enforcement of competition law shall be set aside with the Directive in order to protect the effectiveness of European competition law (Recitals 6, 8-10 Directive).

The Directive clarifies that any victim of infringement can claim full compensation of the damages suffered, covering the actual loss (*damnum emergens*) as well as loss of profit (*lucrum cessans*), respectively plus interest from the point in time the damage occurred until compensation (Recital 12, Article 3 II Directive). However, the Directive also explicitly excludes the possibility of overcompensation (Article 3 III Directive) and insofar follows consequently the compensation principle, which is also a recognized principle in German law (Keßler 2015). That means the compensation awarded shall place the person who suffered the damage in the position in which the person would have been if no infringement of competition law would have happened. Thus the individual shall not receive any further compensation exceeding that amount.

¹⁰ Commission Notice on Immunity from fines and reduction of fines in cartel cases, 2006/C 298/11, 1.

¹¹ In this regard European primary law means the jurisdiction of the European Court of Justice; See: ECJ 20.09.2001, C-453/99, 26 et seq.; ECJ 13.07.2006, C-295/04, 61.

¹² Green Paper of 19.12.2005 on damages actions for breach of the EC antitrust rules, COM(2005) 672, section 2.7.

¹³ White Paper of 2 April 2008 on damages actions for breach of the EC antitrust rules, COM (2008) 165.

¹⁴ European Commission; http://ec.europa.eu/competition/antitrust/actionsdamages/evidence_en.html; Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on certain rules governing actions for damages under national law for infringements of the competition law provisions of the Member States and of the European Union /* COM/2013/0404 final - 2013/0185 (COD), section 1.2.

It is one of the greatest obstacles for any plaintiff in competition law proceedings to gain knowledge of evidence that is relevant to substantiate their claim. Only sufficient evidence will substantiate claims of the plaintiff. Therefore, another important aspect for antitrust damages actions is the evidence to prove the suffered damage. Since cartels are secret as a matter of principle, cartel proceedings are always influenced by an information asymmetry (Recital 15 Directive) at the expense of the plaintiff. In most cases, the victim of the infringement obtains knowledge of the infringement of competition law only after a decision of the European Commission and hence private enforcement is mostly subsequently in the form of so called “follow-on-action” (Keßler 2015). This fact has been acknowledged and thus transferred into two sections of the Directive. First, Article 9 Directive stipulates that a final decision of a national competition authority shall be irrefutably established for the purposes of action for damages claimed before their national courts. That means any individual can refer to such a decision as the basis for the claim of damages resulting from the infringement. Second, Articles 5–8 Directive extensively stipulate the details under which preconditions the disclosure of evidence can be requested by a plaintiff, which legal aspects have to be considered by the national courts, and who can be requested to disclose evidence in such proceedings. Summarizing, the Directive includes numerous stipulations designed to strengthen private enforcement to protect subjective rights of individuals harmed by an infringement of competition law.

However, irrespective of the main objective of the Directive to strengthen private enforcement, emphasis has also been placed on the importance of leniency programs and other settlement procedures (Recital 26 Directive). The Directive recognizes the importance of leniency for the detection of cartels and, therefore, special regulations shall apply to cartelists who blow the whistle “to ensure [the] undertakings’ continued willingness to approach competition authorities voluntarily with leniency statements or settlement submissions” (Recit-

al 26 Directive). Those stipulations somehow seem to contradict the rules designed to strengthen private enforcement. In particular, according to Article 6 VI Directive, the national law of the member states shall ensure that both leniency statements and settlement submissions are excluded from disclosure in front of national courts for the purpose of actions for damages. That means that no leniency application or submission for settlement of a leniency applicant can be used as evidence in front of a national court. To understand the significance of this stipulation, one has also to consider the definition of the term “leniency statement”. According to Article 1 No. 16 Directive, a leniency statement includes any and all oral or written knowledge of a cartel, which is voluntarily provided to a competition authority. However, the leniency statement shall not include any pre-existing information. In conclusion, if already known information is included in the leniency statement, the rule of exemption for disclosure of such information in court is not applicable. Consequently, such information could be used in proceedings relating to an action for damages according to European competition law. With this flexibility clause it shall be ensured that the exemption rule does not contradict with the rights of the victim of the infringement to claim compensation for damages (Recital 26 Directive). According to Article 7 Directive, evidence from the categories of leniency statements or settlement submissions shall be deemed to be inadmissible in actions for damages or otherwise be prohibited under national laws.

This exemption clause is an excellent illustration of the fine line the European legislator is facing. Whereas on the one hand, the individual shall be protected by strengthening the private enforcement, on the other hand leniency applicants are also considered with the implementation of specific stipulations that place immunity recipients (irrespective of whether they are receiving total or partial immunity) in a better position. By excluding leniency statements as a source of evidence in antitrust damage actions, the legislator clearly favors the pro-

tection of the cartelist applying for leniency over the need of protection of the individual’s rights. On the one hand it seems consistent to encourage the participation in leniency programs with the benefit of the legal certainty that information provided within the scope of leniency application cannot be used as evidence in private enforcement against the leniency applicant. However, it also has to be noted that the promotion of the leniency program is obviously privileged over the strengthening of procedural rules in private enforcement and, in this case, privileged over the support to gain evidence for proving suffered damages. It could even be conceivable for leniency applicants to consider including a maximum of information into their leniency application, knowing that the information provided with the leniency application cannot be used as evidence in civil suits. Even though this encourages the detection of cartels, this clearly contradicts the strengthening of private enforcement.

Furthermore, special regulations regarding the joint and several liability have been implemented for immunity recipients. This is a considerable concession to cartelists willing to cooperate with the European Commission or national competition authorities. In general, according to Article 11 I Directive, cartelists are jointly and severally liable for the damage caused. However, Article 11 IV Directive significantly defuses the concept of joint liability by stipulating that the national law of the member states shall ensure that an immunity recipient is only jointly and severally liable in two cases: first, to its direct or indirect purchasers or providers, and second to other injured parties only if full compensation cannot be obtained from the other cartelists involved in the same infringement (Article 11 IV Directive). That means the joint liability of an immunity recipient is restricted. The immunity recipient will only be held liable for damages caused to third parties if indemnity cannot be received from the other cartelists involved, e.g. because of bankruptcy or insolvency of the undertaking. This obviously puts immunity recipients in a better position than other cartelists and is another example for the preference for leniency appli-

cants to the detriment of the damaged party (Keßler 2015). Nevertheless, as outlined, a cartel member will always outweigh the risks and rewards related to blowing the whistle on the existence and involvement in a cartel. Certainly, the stipulations of Article 11 IV Directive relieve immunity recipients from large parts of the joint liability. However, if the damage of victims of the infringement cannot be fully compensated by the other cartel members involved in the same infringement, the immunity recipient will also be held liable for such cases. That means in case members of the cartel become insolvent and thus the injured party cannot be fully compensated by that cartel member, the cartel member who received immunity from either the European Commission or other national competent authorities will nonetheless be held responsible for the damage compensation. It is, therefore, doubtful whether the possible reward, i.e. in this case full or partial immunity from fines, outweighs the risk of private enforcement for members of the cartel.

4. Conclusion

In summary, it can be said that the realization of the two targets of the Directive, i. e. on the one hand ensuring that victims of antitrust infringements can claim suffered damages effectively by strengthening the private enforcement while on the other hand simultaneously optimizing the interrelation between private and public enforcement, was a major challenge for the European legislator. As demonstrated it is obvious that the implementation of specific stipulations for immunity recipients in order to provide incentives for cartel members considering cooperation with competent authorities goes to the detriment of the protection of the individual suffering damages of infringement of competition law by cartel members. In conclusion, the objective to strengthen private enforcement with specific stipulations (e.g. relief in questions of evidence) could not be pursued consequently since rules of exemption for the empowerment of leniency have also been implemented in the Directive. Therefore, the realization of the objectives into the Directive is not entirely convincing. One can

conclude that the European legislator did not fully succeed in implementing secondary law that does justice to both immunity recipients and victims of their infringement. The extent to which the Directive will positively impact the private enforcement of antitrust damages actions in a conclusive way in light of the restrictive stipulations related to immunity recipients remains to be seen.

REFERENCES

- Bulst FW (2008) Of Arms and Armour. The European Commission's White Paper on Damages Actions for Breach of EC Antitrust Law. *Bucerius Law Journal*(2):81–95
- Ezrachi A (2016) EU competition law. An analytical guide to the leading cases, 5th edn. Hart Publishing, Oxford, Portland, Oregon. ISBN: 978-1-5099-0983-4
- Keßler J (2015) Die europäische Richtlinie über Schadensersatz im Wettbewerbsrecht – Cui bono? *Verwaltung und Recht*(3):83–92
- Rother C (2017) Kartellschadensersatz nach der 9. GWB-Novelle. *NZKart Neue Zeitschrift für Kartellrecht*(1):1–2
- Schröter H, van der Hout R (2015) AEUV Artikel 101. In: Groeben H von der, Schwarze J, Hatje A (eds) *Europäisches Unionsrecht*, 7th edn. Nomos, Baden-Baden, ISBN: 978-3-8329-6019-3

AUTHORS

Prof. Dr. iur. Carsten Kunkel
Technical University of Applied Sciences Wildau

Prof. Dr. Giovanni Figá-Talamanca
Martina Semmler, LL.M., PhD Candidate
University of Rome Tor Vergata

E-Mail for correspondence:
carsten.kunkel@th-wildau.de





**Technische Hochschule
Wildau**
*Technical University
of Applied Sciences*

Hochschulring 1
15745 Wildau
Germany

www.th-wildau.de