



**Wissenschaftliche Beiträge
TH Wildau**

2015

IMPRESSUM

HERAUSGEBER

Der Präsident der Technischen Hochschule Wildau

Prof. Dr. László Ungvári
Hochschulring 1
15745 Wildau

www.th-wildau.de

REDAKTIONSKOLLEGIUM DER TH WILDAU

Prof. Dr. sc. hum. Marcus Frohme
Prof. Dr.-Ing. Michael Hendrix
Prof. Dr. rer. nat. Michael Herzog
Prof. Dr.-Ing. Jörg Reiff-Stephan
Prof. Dr. phil. Olga Rösch

REDAKTION

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

GESAMTHERSTELLUNG

STÜRMER & DRÄNGER – Visuelle Kommunikation

Adalbertstraße 20
10997 Berlin

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

Titelfoto: Shutterstock

ISSN 0949-8214

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



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

WISSENSCHAFTLICHE BEITRÄGE **2015**

INHALTSVERZEICHNIS

Wissenschaftliche Beiträge 2015

ANGEWANDTE BIOWISSENSCHAFTEN

- 7 Bioprozessautomatisierung einer Algenanlage mithilfe eines Single-Board-Computers
Moritz Heinrich, Tobias Seydewitz, Franz Xaver Wildenauer, Heike Pospisil
- 15 Automatisierung des Bio-Plex Pro™-Analyseverfahrens
Karolin Keil, Lars Radke, Ulrich M. Tillich, Marcus Frohme
- 21 Impedimetrischer DNA-Nachweis – Schritte in Richtung sensorischer Anwendung
Marc Riedel, Julia Kartchemnik, Michael J. Schöning, Fred Lisdat

INFORMATIK/TELEMATIK

- 29 Ermittlung des Energiebedarfs zur Bewegung von Fahrzeugen in mikroskopischen Verkehrssimulationen
Peter Bernhardt, Christian Sauer, Michael Hendrix
- 39 Automated Recognition of Sleep Stages Using Electroencephalograms
Valeriy Bezruk, Egbert Gedat, Katja Holzheimer, Ralf Vandenhouten

PRODUKTION UND MATERIAL

- 45 Various Types of Polyurethanes in the process of Chemical Recycling
Silke Beckmann, Michael Herzog
- 55 Informationsgewinnung im cyberphysischen Produktionssystem
René von Lipinski, Markus Richter, Jörg Reiff-Stephan
- 61 Entwicklung und Leistungsbestimmung einer 2,2-kW-Tesla-Turbine
Roberto Lisker, Udo Hellwig, Franz Xaver Wildenauer
- 67 Strukturdynamik- und Maschinendiagnose an einem Cherenkov-Teleskop
Torsten Schneider, Robert Paeschke, Daniel Alarcón, Peter Blaschke

MANAGEMENT UND RECHT

- 75 Visualisierung von Optimallösungen logistischer Probleme
Matthias Forster
- 79 E-Assessments in der Hochschullehre: Chancen und Herausforderungen
Xenia Valeska Jeremias, Birgit Sellmer, Ulrike Tippe
- 87 Gefährdet der demografische Wandel die Innovationsfähigkeit von Unternehmen?
Sandra Klatt
- 95 Publish or Perish? Neue Ansätze in der Evaluation von Wissenschaftlerleistungen
Dana Mietzner, Frank Hartmann

VORWORT

PROF. DR. LÁSZLÓ UNGVÁRI

Das Jahr 2014 war in der Geschichte der TH Wildau eines der erfolgreichsten seit Gründung der Hochschule. Die Zahl der Studierenden lag mit 4.119 (31. Oktober 2014) erneut über 4.000. Im WS 2014/15 betrug der Anteil der Bildungsausländer 19,7%, mit den Kollegiaten 20,7%. Früher als geplant haben wir den Anteil der ausländischen Studierenden an der Gesamtstudierendenschaft auf 20% steigern können. In dem Zusammenhang konnten wir 2014 die Rahmenbedingungen für die Betreuung der Studierenden hinsichtlich Unterkunft und Studium verbessern.

Auf der Exmatrikulationsfeier 2014 konnten 855 Absolventinnen und Absolventen ihre Zeugnisse entgegennehmen. Seit Bestehen der Hochschule haben nun 10.500 Frauen und Männer einen Studienabschluss erworben.

Mit Blick auf die Aktivitäten im Bereich der Forschung stand 2014 unter der Überschrift der Profilschärfung. Die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten der TH Wildau haben wir in nunmehr sechs Forschungsfelder gebündelt. Drei der sechs Forschungsfelder konnten wir als erste Hochschule in Berlin-Brandenburg als Forschungsschwerpunkte der Hochschule in der Forschungslandkarte der Hochschulrektorenkonferenz platzieren. Die Schwerpunkte Angewandte Biowissenschaften, Informatik/Telematik sowie Optische Technologien/Photonik erfüllen die strengen Kriterien der HRK hinsichtlich Zahl der Professoren, Wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, Drittmittelaufkommen sowie Publikationen und Promotionsverfahren.

Die Professorinnen und Professoren des Schwerpunkts Angewandte Biowissenschaften haben zudem das „Institut für Angewandte Biowissenschaften“ gegründet, das zurzeit das einzige Institut der TH Wildau ist und den Außenauftritt der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler stärken wird.

Die drei weiteren Forschungsfelder Produktion und Material, Verkehr und Logistik, Management und Recht entsprechen den von der Hochschulleitung definierten Kriterien: mindestens fünf Professorinnen und Professoren, mindestens 250.000 Euro Drittmittel und mindestens fünf Publikationen im Jahr. Die Hochschule wird als Kompetenzzentrum für wichtige Wissenschaftsdisziplinen und als Netzwerkpartner in internationalen, bundesweiten und regionalen Forschungsverbänden für den Wissens- und Technologietransfer wahrgenommen. Wildauer Know-how und Erfahrung in der angewandten Forschung und Entwicklung sind gefragt – sowohl bei international tätigen Großunternehmen als auch bei innovativen kleinen und mittleren Unternehmen.

Jährlich werden an unserer Hochschule über 400 Projekte von den Kolleginnen und Kollegen parallel bearbeitet. Durch erfolgreich beantragte Projekte und direkte Industrienaufträge konnte die TH Wildau 2014 insgesamt auf 11,95 Millionen Euro gesteigert werden. Das ist eine absolute Rekordzahl. Durch die Drittmittel erhöhte sich der Haushalt der Hochschule, gemessen an der Grundfinanzierung des Landes um fast 100% (96,5%).

Ein Teil der wissenschaftlichen Arbeit einer Hochschule besteht in der Veröffentlichung der Ergebnisse der Forschungs- und Entwicklungsprojekte. Die Kolleginnen und Kollegen publizieren bereits seit Jahren in international renommierten Journalen. Die Wissenschaftlichen Beiträge der TH Wildau haben sich als ein wichtiges Medium etabliert, in dem meine Kolleginnen und Kollegen Ergebnisse ihrer Forschung präsentieren und somit Einblicke in ihre Aktivitäten geben. Neu in der vorliegenden Ausgabe ist, dass sich die Gliederung der Artikel an den Forschungsfeldern der Hochschule orientiert.

Ich danke den Kolleginnen und Kollegen für das rege Interesse an den



Wissenschaftlichen Beiträgen, und ich bedanke mich herzlich bei dem Redaktionskollegium für die Begutachtung der eingegangenen Artikel sowie für die Betreuung der Publikation.

Auch dieses Jahr wünsche ich Ihnen eine anregende Lektüre der Wissenschaftlichen Beiträge, die mit der vorliegenden Ausgabe in den 19. Jahrgang gehen. Die Artikel sind auch als PDF über das Internet abrufbar, besuchen Sie dazu die Internetseite

<http://www.th-wildau.de/forschung/wissbeitraege.html>

Prof. Dr. László Ungvári

Präsident
der TH Wildau [FH]

Bioprozessautomatisierung einer Algenanlage mithilfe eines Single-Board-Computers

Moritz Heinrich, Tobias Seydewitz, Franz Xaver Wildenauer, Heike Pospisil*

Zusammenfassung

Für die effektive Haltung von Mikroorganismen, kleinen Pflanzen oder Algen in Bioreaktoren ist die Aufrechterhaltung optimaler Kultivierungsbedingungen, wie beispielsweise pH-Wert, Temperatur oder Nährstoffgehalt, notwendig. Diese Parameter können sich während der Kultivierung ändern, weshalb sie regelmäßig kontrolliert und gegebenenfalls angepasst werden müssen. Wir präsentieren hier den technischen Aufbau und die Softwaredrealisierung eines Automatisierungssystems zur autonomen Regulierung des pH-Wertes in Bioreaktoren, in denen die grüne Mikroalge *Scenedesmus rubescens* kultiviert wird. Dazu wurde ein System mit pH-Sensoren, Signalwandlern und Magnetventilen zur kontrollierten CO₂-Begasung aufgebaut. Für die Steuerung und die Datenaufzeichnung diente ein Single-Board-Computer (Raspberry Pi) mit Webserver. Die Anlage war voll funktionsfähig und konnte über mehrere Tage fehlerlos den pH-Wert auf einen vorgegebenen Wert regeln. Das System ist leicht auch auf Großanlagen und für andere Parameter erweiterbar. Durch die Nutzung eines Single-Board-Computers erfordert die Anlage nur minimalen Platz- und Energiebedarf und ist mit geringen Anschaffungskosten verbunden.

Abstract

The maintenance of stable internal conditions such as pH, temperature, or nutrients is essential for the cultivation of microorganisms, small plants and algae in bioreactors. These parameters can significantly vary during cultivation and have to be controlled and regulated. Here we present the technical construction and software implementation of an automation system for measurement and controlling pH in bioreactors for cultivating the green micro algae *Scenedesmus rubescens*. The system was built up with pH sensors, a signal transducing unit and magnetic valves that regulate the CO₂ volume flow. A single-board-computer (Raspberry Pi) with web server was used as control unit and for data recording. The established system was stable for several days and approved for fulfilling all requirements. It is easily expandable for other parameters and can be used for larger systems. By using the Raspberry Pi as a low cost, very energy efficient credit-card sized computer with minimum space requirements the system can serve as an alternative for commercial automation systems.

1. EINLEITUNG

Es gibt schätzungsweise 400.000 verschiedene Algenarten (Norton et al. 1996). Sie besiedeln unterschiedliche (meist aquatische) Lebensräume, sind morphologisch sehr verschieden aufgebaut und lassen sich in Mikro- und Makroalgen unterscheiden. Allen Algen gemeinsam ist die Fähigkeit zum phototrophen Wachstum, d.h. sie nutzen während der Photosynthese die aus dem Sonnenlicht gewonnene Energie zur Biomasseproduktion und binden dabei CO₂. Algen werden biotechnologisch auf vielfältige Weise verwendet, wie beispielsweise als Lebensmittel (in Form von Salat oder

Gemüse), als Energielieferant (Algenkraftstoff), als Dünger, als CO₂-Verwerter, als Biomaterial (Cellulose) sowie als Quelle für Mineralstoffe, Spurenelemente, ungesättigte Fettsäuren oder Beta-Carotine (Milledge 2011, Fernández-Sevilla et al. 2010). Sie stellen eine natürliche, sehr schnell nachwachsende Rohstoffquelle dar, die einen etwa fünf- bis zehnmal höheren Ertrag als landwirtschaftlich genutzte höhere Pflanzen aufweisen. Während produktionsstarke terrestrische Pflanzen, wie z.B. Raps, etwa 4,2 Tonnen verwertbare Biomasse pro Hektar und Jahr produzieren, können 10 bis 30 Tonnen Mikroalgen-Trockenbiomasse pro Hektar und Jahr in offe-

nen Systemen und bis zu 150 Tonnen pro Hektar und Jahr in Photobioreaktoren hergestellt werden (Weyer et al. 2010, Wijffels & Barbosa 2010).

Die grüne Mikroalge *Scenedesmus rubescens* ist in der Lage, die sekundären Carotinoide Lutein und Zeaxanthin zu bilden, die als Nahrungsergänzungsmittel und Lebensmittelfarbstoffe wirtschaftliche Bedeutung haben (Fernández-Sevilla et al. 2010). Die Kultivierung von *S. rubescens* ist einfach in einem Kulturmedium bei konstanter Temperatur und einer definierten Beleuchtungsintensität möglich. *S. rubescens* besitzt ein pH-Optimum bei etwa 7 bis 7,5 (Heinrich 2014); eine Kultivierung in basischeren oder saureren

* korrespondierende Autorin

Milieu führt zu verzögertem Wachstum und verändertem Stoffwechsel der Algen. Da die für den Stoffwechsel essenziellen Nitratmoleküle aus dem Kulturmedium im Symport mit Wasserstoffionen (H^+) aufgenommen werden, führt die Protonenaufnahme durch die Zellen zu einer Anreicherung von OH^- -Ionen, also zu einem pH-Anstieg. Der pH-Wert kann leicht durch CO_2 -Zufuhr gesenkt werden, da in Wasser gelöstes CO_2 mit Hydroxidionen und Wasser Hydrogencarbonationen bildet, welche mit einem weiteren Wassermolekül zu Carbonationen und Hydroxoniumionen reagieren. Letztere dienen als Protonendonatoren, weshalb der pH-Wert sinkt.

Zur Gewährleistung einer optimalen Kultivierung ist entsprechend den vorgenannten Ausführungen eine möglichst genaue Regelung des pH-Wertes notwendig. Abbildung 1 zeigt einen solchen Regelkreis, in dem der pH-Sensor als Messglied der Messgröße pH-Wert dient und pH_{min} sowie pH_{max} die Grenzmaße darstellen. Hier ist angenommen, dass auch eine pH-Wert-Unterschreitung möglich ist, also das Milieu saurer wird. In diesem Fall muss durch Zugabe einer basischen Komponente der pH-Wert angehoben werden. Als Regler fungiert die Zugabe von CO_2 bzw. der entsprechenden Base, wobei eine parameterabhängige Fallunterscheidung durchgeführt wird. Das in Abbildung 1 gezeigte Regelschema symbolisiert eine Zweipunktregelung, also mit Minimal- und Maximalwertprüfung. Die Regelung kann als Proportional- oder On-Off-Regelung umgesetzt werden.

Für die Regelung des pH-Wertes der Algenkultur ist es erforderlich,

1. den ermittelten pH-Wert mit den Stellwerten pH_{min} und pH_{max} zu vergleichen,
2. die Weite sowie die Dauer der Ventilöffnung für die Zugabe von CO_2 (oder Base) zu ermitteln und
3. regelmäßige pH-Wert-Messungen durchzuführen.

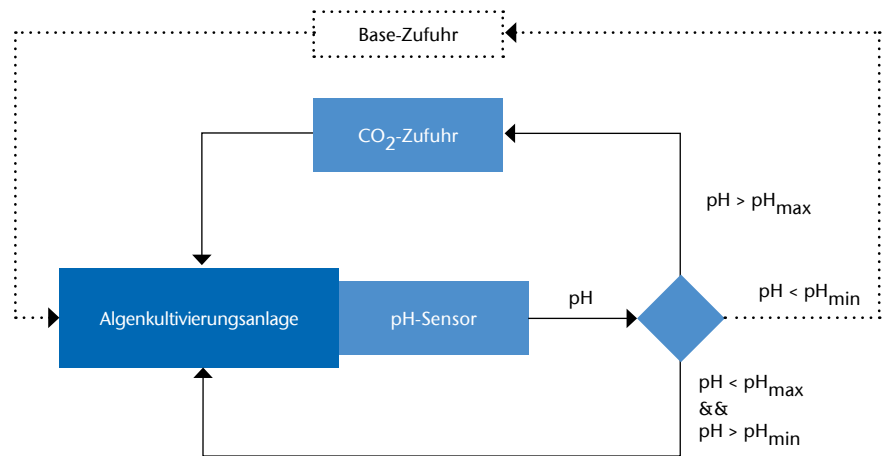


Abb. 1) Schematische Darstellung der Regelung des pH-Wertes einer Algenanlage. Der gemessene pH-Wert wird mit den Stellwerten pH_{min} und pH_{max} verglichen und eine Fallunterscheidung durchgeführt. Im hier beschriebenen Szenario spielt der Regelkreis für einen pH-Wert, der kleiner ist als pH_{min} , keine Rolle, weshalb dieser Weg gestrichelt dargestellt ist.

Die drei oben genannten Punkte können vollautomatisch realisiert werden. Wir zeigen hier ein Automatisierungssystem, mit dem es möglich ist, kostengünstig und autonom Bioprozesse, wie beispielsweise die Kultivierung von Algen zur biotechnologischen Nutzung, zu regeln.

2. MATERIAL UND METHODEN

Die Mikroalge *S. rubescens* wurde in Bold's Basal Kulturmedium bei $30^\circ C$ in 11 Schottflaschen (GLS 80) mit Schraubkappe und vier eingelassenen Ports kultiviert. Über die Ports ist die Gaszufuhr, die Probenahme sowie die Verwendung des Sensors möglich. Die Bestrahlung der Bioreaktoren mit Licht erfolgte von der Rückseite mit einer Beleuchtungsintensität von $50\mu E/m^2 s$. Dem Medium ist Stickstoff in Form von 3mM Natriumnitrat als Stickstoffquelle zugefügt. Abbildung 2 zeigt den Aufbau der Begasungseinheit für drei Reaktoren. Über Magnetventile wird die Zuluft mit CO_2 geregelt. Das Abgas wird in separaten Abfallbehältern mit NaOH geleitet.

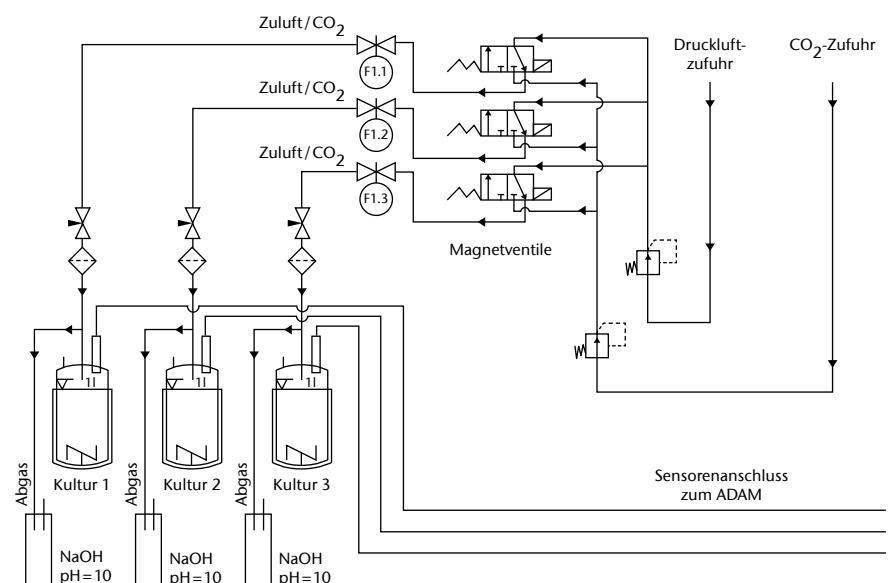


Abb. 2) Darstellung der Begasungseinheit der Algenanlage mit drei Kulturen. Über die Magnetventile wird ein Wechsel zwischen Druckluft und CO_2 -Begasung realisiert. Das Abgas wird in Behälter mit NaOH-Befüllung geleitet. Die pH-Sensoren leiten ihre Signale direkt an das ADAM-System.

Als pH-Sensoren dienen SE515 Memosens-Sensoren der Firma Knick, die über ein induktives Sensor-Stecksystem zur kontaktlosen Datenübertragung sowie einen internen Chip zur Speicherung von Kalibrierdaten verfügen. Der pH-Sensor sendet ein digitales Signal über den gemessenen pH-Wert im Messbereich von pH 0 bis 14 (siehe Abbildung 3). Mit dem SE515-Memosens-Sensor ist neben der pH-Messung auch eine Temperaturmessung über einen zweiten Messkanal möglich. Der direkt angeschlossene Messwandler (Memorail, Firma Knick) wandelt das digitale Sensor-Signal in ein analoges Signal um, welches anschließend mithilfe eines analogen Input-Moduls in ein digitales Signal von 16 Bit gewandelt wird (siehe Abbildung 3). Es handelt sich dabei um das Modul ADAM5017, welches in ein Schnittstellengerät, den ADAM-5000L/TCP (Fa. Advantech), eingebunden wurde. Dieses ist ein Basisgerät für die Wandlung von digitalen und analogen Signalen und bietet Steckplätze für verschiedene Ein- und Ausgangsmodule für unterschiedliche Aufgaben. Das Modul ADAM5017 ist ein Input-Modul mit acht Kanälen, das analoge Signale (elektrische Spannung oder die Stromstärke; hier wurde ein Stromstärkensignal im Bereich von 4 bis 20mA ausgewählt) in digitale Ausgänge zu je 16 Bit umwandelt. Dieses 16-Bit-Signal wird über die interne TCP-Schnittstelle des ADAM-5000L/TCP an einen angeschlossenen Einplatinencomputer gesendet, von welchem über dieselbe Schnittstelle Eingangssignale empfangen werden können (siehe Abbildung 3). Ein weiteres Modul, das diskrete Output-Modul ADAM5069, enthält acht Relais zur Schaltung von Gleichfeldlastkreisen (bei 30V) oder Wechsellastkreisen (bei 250V) bis zu 5A. Damit wird ein direkt gesteuertes 3/2-Wege-Magnetventil (Typ 6012, Fa. Bürkert) geschaltet. Zur Kommunikation wurde der RJ45-Bus über Ethernetverbindung und das Modbus/TCP-Protokoll genutzt. Weitere Schnittstellen sind RS485 und RS232, die hier nicht zum Einsatz kamen. Als Prozessleitsystem für die Steuerung und für die Datenerfassung wird ein kleiner Single-Board-Computer, ein Rasperry Pi (Modell B, Revision 2,

Fa. Rasperry Pi Foundation), verwendet. Dieser Computer enthält einen Broadcom-BCM2835-System-On-A-Chip mit einer 700MHz ARM11-CPU, eine Broadcom VideoCore-IV-Grafikkarte und 512MB SDRAM. Als Betriebssystem dient das Linux-Derivat Debian Wheezy (Raspian). SQLite diente als Datenbanksystem für die Speicherung von Daten und Konfigurationen, als Webserver wurde ein Apache-System verwendet, und zur Erstellung von Webanwendungen die Programmiersprache PHP. Die Signalübertragung zwischen dem Signalwandler und dem Rasperry Pi findet über Ethernet statt, was Übertragungsraten von 10 bis 1000 Megabit pro Sekunde ermöglicht. Es

wurden die Protokolle TCP (Transmission Control Protocol) und UDP (User Datagram Protocol) verwendet, die eine Verbindung zwischen Netzwerkkomponenten in Vollduplex herstellen. Als Kommunikationsprotokoll diente das Modbusprotokoll, für das frei verfügbare PHP-Bibliotheken existieren. Für die Umrechnung zwischen dem digitalen Ausgabesignal des pH-Sensors und dem 2Byte-Ausgabesignal des ADAM5017 Moduls wurde eine Kalibrierkurve erstellt, die den Anstieg der Stromstärke bei zunehmendem pH-Wert beschreibt. Anschließend wurde der Stromstärkenbereich von 4 bis 20mA auf einen 16-Bit-Wertebereich normiert und mit dem Anstieg der Kalibrierkurve verrechnet.

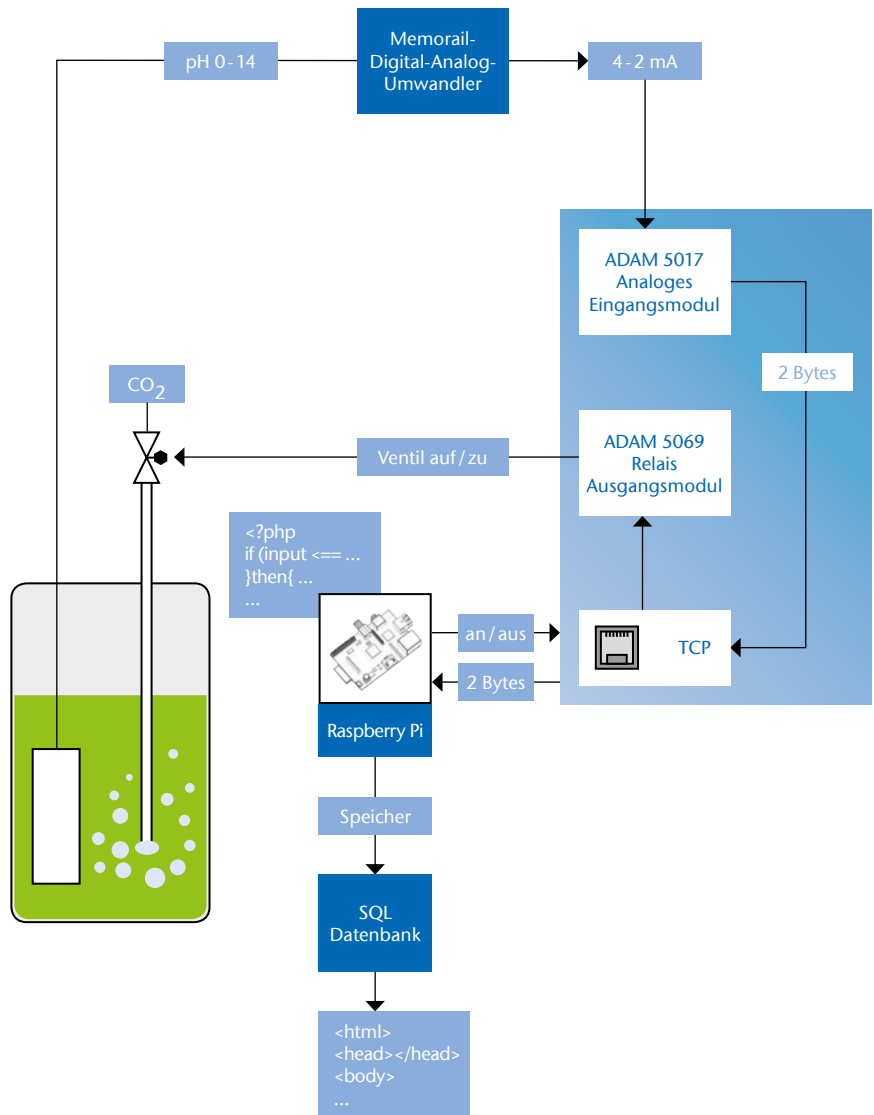


Abb. 3) Aufbau der Bioprocessautomatisierungsanlage zur Regelung des pH-Wertes einer Algenanlage mithilfe eines Prozessleitsystems.

3. ERGEBNISSE

3.1 AUFBAU DES AUTOMATISIERUNGSSYSTEMS

Das dargestellte Steuerungssystem war nach dem Aufbau voll funktionsfähig und arbeitete nach der Übergabe der Konfigurationsdaten völlig autonom. Über einen Zeitraum von zehn Tagen wurden der pH-Wert für zwei verschiedene Kulturen konstant gehalten und Temperatur und pH-Wert in diesem Zeitraum aufgezeichnet und in einer Datenbank gespeichert. Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abbildung 4 gezeigt.

3.2 NORMIERUNG DER SIGNALWANDLUNG

Zunächst wurde die Umrechnung zwischen dem pH-Sensor-Signal in das 16-Bit-Signal (dies entspricht 2 Byte) mit einem Umrechnungsfaktor k_p bestimmt. Dazu wurde die Kalibriergerade zwischen pH-Wert-Signal (Sensor-Signal) und Stromstärke (Memorail-Ausgang) durch Zweipunktkalibrierung mit zwei Pufferlösungen bei pH 4,0 bzw. 7,0 bestimmt. Der Anstieg ergab einen Wert von $k_p = 1,1429$. Der vom Memorail ausgegebenen Wert der Stromstärke I_p , der auf das Intervall von 4 bis 20 mA normiert ist, ergibt sich somit nach Formel (1) wie folgt:

$$1 \quad I_p = pH * k_p + 4$$

Im zweiten Schritt wurde die Intervalltransformation von 4 und 20 mA auf 0 bis 16 Bit berechnet. Hierbei muss der jeweilige Dezimalwert der Binärzahl berücksichtigt werden, sodass das Intervall für das Binärsignal zwischen 0 und 65.535 liegt. Die Intervalltransformation erfolgt nach Formel (2):

$$2 \quad Dez = \frac{Dez_{max} - Dez_{min}}{I_{max} - I_{min}} * (I_p - I_{min}) + Dez_{min}$$



Abb. 4) Versuchsaufbau des Automatisierungssystems. Im Reaktorsystem (links) sind drei Bioreaktoren in 1l-Schottflaschen auf Heizplatten zu sehen. In den luftdicht modifizierten Deckeln befinden sich die Anschlüsse für Druckluft und CO₂ sowie die pH-Sensoren. Das Belüftungssystem (Mitte) umfasst die CO₂-Begasung mit steuerbaren Magnetventilen. Im Steuerungssystem (rechts) sind der Raspberry Pi sowie der ADAM-Messwandler mit den verbauten Modulen zu erkennen.

Die vom ADAM5017-Modul weitergegebene 2 Byte lange Binärzahl kann nach Überführung in eine Dezimalzahl durch Umstellen der Formeln (1) und (2) in den pH-Wert umgerechnet werden.

3.3 PH-WERT-VERÄNDERUNG IN UNGEREGELTEN SYSTEMEN

Für ein unreguliertes System der Algenkultur, d.h. ohne Zufuhr von CO₂, war erkennbar, dass schon nach ca. fünf Stunden pH-Werte größer als 9 erreicht wurden (siehe Abbildung 5). Ab diesem pH-Wert war eine deutliche Verringerung des pH-Anstieges zu verzeichnen, was auf die Wachstumshemmung bei einem für *Scenedesmus rubescens* nicht optimalen pH-Wert zurückzuführen ist, da bei vermindertem Wachstum die Nitrataufnahme und somit die Protonenaufnahme aus dem Medium verringert sind. Somit steigt der pH-Wert nur noch marginal an, er kann aber von der Algenkultur von alleine nicht wieder verringert werden (Lange 2014).

3.4 PH-WERT-VERLAUF IM GEREGELTEN SYSTEM

Die Algenkultur wurde über einen Zeitraum von zehn Tagen mit dem beschriebenen Steuerungssystem betrieben. Die Steuerung erfolgte autonom und war so eingestellt, dass ein pH-Wert von 7,5 nicht überschritten werden sollte. Alle Daten wurden etwa einmal pro Sekunde aufgezeichnet. In Abbildung 6 ist ein Ausschnitt aus dem Verlauf des pH-Wertes gezeigt (Lange 2014). Am Ende des gezeigten Zeitraumes wurde die Regelung abgeschaltet, und ein sehr schneller Anstieg des pH-Wertes ist infolge der Abschaltung zu erkennen. Die Messwerte verdeutlichen, dass der pH-Wert mit dem Automatisierungssystem effektiv reguliert wurde.

pH-Messung in zwei verschiedenen Algenreaktoren Ungeregelttes System

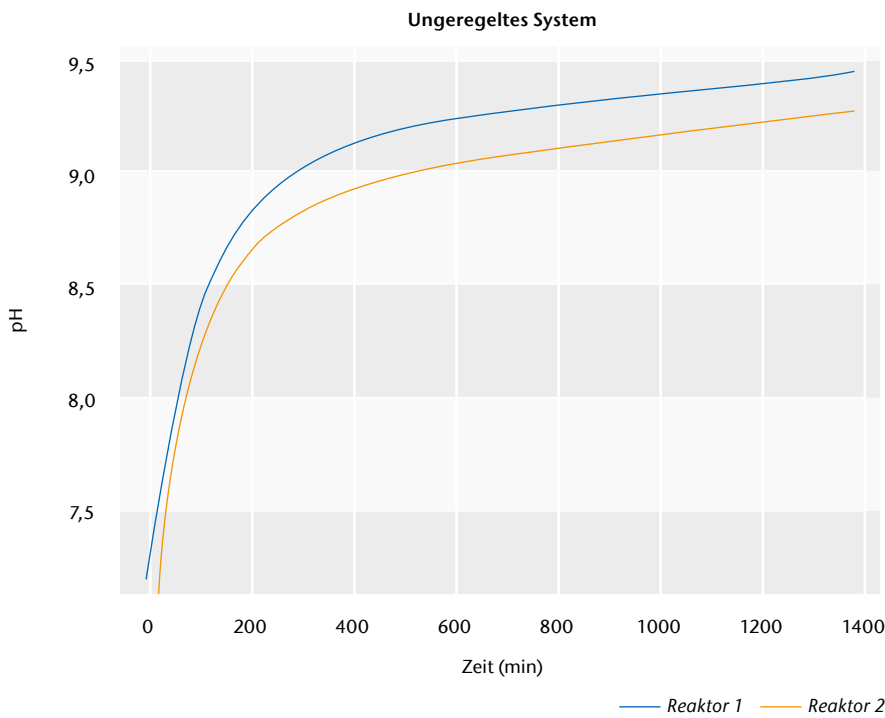


Abb. 5) Verlauf des pH-Wertes einer Algenkultur über 24 Stunden ohne pH-Wert-Regelung, also ohne Zufuhr von CO₂ in den Reaktor. Dargestellt ist eine parallele Messung in zwei verschiedenen Bioreaktoren. Die Algenkulturen befanden sich in der stationären Phase des Wachstums.

pH-Messung in einem Algenreaktor Geregelttes System

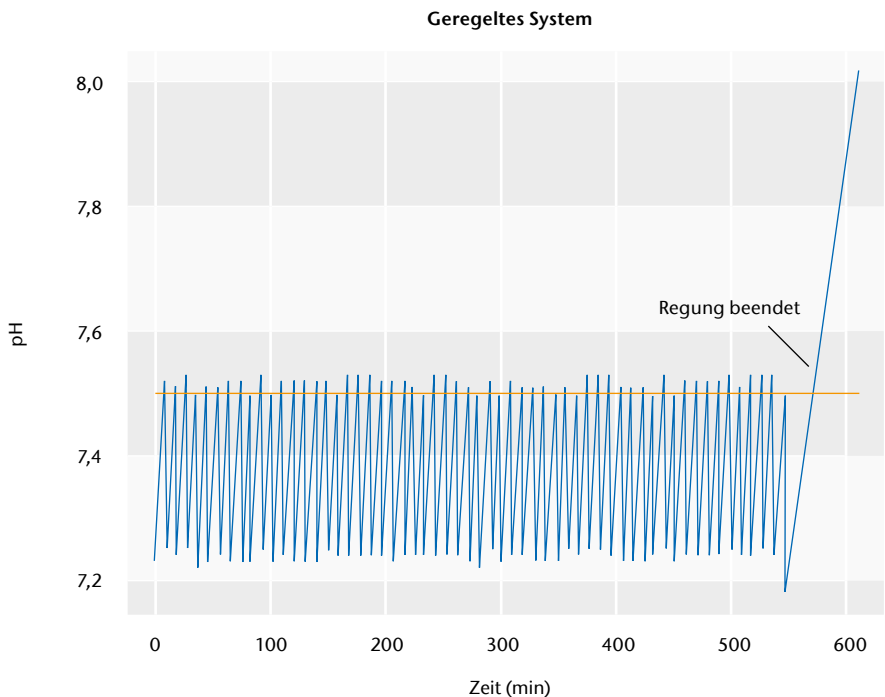


Abb. 6) Darstellung der pH-Messung für das Geregeltte System. Gezeigt ist nur ein Ausschnitt aus dem Verlauf der Messung. Gelb markiert ist hier der Maximalwert des pH-Wertes, welcher nicht überschritten werden sollte. Gekennzeichnet ist mit dem blauen Pfeil weiterhin der Zeitpunkt der Abschaltung der Regelung.

3.5 SOFTWARE

Die entwickelte Software ermöglicht online eine Steuerung des gesamten Systems, die Anpassung von Einstellungen und die Auslagerung von aktuellen Messwerten in eine Speicherdatenbank. Der Zugriff auf die Hauptdatenbank und der Signalfluss zwischen Hauptprogramm und dem Signalwandler sind in Abbildung 7 dargestellt. Vier Hauptfunktionen sind für die Steuerung der Anlage zuständig: Die Funktion 1 schaltet alle Relais aus, in Funktion 2 werden die Signale der ADAM-Module ausgelesen, umgewandelt und an Funktion 3 übergeben. Diese vergleicht die Werte mit dem vorgegebenen Maximalwert und schaltet bei Überschreitung des maximal erreichbaren Wertes die Relais für die Magnetventile zur Belüftung mit CO₂ ein. Hier ist erkennbar, dass nur eine Einpunktregelung zum Einsatz kam, also die Abfrage nach Überschreiten eines Maximalwertes. Die sich anschließende Funktion 4 koordiniert die Speicherung der Messwerte in der Datenbank (Heinrich 2014). Die Kommunikation der Webapplikation mit der Datenbank ist in der Abbildung 8 zusammenfassend dargestellt. Die Hauptdatenbank enthält folgende drei Tabellen: (1) die Messwerte mit Datum, Uhrzeit, Kanalnummer und Messwerttyp, (2) die Kerndaten mit den Device-Nummern, der IP-Adresse und dem Messzeitabstand sowie (3) die ADAM-Daten mit Kanaladresse, Art der Messung, den Umrechnungsfaktor aus der Kalibrierung, den zu verwendenden Maximalwert, die Relaisadressen sowie die Länge der Öffnungszeit der Ventile (Heinrich 2014). Die Webapplikation wurde in HTML und PHP erstellt und ermöglicht die Abfrage des aktuellen Programmstatus, die Eingabe kennzeichnender Attribute wie der Kulturbezeichnung, die Änderung ausgewählter Steuerparameter (Messzeitabstand, pH-Maximalwert, Umrechnungsfaktor, Ventilöffnungszeiten), die ADAM-Konfiguration (Zuordnung der Kanäle zu den jeweiligen Mess- und Steuersystemen) sowie die Überführung der Hauptdatenbank in eine Speicherdatenbank oder das Löschen von Daten (Heinrich 2014).

Während der Laufzeit des Programms wurden ca. 85.000 Messwerte gespeichert, wobei zu allen Zeitpunkten für jeden Bioreaktor sowohl der pH-Wert als auch die Temperatur aufgezeichnet wurden. Dies entsprach einer Datenbankgröße von

weniger als 4 MB. Im Raspberry Pi ist eine Speicherkapazität von 30 GB verfügbar, sodass das Programm in dem beschriebenen Aufbau mit zwei Reaktoren nicht an die Grenze des verfügbaren Speichers kommen wird. Werden mehr ADAM-Kanäle genutzt

oder das Messintervall verringert, wird sich die Größe der Datenbank erhöhen, doch kann abgeschätzt werden, dass die Speicherkapazität keinen limitierenden Faktor des Steuerungssystems darstellt.

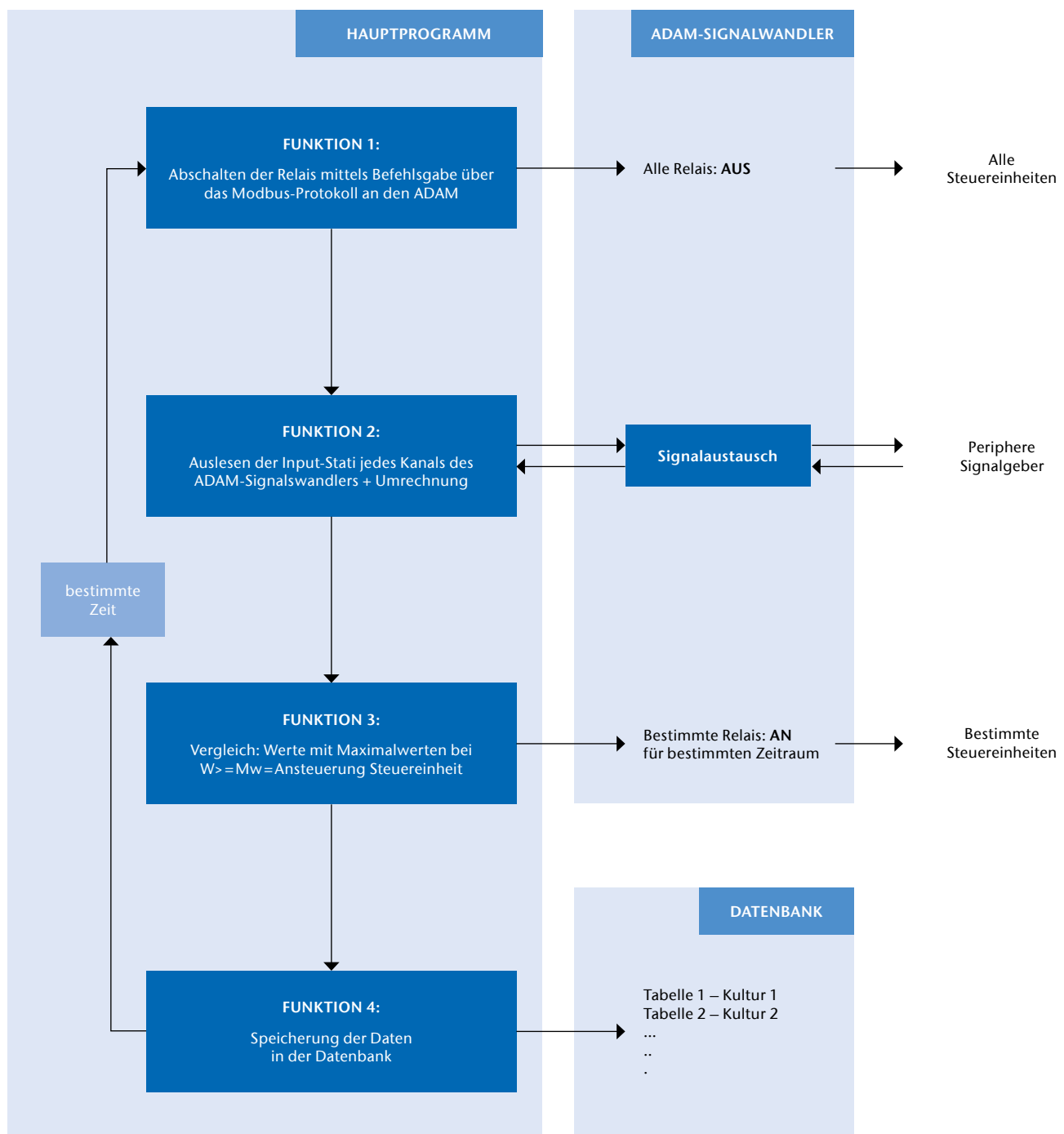


Abb. 7) Ablauf der Aufrufe der Funktionen im Hauptprogramm und deren Interaktionen mit dem ADAM-Signalwandler sowie mit der Datenbank, die über vier Funktionen des Hauptprogrammes gesteuert werden. Die genauere Beschreibung zu den Funktionen findet sich im Text.

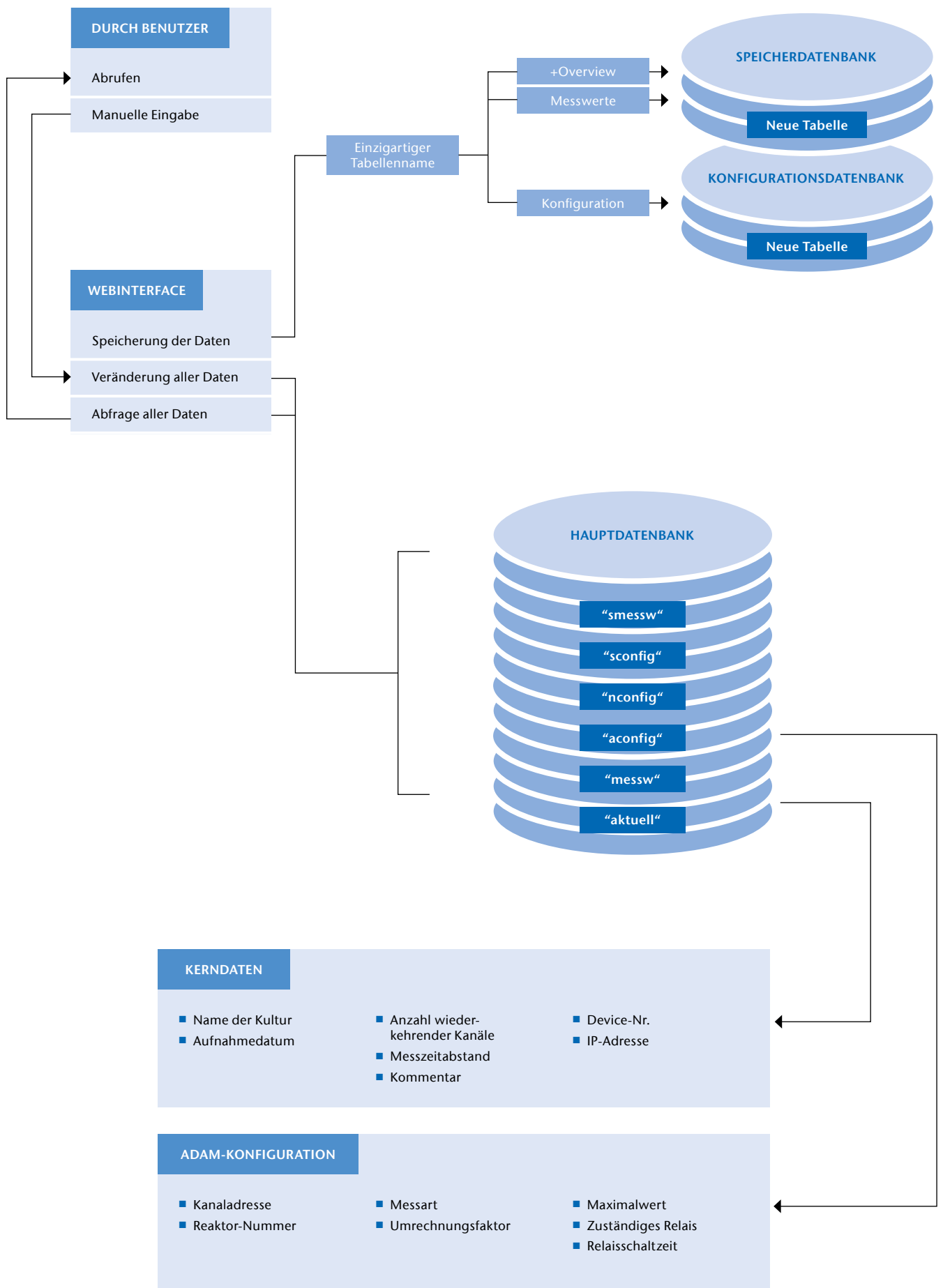


Abb. 8) Darstellung der Kommunikation des Hauptprogramms mit den drei Datenbanken der Software (Hauptdatenbank, Speicherdatenbank, Konfigurationsdatenbank). Gezeigt sind die wichtigsten Attribute der Datenbanken sowie der Zugriff aus der Webapplikation.

4 DISKUSSION

Die Massenproduktion von Algen erfolgt in großflächigen landwirtschaftlichen Anlagen von 10 bis 100 ha Fläche mit etwa 3 bis 30 Photobioreaktoreinheiten pro ha. Das Problem der Anlagen- bzw. Prozessüberwachung ist bislang ungelöst. Zwar stehen prinzipiell geeignete Mess- und Regeleinrichtungen für Bioreaktoren oder Kläranlagen zur Verfügung, doch sind diese für die zahlreichen Einzelanlagen bei Algenplantagen mit einem minimalen Stückpreis von 1.500 bis 2.000 Euro viel zu teuer. Mit dem hier vorgestellten System wurde eine kleine dezentrale Mess- und Regeleinheit entwickelt, die bei einem Einzelpreis von weniger als 300 Euro sowohl einfache pH-Regelaufgaben erfüllt als auch Daten aufzeichnen und an eine zentrale Leitwarte übermitteln kann. Damit ist eine Nutzung auch außerhalb von biologischen Laboren möglich, beispielsweise bei großtechnischen Freifeldanlagen. Durch die Realisierung der Kommunikation über eine Webapplikation ist Ortsunabhängigkeit gegeben, da lediglich ein Zugriff auf das Internet ermöglicht werden muss. Das Automatisierungssystem war voll funktionsfähig, und alle Komponenten haben bisher ihre Ausfallsicherheit bewiesen. Es konnte mit dem hier vorgestellten Aufbau autonom und zuverlässig der pH-Wert auf einem festgelegten Wert geregelt werden. Zur Verbesserung und Erweiterung des Systems sollte als nächster Schritt die Länge der Öffnungszeiten der Ventile nicht mehr fest vorgegeben sein, sondern als Proportionalregelung realisiert werden. Wird solch ein Regelungsansatz verwendet, wird die Ventilöffnungszeit von der Differenz des gemessenen pH-Wertes zum Soll-pH-Wert abhängig gemacht, wodurch weniger Schaltvorgänge in den Ventilen erforderlich sind und ein Überschwingen des Sollwertes vermieden wird. Auch eine Erweiterung der bisher vorliegenden Einpunktsteuerung auf eine Zweipunktsteuerung sollte berücksichtigt werden. Damit kann nicht nur ein Maximalwert, sondern auch ein Minimalwert vorgegeben werden, so wie dies in der Abbildung 1 gezeigt ist. Dies ermöglicht die Nutzung der Anlage für

weitere biologische Objekte und die Integration anderer Messparameter. Eine Steuerung der Temperatur war in diesem System bereits integriert. Hierzu wurde die Temperatur über den pH-Sensor ermittelt und eine elektrische Heizplatte bei Bedarf eingeschaltet. Allerdings erwies sich die Temperatursteuerung als fehleranfälliger als die pH-Steuerung, da es durch den Aufbau in Kulturschränken und die große Abwärme der Lampen bei geschlossenen Türen zu Hitzestau kam und eine Kühlung, wie z. B. durch ein Peltier-Element, in diesem Regelsystem bisher nicht integriert ist. Das System ist modular aufgebaut, und alle Geräte sind untereinander vollständig kompatibel. Durch die Integration weiterer Module kann die Anlage vielfältig eingesetzt und um zahlreiche digitale und analoge Ein- und Ausgänge erweitert werden. Bisher sind nur 6 der 24 Kanäle der Analog-Digital-Wandler-Module belegt, sodass die Möglichkeit für 18 weitere Sensoren, wie z. B. Sauerstoffelektroden oder lichtempfindliche Sensoren, besteht. Das vorgestellte System kann somit auch für die automatische Analytik verwendet werden und ist nicht nur für sensorische und regulatorische Anwendungen ausgelegt. Das Relaismodul des ADAM5000L/TCP ist mit der vorgestellten Konfiguration noch nicht vollständig belegt und wird künftig die Steuerung von Peltier-Elementen übernehmen, um für die korrekte Temperierung der Algenanlage zu sorgen. Weiterhin ist die Integration einer Pumpe denkbar, wodurch ein automatisiertes Fraktioniersystem aufgebaut und die Nutzung der Reaktoren im Fed-Batch-Prozess realisiert werden kann. Da so eine kontinuierliche Nährstoffzugabe im optimalen Konzentrationsbereich möglich wäre, sind in einem solchen Verfahren höhere Wachstumsraten erreichbar. Der Raspberry Pi ist eine weitere ausbaufähige Komponente zur Erweiterung der Anlage. So besteht die Möglichkeit, an den Displayport ein Kameramodul zur Überwachung des Wachstumsfortschrittes oder an den GPIO-Port ein Display anzuschließen.

LITERATUR

- Fernández-Sevilla JM, Ación Fernández FG, Molina Grima E (2010) Biotechnological production of lutein and its applications. *Appl Microbiol Biotechnol* 86(1):27–40. doi: 10.1007/s00253-009-2420-y
- Heinrich M (2014) Entwicklung eines Automatisierungssystems zur Messung und Auswertung von parametrischen Daten aus Bioreaktoren mittels eines Einplatinencomputers. Bachelorarbeit, Technische Hochschule Wildau
- Lange T (2014) Hardwareimplementierung eines Automatisierungssystems für Messung und Regelung des pH-Wertes mittels eines Einplatinen-Computers. Bachelorarbeit, Technische Hochschule Wildau
- Milledge JJ (2011) Commercial application of microalgae other than as biofuels: a brief review. *Rev Environ Sci Biotechnol* 10(1):31–41. doi: 10.1007/s11157-010-9214-7
- Norton TA, Melkonian M, Andersen RA (1996) Algal biodiversity. *Phycologia* 35(4):308–326. doi: 10.2216/i0031-8884-35-4-308.1
- Weyer KM, Bush DR, Darzins A, Willson BD (2010) Theoretical Maximum Algal Oil Production. *Bioenerg Res* 3(2):204–213. doi: 10.1007/s12155-009-9046-x
- Wijffels RH, Barbosa MJ (2010) An outlook on microalgal biofuels. *Science* 329:796–799. doi: 10.1126/science.1189003

AUTOREN

- Moritz Heinrich, B. Sc.**
Technische Hochschule Wildau
Biosystemtechnik/Bioinformatik
- Tobias Seydewitz, B. Sc.**
Technische Hochschule Wildau
Biosystemtechnik/Bioinformatik
- Prof. Dr. Franz Xaver Wildenauer**
Technische Hochschule Wildau
Institut für Angewandte Biowissenschaften
Bioprozesstechnik
franz.wildenauer@th-wildau.de
- Prof. Dr. Heike Pospisil**
Technische Hochschule Wildau
Institut für Angewandte Biowissenschaften
High Performance Computing in Life Sciences
heike.pospisil@th-wildau.de

Automatisierung des Bio-Plex Pro™-Analyseverfahrens

Karolin Keil, Lars Radke, Ulrich M. Tillich, Marcus Frohme*

Zusammenfassung

Für den simultanen Nachweis mehrerer Analyten innerhalb einer Probe ist die Bead-basierte Multiplexanalytik ein häufig verwendetes Verfahren und wird beispielsweise zur Quantifizierung von Proteinen genutzt. Die aufwendige Durchführung der Assays soll durch Automatisierung einerseits dem Anwender abgenommen werden, während andererseits die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Analyse gesteigert wird. Die Automatisierung des Bio-Plex Pro™ Assays ist mit dem Pipettierroboter Tecan Freedom EVO 200 umgesetzt worden. Es ist ein Skript mit der Software Freedom EVOware® entwickelt worden, welches die Probenvorbereitung des Assays vollständig übernimmt. Für einen Vergleich der manuellen und automatisierten Methode sind die humanen Zytokine IL-2, IL-4, IL-10, GM-CSF, IFN- γ und TNF- α in einer achtstufigen Standardverdünnungsreihe und in unterschiedlich konzentrierten Proben gemessen worden. Die Berechnung der Streuungen (Standardabweichung und Variationskoeffizient) der einzelnen Standardverdünnungsreihen sowie der Vergleich von gemessenen und erwarteten Konzentrationen der automatisierten und manuellen Methode zeigen, dass die Automatisierung neben der zeitlichen Optimierung auch die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Analyse verbessert.

Abstract

Bead-based multiplex analysis is frequently used for the simultaneous detection of multiple analytes within a sample. Such assays are commonly used to quantify proteins. The automation of the process relieves the user from the complex assay conductance and on the other hand increases the accuracy and reproducibility of the analysis. The automation of the Bio-Plex Pro™ assay has been successfully implemented with the pipetting-robot Tecan Freedom EVO 200. A script has been developed, using the Freedom EVOware® which has the ability to perform the complete assay procedure. For a comparison between manual and automated methods, the human cytokines IL-2, IL-4, IL-10, GM-CSF, IFN- γ and TNF- α were analysed by an eight-point standard dilution series and with samples of different concentrations. The calculation of the variances (standard deviation and coefficient of variation) of the single standard dilution series as well as the comparison of the observed and expected concentrations of the manual or automated method show the higher precision and reproducibility of the automated process in addition to its time-saving nature.

1. EINLEITUNG

Für biochemische Analyseverfahren werden häufig Detektionsmoleküle, wie beispielsweise Antikörper, an Partikel (sogenannte *Beads*) gekoppelt. Zum Einsatz kommen ebenfalls oft Multititerplatten mit meist 96 oder 384 Reaktionskavitäten (sogenannte *wells*), es gibt heute jedoch bereits Multititerplatten mit bis zu 3456 Wells pro Platte (Wölcke & Ullmann 2001). Bei der chemischen und biologischen Analytik, in der Forschung, der Qualitätskontrolle oder beim Arbeiten mit gefährlichen Substanzen wird zu-

nehmend auch die Automatisierung eingesetzt, sodass in immer mehr automatisierten Prozessen eine steigende Anzahl an Analysen, vor allem bei Horchdurchsatzverfahren bearbeitet werden (Franzen 1986). Im Labor können ganze Prozessketten von der Probenvorbereitung bis hin zur Datendokumentation oder nur die einzelnen Arbeitsschritte automatisiert werden. Dementsprechend kann dann zum Beispiel die manuelle Probenvorbereitung, die häufig das schwächste Glied einer Methode ist, als Fehlerquelle eliminiert werden (Schäfer 2000). Für das Automatisieren einer kompletten

Methode benötigt man ein System (zum Beispiel einen Pipettierroboter im Analytikbereich), das sich programmieren lässt und die Arbeitsschritte der Methode selbstständig nacheinander abarbeitet. Infolgedessen sollten Reproduzierbarkeit und Genauigkeit maximiert und Zeit für andere Arbeiten geschaffen werden (Tecan 2014). Eine automatisierbare Anwendung aus dem Bereich Multiplex-Analytik ist der Bio-Plex Pro™ Assay, durch den gleichzeitig mehrere Protein-Biomarker in einem Well einer 96-Well-Platte quantitativ bestimmt werden. Momentan bieten die Luminex-xMAP-Beads, mit

100 fluoreszenzoptisch unterscheidbaren Bead-Spezien, die höchste Vielfalt (Probst & Kroder 2007). Dabei handelt es sich um einen Immunoassay zur Untersuchung von Zytokinen, Chemokinen und Wachstumsfaktoren. Das grundsätzliche Verfahren ist hierbei dem eines Sandwich-ELISA, einer sensitiven und reproduzierbaren Standard-Methode, analog (Voller et al. 1978). Es kommt zuerst zu einer Reaktion zwischen magnetischen Beads und den Biomarkern, wobei diese an spezifische Antikörper auf den Beads binden (Abb. 1). Durch mehrere Waschschriffe werden ungebundene Proteine entfernt und es wird schließlich ein Detektionsantikörper hinzugegeben. Dadurch erfolgt die Bildung eines Sandwich-Komplexes, an den ein roter Fluoreszenzindikator gekoppelt wird. In einem Bio-Plex-System (oder einem gleichartigen Luminex-basierten Reader) wird die Messung durchgeführt. Die Daten werden als Median Fluorescence Intensity (MFI) und mithilfe einer Standardkurve als Konzentration in pg/µl ausgegeben. Die Konzentration des Bead-gebundenen Analyten verhält sich proportional zu der MFI (Bio-Rad Laboratories 2013). Mit dem Pipettierroboter Tecan Freedom EVO 200 soll dem Anwender die Probenvorbereitung und die Durchführung des Assays vollständig abgenommen werden. Hierbei handelt es sich um eine Liquid-Handling-Workstation, die neben einem Liquid Handling Arm (LiHA) zum Pipettieren von Flüssigkeiten und Suspensionen auch über einen Robotic Manipulation Arm (ROMA) verfügt, welcher der Bewegung von Multititerplatten dient. Durch den Einsatz eines Pipettierroboters kann eine große Anzahl an Proben bzw. Reaktionsansätzen parallel, miniaturisiert, reproduzierbar und kostengünstig bearbeitet werden (Mayr & Fuerst 2008). Der Roboter wird über die Software EVOware 2 standard gesteuert, welche über alle Befehle zur Steuerung der Roboterarme verfügt und auch die Integration neuer Carrier (Halterungen) und ihrer zugelassenen Labware (Laborutensilien) ermöglicht. Das mit der EVOware etablierte Skript umfasst die einzelnen Schritte des Assays, wobei mithilfe von Variablen und Subroutinen die essenzielle Variabilität gewahrt wird. Dazu gehören die

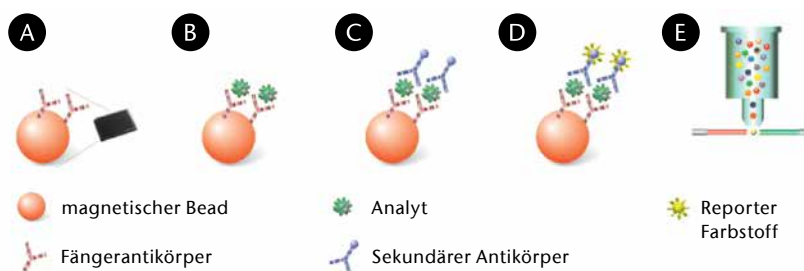


Abb. 1) Darstellung der Funktionsweise eines Bio-Plex Pro™ Assays in einzelnen Schritten. Zwischen jedem Schritt finden wiederholte Waschschriffe statt, um ungebundene Moleküle und Partikel zu entfernen. A) Magnetische Beads (Orange) mit Fängerantikörpern auf der Oberfläche werden in die Wells einer Mikrotiterplatte gegeben. B) Die Analyten (meist Proteine) in den Proben binden spezifisch an die Fängerantikörper. C) Ein zweiter spezifischer Fängerantikörper wird in die Wells gegeben und bindet ebenfalls an den Analyten und bildet einen Sandwich-Komplex. D) Ein zugegebener Fluoreszenzfarbstoff bindet als Reportermolekül an die sekundären Antikörper. E) Die Bead-Komplexe werden einzeln nacheinander analysiert. Dabei werden Beadsorte (und damit der jeweilige Analyt) identifiziert und die Menge an Reportermolekülen quantifiziert [Abbildung bearbeitet nach 4].

Anzahl der verwendeten Typen von Beads und Antikörpern, sowie die zu untersuchende Probenanzahl in Einfach- und Doppelbestimmung. Durch die Automatisierung des Bio-Plex Pro™ Assays sollen die aufwendige manuelle Probenvorbereitung sowie ihre Fehleranfälligkeit reduziert werden und die Reproduzierbarkeit gesteigert werden. Die außerdem gewonnene Zeit kann genutzt werden, um sich Mehrwertaufgaben und der Datenauswertung widmen zu können.

2. MATERIAL UND METHODEN

Die Automatisierung für die Probenvorbereitung des Assays am Pipettierroboter Tecan Freedom Evo 200 ist mit der Software Freedom EVOware® standard 2.0 anhand des *Bio-Plex Pro™ Assays – Cytokine, Chemokine, and Growth Factors Instruction Manual* (vom 28.01.2013) von Bio-Rad etabliert worden. Dafür sind auf dem Arbeitsbereich des Pipettierroboters die HydroFlex™-Waschstation und die nötigen Carrier (Halterungen) für Laborutensilien (wie z. B. Reaktionsgefäße) integriert worden. Für die Durchführung des Assays, sowohl manuell als auch automatisiert, sind verschiedene Fertigungssysteme verwendet worden (Bio-Plex® Validation Kit 4.0, Bio-Plex Calibration Kit, Bio-Plex Pro™ Reagent Kit). Die Messung erfolgt mit dem Bio-Plex® 200 (Bio-Rad) unter Verwendung der Software Bio-Plex Manager 6.1. Mittels Bio-Plex® 200 können bis zu 100 verschiedene Analyten in einer Probe analysiert werden. Der Assay wird auf einer Mikrotiterplatte im

96-Well-Format durchgeführt, sodass neben einer Standardreihe Platz für bis zu 72 Proben ist. Um diese Variabilität mit der automatisierten Methode abbilden zu können, werden die Probenanzahl und die Anzahl an Beadsorten abgefragt. Für die Auswahl der Anzahl an Beads und Detektionsantikörpern werden im Skript Subroutinen verwendet. Über Variablen wird die Menge zu pipettierender Lösungen (Bead-Suspension, Antikörperlösungen und Fluoreszenzfarbstoff) an die Probenanzahl angepasst. Des Weiteren können Proben zur Erhöhung der Messsicherheit in Replikaten gemessen werden. Nach vollständiger Implementierung des Skripts (d. h. Fehlerkorrektur und Optimierung einzelner Schritte) wird der Assay manuell und automatisiert durchgeführt. Dabei werden eine achtstufige Standardverdünnungsreihe in Doppelmessung und zwei Proben unterschiedlicher Konzentration in Dreifachmessung betrachtet. Die Proben wurden aus dem gelösten Standard in den Verdünnungen 1:1500 (C1) und 1:30 (C2) hergestellt. Auf diese Weise wird die Messgenauigkeit im mittleren und niedrigen Messbereich bestimmt, dem die Proben zugeordnet werden können.

3. ERGEBNISSE

Zunächst wird der zeitliche Aufwand zwischen der manuellen und automatisierten Methode verglichen (Abb. 2). Dafür werden die Gesamtdauer des Assays, die Inkubationszeit, die Messzeit und die Zeit, die der Anwender selbst aktiv arbeiten muss, betrachtet.

Die Messzeit und die Inkubationszeit können durch die Automatisierung nicht verkürzt werden. Allerdings kann der aktive Arbeitsaufwand deutlich verringert werden. Je nachdem wie geübt der Anwender ist, werden zwei bis drei Stunden bei der manuellen Durchführung benötigt. Der Pipettierroboter benötigt für alle Arbeitsschritte nur eine Stunde. Für den Anwender beträgt in der automatisierten Methode die aktive Arbeitszeit sogar nur eine halbe Stunde, in welcher der Roboter vorbereitet, gestartet und zwischenzeitlich kontrolliert werden muss.

Die Gesamtdauer der automatisierten Methode ermöglicht somit eine Zeitersparnis von einer Stunde gegenüber der manuellen Durchführung. Die aktive Arbeitszeit wird sogar um zwei Stunden verkürzt, dies entspricht einer Einsparung von 23% bzw. sogar 80%.

Als nächstes wurde die Präzision eines automatisierten und zwei manuell durchgeführter Assays verglichen. Hierfür werden die pipettierten Volumina (letztlich Konzentrationen in pg/µl) gegenüber den gemessenen Fluoreszenzintensitäten aus den achtstufigen Standardverdünnungsreihen doppelt-logarithmisch dargestellt (Abb. 3–5).

Beim manuellen Assay eines ungeübten Anwenders sind größere Standardabweichungen besonders deutlich im Bereich der geringsten Konzentrationen zu erkennen. Dabei weisen IL-2 und IL-4 die geringsten Abweichungen auf und TNF-α sowie GM-CSF die höchsten (Abb. 3A). Das Ergebnis eines erfahrenen Anwenders zeigt eine deutliche Verbesserung in der Präzision gegenüber dem ungeübten Anwender (Abb. 3B). Dennoch fallen auch hier die größeren Standardabweichungen im Bereich der kleinsten pipettierten Volumina auf (entsprechend den Konzentrationen bei IL-2 und IL-4). Die automatisierte Durchführung zeigt die geringsten Standardabweichungen (Abb. 3C), jedoch auch hier mit der größten Abweichung bei der kleinsten pipettierten Menge (entsprechend der geringsten Konzentration TNF-α).

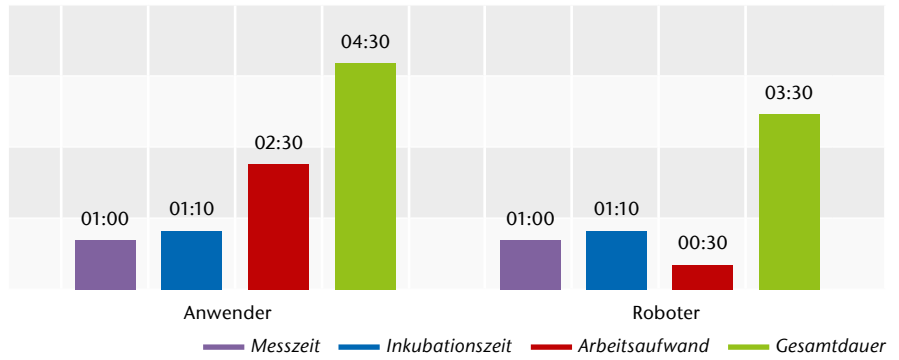


Abb. 2) Vergleich des zeitlichen Aufwands für die manuelle Durchführung des Prozesses und die Automatisierung (Zeitangabe in h). Die Gesamtdauer der automatisierten Methode bringt eine Zeitersparnis von einer Stunde gegenüber der manuellen Durchführung. Die aktive Arbeitszeit wird sogar um zwei Stunden verkürzt.

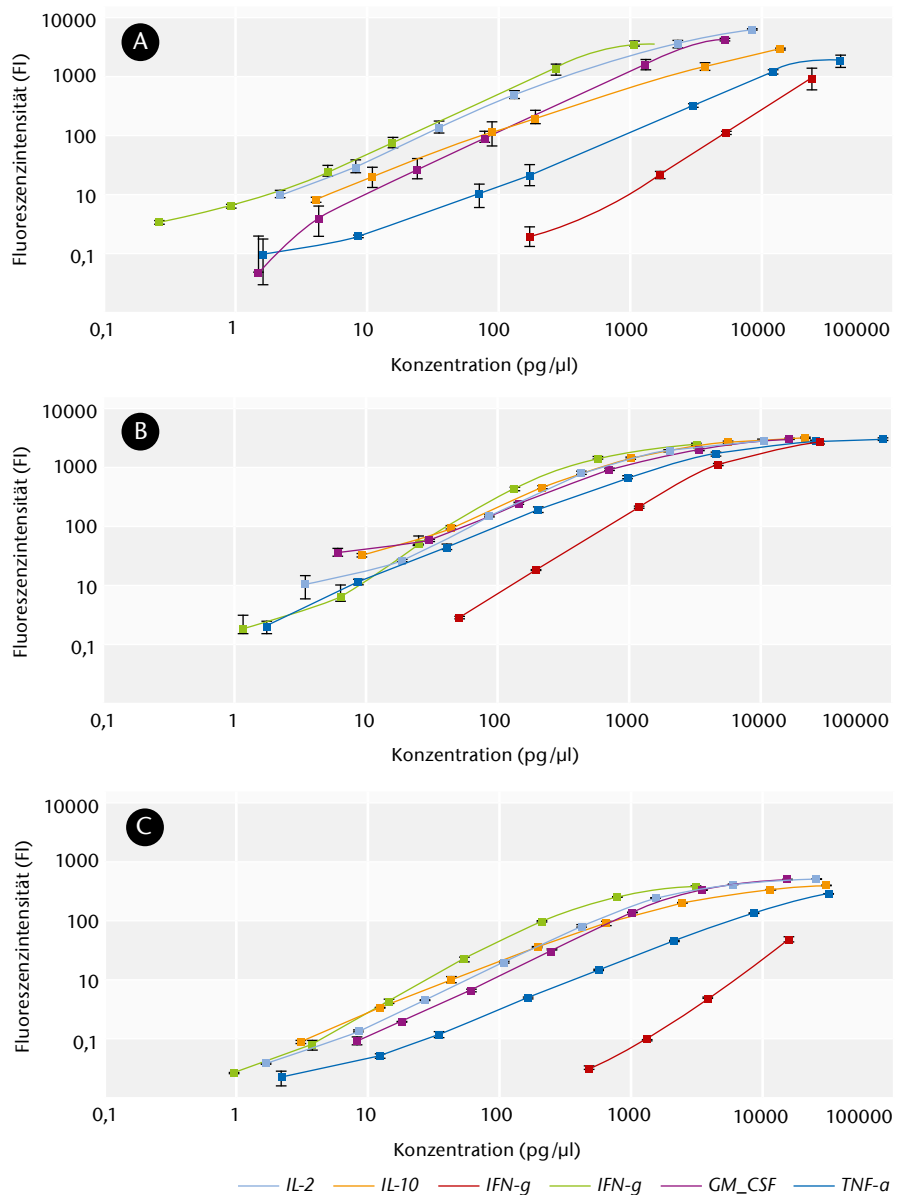


Abb. 3) Dargestellt sind die gemessenen Konzentrationen [pg/µl] einer achtstufigen Standardverdünnungsreihe gegenüber der gemessenen Fluoreszenzintensität (doppelt-logarithmisch). Die Standardabweichungen werden als Fehlerindikatoren (schwarz) dargestellt. A) Assay wird durch einen ungeübten Anwender manuell durchgeführt. Größere Streuungen treten insbesondere in den unteren Messbereichen der Analyten GM-CSF und TNF-α auf. Aufgrund eines Fehlers werden die Werte der vierten Verdünnungsstufe (zwischen 100 und 1000 pg/µl) nicht dargestellt. B) Assay wird manuell von einem geübten Anwender durchgeführt. Die Standardabweichungen sind geringer als bei einem ungeübten Anwender. Allerdings treten auch hier sichtbare Streuungen im Bereich der kleinsten pipettierten Volumina bzw. Konzentrationen auf. C) Automatisierter Assay mit sehr geringen Standardabweichungen bei allen Messwerten.

Da die Standardabweichung nicht normiert ist, werden die Variationskoeffizienten (%CV) der manuellen und automatisierten Prozesse miteinander verglichen. Der %CV gibt die Standardabweichung als prozentualen Wert bezogen auf den Mittelwert der Messwerte an. Die acht Konzentrationen (S1–S8) der Standardverdünnungsreihe sind gegen die Analyten in einem Dotplot aufgetragen (Abb. 4), wobei die Größe der Fläche mit dem %CV korreliert.

Die größten Werte nimmt der Variationskoeffizient bei der manuellen Durchführung durch den ungeübten Anwender an. Hier liegt der höchste Wert bei 38,82% (S1/(1)) während der Roboter den kleinsten Wert mit 0,22% (S1/(3)) erreicht.

Zusätzlich ist der Durchschnitt des %CV der einzelnen Anwender und des Roboters ermittelt worden. Dabei zeigt sich, dass ein erfahrener Anwender (mittlerer %CV von 5,16) eine deutlich geringere Abweichung erreicht als ein unerfahrener (mittlerer %CV von 13,18). Die geringste mittlere Streuung wurde mit der automatisierten Durchführung erhalten (mittlerer %CV 3,95).

Schließlich wurden die gemessenen Konzentrationen der hergestellten Proben der automatisierten und manuellen Durchführung den Erwartungswerten gegenübergestellt (Abb. 5). Hierbei wird deutlich, dass die Ergebnisse der automatisierten Durchführung näher an den erwarteten Konzentrationen liegen als die bei einer manuellen Ausführung.

4. DISKUSSION

Für die Beurteilung des Nutzens einer Automatisierung des Bio-Plex Pro™-Analyseverfahrens wurden sowohl technische Aspekte, wie die Messgenauigkeit, als auch die Zeitersparnis untersucht.

Beim Vergleich des zeitlichen Aufwands für den manuell durchgeführten mit dem automatisierten Prozess konnte gezeigt werden, dass sich die Automatisierung des Verfahrens lohnt. Sowohl die Gesamtdauer für die Durchführung des Assays als auch die Zeit, in der der Anwender selbst aktiv ist, wurden erheblich reduziert. Der

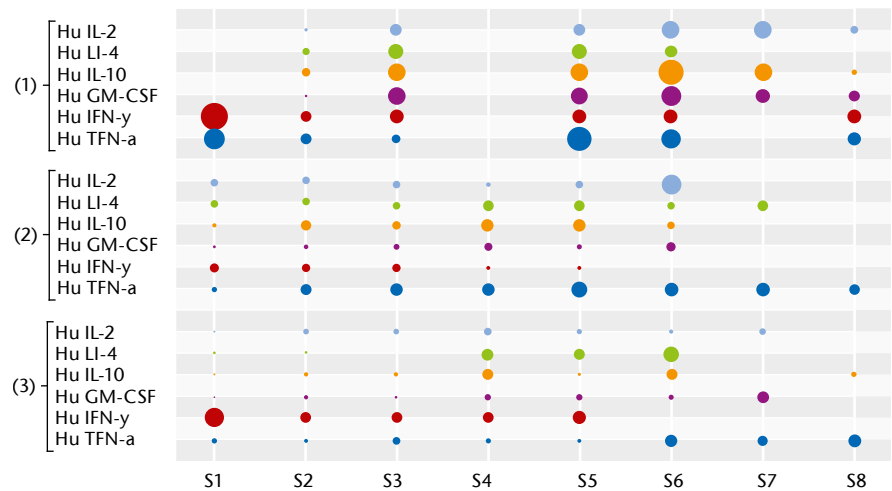


Abb. 4) Vergleich der Variationskoeffizienten (%CV) der beiden manuellen gegenüber der automatisiert hergestellten Standardverdünnungsreihe. Die Variationskoeffizienten %CV werden über die Fläche der Punkte dargestellt. Dargestellt sind die manuellen Versuchsdurchführungen des ungeübten Anwenders (1), des geübten Anwenders (2) und des automatisierten Versuchs (3). Im manuellen Versuch (1) können erneut die Werte für S4 aufgrund eines Fehlers nicht berechnet werden. Weitere nicht dargestellte %CV konnten nicht berechnet werden, da bei der Messung der jeweiligen Konzentrationsstufe die untere oder obere Nachweisgrenze überschritten wurde oder eine der Replikatmessungen ausgefallen ist.

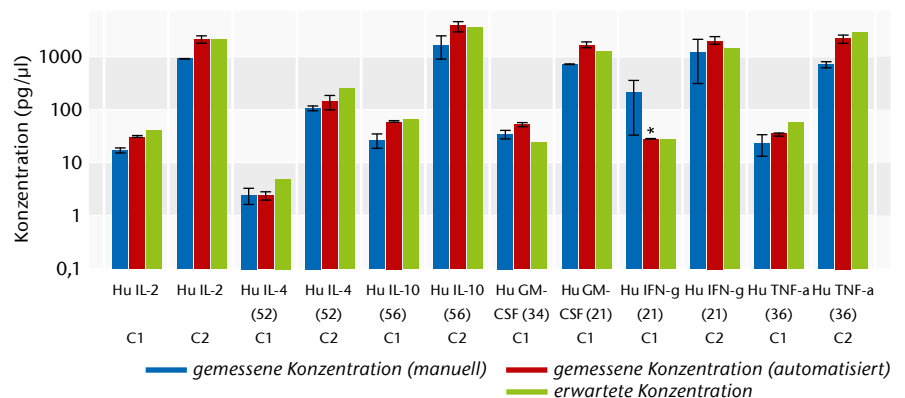


Abb. 5) Die gemessenen Konzentrationen aus dem manuellen und automatisierten Versuch im Vergleich zu der erwarteten Konzentration. Die Konzentrationen wurden logarithmisch aufgetragen. Zusätzlich wurden die Standardabweichungen der gemessenen Konzentrationen als Fehlerindikatoren (schwarz) eingefügt. * IFN-gamma ist nur in Einfachmessung bestimmt worden.

Anwender muss anstatt 2,5 Stunden Arbeitsaufwand nur ca. 0,5 Stunden investieren, da der Roboter die restliche Zeit selbstständig arbeitet. Dadurch wird dem Anwender mit der Automatisierung mehr Zeit verschafft, in der er sich mit anderen Aufgaben befassen kann. Selbst wenn der Anwender nicht sofort nach Beendigung des Skripts zur Stelle ist, wird der Assay mit einem lichtundurchlässigen Deckel auf einem Schüttler gelagert, sodass es zu keiner Beeinträchtigung der lichtsensitiven Fluoreszenzfarbstoffe kommt oder sich die Bead-Analyt-Komplexe ablagern.

Beim manuellen Pipettieren vieler Proben ist es möglich, dass die erste Probe bereits 30 Minuten inkubiert, bis die letzte Probe auf die Platte pipettiert wird. Der Roboter hingegen pipettiert

schneller und trägt zudem mehrere Proben gleichzeitig auf. Dies trägt erheblich zur Verringerung der Intraassay-Varianz (Streuung innerhalb des Assays) bei.

Um die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit miteinander zu vergleichen, sind die Standardabweichungen und Variationskoeffizienten der achtstufigen Standardverdünnungsreihen sowie die gemessenen gegenüber den erwarteten Konzentrationen betrachtet worden. Durch den Vergleich der manuellen und automatisierten Standardabweichungen wurde gezeigt, dass die Streuung bei der Automatisierung merklich geringer ist als bei der manuellen Durchführung. Dieses Ergebnis konnte durch die Berechnung der Variationskoeffizienten bestätigt werden. Es zeigte sich, dass mit der

Automatisierung eine Verbesserung der mittleren Variationskoeffizienten von ca. 30% selbst gegenüber einem geübten Anwender erreicht worden ist. Somit liefert die automatisierte Methode qualitativ bessere Ergebnisse. Der Vergleich der gemessenen Werte mit den erwarteten bestärkt das Ergebnis aus dem Vergleich der Standardverdünnungsreihe. Es wird deutlich, dass die Werte, die durch den automatisierten Prozess generiert wurden, näher an den Erwartungswerten lagen und eine niedrigere Standardabweichung auftrat. Somit wird durch die automatisierte Methode auch die quantitative Bestimmung von Proben verbessert. In allen Durchführungen war die Präzision bei hohen und mittleren Analytkonzentrationen besser als bei niedrigen. Dies zeigt sich bei der Betrachtung der Variationskoeffizienten in Abbildung 4, aber auch beim Vergleich der gemessenen Konzentrationen der Proben C1 und C2 (siehe Abbildung 5). Insbesondere bei der automatisierten Durchführung ist die Abweichung zwischen gemessener und erwarteter Konzentration für die höher konzentrierte Probe C2 (1:30 Verdünnung) immer geringer als bei der niedrig konzentrierten Probe C1. Zum einen lässt sich diese Fehleranfälligkeit durch die statistische Ungleichverteilung der Moleküle in niedrigkonzentrierten Proben erklären. Zum anderen steigt mit der geringer werdenden Steigung der Kalibrierkurven im unteren Messbereich die Fehleranfälligkeit bei der Quantifizierung an. Fehler in diesem Bereich ließen sich über die Erhöhung der Messsensitivität (höhere Spannung der Photomultiplier im Messgerät) einstellen, jedoch wird dadurch der dynamische Messbereich eingeschränkt. Durch die Automatisierung entstehen nur geringfügig höhere Kosten, die durch den Stromverbrauch und den Verbrauch von teureren Pipettenspitzen für den Roboter entstehen. Im Gegenzug werden durch die eingesparte Arbeitszeit Ressourcen für andere Tätigkeiten geschaffen. Durch die höhere Genauigkeit der automatisierten Methode kann das Potenzial der Methode besser ausgeschöpft werden und die in die Fertigungssysteme investierten Gelder werden in qualitativ bessere Ergebnisse überführt.

5. SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK

Mit der Automatisierung des Bio-Plex Pro™-Analyseverfahrens ist die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit des Assays gesteigert und eine zeitliche Optimierung erreicht worden. Mit der Verwendung des Skripts können Pipettierfehler in der Probenvorbereitung und das Risiko einer Kontamination stark gesenkt werden. Weiterhin bezieht sich die zeitliche Optimierung sowohl auf die Reduzierung der Gesamtdauer bei der Durchführung des Assays als auch den Arbeitsaufwand des Anwenders. Somit kann die gewonnene Zeit für Mehrwertaufgaben genutzt werden. Im Allgemeinen ist durch die Automatisierung selbst ein unerfahrener Anwender, mithilfe der entsprechenden SOP (*Anleitung zur Nutzung des Skripts, BioPlexAssay am Pipettierroboter Tecan Freedom EVO 200*), in der Lage, den Assay durchzuführen und sowohl qualitative als auch quantitative Ergebnisse zu erhalten. Eine Erweiterung des Skripts auf die Vollautomatisierung des Verfahrens wird möglich, wenn der Bio-Plex® 200 in den Arbeitsbereich des Roboters integriert wird. Außerdem kann das Skript einfach angepasst bzw. erweitert werden, falls Änderungen an dem Analyseverfahren vorgenommen werden.

LITERATUR

- Bio-Rad Laboratories (2013) Bio-Plex Pro™ Cytokine, Chemokine, and Growth Factor Assays. Instruction Manual. <http://www.bio-rad.com/webroot/web/pdf/lsr/literature/10014905.pdf>. Accessed 06 Nov 2014
- Franzen K (1986) Der nächste Schritt in der Laborautomatisierung – Der Roboter. *Fresenius Z Anal Chem* 323(6):556–559. doi: 10.1007/BF00504497
- Mayr LM, Fuerst P (2008) The future of high-throughput screening. *J Biomol Screen* 13(6):443–448. doi: 10.1177/1087057108319644
- Probst MCO, Kroder MJ (2007) Bead-basierte Multiplexanalytik. In: Sack U, Tárnok A, Rothe G (eds) *Zelluläre Diagnostik. Grundlagen, Methoden und klinische Anwendungen der Durchflusszytometrie*. Karger, Basel, ISBN: 978-3-8055-7928-5, pp 191–207. doi: 10.1159/000097615
- Schäfer R (2000) Steuerung von Analyseautomaten und Labormanagement im analytischen Labor. *GIT Lab Fachz* 44(12):404–409
- Tecan (2014) Freedom EVOware®. <http://www.tecan.com/platform/apps/product/index.asp?MenuID=1458&ID=1084&Menu=1&Item=21.7.1>. Accessed 04 Feb 2014
- Voller A, Bartlett A, Bidwell DE (1978) Enzyme immunoassays with special reference to ELISA techniques. *J Clin Pathol* 31(6):507–520. doi: 10.1136/jcp.31.6.507
- Wölcke J, Ullmann D (2001) Miniaturized HTS technologies – uHTS. *Drug Discov Today* 6(12):637–646. doi: 10.1016/S1359-6446(01)01807-4

Wesentliche Ergebnisse entstanden im Rahmen einer Bachelorarbeit der Erstautorin in der Abteilung für Molekulare Biotechnologie und Funktionelle Genomik der Technischen Hochschule Wildau.

AUTOREN

Karolin Keil, B. Sc.
Technische Hochschule Wildau
Biosystemtechnik / Bioinformatik

Lars Radke, M. Sc.
Technische Hochschule Wildau
Biosystemtechnik / Bioinformatik

Ulrich M. Tillich, M. Sc.
Technische Hochschule Wildau
Biosystemtechnik / Bioinformatik

Prof. Dr. Marcus Frohme
Technische Hochschule Wildau
Molekulare Biotechnologie und Funktionelle Genomik
marcus.frohme@th-wildau.de

Impedimetrischer DNA-Nachweis – Schritte in Richtung sensorischer Anwendung

Marc Riedel, Julia Kartchemnik, Michael J. Schöning, Fred Lisdat*

Zusammenfassung

Diese Studie beschreibt einen labelfreien impedimetrischen Sensor auf der Grundlage von kurzen einzelsträngigen DNA-Erkennungselementen für den Nachweis von Hybridisierungsereignissen. Der Fokus der Arbeit liegt auf der Aufklärung des Einflusses der Ziel-DNA-Länge und der Erkennungssequenzposition auf die sensorische Leistungsfähigkeit. Die impedimetrischen Messungen werden in Anwesenheit des Redoxsystems Kaliumhexacyanoferrat (II/III) durchgeführt und zeigen einen Anstieg des Durchtrittswiderstandes nach der Hybridisierung mit komplementärer Ziel-DNA mit einer Nachweisgrenze im unteren nanomolaren Bereich. Nach der Hybridisierung kann die Regeneration des Sensors mit deionisiertem Wasser durch die Einstellung effektiver Konvektionsbedingungen erreicht werden und ermöglicht somit eine Wiederverwendbarkeit des Sensors. Untersuchungen zu längeren Ziel-DNA-Strängen mit einem zur Lösung exponierten Überhang demonstrieren die Anwendbarkeit des impedimetrischen Nachweises für längere Sequenzen. Allerdings resultiert eine zunehmende Überhanglänge in einer verringerten Durchtrittswiderstandsänderung. Um die Impedanzänderung für längere Ziel-DNA zu erhöhen, wird die Erkennungssequenzposition verändert, sodass ein kleiner Überhang zur Elektrode ausgerichtet ist. Die Ergebnisse legen nahe, dass DNA in direkter Nähe zur Elektrode einen größeren Einfluss auf das impedimetrische Signal besitzt als weiter entfernte DNA.

Abstract

This study describes a label-free impedimetric sensor based on short ssDNA recognition elements for the detection of hybridisation events. We concentrate on the elucidation of the influence of target length and recognition sequence position on the sensorial performance. The impedimetric measurements are performed in the presence of the redox system ferri-/ferrocyanide and show an increase in charge transfer resistance upon hybridisation of complementary ssDNA in the nanomolar range. After hybridisation, a sensor regeneration can be achieved with deionised water by adjustment of effective convection conditions, ensuring sensor reusability. By investigation of longer targets with overhangs exposed to the solution, we can demonstrate applicability of the impedimetric detection for longer ssDNA. However, a decreasing charge transfer resistance change (ΔR_{ct}) is found by extending the overhang. As a strategy to increase the impedance change for longer target strands, the position of the recognition sequence can be designed in a way that a small overhang is exposed to the electrode surface. These results suggest that DNA near the electrode possesses a larger impact on the impedimetric signal than DNA further away.

1. EINLEITUNG

Die Bioanalytik in den Bereichen Medizin, Nahrungsmittelindustrie und Umweltkontrolle strebt nach einfachen und schnellen DNA-Nachweissystemen mit einer hohen Präzision und geringen Kosten. Verschiedene Verfahren wurden bereits für die Erkennung von genetisch bedingten Krankheiten, die Identifikation pathogener Krankheitserreger, den Nachweis von Kontaminationen in Nahrungsmitteln sowie für forensische Studien

entwickelt. Neben bereits etablierten Nachweismethoden, wie z. B. PCR, werden ebenfalls DNA-Biosensoren mit zunehmendem Interesse während des letzten Jahrzehnts verfolgt (Drummond et al. 2003, Lucarelli et al. 2008, Sassolas et al. 2008). Das Funktionsprinzip von DNA-Biosensoren basiert gewöhnlich auf einem spezifischen Hybridisierungsereignis zwischen immobilisierter einzelsträngiger DNA (Fänger-ssDNA) und komplementärer Ziel-ssDNA in einer Probenlösung, welche die Umwandlung in ein ana-

lytisches Signal auslöst. Die Analyse von hybridisierungsinduzierten Veränderungen der Oberflächeneigenschaften ist bereits mit verschiedenen Signalwandlern wie piezoelektrischen (Kleo et al. 2011), optischen (Fan et al. 2008) und elektrochemischen Systemen (Drummond et al. 2003, Pänke et al. 2007) gezeigt worden. Insbesondere elektrochemische Biosensoren sind aufgrund der einfachen, billigen und tragbaren Anwendung vielversprechend für eine Verwendung in der „Point-of-care“-Diagnostik

* korrespondierender Autor

(Lucarelli et al. 2008). In verschiedenen Ansätzen ist bereits der Nachweis von Hybridisierungsreaktionen mit elektrochemischen Methoden gezeigt worden. Meistens wird für den Nachweisprozess des Hybridisierungsereignisses ein Redoxmolekül benötigt. Oft muss ein Redox- oder Enzymlabel an die komplementäre Zielsequenz gekoppelt werden, was zu einer hohen Sensitivität führt, jedoch die Anwendung teuer und zeitintensiv macht. Des Weiteren können ein Einfluss des Labels auf die DNA-Erkennung sowie eine variierende Ausbeute der DNA-Label-Kopplung nicht ausgeschlossen werden (Daniels & Pourmand 2007). Infolgedessen ist die Verwendung eines Labels für eine biosensorische "Point-of-care"-Anwendung nicht vorteilhaft.

Stattdessen wird ein labeltfreies Nachweissystem mit einer kosteneffektiven und schnellen Anwendbarkeit bevorzugt. Dabei resultiert die Bindung der komplementären Ziel-DNA am immobilisierten Fängerstrang in einer Veränderung der elektrochemischen Eigenschaften (wie z. B. Leitfähigkeit, Widerstand und Oberflächenpotenzial) der Elektrodenoberfläche (Berggren et al. 1999, Li et al. 2005). Dies macht die Verwendung eines Labels unnötig. Die große Anzahl an Studien, welche die Impedanzspektroskopie für Bindungsanalysen nutzen, zeigt das deutliche Interesse für die Verwendung dieser Technik zum Aufbau elektrochemischer Sensoren (Lisdät & Schäfer 2008, Park & Park 2009, Kafka et al. 2008). Dies kann ebenfalls auf die Möglichkeit der kompletten Oberflächencharakterisierung durch die Aufnahme von Spektren über einen weiten Frequenzbereich zurückgeführt werden.

Erste Bemühungen der Kombination von Impedanzspektroskopie und DNA-Nachweis fokussierten auf die Sensorsensitivität durch die Änderung der DNA-Immobilisierungsmethoden (Park et al. 2008, Peng et al. 2007), der Bestimmung des Einflusses des Fängertyps (Wang et al. 2008), der Oberflächenkonzentration (Keighley et al. 2008, Witte & Lisdät 2011) und der Verwendung von verschiedenen Oberflächenmaterialien (Kafka et al. 2008, Cai et al. 2004). Weitere Ansätze mit Impedanzspektroskopie zeigen das Potenzial zum Nachweis von „single base mismatches“ (Kafka et al.

2008, Wang et al. 2008) oder DNA-Protein-Interaktionen (Witte & Lisdät 2011, Tersch & Lisdät 2011). In den meisten Fällen werden eher kurze Zielstränge verwendet, welche für Proof-of-Principle-Betrachtungen gut geeignet sind, aber die Leistung des Systems für den Nachweis von längeren Strängen aus z. B. PCR-Amplifikationsprotokollen nicht zeigen. Des Weiteren existieren einige andere Probleme bei der Anwendung der Impedanzspektroskopie in der Bioanalytik wie z. B. zeitliche Impedanzänderungen (Tersch & Lisdät 2011) oder die schlechte Wiederverwendbarkeit (Patolsky et al. 1999). Es besteht somit weiterhin Forschungsbedarf, um gut definierte Schnittstellen und Nachweiszyklen zu erhalten. Dies ist für ein Sensorformat, welches einen Nachweis von gelabelten Molekülen vermeidet, besonders wichtig.

In dieser Studie soll der Einfluss der Ziel-DNA-Länge und der Erkennungssequenzposition auf das Impedanzsignal untersucht werden. Zunächst werden dazu die Bedingungen evaluiert, um ein Sensorsystem mit einer ausreichenden Signalstabilität und einer wiederverwendbaren Anwendung zu realisieren.

2. EXPERIMENTELLER TEIL

Die Thiol-modifizierte Fänger-DNA und die komplementäre Ziel-DNA wurden von biomers.net (Ulm, Deutschland) synthetisiert. Die verwendeten Sequenzen sind in Tabelle 1 dargestellt. Alle anderen Chemikalien wurden von Sigma-Aldrich (Taufkirchen, Deutschland) bezogen. Die Herstellung der Lösungen erfolgte mit Reinstwasser.

Für die elektrochemischen Untersuchungen wurden Goldchipelektroden mit einer 200 nm dicken Goldschicht verwendet. Die Sensorfläche besitzt einen Durchmesser von 5 mm und eine Fläche von 0,2 cm².

Die gereinigten Goldchips wurden für den Aufbau einer DNA-Erkennungsschicht mit 1 µM Thiol-modifizierter Fänger-DNA und 0,5 µM Mercaptohexanol in 0,1 M Kaliumphosphatpuffer (+ 1 M Kaliumchlorid und 2 mM Magnesiumchlorid, pH 7) für zwei Stunden inkubiert. Um unspezifische Wechselwirkungen der immobilisierten DNA zu vermeiden, wurde die

Sensoroberfläche anschließend durch die Inkubation mit 1 mM Mercaptohexanol in 0,1 M Natriumphosphatpuffer (pH 7) passiviert.

Die Hybridisierung wurde auf der modifizierten Sensorelektrode für zehn Minuten unter Rühren mit 10 µM Ziel-DNA in 50 mM TRIS-Puffer (+ 0,1 M Natriumphosphat, pH 7) durchgeführt. Für die Untersuchung der Sensorsensitivität wurden Konzentrationen zwischen 0,01 µM und 10 µM verwendet. Die Impedanzspektroskopiemessungen wurden in 0,1 M Natriumphosphatpuffer (pH 7) in Anwesenheit von 2 mM Kaliumhexacyanoferrat(II/III) unter folgenden Parametern durchgeführt: Frequenzbereich 10 kHz – 1 Hz, 5 mV AC Amplitude, Open Circuit Potential (180–190 mV vs. Ag/AgCl).

3. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1 SENSORPRINZIP UND CHARAKTERISIERUNG

Für den Aufbau des Sensors wird kurze Thiol-modifizierte Fänger-DNA, welche als Erkennungselement dient, auf den Goldchipelektroden über Chemisorption immobilisiert. Wir verwenden Fänger-DNA mit einer Länge von 25 Nukleotiden aufgrund der höheren Hybridisierungsspezifität und -effizienz im Vergleich zu längeren Fängern (Lucarelli et al. 2008). Zusätzlich wird Mercaptohexanol verwendet, um unspezifische Wechselwirkungen der DNA mit der Goldoberfläche zu vermeiden und die Orientierung der Fänger-DNA Richtung Lösung zu begünstigen.

Um die Qualität der hergestellten DNA-Elektroden zu evaluieren, werden die Elektroden hinsichtlich der Konzentration an hybridisierungsfähiger Fänger-DNA durch einen Hybridisierungsschritt mit Methylenblau-modifizierter DNA (25merMB) voltammetrisch untersucht. Die Oberflächenbelegung an funktionaler Fänger-DNA wird anhand der Reduktionspeakfläche, welche der Anzahl gebundener 25merMB-DNA entspricht, bestimmt. Da verschiedene Studien einen Einfluss der Fänger-DNA-Dichte auf die Hybridisierungseffizienz und Sensorleistung demonstrieren (Keighley et al. 2008, Witte & Lisdät 2011), haben wir Elektroden mit einer ähnlichen Oberflächenkonzentration (11,5 ± 2,2 pmol/cm²) gewählt, um

Tab. 1: Sequenzen der in dieser Arbeit verwendeten einzelsträngigen DNA. Komplementäre Sequenzposition der Ziel-DNA in Bezug zum 25mer Fänger ist fett dargestellt. SH – Thiol; MB – Methylenblau; eü – Sequenz mit einem zur Elektrodenoberfläche ausgerichteten Überhang.

Typ	Oligonukleotid	Sequenz (5' → 3')
Fänger	25mer Fänger	SH-C ₆ - CGT CCA AGC GGG CTG ACT CAT CAA G
Zielstrang	25merMB	MB-C ₆ - CTT GAT GAG TCA GCC CGC TTG GAC G
Zielstrang	25mer	CTT GAT GAG TCA GCC CGC TTG GAC G
Zielstrang	35mer	TAC AGT ACA CCT TGA TGA GTC AGC CCG CTT GGA CG
Zielstrang	45mer	CCA CTA GCA TTA CAG TAC ACC TTG ATG AGT CAG CCC GCT TGG ACG
Zielstrang	45mer(eü:5)	AGC ATT ACA GTA CAC CTT GAT GAG TCA GCC CGC TTG GAC GCC ACT
Zielstrang	45mer(eü:10)	TAC AGT ACA CCT TGA TGA GTC AGC CCG CTT GGA CGC CAC TCC CAT
Zielstrang	80mer	CAC AAC GCA CTA GGA TGT TCA CAA TCG CAG TCA GAC CAC TAG CAT TAC AGT ACA CCT TGA TGA GTC AGC CCG CTT GGA CG

eine gute Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Anschließend werden die Elektroden vor und nach der Hybridisierung mit 25mer Ziel-DNA in Anwesenheit des Redoxsystems Kaliumhexacyanoferrat(II/III) mittels Impedanzspektroskopie untersucht. Um eine schnelle sensorische Anwendbarkeit zu gewährleisten, wird die Hybridisierung auf eine sehr kurze Zeit von nur zehn Minuten reduziert. Ein repräsentatives Impedanzspektrum einer Elektrode mit einer denaturierten und hybridisierten Oberfläche ist in Abbildung 1 dargestellt. Dabei korreliert der Halbkreisdurchmesser mit dem Durchtrittswiderstand (R_{ct}) und steigt nach der Hybridisierung. Diese Beobachtung ist auf die weitere Akkumulation von negativer Ladung zurückzuführen, welche die Umwandlung des negativ geladenen Redoxsystems an der Elektrode stört. Das aufgenommene Impedanzspektrum wird anschließend durch eine Anpassung an das Ersatzschaltbild ausgewertet und der Durchtrittswiderstand als analytische Messgröße gewählt. Nach der Hybridisierung mit 25mer DNA steigt der R_{ct} von $4510 \pm 1150 \Omega$ auf $12140 \pm 3810 \Omega$ ($n=8$) und erlaubt eine gute Diskriminierung zwischen dem denaturierten und dem hybridisierten Zustand. Trotz der Unterschiede jeder Elektrode in Bezug auf den absoluten Durchtrittswiderstand bleibt das R_{ct} -Verhältnis zwischen dem denaturierten und hybridisierten Zustand mit

$2,7 \pm 0,25$ ($n=8$) relativ konstant und wird als Sensorparameter gewählt.

3.2 SENSORREGENERATION

Die Denaturierung ist ein essenzieller Schritt, um den Sensor nach der Hybridisierung zu regenerieren und eine Wiederverwendbarkeit für einen nachhaltigen und ökonomischen Betrieb zu ermöglichen. Aus diesem Grund werden nachfolgend verschiedene Denaturierungsstrategien mit

destilliertem Wasser als Denaturierungsreagenz und Methylenblau-modifizierter Ziel-DNA voltammetrisch getestet. Das Denaturierungsprinzip von destilliertem Wasser basiert auf der Destabilisierung des DNA-Duplexes aufgrund der fehlenden Abschirmung der negativen Eigenladung der DNA in Abwesenheit von Kationen. Dies führt wiederum zu einer elektrostatischen Abstoßung der einzelnen Stränge. Es werden drei verschiedene Denaturierungsmethoden mit destil-

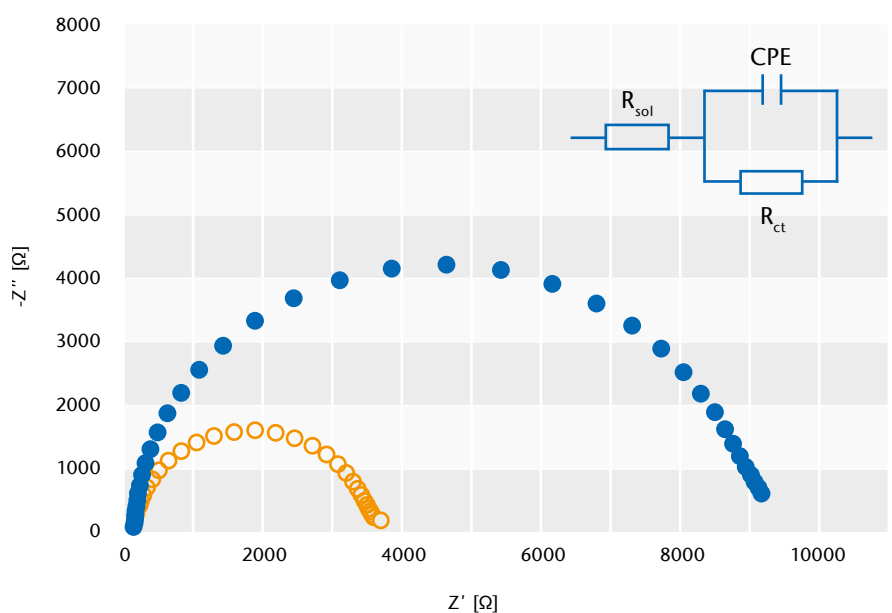


Abb. 1) Im Nyquist-Plot dargestellte Impedanzspektren einer DNA-modifizierten Goldchipelektrode im denaturierten (weiß) und hybridisierten Zustand (blau). Inset: Das in dieser Arbeit für die Analyse der Daten verwendete Ersatzschaltbild (R_{sol} – Lösungswiderstand, R_{ct} – Durchtrittswiderstand, CPE – konstantes Phasenelement, welches die Doppelschichtkapazität repräsentiert).

liertem Wasser untersucht: zehn Minuten Inkubation, zehnmaliges Spülen des Chips für je drei Sekunden sowie zehnmaliges Spülen des Chips für je drei Sekunden, gefolgt von einer vierminütigen Inkubation unter Rühren. Während eine Inkubation in Wasser für zehn Minuten zu einer schlechten Entfernung von 25merMB DNA (14%) führt, steigt die Effizienz auf bis zu 60% durch das Spülen mit Wasser und kann auf nahezu 100% durch einen zusätzlichen Rührschritt für vier Minuten gesteigert werden (siehe Abbildung 2). Das heißt, dass durch die Einstellung geeigneter konvektiver Bedingungen eine effektive Denaturierungsprozedur mit destilliertem Wasser etabliert werden kann. Durch die Verwendung dieser Prozedur sind vier repetitive Hybridisierungs-/Denaturierungszyklen durchgeführt worden, ohne Veränderungen der Hybridisierungs- und Denaturierungseffizienz (durchschnittlich $98 \pm 2\%$) festzustellen. Somit wird die Elektrodenfunktionalität nicht durch die Denaturierungsprozedur beeinflusst und eine konstante Qualität des DNA-Nachweises während der Messzyklen ist möglich. Eine gleichbleibende Denaturierungsqualität kann auch für den impedimetrischen Sensor zum Nachweis von labelfreier DNA über mehrere Messzyklen gezeigt werden.

3.3 SENSORSSENSITIVITÄT

Anschließend werden die Elektroden bei verschiedenen Konzentrationen von 25mer Ziel-DNA untersucht, um die untere Nachweisgrenze und den dynamischen Bereich des impedimetrischen Sensors zu bestimmen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 3 als normalisiertes R_{ct} -Verhältnis in Abhängigkeit von der DNA-Konzentration dargestellt. Sie zeigt eine sigmoide Bindungskurve mit einem ansteigenden R_{ct} nach der Hybridisierung mit Konzentrationen zwischen $0,01 \mu\text{M}$ und $10 \mu\text{M}$ 25mer DNA. Die Halbwertkonzentration beträgt $380 \pm 50 \text{ nM}$ und der lineare Messbereich liegt zwischen $0,15 \mu\text{M}$ und $1 \mu\text{M}$. Der Konzentrationsbereich des Sensors ist damit ähnlich wie ein impedimetrisches System mit kürzeren Fängersequenzen (Kafka et al. 2008) und ein voltametrischer Sensor, welcher gelabelte Ziel-DNA verwendet (Pänke et al. 2007).

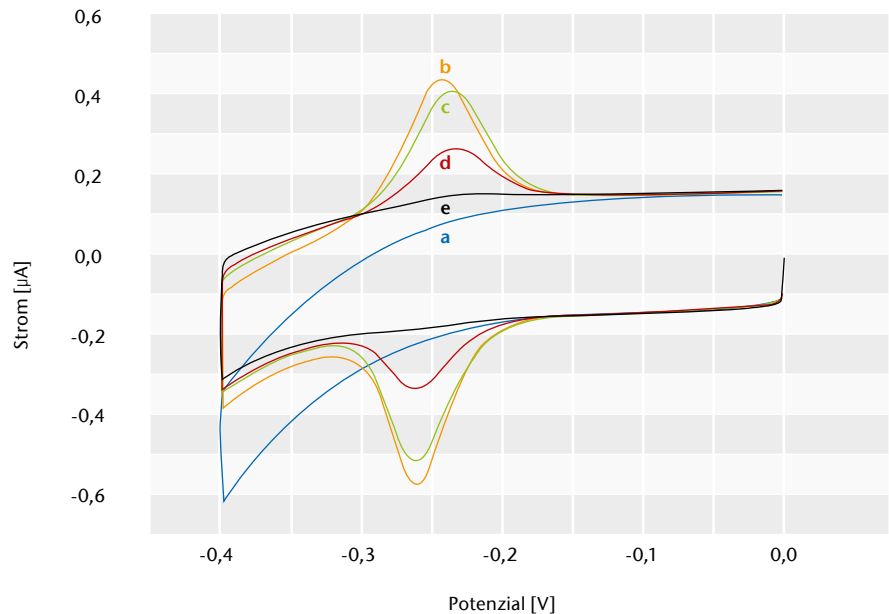


Abb. 2) Zyklische Voltammogramme einer DNA-modifizierten Goldchipelektrode vor (a) und nach der Hybridisierung (b) mit komplementärer Methyleneblau-modifizierter DNA sowie nach der Anwendung verschiedener Denaturierungsprozeduren mit destilliertem Wasser: 10 min Inkubation (c), 10 x spülen für je 3 s (d), 10 x spülen für je 3 s sowie eine 4 min Inkubation unter Rühren (e).

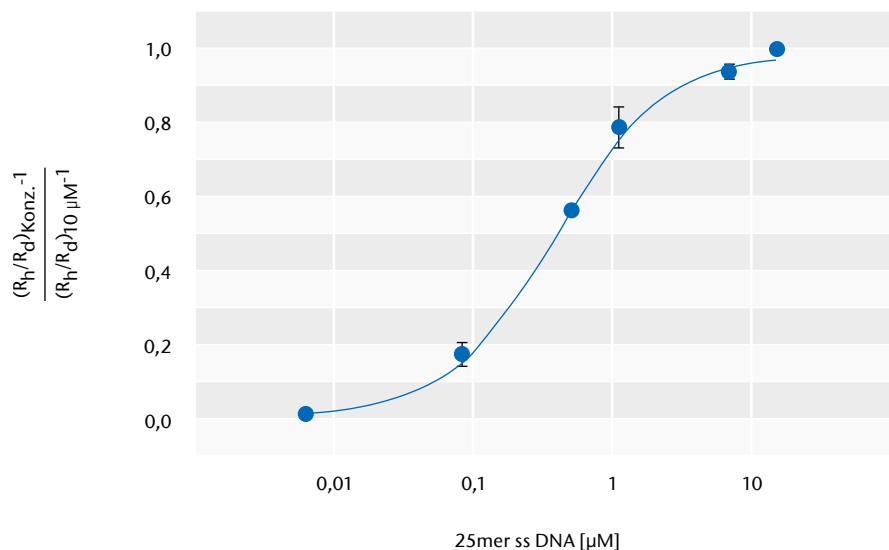


Abb. 3) Relatives Verhältnis des Durchtrittswiderstandes von DNA-modifizierten Goldchipelektroden ($n=3$) in Abhängigkeit von der 25mer DNA-Konzentration. Die Daten sind auf den Wert für die Hybridisierung mit $10 \mu\text{M}$ Ziel-DNA normalisiert: $(R_H/R_D)_{\text{konz.}}$ – Durchtrittswiderstandsverhältnis zwischen dem hybridisierten (R_H) und dem denaturierten Zustand (R_D) nach der Inkubation mit verschiedenen 25mer DNA-Konzentrationen; $(R_H/R_D)_{10\mu\text{M}}$ – Durchtrittswiderstandsverhältnis zwischen dem hybridisierten (R_H) und dem denaturierten Zustand (R_D) nach der Inkubation mit $10 \mu\text{M}$ 25mer Ziel-DNA.

3.4 EINFLUSS DER ZIEL-DNA-LÄNGE UND DER ERKENNUNGS-SEQUENZPOSITION

Obwohl eine Sensitivität im nanomolaren Bereich erreicht werden kann, sind oft Amplifizierungsschritte für einen analytischen Nachweis von geringen DNA-Mengen notwendig. Durch

den Einsatz von Amplifizierungsmethoden wie PCR entstehen jedoch längere DNA-Stränge, deren Einfluss auf das Impedanzsignal bisher nur wenig beachtet worden ist. Deshalb haben wir Hybridisierungsstudien mit unterschiedlich langen komplementären Ziel-DNA-Strängen durchgeführt. Zunächst werden dazu Sequenzen

mit einer Länge zwischen 35 und 80 Nukleotiden (35mer, 45mer, 80mer) untersucht, welche nach der Bindung am immobilisierten Fänger einen zur Lösung exponierten Überhang besitzen. Das Design der Strukturen ist in Abbildung 4 dargestellt.

Wie in Abbildung 5A dargestellt, induzieren alle Zielsequenzen einen Anstieg der Impedanz nach der Hybridisierung. Entgegen unseren Erwartungen nimmt die Rct-Änderung mit zunehmender Stranglänge ab, obwohl ein längerer Strang eine höhere Akkumulation der DNA-Masse bzw. negativer Ladung vor der Elektrode bedingt. Da eine sinkende Hybridisierungseffizienz für längere Stränge bekannt ist (Baker & Milam 2011), kann der Einfluss einer kleineren Menge an Fänger-Ziel-DNA-Komplexen auf die impedimetrische Signalantwort nicht ausgeschlossen werden. Die impedimetrischen Experimente geben keinen Einblick in die Hybridisierungseffizienz der jeweiligen Stränge, weshalb die Hybridisierungsstudien mittels Oberflächenplasmonenresonanzspektroskopie (SPR) reproduziert wurden. Der

Aufbau der DNA-Sensorschicht auf dem SPR-Chip und die Hybridisierung mit den Zielsequenzen erfolgten in einem Fließsystem unter identischen Bedingungen wie für den impedimetrischen Sensor. In Abbildung 5B ist eine repräsentative SPR-Messung der unterschiedlich langen Zielsequenzen dargestellt. Für das 25mer kann ein stabiles SPR-Signal zum Ende der Hybridisierung festgestellt werden, was einen klaren Hinweis für die Ausbildung einer komplett hybridisierten Sensoroberfläche gibt. Im Gegensatz dazu zeigen die Sequenzen mit einem Überhang ein ansteigendes SPR-Signal am Ende der Hybridisierung, dies ist wahrscheinlich auf eine langsamere Hybridisierungskinetik von längeren Zielsträngen zurückzuführen. Für die Auswertung der Messung ist die angelagerte Masse der Zielstränge bestimmt worden ($1000 \text{ RU} = 100 \text{ ng/cm}^2$), um die Oberflächenkonzentration an Fänger-Ziel-DNA-Komplexen zu berechnen. Während eine zunehmende Zielsequenzlänge aus einer Zunahme der angelagerten hybridisierten Masse resultiert, nimmt die molare Konzentration an Fänger-Ziel-DNA-Komplexen

bei längeren DNA-Strängen ab. Eine Abnahme der Hybridisierungseffizienz geschieht in guter Übereinstimmung mit anderen Berichten (Baker & Milam 2011, McKendry et al. 2002) und zeigt die sterische und abstoßende Behinderung der Überhänge. In Bezug auf die impedimetrischen Ergebnisse bedeutet dies, dass die Rct-Änderung einen identischen Verlauf wie die Oberflächenkonzentration der ausgebildeten Fänger-Ziel-DNA-Komplexe besitzt (siehe Abbildung 5C). Demzufolge ist eine hohe Oberflächenkonzentration an Fänger-Ziel-DNA-Komplexen wichtiger als die angelagerte DNA-Masse, sofern ein großer Teil der DNA weiter entfernt vor der Elektrode lokalisiert ist. Eine Akkumulation negativer Ladung durch den Überhang besitzt somit einen geringeren Einfluss auf das Impedanzsignal als zunächst vermutet. Wir schlussfolgern, dass elektroden-nah positionierte DNA die Abstoßung zwischen Elektrodenoberfläche und dem negativ geladenen Redoxsystem stärker erhöht und schwieriger für die Komplexionen zu penetrieren ist. Dessen ungeachtet zeigt der Sensor

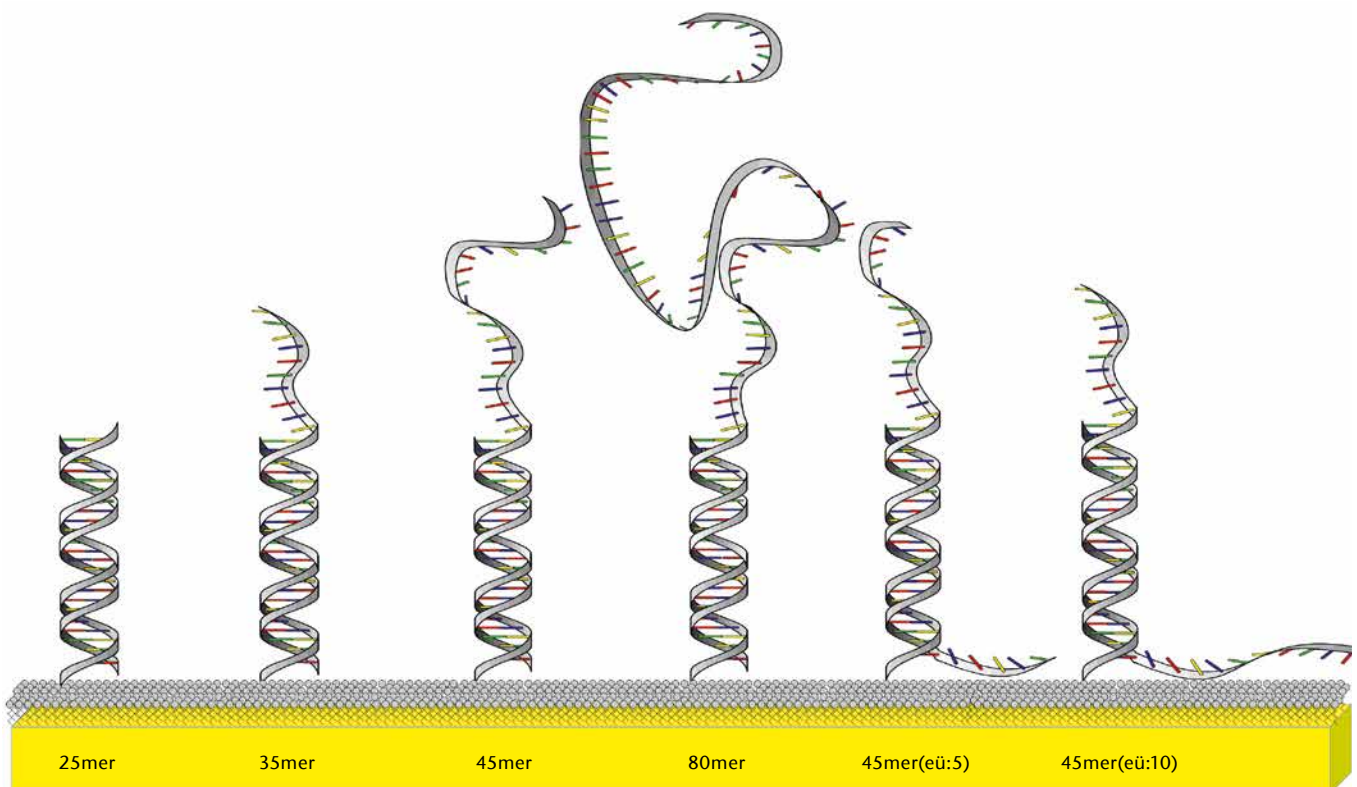


Abb. 4) Schematische Darstellung der Fänger-Ziel-DNA-Komplexe zwischen einem 25mer Fänger und den entsprechenden Zielsträngen.

das Potenzial für den Nachweis von längeren DNA-Sequenzen bis zu einer Länge von 80 Nukleotiden nach einer kurzen Hybridisierungszeit von nur zehn Minuten.

Im Weiteren wird untersucht, wie das impedimetrische Signal für längere Zielsequenzen gesteigert werden kann. Dazu wird die Position der Erkennungssequenz in dem Strang verändert, sodass die verwendeten 45mere einen zur Oberfläche ausgerichteten Überhang von fünf Nukleotiden (45mer(eo:5)) oder zehn Nukleotiden (45mer(eo:10)) besitzen (siehe Abbildung 4). Durch die Ausrichtung des Überhangs zur Oberfläche soll eine weitere Akkumulation der negativen Ladung direkt vor der Elektrode induziert werden, welche zu einem Anstieg des Rct im Vergleich zum 45mer ohne Überhang zur Elektrode führt. Eine Ausrichtung der Überhänge zur Elektrode könnte jedoch auch die Hybridisierungskinetik aufgrund sterischer und abstoßender Effekte beeinflussen. In Abbildung 6 sind die repräsentativen Impedanzspektren einer Elektrode für die verschiedenen 45mer Sequenzen dargestellt. Trotz der unterschiedlichen Erkennungssequenzposition induzieren alle 45mer Moleküle eine Impedanzänderung nach dem Hybridisierungsereignis und sind nachweisbar. Das erhaltene Rct-Verhältnis steigt für das 45mer, 45mer(eo:5) und 45mer(eo:10) auf $1,72 \pm 0,13$, $2,03 \pm 0,08$ bzw. $2,25 \pm 0,07$ und zeigt eine deutliche Abhängigkeit zwischen der Rct-Änderung und dem zur Elektrodenoberfläche ausgerichteten Überhang. Um konzentrationsbedingte Effekte auf das Impedanzsignal auszuschließen, werden anschließend SPR-Untersuchungen durchgeführt. Diese zeigen lediglich eine geringe Abnahme der Oberflächenkonzentration der ausgebildeten Fänger-Ziel-DNA-Komplexe mit zunehmender Länge des zur Elektrode exponierten Überhangs. Der impedimetrische Effekt des elektroden-nahen Überhangs kann somit auf den Anstieg der negativen Ladung nahe der Elektrode zurückgeführt werden, welche die Permeation des Redoxsystems zur Elektrode erschwert. Die Ergebnisse zeigen, dass das impedimetrische System die Unterscheidung von

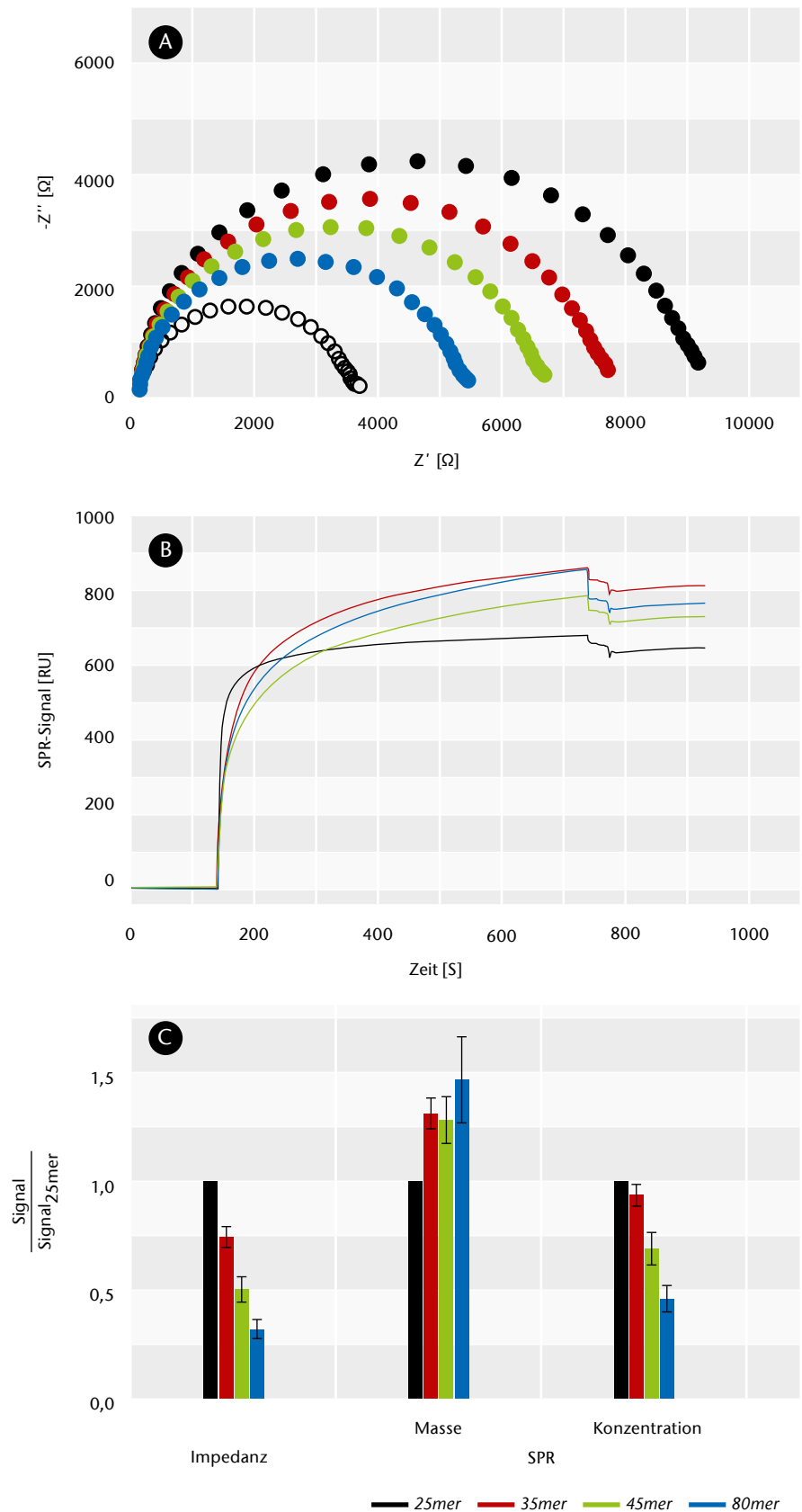


Abb. 5) (A) Impedanzspektren einer DNA-modifizierten Goldchipelektrode vor (weiß) und nach der Hybridisierung mit 25mer (schwarz), 35mer (rot), 45mer (grün) und 80mer (blau) Ziel-DNA. (B) SPR-Messung der Hybridisierung mit 25mer (schwarz), 35mer (rot), 45mer (grün) und 80mer (blau) Ziel-DNA auf einem Fänger-DNA-modifizierten SPR-Chip. (C) Normalisierte Hybridisierungssignale der Impedanz- und SPR-Ergebnisse für die Hybridisierung mit 25mer, 35mer, 45mer und 80mer Ziel-DNA. Das impedimetrische Signal wird anhand des Durchtrittswiderstandsverhältnisses $[(R_h/R_d)-1]$ zwischen der hybridisierten (R_h) und denaturierten Situation (R_d) bestimmt. Die Masse und Konzentration der gebundenen Zielstränge wird anhand des SPR-Signals kalkuliert.

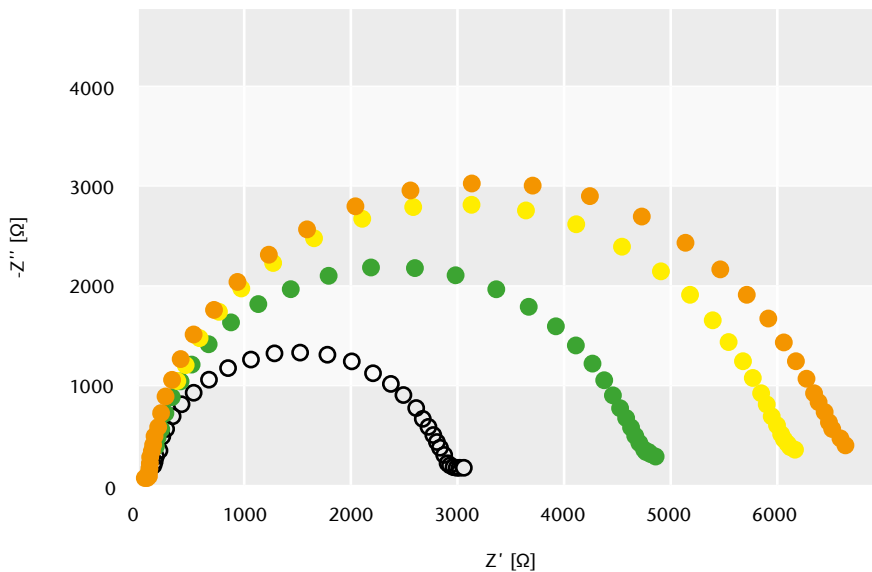


Abb. 6 Impedanzspektren einer DNA-modifizierten Goldchipelektrode vor (weiß) und nach der Hybridisierung mit 45mer (grün), 45mer(eü:5) (gelb) und 45mer(eü:10) (orange) Ziel-DNA (eü:5 und eü:10 bedeutet, dass ein Überhang von 5 oder 10 Nukleotiden zur Elektrode ausgerichtet ist).

Zielsequenzen mit einer identischen Länge, aber unterschiedlichen Erkennungssequenzpositionen ermöglicht. Des Weiteren geben die Ergebnisse Zugang zum Design von vorteilhaften Fänger-Ziel-DNA-Komplexen, welche in einem gesteigerten Impedanzsignal resultieren und möglicherweise eine labelfreie Detektion von längeren Zielsequenzen als dem vorgestellten 80mer erlauben.

4. SCHLUSSFOLGERUNG

Die in dieser Arbeit vorgestellten Experimente zeigen, dass durch die Kombination von Fänger-DNA-modifizierten Goldchipelektroden und der Impedanzspektroskopie ein sensorisches System zum labelfreien Nachweis von Nukleinsäuren entwickelt werden kann. Der Sensor ermöglicht eine eindeutige Diskriminierung zwischen dem hybridisierten und dem denaturierten Zustand bis zu einer Nachweisgrenze im unteren nanomolaren Bereich sowie eine Wiederverwendbarkeit nach der Denaturierung mit Wasser. Untersuchungen zum Einfluss der Zielsequenzlänge und der Erkennungssequenzposition auf das impedimetrische Signalverhalten zeigen eine direkte Beziehung zwischen der Länge der Sequenzen sowie der Ausrichtung des Überhangs und liefern wichtige Erkenntnisse zur Steigerung der Sensitivität des sensorischen Systems.

Sequenzen mit einem zur Lösung exponierten Überhang führen mit zunehmender Länge zu abnehmenden Impedanzänderungen, was zum einen auf eine geringere Hybridisierungseffizienz längerer Stränge und zum anderen auf den geringeren Einfluss der weiter entfernten DNA-Überhänge auf die Signalantwort zurückzuführen ist. Dessen ungeachtet können Zielstränge mit einer Länge von bis zu 80 Nukleotiden labelfrei innerhalb einer kurzen Hybridisierungszeit von zehn Minuten detektiert werden, was einen Zugang zum Nachweis von PCR-Produkten aus biochemischen Proben gibt. Eine Steigerung der Signalantwort kann durch eine Veränderung der Erkennungssequenzposition innerhalb der Ziel-DNA, d. h. eine Verschiebung des Überhangs zur Elektrode, erreicht werden. Die Ergebnisse zeigen, dass durch das Design von vorteilhaften Fänger-Ziel-DNA-Komplexen eine verbesserte Sensitivität von langen DNA Sequenzen erreicht werden kann. Des Weiteren ermöglicht das impedimetrische System eine Unterscheidung von Zielsequenzen mit gleicher Länge, aber unterschiedlicher Erkennungssequenzposition. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass in dieser Arbeit einige Hindernisse in der Anwendung der Impedanzspektroskopie für den Nachweis von DNA überwunden worden sind.

LITERATUR

Baker BA, Milam VT (2011) Hybridization kinetics between immobilized double-stranded DNA probes and targets containing embedded recognition segments. *Nucl Acids Res* 39(15):e99. doi: 10.1093/nar/gkr293

Berggren C, Stålhandske P, Brundell J, Johansson G (1999) A Feasibility Study of a Capacitive Biosensor for Direct Detection of DNA Hybridization. *Electroanalysis* 11(3):156–160. doi: 10.1002/(SICI)1521-4109(199903)11:3<156::AID-ELAN156>3.0.CO;2-O

Cai W, Peck JR, van der Weide, Daniel W, Hamers RJ (2004) Direct electrical detection of hybridization at DNA-modified silicon surfaces. *Biosens Bioelectron* 19(9):1013–1019. doi: 10.1016/j.bios.2003.09.009

Daniels JS, Pourmand N (2007) Label-Free Impedance Biosensors: Opportunities and Challenges. *Electroanalysis* 19:1239–1257. doi: 10.1002/elan.200603855

Drummond TG, Hill MG, Barton JK (2003) Electrochemical DNA sensors. *Nat Biotechnol* 21:1192–1199. doi: 10.1038/nbt873

Fan X, White IM, Shopova SI, Zhu H, Suter JD, Sun Y (2008) Sensitive optical biosensors for unlabeled targets: a review. *Anal. Chim. Acta* 620:8–26. doi: 10.1016/j.aca.2008.05.022

Kafka J, Pänke O, Abendroth B, Lisdat F (2008) A label-free DNA sensor based on impedance spectroscopy. *Electrochim Acta* 53(25):7467–7474. doi: 10.1016/j.electacta.2008.01.031

Keighley SD, Li P, Estrela P, Migliorato P (2008) Optimization of DNA immobilization on gold electrodes for label-free detection by electrochemical impedance spectroscopy. *Biosens Bioelectron* 23:1291–1297. doi: 10.1016/j.bios.2007.11.012

Kleo K, Kapp A, Ascher L, Lisdat F (2011) Detection of vaccinia virus DNA by quartz crystal microbalance. *Anal Biochem* 418(2):260–266. doi: 10.1016/j.ab.2011.07.016

Li C, Liu Y, Luong JHT (2005) Impedance sensing of DNA binding drugs using gold substrates modified with gold nanoparticles. *Anal. Chem.* 77(2):478–485. doi: 10.1021/ac048672l

Lisdat F, Schäfer D (2008) The use of electrochemical impedance spectroscopy for biosensing. *Anal Bioanal Chem* 391(5):1555–1567. doi: 10.1007/s00216-008-1970-7

Lucarelli F, Tombelli S, Minunni M, Marrazza G, Mascini M (2008) Electrochemical and piezoelectric DNA biosensors for hybridisation detection. *Anal. Chim. Acta* 609(2):139–159. doi: 10.1016/j.aca.2007.12.035

McKendry R, Zhang J, Arntz Y, Strunz T, Hegner M, Lang HP, Baller MK, Certa U, Meyer E, Güntherodt H, Gerber C (2002) Multiple label-free biodetection and quantitative DNA-binding assays on a nanomechanical cantilever array. *Proc Natl Acad Sci USA* 99(15):9783–9788. doi: 10.1073/pnas.152330199

Pänke O, Kirbs A, Lisdat F (2007) Voltammetric detection of single base-pair mismatches and quantification of label-free target ssDNA using a competitive binding assay. *Biosens Bioelectron* 22(11):2656–2662. doi: 10.1016/j.bios.2006.10.033

Park J, Kwon SH, Park JW, Park S (2008) Label-free detection of DNA molecules on the dendron based self-assembled monolayer by electrochemical impedance spectroscopy. *Anal. Chim. Acta* 619(1):37–42. doi: 10.1016/j.aca.2008.02.055

Park J, Park S (2009) DNA Hybridization Sensors Based on Electrochemical Impedance Spectroscopy as a Detection Tool. *Sensors* 9(12):9513–9532. doi: 10.3390/s91209513

Patolsky F, Katz E, Bardea A, Willner I (1999) Enzyme-Linked Amplified Electrochemical Sensing of Oligonucleotide–DNA Interactions by Means of the Precipitation of an Insoluble Product and Using Impedance Spectroscopy. *Langmuir* 15(11):3703–3706. doi: 10.1021/la981682v

Peng H, Soeller C, Travas-Sejdic J (2007) Novel Conducting Polymers for DNA Sensing. *Macromolecules* 40(4):909–914. doi: 10.1021/ma062060g

Sassolas A, Leca-Bouvier BD, Blum LJ (2008) DNA biosensors and microarrays. *Chem Rev* 108(1):109–139. doi: 10.1021/cr0684467

Tersch C, Lisdat F (2011) Label-free detection of protein–DNA interactions using electrochemical impedance spectroscopy. *Electrochim Acta* 56(22):7673–7679. doi: 10.1016/j.electacta.2011.06.063

Wang Y, Li C, Li X, Li Y, Kraatz H (2008) Unlabeled hairpin-DNA probe for the detection of single-nucleotide mismatches by electrochemical impedance spectroscopy. *Anal. Chem.* 80(6):2255–2260. doi: 10.1021/ac7024688

Witte C, Lisdat F (2011) Direct detection of DNA and DNA-Ligand interaction by impedance spectroscopy. *Electroanalysis* 23(2):339–346. doi: 10.1002/elan.201000410

AUTOREN

Marc Riedel M. Sc.

Technische Hochschule Wildau
AG Biosystemtechnik
marc.riedel@th-wildau.de

Julia Kartchemnik B. Sc.

Technische Hochschule Wildau
AG Biosystemtechnik
julia.kartchemnik@th-wildau.de

Prof. Dr. Michael J. Schöning

Institut für Nano- und Biotechnologie
FH Aachen
schoening@fh-aachen.de

Prof. Dr. rer. nat. habil. Fred Lisdat

Technische Hochschule Wildau
AG Biosystemtechnik
fred.lisdat@th-wildau.de

Ermittlung des Energiebedarfs zur Bewegung von Fahrzeugen in mikroskopischen Verkehrssimulationen

Peter Bernhardt*, Christian Sauer, Michael Hendrix

Zusammenfassung

Die Integration von Modellen für Fahrzeuge mit alternativen Antrieben in Verkehrssimulationen erfordert eine genauere Betrachtung der Energieflüsse in den einzelnen Fahrzeugen. Diese Arbeit betrachtet den Energiebedarf für die Bewegung von Fahrzeugen und evaluiert vorhandene klassische Modelle zur Abstraktion der physikalischen Einflüsse. Aufgrund der fehlenden Einstimmigkeit der Autoren bei der Beschreibung solcher Modelle in der Literatur wird letztlich der Ansatz verfolgt, ein entsprechendes Modell von der physikalischen Basis ausgehend neu zu entwickeln. Zusätzlich dazu wird festgestellt, dass die Beschränkungen der geläufigen Verkehrssimulationsumgebungen einen signifikanten Einfluss auf die Berechenbarkeit einzelner Komponenten derartiger Modelle haben. Das geschaffene Modell wird anschließend in verschiedenen Varianten in einem Vergleich mit einem weit verbreiteten Modell evaluiert. Zu guter Letzt muss konstatiert werden, dass eine Erhöhung der Realitätsnähe der Simulation – insbesondere im situativen Bereich – erreicht werden konnte, für wesentliche Verbesserungen jedoch eine Beseitigung bestehender Restriktionen der Simulationsumgebungen erforderlich wäre.

Abstract

The integration of models for alternative fuel vehicles in traffic simulation requires a closer examination of the energy flows in the individual vehicles. This work considers the energy required for the movement of vehicles and evaluates existing classical models for the abstraction of the physical influences. Due to the lack of unanimity of the authors in the describing of such models in the literature, the approach ultimately pursued requires redeveloping an appropriate model of the physical basis as a starting point. Additionally, it has been established that the restrictions of the common traffic simulation environments have a significant impact on the computability of individual components of such models. The created model is then evaluated in different variants in comparison with a widely used model. Finally, it is notable that increasing simulation realism could be achieved, however, for in order to see substantial improvements, the elimination of certain restrictions of current simulation environments would be required.

1. EINLEITUNG

Das breite Bewusstsein für ökologische Thematiken auf der Welt und die dadurch entstehenden gesellschaftlichen Rahmenbedingungen haben in den letzten Jahren zu einer Verstärkung der Weiterentwicklung von Antriebskonzepten für Straßenfahrzeuge geführt. So werden den Käufern von Fahrzeugen mit klassischem Antriebskonzept, wie dem Verbrennungsmotor, in immer stärkerem Maße zusätzliche Angebote mit alternativen Antriebskonzepten, wie z. B.

Elektromotor oder Hybridantrieb, gemacht. Insbesondere Fortschritte bei den Technologien zur Speicherung elektrischer Energie, gerade hinsichtlich der Faktoren Kapazität und Kosten, erlauben es den Herstellern, die steigende Nachfrage nach alternativen Antriebsvarianten nicht nur exemplarisch, sondern in Serie zu bedienen. Auch wenn aktuell noch nicht von einer weiten Verbreitung¹ von Fahrzeugen mit alternativem Antrieb gesprochen werden kann, so ist doch das ehrgeizige Ziel der Bundesregierung, bis zum Jahr 2020

eine Million Zulassungen von Elektrofahrzeugen in Deutschland zu erreichen (Die Bundesregierung 2009: 2). Unabhängig davon, dass der dann eventuell erreichte Anteil von knapp 2,0 Prozent am Gesamtfahrzeugbestand noch nicht signifikant erscheint, so kann und muss von einer punktuell – wie z. B. in Städten – und damit verkehrstechnisch relevanten Verbreitung von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben ausgegangen werden. Die in Verkehrssimulationen eingesetzten Simulationsmodelle für Fahrzeuge müssen auf diese neuar-

¹ Im Jahr 2013 besaßen 1,5 Prozent der in Deutschland neu zugelassenen Fahrzeuge einen alternativen Antrieb (Kraftfahrt-Bundesamt 2014b). Wodurch am 01.01.2014 ein Gesamtanteil von 0,2 Prozent am Fahrzeugbestand erreicht wurde (Kraftfahrt-Bundesamt 2014a).

tigen Gegebenheiten abgestimmt werden, damit sich auch in diesen Szenarien weiterhin aussagekräftige Ergebnisse erzielen lassen.

Dies bedeutet im Detail eine Abkehr von der Verwendung von statischen Modellen zur Simulation von Fahrzeugen mit klassischen Antriebskonzepten wie dem Verbrennungsmotor. Die Notwendigkeit dafür basiert auf der Feststellung, dass für die Simulation von Fahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten, wie z.B. Elektromotor oder Hybridantrieb, ein dynamisches Simulationsmodell benötigt wird. Dynamisch vor allem in der Hinsicht, dass bestimmte spezifische Eigenschaften eines Fahrzeuges nicht mehr konstant sind, sondern sich während der Fahrt verändern können. So hat zum Beispiel ein Hybridfahrzeug nicht mehr nur eine maximale Beschleunigung, sondern diese hängt in starkem Maße davon ab, welche Kombination von Antrieben situativ zum Einsatz kommt. Beispielhaft dafür steht der Toyota Prius III. Dessen Gesamtsystemleistung des Hybrid-Antriebs von 100 kW erlaubt andere Fahrleistungen als die reinen 73 kW an Maximalleistung des Verbrennungsmotors (Toyota Deutschland GmbH 2014: 18).

Ein Zwischenziel auf dem Weg zur Entwicklung eines solchen dynamischen Simulationsmodells für Fahrzeuge mit flexiblen Antriebskonzepten ist die Erarbeitung eines allgemeingültigen Modells zur Bestimmung des Energiebedarfs sich bewegender Fahrzeuge unter Berücksichtigung der Fähigkeiten von mikroskopischen Verkehrssimulationen. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf der Ausgestaltung des Dilemmas zwischen physikalischer Genauigkeit und notwendiger rechen technischer Performanz.

Dieser Beitrag gliedert sich wie folgt: Sektion II gibt einen Überblick über vorhandene Arbeiten zu diesem Thema und bewertet deren Ansätze. In Sektion III wird ein eigener Ansatz zur Ermittlung des Energiebedarfs hergeleitet, welcher darauf folgend in Sektion IV mit den bestehenden Arbeiten verglichen wird. Sektion V fasst dann die erzielten Ergebnisse zusammen und zeigt den weiteren Forschungsbedarf auf.

2. STAND DER FORSCHUNG

Die Ermittlung des Energiebedarfs von Kraftfahrzeugen spielt insbesondere bei der Betrachtung der ausgestoßenen Emissionen eine wichtige Rolle. Da dies keine neue Forschungsthematik ist, existieren verschiedene Ansätze der Modellierung. Treiber et al. geben eine kompakte Übersicht über die möglichen Modellierungsformen (Treiber & Kesting 2013: 379–387). Da in dieser Arbeit und der zugrunde liegenden Zielstellung eine Tank-to-Wheel-Betrachtung für einzelne Fahrzeuge verfolgt wird, kommen nur lastbasierte Modelle infrage. Dabei kann jedoch schon im Voraus festgelegt werden, dass das gesuchte physikbasierte Modell zwar mit etablierten Modellen, wie dem „Comprehensive Modal Emission Model“ (CMEM) oder dem „Passenger Car and Heavy Duty Emission Model“ (PHEM), vergleichbar ist, jedoch insbesondere aufgrund der Anforderung an die rechen technische Performanz ohne deren tiefgreifenden Detailgrad auskommen muss.

Beispielhaft für eine Vielzahl von Veröffentlichungen steht das von Treiber & Kesting (2013) beschriebene Treibstoffverbrauchsmodell, welches auf einem klassischen physikalischen Kräftemodell basiert. Dazu wird pro Zeitintervall ermittelt, wie hoch die Leistung ist, die das Fahrzeug im nächsten Schritt erbringen muss, um daraus dann den entsprechenden Treibstoffbedarf zu berechnen. Die physikalischen Einflüsse auf das Fahrzeug ergeben sich bei Treiber & Kesting additiv aus Beschleunigungskraft, Hangabtriebskraft, Rollwiderstand und Luftwiderstand. Die Auswirkungen der Wirkungsgrade werden, mit Ausnahme beim Motor bei der Ermittlung des Treibstoffbedarfs, außer Acht gelassen.

Neudorfer (2010) setzt ebenfalls auf das physikalische Kräftemodell; erweitert dieses jedoch im Bereich des Rollwiderstandes um den Lagerwiderstand.

Im Rahmen der Simulation von Elektrofahrzeugen beschäftigen sich auch Maia et al. (2011) mit dem Energiebedarf von Fahrzeugen. Das physikalische Kräftemodell wird von ihnen insbesondere um die Berücksichti-

gung der Kraft zur rotatorischen Beschleunigung des Motors erweitert. Zusätzlich zu den einwirkenden Kräften werden auch die Wirkungsgrade von Motor und Getriebe berücksichtigt. Bei der letztendlichen Berechnung des Energiebedarfs beschreibt diese Arbeit als einzige auch einen Regelkreis mit der Aufgabe, zu kontrollieren, ob der Motor überhaupt in der Lage ist, die angeforderte Leistung zu liefern und bei Bedarf die Anforderung entsprechend zu korrigieren.

In ihrer Untersuchung zu Ladeinfrastrukturen für elektrisch angetriebene Busse ermitteln Kurczveil & Schnieder (2013) ebenfalls den notwendigen Energiebedarf. Wenngleich in dieser Arbeit nicht mit den Kräften, sondern den äquivalenten Energiemengen gearbeitet wird, so erweitern die Autoren das klassische Kräftemodell um den Widerstand zur Bewältigung von Kurven im Straßenverlauf. Obzwar der Einfluss des Kurvenwiderstands bei schweren Fahrzeugen wie Bussen sicherlich größer als bei Pkw ist, fällt es schwer, diesen von vornherein – wie in vielen anderen Arbeiten – von der Hand zu weisen. Vor allem da auch Hirano et al. (2014) die Auswirkungen des Kurvenwiderstands eindrucksvoll aufzeigen (vgl. Abbildung 2).

Beispielhaft für eine Berücksichtigung der Anforderungen an die Performanz steht die Arbeit von Schellenberg et al. (2014). Das dort entwickelte Modell zur Ermittlung des Energiebedarfs ist rein analytischer Natur und verwendet z. B. stets eine konstante Motoreffizienz für alle Fahrsituationen. Ebenso geht das physikalische Kräftemodell über den Standard nicht hinaus, was jedoch genau der Zielstellung der Arbeit entspricht.

Insgesamt gesehen ist keines dieser Modelle auf Fahrzeuge mit kombinierten Antrieben, wie z. B. Hybridfahrzeugen ausgerichtet. Dies bedeutet, dass immer von konstanten Eigenschaftswerten ausgegangen wird und Veränderungen der Kraftflüsse unberücksichtigt bleiben.

Im Ergebnis führt das Literaturstudium zu keinem einhelligen Gesamtbild. Obgleich die Mehrzahl aller Publikationen auf das klassische phy-

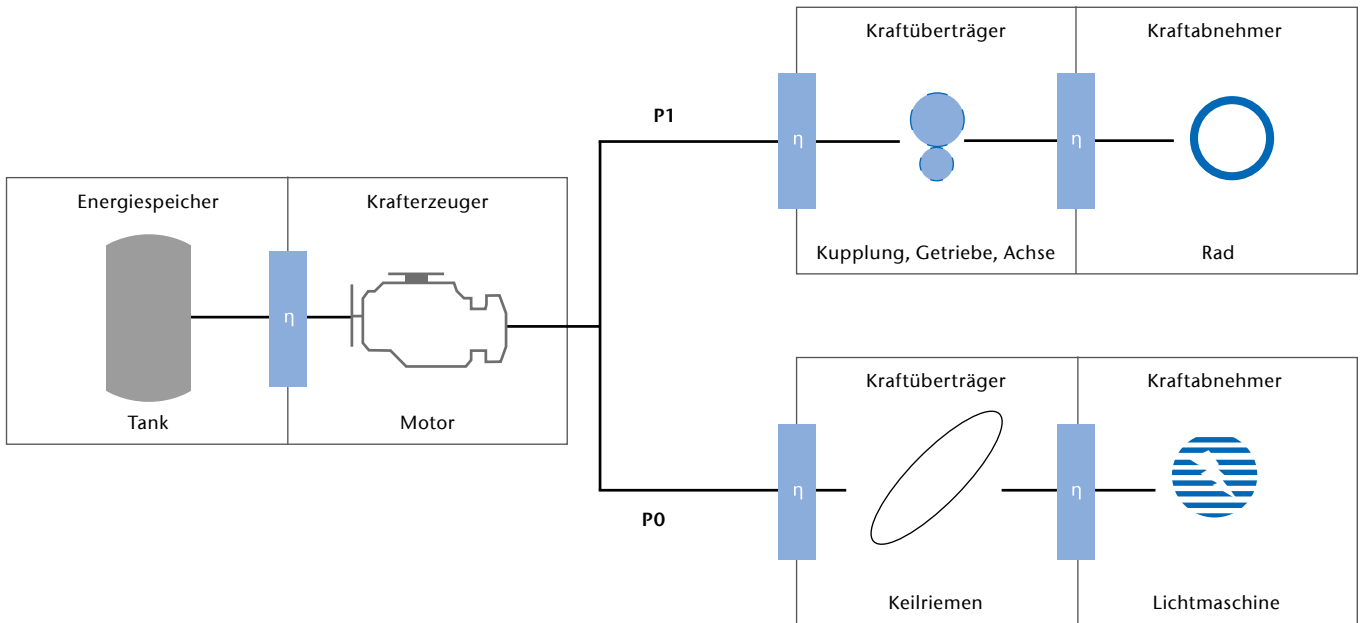


Abb. 1) Fahrzeugmodell, erweitert um Grundleistung und Wirkungsgrade.

sikalische Kräftemodell zurückgreift, gibt es doch eine Reihe von weiteren Publikationen, welche dieses um weitere offensichtlich relevante Aspekte erweitern. Davon ausgehend wurde die Entscheidung getroffen, noch einmal einen Schritt zurückzugehen und ausgehend von einer neutralen, rein physikalischen Betrachtung der Fahrzeugdynamik eine eigene Modellvariante zu entwickeln.

3. MODELL ZUR ERMITTLUNG DES LEISTUNGSBEDARFS

3.1 VORBEREITUNG

Die Beschreibung eines theoretischen Fahrzeugmodells, welches in einer zeitdiskreten mikroskopischen Verkehrssimulation eingesetzt werden kann, bedeutet, dass dieses Modell anhand von mathematischen und physikalischen Zusammenhängen aufgebaut wird und damit im Gegensatz zur experimentellen Modellbildung steht, in welcher die Modelle anhand der Identifikation von Ereignissen und Vorgängen erstellt werden. Der Schwerpunkt bei dieser Modellbildung liegt dabei auf einer möglichst korrekten Abbildung der physikalischen Zusammenhänge in Bezug auf das Fahrzeug. Somit werden in diesem Modell auch nur die technischen Faktoren berücksichtigt und nicht das Zusammenspiel zwi-

sehen mehreren Fahrzeugen oder psychologische Aspekte des Fahrzeugführers.

Als Ausgangspunkt dient ein einfaches allgemeines Fahrzeugmodell (siehe Abbildung 1), welches aus den vier Komponenten Energiespeicher, Krafterzeuger, Kraftübertragung und Kraftabnehmer besteht. Diese Verallgemeinerung soll es ermöglichen, die unterschiedlichsten Fahrzeugantriebsarten in der gleichen Simulationsumgebung abzubilden.

Der für den Vortrieb erforderliche Energieverbrauch eines Fahrzeugs, also die für den Kraftabnehmer erforderliche Energie zur Erfüllung der gestellten Aufgabe (z. B. gewünschte Geschwindigkeit), wird anhand eines physikalischen Kräftemodells bestimmt. Der äquivalente Leistungsbedarf, um das Fahrzeug anzutreiben, wird als P_1 bezeichnet.

Für eine realitätsnahe Modellierung ist es jedoch erforderlich, zusätzlich die elektrische Leistung zu berücksichtigen, welche für die im Fahrzeug verbauten Nebenverbraucher aufgewendet werden muss. Zu diesen Nebenverbrauchern gehören die elektrischen Verbraucher wie z. B. im Motor verbaute Pumpen, Servolenkung, Klimaanlage, Radio und Licht. Dieser Grundleistungsbedarf, also der von der Geschwindigkeit unabhängige Leistungsbedarf aller

Nebenverbraucher, wird als P_0 bezeichnet.

Bei der Betrachtung von Systemen aus der Perspektive des Leistungsbedarfs ist eine Einbeziehung von Wirkungsgraden (η) pro Komponente oder Übertragungsweg unerlässlich, um die entstehenden Energieverluste durch Transformation oder Übertragung nicht zu vernachlässigen. Der Aspekt der Laufzeitperformanz spiegelt sich zu diesem Zeitpunkt in der Form wider, dass im Rahmen des zu erstellenden Modells nur die in Längsrichtung auf das Fahrzeug einwirkenden Kräfte betrachtet werden.

3.2. ALLGEMEINES PHYSIKALISCHES MODELL

Das allgemeine physikalische Modell dient der Ermittlung des Leistungsbedarfs zum Antrieb der Räder, welcher durch die Antriebsmaschine eines Fahrzeugs für die Vorwärtsbewegung aufgewandt werden muss, um z. B. eine gewünschte Geschwindigkeit v oder Beschleunigung a zu erreichen. Es handelt sich somit um die zu überwindende Bewegungskraft F_{Fahr} , welche auch als Fahrwiderstand bezeichnet wird.

Nach Mitschke & Wallentowitz (2004) wirken auf ein Fahrzeug in Fahrtrichtung insbesondere die folgenden Kräfte:

F_{Roll}	als Rollwiderstand in N
$F_{Schwall}$	als Schwallwiderstand in N
F_{Lager}	als Lagerwiderstand in N
$F_{RestBrems}$	als Restbremsmoment in N
F_{Vsp}	als Vorspurwiderstand in N
F_{Kurve}	als Kurvenwiderstand in N
F_{Steig}	als Steigungswiderstand in N
F_{Luft}	als Luftwiderstand in N
F_{Rot}	als Rotationsenergie in N
F_{Besch}	als Beschleunigungswiderstand in N

Für den Fahrwiderstand F_{Fahr} gilt demnach

$$1 \quad F_{Fahr} = F_{Roll} + F_{Schwall} + F_{Lager} + F_{RestBrems} + F_{Vsp} + F_{Kurve} + F_{Steig} + F_{Luft} + F_{Rot} + F_{Besch}$$

Die nachfolgenden Abschnitte setzen sich mit den einzelnen Kräften auseinander und bewerten deren Relevanz.

Rollwiderstand

Der Rollwiderstand F_{Roll} setzt sich aus zwei Komponenten zusammen. Zum einen aus der Verformungskraft, die der Reifen aufbringen muss, um sich in den Latsch hineinzudrehen bzw. wieder herauszudrehen. Diese Kraft entspricht der Radlast. Zum anderen aus der Reibkraft, die seitlich auf das Rad aufgrund der dauerhaften Verformung des Untergrundes auftritt. Da die Bestimmung der Reibkraft nur unter einem sehr hohen Aufwand erfolgen kann, wird zur Vereinfachung der Rollwiderstandsbeiwert als Proportionalitätsfaktor verwendet. Der Rollwiderstandsbeiwert wurde ursprünglich anhand von Versuchsergebnissen für verschiedene Rad-Untergrund-Kombinationen entwickelt und ist gängigen Tabellenbüchern zu entnehmen.

Nach der Festlegung von

F_{Rad}	als die Radlast in N und
f_r	als den dimensionslosen Rollwiderstandsbeiwert

lautet die Formel zur Bestimmung der Rollreibungskraft F_{Roll} wie folgt:

$$2 \quad F_{Roll} = F_{Rad} * f_r$$

Schwallwiderstand

Der Schwallwiderstand tritt bei z.B. regennasser Fahrbahn auf und beschreibt die Kraft, die erforderlich ist, um Wasser unter dem Rad zu verdrängen. Die Größe des Widerstandes hängt von der Geschwindigkeit des fahrenden Fahrzeugs ab und von der Fläche, in die das Rad eintaucht. Die Bestimmung des Schwallwiderstandes erfolgt annäherungsweise.

Nach der Festlegung von

v	als die Geschwindigkeit in m/s ,
b	als die Reifenbreite in m und
n	als geschwindigkeitsabhängigen Exponenten

lautet die Formel zur Bestimmung des Schwallwiderstands $F_{Schwall}$ wie folgt:

$$3 \quad F_{Schwall} \sim b * v^n$$

Der geschwindigkeitsabhängige Exponent kann gängigen Tabellenwerken entnommen werden und liegt laut Mitschke & Wallentowitz (2004: 12) ab einer Wasserstandshöhe von 0,5 mm bei ca. 1,6.

Lagerreibung

Der Lagerwiderstand (F_{Lager}) tritt im Radlager auf und beschreibt eine Kraft, die entgegen der Rollrichtung wirkt. Zur Bestimmung ist das Wissen über die Lagerbelastung, den Reibbeiwert des Lagers und den Lagerradius erforderlich.

Sei

$F_{LBelastung}$	die Lagerbelastung in N ,
μ_L	der Reibbeiwert des Lagers und
r_L	der Lagerradius,

dann lautet die Formel für Bestimmung von F_{Lager} in Nm

$$4 \quad F_{Lager} = \mu_L * r_L * F_{LBelastung}$$

Obwohl in dieser Formel bereits Verallgemeinerungen getroffen wurden, wie z.B. der Einsatz eines Reibbeiwert-

tes, über welchen das Material, die Schlüpfrigkeit und die Verarbeitungsqualität des Lagers abgebildet werden, kann diese Kraft nur unter einem sehr hohen Aufwand ermittelt werden. Abgesehen davon ist die Lagerreibung in der Regel, außer während des Anfahrens, sehr viel kleiner als die Rollreibung.

Um sie dennoch in einem Simulationsmodell einfließen lassen zu können, schlägt Neudorfer (2010: 66) vor, einen Prozent der Radlast des Fahrzeugs als Näherungswert zu verwenden. Somit wäre

$$5 \quad F_{Lager} = 0,01 * F_{Rad}$$

Exemplarische Berechnungen zeigen in diesem Fall jedoch einen deutlich zu hohen Anteil des Lagerwiderstands am Gesamtwiderstand, welcher als nicht korrekt eingeschätzt wird. In dieser Arbeit wird der Lagerwiderstand daher vernachlässigt.

Restbremsmoment

Mit dem Restbremsmoment ($F_{RestBrems}$) wird die bei Scheibenbremsen auftretende Kraft beschrieben, die auch nach dem Lösen der Bremse auftreten kann. Dies geschieht in der Regel bei älteren Scheibenbremsen dadurch, dass die Bremsbeläge auf der Brems Scheibe schleifen (Mitschke & Wallentowitz 2004).

Da das Restbremsmoment je nach Bauart und Alter der Bremsen signifikant variiert, wird dieser Wert in der Simulation vernachlässigt.

Luftwiderstand

Der Luftwiderstand beschreibt die Reibungskraft, die das Fahrzeug überwinden muss, um sich in der Erdatmosphäre bewegen zu können.

Nach der Festlegung von

c_w	als dimensionslosen Strömungswiderstandskoeffizienten,
ρ	als Luftdichte in kg/m^3 ,
A	als Frontfläche des Fahrzeugs in m^2 und
v	als Geschwindigkeit in m/s

lautet die Formel zur Bestimmung des Luftwiderstandes F_{Luft} folgendermaßen:

6
$$F_{Luft} = \frac{1}{2} * c_w * \rho * A * v^2$$

Bei dieser Formel handelt es sich bereits um eine vereinfachte Betrachtung des Luftwiderstandes. So werden nur die bei absoluter Windstille frontal auf das Fahrzeug einwirkenden Kräfte betrachtet, die aufgrund der Luftverdrängung während der Fahrt auftreten.

Vernachlässigt werden einerseits Windgeschwindigkeiten und andererseits die seitlich und senkrecht auf das Fahrzeug einwirkenden Kräfte durch auftretende Winde und Luftverwirbelungen. Eine Berücksichtigung dieser Kräfte hätte Auswirkungen auf das gesamte Modell, da z. B. ein Aufwind unter dem Fahrzeug zu einer verringerten Radlast führen würde.

Kurvenwiderstand

Den Kurvenwiderstand (F_{Kurve}) muss ein Fahrzeug während einer Kurvenfahrt überwinden. Während dieser bei normaler Fahrt unter 0,4g auf trockener Straße als unbedeutend angesehen werden kann, sollten bei höheren Seitenbeschleunigungen die dadurch entstehenden Kräfte an den Antriebsrädern berücksichtigt werden.

Nach der Festlegung von

- m als Fahrzeugmasse in kg,
- v als Geschwindigkeit in m/s,
- r als Kreisradius in m,
- l_H, l_V als Abstand zwischen den beiden Achsen bzw. von vorderer oder hinterer Achse zum Fahrzeugschwerpunkt und
- α_V, α_H Schräglaufwinkel der Vorder- und Hinterräder

lautet die Formel zur Bestimmung des Kurvenwiderstands F_{Kurve} wie folgt:

7
$$F_{Kurve} = m * \frac{v^2}{r} * \left(\frac{l_H}{l} * \sin(\alpha_V) + \frac{l_V}{l} * \sin(\alpha_H) \right)$$

Bei Annahme von $l_H/l = l_V/l$ vereinfacht sich dies zu

8
$$F_{Kurve} = m * \frac{v^2}{r} * \sin(\alpha_V)$$

In der Arbeit von Hirano et al. (2014) werden die Kräfte einer Geradeausfahrt den Kräften einer Kurvenfahrt gegenübergestellt. Auf Abbildung 2 ist zu erkennen, dass sich die einwirkende Gesamtkraft während einer Kurvenfahrt (rechter Balken) im Gegensatz zur einwirkenden Kraft bei einer Geradeausfahrt (linker Balken) ungefähr verdoppelt.

Es lässt sich daraus schlussfolgern, dass der Kurvenwiderstand sehr wohl einen direkten Einfluss auf das Fahrzeugverhalten ausüben kann und somit zu einem erhöhten Leistungsbedarf führen kann.

Steigungswiderstand

Der Steigungswiderstand (F_{Steig}) beschreibt die positive Kraft, die dem Fahrzeug entgegenwirkt, wenn es eine Steigung befährt. Befährt das Fahrzeug ein Gefälle, wird diese Kraft negativ.

Nach der Festlegung von

- m als Fahrzeugmasse in kg,
- g als Gravitationskraft in m/s² und
- α als Steigungswinkel in Grad

lautet die Formel zur Bestimmung des Steigungswiderstandes F_{Steig} wie folgt:

9
$$F_{Steig} = m * g * \sin(\alpha)$$

Beschleunigungswiderstand der Fahrzeugmasse

Die Beschleunigungskraft (F_{Beschl}), auch Trägheitskraft genannt, tritt immer dann auf, wenn sich die Geschwindigkeit des Fahrzeugs verändert. Ganz konkret repräsentiert dieser Widerstand die translatorische Beschleunigung der Fahrzeugmasse.

Nach der Festlegung von

- m als Fahrzeugmasse in kg und
- a als Beschleunigung in Fahrtrichtung in m/s²

lautet die Formel zur Bestimmung der Beschleunigungskraft (F_{Beschl}) wie folgt:

10
$$F_{Beschl} = m * a$$

Beschleunigungswiderstand der rotatorischen Massen

Der Beschleunigungswiderstand der rotatorischen Massen (F_{Rot}) ist ein Teil des allgemeinen Beschleunigungswiderstands und beschreibt die erforderliche Kraft zur Beschleunigung der sich drehenden Teile eines Fahrzeugs.

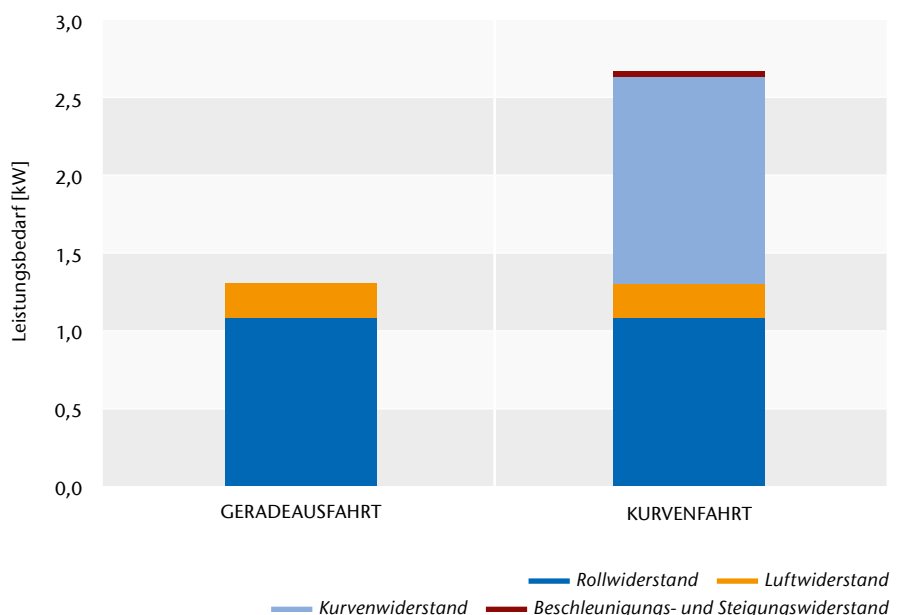


Abb. 2) Kräfteeinfluss bei Kurvenfahrt (nach Hirano et al. 2014: 65).

Nach der Festlegung von

- J_{Rj} als die Massenträgheitsmomente der sich drehenden Teile,
- r_j als die Radien der sich drehenden Teile und
- R_j als die dynamischen Halbmesser der sich drehenden Teile

lautet die Formel zur Bestimmung der Rotationsenergie F_{Rot} wie folgt:

$$11 \quad F_{Rot} = a * \sum_{j=1}^n \frac{J_{Rj}}{r_j * R_j}$$

Es ist zu erkennen, dass die Berechnung der Rotationsenergie tiefgehendes Wissen über die einzelnen Komponenten des Fahrzeugs erfordert. Da der dafür zu betreibende Aufwand in keinem sinnvollen Verhältnis zum Nutzen steht, schlagen Maia et al. (2011) vor, diese Berechnung durch eine Anhebung der Fahrzeugmasse um 5% zu substituieren. Somit gilt:

$$12 \quad F_{Rot} = 0,05 * F_{Besch}$$

Zusammenfassung

In der Betrachtung des Fahrwiderstands wurden die einzelnen Teilkräfte eingeführt und deren Berechnung beschrieben. Es wurde aufgezeigt, dass die Berechnung des Restbremsmoments, des Lagerwiderstandes und des Vorspurwiderstandes für die praktikable Bestimmung des Leistungsbedarfes einen so geringen Einfluss auf den gesamten Leistungsbedarf haben, dass sie vernachlässigt werden können. Außerdem wurde für die Bestimmung des Beschleunigungswiderstands der rotatorischen Massen eine Vereinfachung eingeführt. Darauf basierend kann Formel (1) folgendermaßen angepasst werden:

$$13 \quad F_{Fahr} = F_{Schwall} + F_{Roll} + F_{Kurve} + F_{Steig} + F_{Luft} + 1,05 * F_{Besch}$$

3.3 BERÜCKSICHTIGUNG SIMULATIONS-TECHNISCHER EINSCHRÄNKUNGEN

Moderne Verkehrssimulationen (vgl. Barceló 2010) sind sehr leistungsfähige Werkzeuge für eine Vielzahl von Einsatzzwecken. Dessen ungeachtet gibt es immer noch eine Reihe von Beschränkungen für einzelne Einsatzfälle. Dies ist einer Reihe von Gründen geschuldet. So ist einerseits oftmals das vorhandene Kartenmaterial nicht aussagekräftig genug, um z.B. zuverlässige Höhenprofile zu integrieren. Und andererseits erfordert – trotz aller Fortschritte – die vorhandene Rechenkapazität immer noch Kompromisse im Detailgrad der Modellierung von Straßennetzen.

Konkret hat dies die folgenden Auswirkungen auf das in (13) formulierte physikalische Modell:

- Die Verwendung von Graphen zur Modellierung des Straßennetzes bedingt die Zerlegung von Kurven in einzelne Teilstücke oder deren Beschränkung auf reine Knotenpunkte. Es sind daher in der Regel keine auf Kurvenradien basierende Funktionalitäten, wie z.B. das Abbremsen vor Kurven, realisierbar.
- Der Verzicht auf eine Integration von Wetterinformationen – höchstens auf globaler Ebene für das gesamte Simulationsgebiet – erlaubt daher auch nicht die realistische Integration von wetterbasierenden Kräfteinflüssen. So sind z.B. Fahrbahnen mit stehendem Wasser üblicherweise nicht flächendeckend anzutreffen.
- Ohne realistische Höhenprofile fällt es schwer, zuverlässig die Einflüsse von Steigungen und Gefällen zu berücksichtigen. Um dieses Ziel zu erreichen müsste jedoch der Detailgrad des Knotennetzes derart erhöht werden, dass dies der Leistungsanforderung der Performanz widerspricht. Eine grobe Umsetzung ist jedoch möglich und wurde im Rahmen dieser Arbeit implementiert.

Unter Berücksichtigung der vorherigen Ausführungen ist es notwendig, der Modellierung des Fahrwiderstandes F_{Fahr} folgende auch simulationstechnisch realisierbare Darstellung zu geben:

$$14 \quad F_{Fahr} = F_{Roll} + F_{Steig} + F_{Luft} + 1,05 * F_{Besch}$$

Gleichwohl werden im nachfolgenden Vergleich die in (14) entfernten Einflüsse über pragmatische Annahmen und Nebenrechnungen berücksichtigt.

4. VERGLEICH

Für die Überprüfung der Relevanz unseres Modells haben wir es in einer mikroskopischen Verkehrssimulation implementiert und mit dem klassischen physikalischen Modell verglichen. Neben diesem Vergleich wurde die verwendete Simulationsumgebung derart modifiziert, um auch den entfallenen Schwallwiderstand sowie den Kurvenwiderstand zumindest vereinfacht berücksichtigen zu können.

4.1 SIMULATIONSUMGEBUNG

Die für die Durchführung der Simulation verwendeten statischen Fahrzeugmodellparameter sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Die Fahrstrecke stellt einen dreieckigen Rundkurs dar. Die Eckpunkte der Strecke wurden A, B und C benannt. Ein Fahrzyklus besteht aus der Route $A \rightarrow C \rightarrow B \rightarrow A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$. Der gewählte Fahrzyklus entspricht keinem Standardzyklus, wie z.B. dem Modifizierten Neuen Europäischen Fahrzyklus (MNEFZ) (vgl. Dietsche & Reif 2014), da diese Fahrzyklen in der Regel nur Bewegungen in verschiedenen Geschwindigkeiten auf einer Ebene beschreiben und somit die für diese Arbeit wesentlichen Auswirkungen von Steigungen und Gefällen außer Acht lassen. Detailinformationen über die Fahrstrecke enthält Tabelle 2.

Für die exemplarische Modellierung von Kurvenfahrten im Rahmen einer Verkehrssimulation wird ein stark abstrahiertes Kurvenmodell verwendet. Eine Kurve wird als Kreisbogen mit einem Radius r und einem Mittelpunktswinkel α_M formuliert. Dies erlaubt dann die Berechnung der Länge des Kreisbogens und somit der für die Bewältigung dieser Kurve benötigten Leistung. Währenddessen wird ein konstanter Schräglaufwinkel $\alpha_v = 5^\circ$ angenommen. Geschwindigkeitsänderungen auf den Hälften des Kreisbogens werden über die jeweils erlaubte Höchstgeschwindigkeit abstrahiert.

Die Festlegung der Kurvenradien in Tabelle 3 erfolgt gemäß den aktuellen Baurichtlinien, veröffentlicht in Schneider et al. (2014).

4.2 VERGLEICH DER LEISTUNGSBEDARFE

Zum Vergleich der physikalischen Kräftemodelle wird ein Fahrzeug jeweils einen Fahrtzyklus lang auf der definierten Fahrtstrecke bewegt. Das Fahrzeugfolgmodell ist dabei derart ausgelegt, dass es immer versucht, die jeweilige erlaubte Höchstgeschwindigkeit zu erreichen, jedoch Bremswege vor Geschwindigkeitseinschränkungen oder dem Ziel berücksichtigt. Während der Fahrt werden die Leistungswerte für die Überwindung der jeweiligen Widerstände für jeden Simulationsschritt ($\Delta t = 20\text{ms}$) erfasst.

Verglichen werden die folgenden Kräftemodelle:

- a) das klassische Modell von Treiber & Kesting (2013)
- b) das in dieser Arbeit entwickelte Modell (siehe (14))
- c) Formel (14), erweitert um einen konstanten Schwallwiderstand (mit $n=1,5$ und $b=0,195$ m)
- d) Formel (14) mit Berücksichtigung des Kurvenwiderstands

Zuerst stellt der für eine Fahrt benötigte Gesamtleistungsbedarf die Grundlage für den Vergleich dar. Die gewonnenen Ergebnisse zeigen, dass die in dieser Arbeit erstellten Modelle insgesamt gesehen keinen signifikanten Unterschied bei der Modellierung

Tab. 1: Statische Modellparameter

Parameter	Symbol	Wert
Fahrzeuggewicht	m	1400 kg
Maximale Geschwindigkeit	v_{max}	192 km/h
Maximale Beschleunigung	a_{+max}	2 m/s ²
Maximale Bremsrate	a_{-max}	3 m/s ²
Strömungswiderstandskoeffizient	c_w	0,3
Fahrzeugfrontfläche	A	2,0 m ²
Rollwiderstandsbeiwert	f_r	0,01
Luftdichte bei 20°	ρ	1,25 kg/m ³

Tab. 2: Statische Modellparameter

Strecke	Länge	Steigung	Max. Geschwindigkeit
A – B	14.993 m	6,48 %	30 km/h
B – C	16.054 m	0,00 %	80 km/h
A – C	29.994 m	3,24 %	50 km/h

Tab. 3: Kurvendefinition

Kurve	Mittelpunktswinkel	Radius
A – B – C	150,05°	200 m
B – C – A	14,45°	300 m
B – A – C	15,50°	90 m

Tab. 4: Vergleich der Gesamtleistungsbedarfe

	Modell (a)	Modell (b)	Modell (c)	Modell (d)
Beschleunigungswiderstand	63776 kW	64178 kW	64966 kW	64178 kW
Rollwiderstand	419173 kW	418835 kW	418834 kW	418835 kW
Steigungswiderstand	677224 kW	677219 kW	677218 kW	677219 kW
Luftwiderstand	351055 kW	351004 kW	350999 kW	351004 kW
Beschleunigungswiderstand (rot.)		3209 kW	3248 kW	3209 kW
Schwallwiderstand			205 kW	
Kurvenwiderstand				1692 kW
		+ 0,21 %	+ 0,28 %	+ 0,32 %

der verschiedenen Kräfteinflüsse erzielen (siehe Tabelle 4).

Im Einzelnen zeigt sich zum Beispiel bei der Betrachtung des Rollwiderstandes, dass die von Treiber & Kesting getroffenen Vereinfachungen, d. h. die Nichtberücksichtigung des Steigungswinkels zur Anpassung der Normalkraft, wirklich gerechtfertigt sind. Der Anteil des Beschleunigungswiderstandes der rotatorischen Massen beträgt erwartungsgemäß 5,0 Prozent. Eine weitere Ursache für die geringfügigen Unterschiede ist in den stochastischen Elementen des Fahrzeugfolgmodells (z. B. Trödefaktor) zu suchen.

Ein ganz anderes Bild ergibt sich jedoch bei der Betrachtung einer situativen Energiebilanz. Wird – dies sei an dieser Stelle exemplarisch herausgegriffen – der Energiebedarf einer einzelnen Zeitscheibe verglichen, so wird deutlich, dass Kräfte wie der Kurvenwiderstand situativ eine signifikante Rolle spielen können. Ein im Modell (d) im Gegensatz zu Modell (a) um 27,1 Prozent erhöhter momentaner Leistungsbedarf bei einer Kurvenfahrt in der Ebene mit konstanter Geschwindigkeit (siehe Abbildung 3) kann zum Beispiel dazu führen, dass – auch bei klassischen Fahrzeugkonzepten – die Maximalleistung des Antriebs überschritten wird und die aktuelle Ge-

schwindigkeit nicht gehalten werden kann. Fahrzeuge mit kombinierten Antrieben könnten u. a. mit einer Veränderung des Betriebsmodus, d. h. z. B. Zuschaltung eines weiteren Antriebs, reagieren.

5. ABSCHLUSSBETRACHTUNGEN

Bei dem Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Modellierungsvarianten konnte festgestellt werden, dass die primär sowohl aus dem Grund der Vereinfachung des Modells als auch der Berechnung im Allgemeinen nicht berücksichtigten Komponenten des physikalischen Modells keinen signifikanten Einfluss auf den Gesamtenergiebedarf für die Bewegung von Fahrzeugen haben. Für den Energiebedarf im Momentanbereich konnte jedoch eine Relevanz deutlich aufgezeigt werden. Die üblicherweise getroffenen Vereinfachungen sind aus Sicht der Zielstellung vieler Simulationsprojekte verständlich. Wenn ein allgemeines Emissionsmodell für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor aufgestellt oder die großflächige Verteilung von Ladestationen bei Elektrofahrzeugen untersucht werden soll, dann sind derlei Vereinfachungen sehr wohl vertretbar, da ihre Signifikanz durch den gewünschten bzw. geforderten Genauigkeitsgrad aufgehoben wird.

Bei der Simulation von Fahrzeugen mit alternativen Antrieben ist es jedoch erforderlich, deren interne Prozesse des Energiemanagements möglichst genau abzubilden. Die Steuerung des Zusammenspiels von mehreren Antrieben ist ein komplexes Geflecht von Regeln und Zuständen, dessen Modellierung wesentlich stärker von externen und internen situativen Parametern, dabei gerade auch vom aktuellen Leistungsbedarf, abhängt, als dies bei Fahrzeugen mit nur einem Antrieb erforderlich ist. So führt etwa die in dem erstellten Modell erzielte Erhöhung des Anteils der Energien welche nicht rekuperiert werden können, d. h. Energien, welche das System Fahrzeug verlassen, auch dazu, dass z. B. „Folgefehler“ bei der Ermittlung der Reichweite vermieden bzw. verringert werden. Zusammenfassend gesehen muss daher konstatiert werden, dass für eine weitere Verbesserung der Simulationsqualität, gerade im Hinblick auf Fahrzeuge mit alternativen Antrieben, an einer Reduzierung der funktions-technischen Einschränkungen von Verkehrssimulationsumgebungen gearbeitet werden muss. Lässt sich dieser Schritt nicht vollziehen, dann sind die Vereinfachungen des klassischen Energiebedarfsmodells (siehe Modell (a)) als geeignet anzusehen.



Abb. 3) Situativer Leistungsbedarf bei konstanter Kurvenfahrt in der Ebene.

² Die Zeitscheiben ergeben sich aufgrund der diskreten Simulationsarchitektur.

LITERATUR

Barceló J (ed) (2010) Fundamentals of Traffic Simulation. International Series in Operations Research & Management Science, vol 145. Springer, New York. ISBN: 978-1-4419-6142-6. doi: 10.1007/978-1-4419-6142-6

Die Bundesregierung (2009) Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität der Bundesregierung. http://www.bmbf.de/pubRD/nationaler_entwicklungsplan_elektromobilitaet.pdf. Accessed 17 Sep 2014

Dietsche K, Reif K (2014) Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, 28th edn. Springer Vieweg, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-03800-7

Hirano Y, Inoue S, Ota J (2014) Model-based Development of Future Small EVs using Modelica. In: Tummescheit H, Árzén K (eds) Proceedings of the 10th International Modelica Conference, 10–12 March 2014, Lund, Sweden, pp 63–70. doi: 10.3384/ecp1409663

Kraftfahrt-Bundesamt (2014a) Der Fahrzeugbestand im Überblick am 1. Januar 2014 gegenüber 1. Januar 2013. http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/2014_b_ueberblick_.pdf?__blob=publicationFile&v=7. Accessed 17 Sep 2014

Kraftfahrt-Bundesamt (2014b) Jahresbilanz der Neuzulassungen Jahr 2013. http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/neuzulassungen_inhalt.html?nn=644264. Accessed 17 Sep 2014

Kurczveil T, Schnieder E (2013) Extending a traffic simulation tool for the evaluation of novel charging infrastructures. In: 3rd International Electric Drives Production Conference (EDPC), 29–30 Oct 2013, Nuremberg, Germany, pp 1–5. doi: 10.1109/EDPC.2013.6689752

Maia R, Silva M, Araujo R, Nunes U (2011) Electric vehicle simulator for energy consumption studies in electric mobility systems. In: IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems (FISTS), 29 Jun – 1 Jul 2011, Vienna, Austria, pp 227–232. doi: 10.1109/FISTS.2011.5973655

Mitschke M, Wallentowitz H (2004) Dynamik der Kraftfahrzeuge, 4th edn. Springer, Berlin. ISBN: 978-3-540-42011-8

Neudorfer H (2010) Weiterentwicklung von elektrischen Antriebssystemen für Elektro- und Hybridstraßenfahrzeuge. Österreichischer Verband für Elektrotechnik, Wien. ISBN: 978-3-85133-056-4

Schellenberg S, Berndt R, Eckhoff D, German R (2014) A Computationally Inexpensive Battery Model for the Microscopic Simulation of Electric Vehicles. In: IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 14–17 Sep 2014, Vancouver, BC, Canada, pp 1–6. doi: 10.1109/VTCFall.2014.6965807

Schneider K, Goris A, Albert A (eds) (2014) Bautabellen für Ingenieure. Mit Berechnungshinweisen und Beispielen, 21st edn. Bundesanzeiger-Verlag, Köln. ISBN: 978-3-8462-0304-0

Toyota Deutschland GmbH (2014) Prius – Preise und Fakten. http://www.toyota.de/download/cms/dede/Toyota-Prius-PDB_tcm-17-100397.pdf. Accessed 17 Sep 2014

Treiber M, Kesting A (2010) Verkehrsdynamik und -simulation. Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik. Springer, Berlin, Heidelberg. ISBN: 978-3-642-05227-9. doi: 10.1007/978-3-642-05228-6

Treiber M, Kesting A (2013) Traffic flow dynamics. Data, models and simulation. Springer, Heidelberg, New York. ISBN: 978-3-642-32460-4

AUTOREN

Peter Bernhardt, M.Sc.
Technologietransfer- und Weiterbildungszentrum an der Technischen Hochschule Wildau FH e.V.
peter.bernhardt@th-wildau.de

Christian Sauer, M.Sc.
Technologietransfer- und Weiterbildungszentrum an der Technischen Hochschule Wildau FH e.V.
sauer@th-wildau.de

Prof. Dr. Michael Hendrix
Technische Hochschule Wildau
michael.hendrix@th-wildau.de

Automated Recognition of Sleep Stages Using Electroencephalograms

Valeriy Bezruk, Egbert Gedat, Katja Holzheimer, Ralf Vandenhouten*

Abstract

The assessment of different sleep stages and their disorders in diseases is an important part of telematic medicine. With an electroencephalogram, the different stages of sleep can be monitored and classified with respect to brain activity. By means of modern data management such as the patient monitor ixTrend, for example, the data can be recorded for long sleep phases and evaluated by a computer using appropriate software, such as Dataplore. Here, a new mathematical model for the automated classification of sleep stages is introduced. The statistical method of autocorrelation, applied to six known sleep stages, was extended by one new class for unknown signals. Due to this new class, it is not necessary to sort all recorded EEG signals into one of the known classes, thereby, minimising the probability of errors. Further, the dependence of the error probability on the duration of the analysed EEG signal was assessed. A minimal error probability of $p_{\min} = 0.15$ was detected. Exemplary data for one patient are reported.

Zusammenfassung

Die Beurteilung der verschiedenen Schlafphasen und deren Störungen bei Erkrankungen spielt eine wichtige Rolle in der telematischen Medizin. Mit einem Elektroenzephalogramm können die Schlafphasen überwacht und in verschiedene Klassen der Hirnaktivität eingeteilt werden. Durch moderne Methoden des Datenmanagements, wie etwa den Patientenmonitor ixTrend, können die Daten über längere Schlafphasen aufgezeichnet und am Computer mit geeigneter Software, etwa Dataplore, analysiert werden. Hier wird ein neues mathematisches Modell zur automatischen Klassifizierung der Schlafphasen vorgestellt. Die statistische Methode der Autokorrelation, angewendet auf sechs bekannte Schlafphasen, wurde erweitert um eine neue Klasse nicht zuordenbarer Muster. Durch diese neue Klasse wird es vermieden, jedes aufgezeichnete EEG-Muster in eine der bekannten Klassen hineinzuzwingen. Dadurch wird der Fehler bei der Zuordnung verringert. Weiter wird der Einfluss der Länge des analysierten EEG auf die Fehlerquote der Zuordnung untersucht. Es zeigte sich eine minimale Fehlerquote von $p_{\min} = 0,15$. Es werden beispielhafte Daten eines Patienten gezeigt.

1. INTRODUCTION

The telematics research group at the TH Wildau has been pursuing a collaboration with ixellence and Philips in the area of telemonitoring for several years. Problems of automated diagnosis support are increasingly emerging. In addition to vital parameters like heart frequency, blood pressure, and ECG the analysis of EEG imposes new demands on signal processing. With an electroencephalogram the sleep stages can be monitored, classified according to brain activity, and screened for disorders due to diseases (Motamedi-Fakhr et al. 2014: 21–33). Studying the structure of sleep and its disorders plays an

important part in medical telematics. The analysis of the nighttime sleep structure is significant in the diagnosis of brain disorders. In cases of functional diseases of the nervous system and psychoses, sleep disorders are often the main complaint, and sometimes the only one. Examination of the nighttime sleep structures turns out to be also useful in the analysis of the sleep functions and mechanisms. Specifically the sleep structure of patients with ischemic heart diseases is studied in cardiac clinics, since dangerous cardio-vascular system attacks – heart beat disorders, myocardial infarction – often develop during the night sleep (Neymark et al. 1985: 376). Changes in the functional condition

of the brain entail changes in the nature of its electric activity. The electroencephalogram (EEG) is a good indicator of the brain's level of wakefulness and adequately reflects the depth of sleep. Analysis can also be performed with respect to cardiovascular parameters (Cotuk et al. 2004). Successes achieved in studying sleep organisation are closely related to the use of electroencephalographic examinations. However, recognition of the sleep stages by the EEG records is time consuming, labour intensive, and expensive, since EEG recording of the night sleep takes hundreds of meters of documentation on paper. Moreover, visual analysis involves only descriptive criteria to identify

* corresponding author

the stages of sleep, which lead to the emergence of differing expert views in assessing the transitions between the stages. Sleep structure study objectivation and automation has therefore become a necessity. Various mathematical methods of signal analysis may be applied for this purpose (Bezruk et al. 2005: 45–48, Kravchenko et al. 1991: 138–142, Neymark et al. 1985: 376). Nevertheless, automated determination of the sleep stages by the EEG with the use of mathematical methods is related to certain difficulties, caused by the similarity of the spectral composition of the EEG for separate sleep phases and stages, specifics of correspondent EEG in different people, and the emergence of artifacts.

Different approaches can be applied to solve these problems, characterised by the selected mathematical description (model) of the EEG and the respective recognition algorithm. Spectral methods of the sleep stages recognition can be used, based on an EEG description with expansion factors given by specific base functions (e.g. DEF, Walsh, and Haar) (Neymark et al. 1985: 376). Furthermore, the autoregressive model (AR) can be applied to describe the EEG (Zhovna & Shallom 2008: 2665–2668). It enables the synthesis of autoregressive algorithms for signal recognition (Kravchenko et al. 1991: 138–142). In this research, using the method of known signal recognition is recommended, extended by a class of unknown signals to consider the effects of artifacts (Neymark et al. 1985: 376). This enables reducing the probability of errors while solving the problem of automatic recognition of the sleep stages in real conditions. The suggested autoregressive method of the sleep stages recognition by the EEG is described, as well as some findings of examinations, carried out by statistical simulation with the selected sections for 6 typical stages of sleep from the EEG. A schematic of the method is depicted in Fig. 1.

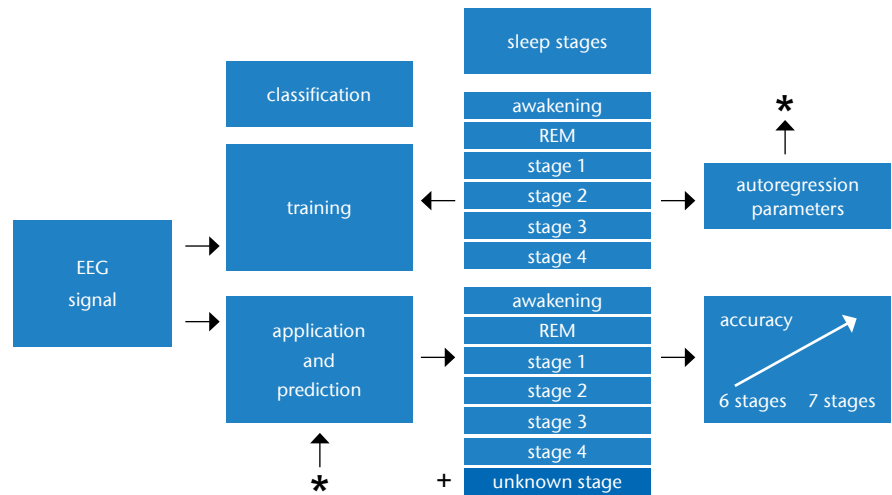


Fig. 1) Schematic of the EEG signal processing. The autoregression algorithm is trained with known sleep stages yielding the autoregression parameters. These are used to analyse unknown EEG signals. The introduction of a seventh class ‘unknown stage’, increases the accuracy of the method.

2. EEG MATHEMATICAL MODEL AND THE METHOD OF SLEEP STAGES RECOGNITION

Analysis of EEG data is mathematically adhered to time-series analysis as in (Vandenhouten et al. 2000: 729–737, Vandenhouten et al. 1999). It is presumed that the EEG is adequately described by the mathematical model as an autoregression process (Kravchenko et al. 1991: 138–142).

$$1 \quad X_t = a_1^i \cdot X_{t-1} + a_2^i \cdot X_{t-2} + \dots + a_{p_i}^i \cdot X_{t-p_i} + \sigma_i v_t$$

The parameters of the AR model $A_t = (a_1^i, a_2^i, \dots, a_{p_i}^i, \sigma_i, i, p_i)$ at any time t meet the stability terms and belong to one of the M classes. It is suggested that the parameters of the AR model, selected to describe the EEG, are known or may be determined based on the classified training of selected values of the EEG sections. It is also thought that the parameters of the EEG model remain stable over significant period of time.

After receiving another reference reading x_t of the EEG section under already available reference readings $\tilde{x}_t = (x_t, \dots, x_{t-T})$ it is necessary to find the class to which the analyzed EEG segment belongs to at $t \geq T$ (where T is the duration of the EEG segment under analysis). In a number of practical cases, the duration of the EEG time interval T , which determines the decision, is significantly shorter than the time interval of the AR stability parameters, selected for the EEG description. Then it is possible to suggest a simpler solution for the problem of the automated sleep stage recognition using autoregressive algorithms of the signal recognition. Furthermore, to take the appearance of artifacts appearing in real world conditions into consideration, introduction of an additional $M + 1$ - class of unknown signals in the recognition decision procedure is expected. Considering the expression for the multivariate density in Gaussian autoregressive sequences, the algorithm of automated recognition of the given sleep stages of the EEG, together with the now available $M + 1$ - class of unknown signals, will look as follows (Kravchenko et al. 1991: 138–142, Bezruk et al. 2005: 45–48):

2a $H^k : K_k(\vec{x}) < \Lambda_k, \quad k = \overline{1, M}$

2b $K_k(\vec{x}) - K_i(\vec{x}) + \ln \frac{(2\pi\sigma_i)^{p_i-L}}{(2\pi\sigma_k)^{p_k-L}} \geq \ln \frac{P_k}{P_i},$

2c $H^{M+1} : K_k(\vec{x}) > \Lambda_k, \quad k = \overline{1, M}$

Here, with

2d
$$K_k(\vec{x}) = \frac{1}{2\sigma_k^2} \sum_{l=p+1}^L \left[x_l - \mu_k - \sum_{j=p+1}^{p_k} a_j^k (x_{l-j} - \mu_k) \right]^2$$

a correlation is included in the expression for the multivariate density, determining the standardised forecasting error in the AR model. These Λ_k are given by

2e
$$\Lambda_k = \ln \frac{(2\pi)^{\frac{L}{2}} \sigma_k^{L-p_k} \lambda_k}{P_k}$$

Tab. 1: Autoregression model parameters obtained under the EEG for 6 different sleep stages.

	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$	$i = 6$
σ_i	25.4	18.3	21.5	15.7	15.9	11.2
a_1	0.61	0.51	0.24	0.06	0.12	0.38
a_2	0.67	0.42	0.33	0.18	0.50	0.26
a_3	0.75	0.37	0.25	0.13	0.11	0.33
a_4	0.62	0.24	0.06	0.08	0.09	0.28
a_5	0.32	0.13	0.06	0.03	0.07	0.17
a_6	0.16	0.17	0.17	0.04	0.04	0.12
a_7	0.17	0.22	0.14	0.08	0.06	0.16
a_8	0.15	0.18	0.05	0.02	0.01	0.15
a_9	0.09	0.13	0.05	0.04	0.01	0.09
a_{10}	0.03	0.04	0.05	0.01	0.01	0.03

and define threshold values, determined by the provision of the given probabilities of the correct recognition of the given M sleep stages. P_k is the order and a_j^k are the EEG AR model parameters for k sleep stage. According to this, a two step recognition algorithm decision for the i sleep stage applies: provided execution of at least one of the inequalities in (2a), as well as provided the execution of the inequality system in (2b). When inequality (2c) is executed, the decision for the $M + 1$ class of the unknown signals applies. In the recognition algorithm (2), the parameters of the AR models are assumed to be known. Providing they are unknown, they should be determined by the selected classifying training EEG sections.

Thus, this algorithm operates in two modes: training and recognition. In the training mode it is possible to determine the values of the correlation functions, which enable identifying the AR model parameters (in particular, using the Yule Walker equation). In recognition mode, it can be determined to which class (corresponding to the sleep stages) a given EEG with duration T belongs, including the possible option that it belongs to the class of the unknown signals.

Geometrical sense of the rule of decisionmaking according to (2) is that for the EEG of the given sleep stages, separate closed regions are constructed in parameter space. If observations are made in one of these separate regions, the decision is made for the respective sleep stage. Otherwise, the observed EEG section refers to the class of unknown signals.

The decision-making procedure (2) may be extended in case it is necessary to make decisions for EEGs coming from several recording channels. To describe this multi-channel EEG, it is possible to use vector autoregression. Therewith, it is possible to define a recognition algorithm of type equation (2), which allows for the more complicated situation of multi-channel input. The practical specifics and working features of the autoregression signal recognition algorithms using selected Gaussian random signals with different correlation functions were as-

essed in (Neymark et al. 1985: 376). From the practical point of view, it is interesting to conduct the study with the suggested algorithm for recognition of given signals under available unknown signals using equation (2) for the problem of recognising stages of sleep by the EEG.

3. FINDINGS FOR AUTOMATED SLEEP STAGES RECOGNITION BY EEG

We will provide several results of studying the sleep stage recognition algorithm of equation (2) that were obtained using selected EEGs for the 6 stages of sleep. Table 1 shows the AR model parameters that were found for the EEGs for each of the 6 stages of sleep. The research involved selected EEG sections with the volume of 50,000 reference points for each of the 6 stages of sleep. The parameters were generated according to the classified training decision procedure of equation (2).

Reference sections were used to study practical specifics of solving the problem of automated recognition of the sleep stages by EEG. We also examined the dependency of the quality of recognising sleep stages on the value of the EEG monitoring interval T , which determines the decision on the current sleep stage (Fig. 2).

Minimum value of the mean probability of the erroneous recognition of the sleep stages was found $P_{\min} = 0.15$. In the result of producing reference EEG selections for the recognition of different stages of sleep the following diagrams of changes in the sleep stages were obtained. They are convenient for the operative analysis of the patient's sleep structure and further diagnostics. One section of the diagram is provided in Fig. 3.

4. CONCLUSION

A new method of automated recognition of the given sleep stages by EEG is suggested, introducing the class of unknown signals. The method is based on the EEG description by the mathematical model in the form of autoregression processes. During the process of the EEG recognition, the decision is made either for one of the sleep stages or for

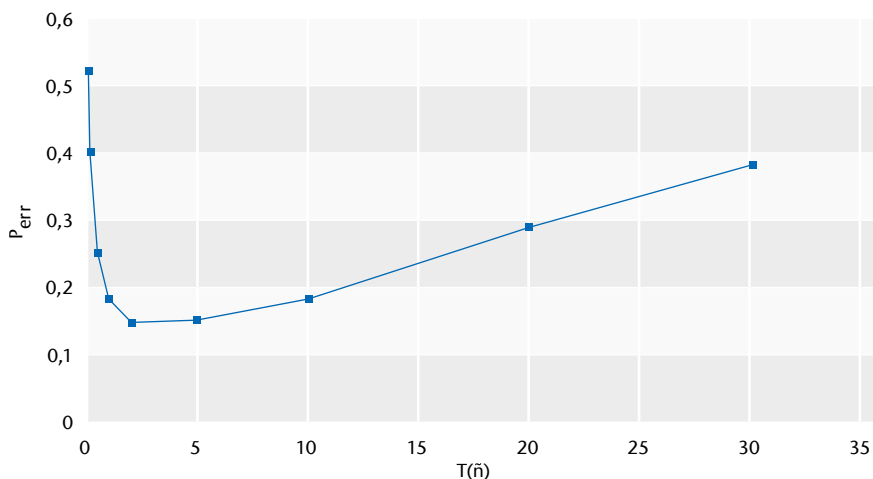


Fig. 2) Dependency of the mean probability of erroneous recognition of the sleep stages on the duration of the EEG interval used to make decisions.

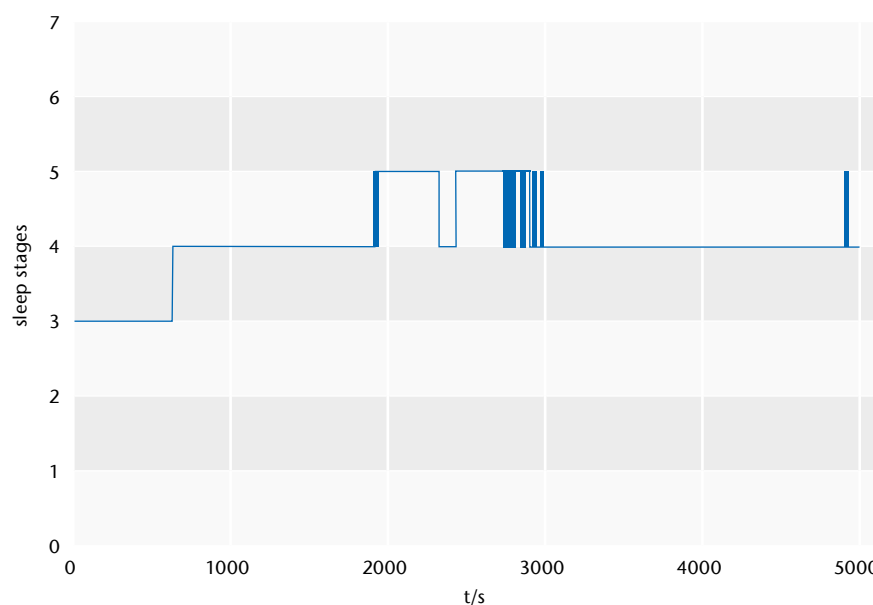


Fig. 3) Diagram of sleep stage ($N = 3...4...5$) changes on the duration of sleep obtained by the results of the EEG recognition.

the class of unknown observations. This method of recognition enables reduction of the probability of erroneous decisions in real conditions, which infer the emergence of various artifacts. The method of recognising sleep stages by EEG may be used in creating automated systems of information support for diagnosing diseases of the nervous and cardiovascular systems.

The work provides findings of practical specifics of the automated sleep stages recognition by EEG. The study was carried out by statistical simulation using selected EEG sections for 6 typical sleep stages. The dependency of the error in recognising sleep stages on the EEG time interval used for determining the

decision was obtained. The research paper also provides time diagrams of changes in the sleep stages, which may be practically useful in the operative evaluation of the night sleep structure. In order to further reduce probability of erroneous recognition of sleep stages, it is advisable to apply EEGs received from several channels (8 or 16) in making decisions. Therewith, it is preferable to use a vector autoregression model for the EEG mathematical description and synthesise the correspondent algorithm of the EEG recognition.

To obtain final recommendations for the practical use of the suggested method of automated sleep stages recognition, it is necessary to conduct

clinical studies on real night sleep EEGs using signals coming from several channels of the electroencephalograph, as well as taking into account different sources of artifacts, including opening the eyes and changes in the electrode position.

The method is suited for integration in a direct telemonitoring software, ixTrend (Holzheimer 2014b), and the appendant data analysis software, Dataplore (Holzheimer 2014a, Vandenhouten et al. 1999), developed by one of the author's research groups (RV). Here, the EEG signals displayed on standard patient surveillance monitors are tapped and fed into a sophisticated signal analysis environment, providing diverse tools, including statistical and nonlinear analysis.

REFERENCES

Bezruk VM, Kovalenko NP, Lysenko VA (2005) About one method of the sleep stages recognition based on the autoregression model of electroencephalograms (in Russian). *Bionika intellekta Nov.*(1):45–48

Cotuk B, Perlitz V, Vandenhouten R, Grebe R, Lambertz M, Petzold ER, Schmid-Schönbein H (2004) Variable N:M phase synchronisation between physiological rhythms and the 0.15 Hz rhythm band during 'relaxed' behavioural states. In: *Proceedings of the International Congress on Modeling Mental Processes and Disorders*, 24–29 May 2004, Kuşadası, Turkey

Holzheimer K (2014a) Dataplore – Analysis of signals and time series data. <https://www.ixellence.com/index.php/en/products/dataplore>. Accessed 25 Aug 2014

Holzheimer K (2014b) ixTrend – recording vital signs from Philips IntelliVue patient monitors. <https://www.ixellence.com/index.php/en/products/ixtrend>. Accessed 25 Aug 2014

Kravchenko NI, Bezruk VM, Tihonov VA (1991) Recognition of casual signal within the framework of autoregression models. Probabilistic models and processing casual signals and fields (in Russian). *UMK VO*, Kiev

Motamedi-Fakhr S, Moshrefi-Torbati M, Hill M, Hill CM, White PR (2014) Signal processing techniques applied to human sleep EEG signals – A review. *Biomed Signal Process Contr* 10:21–33. doi: 10.1016/j.bspc.2013.12.003

Neymark YP, Kogan NJ, Saweljew WP (1985) Pattern recognition in medical diagnosis (in Russian). *Nauka*, Moscow

Vandenhouten R, Lambertz M, Langhorst P, Grebe R (2000) Nonstationary time-series analysis applied to investigation of brainstem system dynamics. *IEEE Trans Biomed Eng* 47(6):729–737. doi: 10.1109/10.844220

Vandenhouten R, Rasche M, Parotat E, Lenz A., Fluck M (1999) Dataplore – A Professional Environment for Time Series and Signal Analysis. *Datan*

Zhovna I, Shallom ID (2008) Automatic detection and classification of sleep stages by multichannel EEG signal modeling. In: *IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBS) Annual International Conference*, 20–25 Aug 2008, Vancouver, BC, pp 2665–2668. doi: 10.1109/IEMBS.2008.4649750

AUTHORS

Prof. Dr. Valeriy Bezruk
Head of department Communication networks
Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine
valeriy_bezruk@ukr.net

Dr. rer. nat. Egbert Gedat
Technische Hochschule Wildau
Forschungsgruppe Telematik
egbert.gedat@th-wildau.de

Katja Holzheimer
ixellence GmbH
katja.holzheimer@ixellence.com

Prof. Dr. rer. nat. Ralf Vandenhouten
Technische Hochschule Wildau
Forschungsgruppe Telematik
ralf.vandenhouten@th-wildau.de

Various Types of Polyurethanes in the process of Chemical Recycling

Silke Beckmann, Michael Herzog*

Abstract

Increasing raw material costs and more stringent regulations have led to more pressure to develop customer-oriented recycling processes for polyurethanes. Furthermore, waste disposal runs into increasing costs for the producers while old methods of disposal are prohibited legally, both in the US and Europe. One way to solve this problem is to develop a well-suited process and plant for a customer specialised procedure to re-use the waste material obtained for each type of polyurethane product. Based on the previously described simultaneous glycolysis and aminolysis of polyurethanes in this paper, we will report on first results on larger scale recycling of some polyurethane products. While we were initially focused on the use of the recycling products (recycling polyols) to produce new types of polyurethanes, e. g. from cold moulded foams sealants or coatings, the philosophy had to be changed to use the recycling polyols as much as possible to produce the same materials as originally. This route was consequently developed further to other polyurethane products and the incorporation of the recycling polyols into original premixes to be reacted with isocyanates.

Zusammenfassung

Steigende Materialkosten und verschärfte regulatorische Anforderungen sind Stressoren hin zu einem anwenderorientierten chemischen Recycling von Polyurethanen. Ferner ist die Abfallablagerung in den USA und Europa weitgehend nicht mehr möglich und die Entsorgung mit steigenden Kosten verbunden. Eine Möglichkeit, das Problem zu lösen, besteht darin, für jeden Polyurethan-Typ einen entsprechend angepassten Prozess einschließlich Anlagenauslegung für die Wiederverwendung des Abfallmaterials zu entwickeln. Aufbauend auf einer kombinierten Glykolyse und Aminolyse wird im vorliegenden Artikel über erste Ergebnisse einer Maßstabsvergrößerung an konkreten Polyurethan-Produkten berichtet. Die Zielrichtung zu Beginn war die Verwendung von Recycling-Produkten (Recycling-Polyolen) zur Herstellung von neuen Polyurethan-Typen, z. B. ausgehend von Kaltformweichschäumen zu Dichtmassen oder Beschichtungen. Mit der nunmehr verfolgten Philosophie werden so viel wie möglich Recycling-Polyole in der Original-Rezeptur verwendet. Dieser Weg wurde konsequent für Polyurethanprodukte unter Einbeziehung von Recycling-Polyolen in ursprünglichen Mischungen zur Reaktion mit Isocyanaten weiterentwickelt.

1. SHORT REVIEW OF THE PROCESS

The combined glycolysis and aminolysis reaction make use of the re-esterification at the urethane group by the glycols present to liberate the polyetheralcohol originally employed and an amidation reaction with cleavage of the urethane group to produce a trisubstituted urea and the originally present alcohol (Stoychev et al. 2010). The polyureas present remain mainly unchanged, only on extended addition or reaction times the cleavage by the glycolic hydroxyl groups to form primary aromatic amines occurs as an undesirable side reaction

(Stoychev et al. 2011).

Depending on the type of polyurethane to be treated, the glycol is either only a monomer or an oligomer or, as in most cases, is a mixture of several glycols so as to produce optimum product quality and ease the dissolution of the solid particles. As has been shown previously (Langenstraßen et al. 2001), the type of glycol determines the rate of reaction to some extent but more the viscosity of the recycling polyol and the final properties of the new polyurethane produced from it. An additional feature is the particle size of the grafted polymers from grafted polyols used

which may be established by proper choice of the glycol mixture (see further chapters).

The recycling polyols may be produced by the batch, or continuously (Schmidt et al. 2001). The batch process makes use of jacketed stainless steel reactors with a volume up to 6 metric tonnes with specially designed periphery equipment and a specially designed dosage unit so as to receive a continuous flow of solid particles with optimum rate into the reactor. The reactor outlet is connected to a filtering unit to filter off any insoluble material and additionally

* corresponding author

to be able to apply a certain reduced pressure to degas the recycling polyol if necessary. There is no need for further treatment of the recycling polyol, moreover, it is used as produced (Behrendt & Pohl 1999, 2004b, 2004a). In the continuous process, a twin screw reactor is typically used where the shafts of the screws and the mantle are both heated to the reaction temperature by a heat transfer medium, usually thermal oil. The feed is made by a screw to densify the material and by dosage pumps and the outlet is again connected to a filtering unit and a suction pump.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 MATERIALS

Diethylene glycol (DEG), dipropylene glycol (DPG), polyethylene glycols (PEG) of molecular weight 200 and 400, and polypropylene glycol (PPG) of molecular weight 400 were obtained by Fluka AG and used without further purification, polypropylene glycol 2000 was a gift of Elastogran AG, Germany, dinbutyl amine (DBA) was purchased from Merck KGaA, Darmstadt, Germany, and used without further treatment. Catalysts used were Dabco 33 LV as a gift from Air Products and Polycat NP 40 from Performance chemicals GmbH. Stabilizers of various types were generously given by Th. Goldschmidt AG.

The various types of polyurethanes were samples from producers of Germany, Japan, Mexico, Poland, the USA, Bulgaria, or Portugal.

2.2 METHODS

First experiments were generally performed in small-scale lab glass ware: a 750 ml four necked glass flask with stirrer, thermometer, reflux and solids inlet. The liquids were placed into the reactor, heated to 180°C, and the solids introduced with stirring as fast as possible while the temperature was slowly increased to the final reaction temperature. At this, the mixture was kept after completion of the addition another 30 to 60 minutes. The reaction mixture was allowed to cool down, filtered, and subjected to analysis.

The next step was the first scale up to a 1.75 kg batch in a 2.5 l glass reactor. The apparatus was as before and so is the process. For filtering, in this case was used a pressurized filter with a 120 mesh screen where the pressure was obtained from compressed nitrogen and applied with up to 25 kp/cm².

The third step in up-scaling was the use of a 100 l stainless steel reactor heated by thermal oil and stirred by a blade stirrer at 60 rpm. The process was the same as before, for filtering a suction filter was directly connected to the bottom outlet and used together with a membrane vacuum pump. The reactor was equipped with a three stage heat exchanger consisting of demister, first heat exchanger adjusted to a predetermined temperature and a second heat exchanger to collect any low boiling liquids.

3. RESULTS

3.1 RECYCLING POLYOLS FROM AUTOMOTIVE PRODUCTS

From automotive wastes, mainly seat cushions, i.e. cold moulded foams, ceiling elements, i.e. rigid reinforced foams, and wheel mould flashes, i.e. microcellular elastomers or flexible integral foams, were reacted to form recycling polyols.

Cold moulded foams were delivered by two main German manufacturers as complete cushions that did not meet standards. These were cut to flakes of about 8 cm size by a shredder. The flakes were introduced into the respective reactor without further treatment or separation.

The seats were used in an amount between 50 and 75% by weight to produce recycling polyols with viscosities ranging from 2,000 to 30,000 mPas (25°C) and hydroxyl numbers of 350 to about 270 mg KOH/g. The aim was to add the recycling polyols to pre-mixes to result in elastic products again. Mainly, the recycling polyols were used as additives with 15 to 25% by weight in pre-mixes to produce flexible cold moulded foams. Additionally, they were used to produce new types of material, e. g. sealants or steel tank coatings (Evtimova et al. 2004) or

composites with wood fibers (Belke et al. 2003). Table 1 depicts some examples of recycling polyols as derived from cold moulded foams.

By the process described from cold moulded flexible foams, recycling polyols can be prepared with a viscosity in the range between 3,500 and 27,000 mPas (25°C) with waste loads of the mixture between 60 and 75% by weight. In the range of about 65% by weight of solids the viscosity is established in the range between 4,000 and 11,000 mPas with hydroxyl numbers of about 300 mg KOH/g. These recycling polyols maybe used as an additive to commercial pre-mixes or added as an additional feed to the foaming mixture up to 30% by weight. The resultant foams increase somewhat in hardness but do not suffer a loss in low temperature performance or comfort.

Integral foams processed were polyether based systems used to produce steering wheel shells of which the mould flashes were shredded to pieces of about 5 cm thickness. The flakes were subjected to several investigation of the system in which the amount of solids, the amine content, and the reaction time were systematically investigated.

As in the case of the cold moulded Foams, the optimum amount of polyurethane solids is again in the range of 60 to 65% by weight where the viscosity is of a magnitude allowing the recycling polyol to be added to a pre-mix or processed as one of the components of the foaming mixture. The addition of the secondary amine leads to a rather high amine number in the lab scale experiments. This does not significantly affect the processing times, but may in some cases lead to a decrease in the amount of catalyst.

The investigation of several amine concentrations is presented in table 3. As shown in table 3, the amine concentration does not significantly affect the amine number. It only results in a further increase at concentrations beyond 4% by weight. This limit is different for any type of polyurethane and depends on the concentration of urethane groups present in the polymer. Most effect is contributed by the reaction time as shown in table 4.

Tab. 1: Recycling polyols from flexible cold molded foams

Item/No.	191	192	194	198	130
PUR (% by weight)	65,0	70,0	63,0	62,5	75,0
DPG (% by weight)	30,0	25,0	32,0	32,5	23,3
DBA (% by weight)	5,0	5,0	5,0	5,0	1,7
Reaction temperature (°C)	210	210	210	210	200
Reaction time (min)	55	60	55	45	115
Appearance	turbid	viscous	clear	clear	inhomogeneous
OH-No. (mg KOH/g)	299	251	310	303	213
Amine No. (mg KOH/g)	48	15	17	18	21
Viscosity (25°C) (mPas)	11,500	17,800	4,100	3,680	27,000

Tab. 2: Recycling polyols made with varying the amount of polyurethanes

No.	PUR (% by weight)	Reaction time (min)	OH No. mg KOH/g	Amine No. mg KOH/g	Viskosity (25°C) (mPas)
149	70,0	190	225	29	15,030
158	65,0	110	266	27	6,600
146	63,0	90	310	28	10,800
150	60,0	100	269	22	5,130
143	55,0	105	351	23	4,850
151	50,0	80	336	20	2,020
152	40,0	65	413	16	1,230

Tab. 3: Systematic variation of the amount of di-n-butyl amine in batches with 60 % by weight polyurethane solids load

No.	DBA (% by weight)	Reaction time (min)	Hydroxyl No. (mg KOH/g)	Amine No. (mg KOH/g)	Viskosity (25°C) (mPas)
153	1,0	95	336	24	6880
154	2,0	95	335	25	7700
155	3,0	95	336	28	5640
156	4,0	95	338	31	5280
157	5,0	95	335	36	5340

Tab. 4: Systematic variation of the reaction time in batches with constant polyurethane solids load at 200°C

No.	DBA (% by weight)	Reaction time (min)	Hydroxyl No. (mg KOH/g)	Amine No. (mg KOH/g)	Viscosity (25°C) (mPas)
159	63,2	50	246	17	9650
160	63,2	65	241	20	8360
161	63,2	80	243	25	5900
162	63,2	95	244	26	6600
163	63,2	110	254	24	5500
164	63,2	125	230	20	9610

The reaction time of the mixture after completing the addition of the polyurethane foam flakes increases corresponding to the increasing the reaction time, reaching a limit after about 90 minutes. Shorter reaction times (addition and post reaction) such as 50 minutes could not be established under lab conditions with suitable amounts of reactands (i. e. a batch size of 500 g). In continuous production, this number maybe decreased further by establishing reaction times of 20 minutes. Shorter reaction times will not be suitable even at temperatures exceeding 250°C as demonstrated and proven by experiments conducted with a continuous and a semi-continuous reactor, as the reaction is not complete. The experiments performed to this point with up to a batch size of 90 kg demonstrate the integral foams to be processable to recycling polyols with suitable properties. The somewhat higher viscosity as compared with the polyols received from the cold moulded foams may be attributed to the different formulation and the load of solids (pigments and fillers). The wastes employed were glass fibre reinforced high density foams as used in car ceilings having an estimated density of 65 g/dm³. The glass fibres were of 20 to 48 mm length before the experiment and decreased to 12 to 27 mm length after. The fibres were separated by simple filtration via a Buchner funnel. The unknown formulation of the rigid foam led to lower degrees of solids content in the experiments as shown in table 5.

The rigid foams were transformed with 40 % by weight into polyols of hydroxyl numbers of about 400 mg KOH/g and viscosities in the range of 8,000 mPas (25°C) when any solids were filtered off. The solids were glass long fibres or solids consisting of other polymers (mainly polyolefins) which had to be separated before they could further processed to give rigid foams without reinforcements under lab scale conditions. The increases of the reaction temperature. In this case lead to a tremendous increase in viscosity. The source of this increase is not yet clear but may be attributed to finely dispersed solids and fillers of the original foam to produce structural viscous liquids.

3.2 FLEXIBLE SLABSTOCK FOAMS

Flexible slabstock foams are produced from polyether systems, polyester systems, and mainly based on grafted polyether systems. Each of these types needs a detailed investigation and a specially developed solvolysis mixture and processing technology. Furthermore, the final product properties need to be carefully determined by the customer according to his technology before process development to adjust both viscosity and hydroxyl content (Behrendt & Naber 2009).

Flexible slabstock based on polyester systems was solvolysed using a typical mixture to give viscous recycling polyols of light amber colour. They were produced by batch technology in small and 6 kg batches. The results are depicted in table 6.

With this type of slabstock foam, the viscosities of the recycling polyols are generally high as are the original polyester polyols. They may be processed into the premixes at higher temperature to result in flexible foams again. The limit of application into a typical premix was determined to be 15% by weight at present. Further experiments were performed to reduce the viscosity and to be able to use more than the limiting 15 % by weight in a premix. Some results of such experiments are presented in table 7.

The addition of only a few percent into the reaction mixture reduces clearly the viscosity to values suitable for use in the production. The recycling polyols are clear, amber liquids without any solid side products. The incorporation of these recycling polyols into slabstock foam formulations (free rise under lab conditions) led to a decrease in hardness and a higher degree of softness with lower ball rebound. This may be attributed to the interference of the short chain triols with phase build up during foaming and polymer formation.

The materials used in further experiments were flexible slabstock foam residues from the outer part of the block with densified skins having a determined density of 34.5 g/dm³ of the foam part. Some results are shown in table 8.

The results with polyether flexible

slabstock foams are similar to those obtained with cold moulded foams, i. e., in a range of solids, load to the reaction mixture of a bout 60 % by weight recycling polyols with suitable viscosities can be attained. The increase in the solid content as shown with batch 116 leads to a sharp increase in viscosity while the hydroxyl number accordingly decreases. In application of such recycling polyols, an optimum for viscosity and hydroxyl content has to be found to have both a maximum amount of recycling polyol added to the foaming mixture and optimum processing conditions. Flexible slabstock foams based on grafted polyether polyols are the main product in this field today, but present the greatest issue as well. The problem is centered on the solids content which maybe either separated and disposed of or dispersed in the recycling polyol as fine particles. As the reaction temperature typically exceeds the melting temperature of the grafted polymer chains, a special technology had to be developed to produce stable dispersions. A further limitation may arise from the polyureas present in the recycling polyol resulting in the combination of both viscosity problems through the build-up of tixotropy or of a high portion of non-Newtonian viscosity (structural viscosity). When developing a technology to separate the grafts, the solvolysis mixture needs to have a well-adjusted surface tension which is established by the use of a carefully selected mixture of short chain glycols. Some examples are presented in table 9, using batches that were produced on 1 kg basis to receive the grafts as filterable solids.

The technology and solvolysis mixture used in these experiments resulted in homogeneous recycling polyols of clear, light amber appearance with a viscosity as low as 1,500 mPas (25°C) due to the low solids content. A precipitate formed of solid needles of about 4 to 6 mm length and 0.5 to 1.5 mm thickness or particles of about 0.2 mm diameter which turned out to be the grafted polymers. The needle-like and the particulate material could be easily filtered off both at room temperature and at 75°C while the latter temper-

Tab. 5: Recycling polyols from reinforced rigid foams

Item/No.	166	168	169
Foam (% by weight)	40,1	40,1	40,1
DPG (% by weight)	29,2	29,2	29,2
DEG (% by weight)	35,2	29,2	29,2
DBA (% by weight)	1,5	1,5	1,5
Temperature (°C)	200	220	230
Time (min)	40	45	40
OH-No. (mg KOH/g)	381	387	473
Amine No. (mg KOH/g)	36	32	38
Viscosity (25°C) (mPas)	7,750	28,500	>50,000

Tab. 6: Recycling polyols from polyester slabstock foam

Item / No.	110	111	112	115	113
Foam (% by weight)	53,8	57,7	62,3	65,0	67,5
DPG (% by weight)	44,8	40,9	36,3	33,5	31,0
DBA (% by weight)	1,4	1,3	1,4	1,5	1,5
Temperature (°C)/time (min)	180/60	220/60	220/80	220/85	220/60
Hydroxyl No. (mg KOH/g)	303	331	292	290	275
Amine No. (mg KOH/g)	45	46	46	42	43
Viscosity (25°C) (mPas)	10,530	8,690	19,370	16,880	32,300

Tab. 7: Modified recycling polyols from polyester slabstock foam

Item / No.	122	124	130	131	132
Foam (% by weight)	65,0	71,0	75,0	57,7	57,7
DPG (% by weight)	33,5	27,4	23,3	38,9	36,8
Short chain triol(% by weight)	0	0	0	2,0	4,1
DBA (% by weight)	1,5	1,6	1,7	1,3	1,4
Temperature (°C)/time (min)	200/80	220/80	220/80	220/80	220/80
Hydroxyl No. (mg KOH/g)	304	278	213	348	346
Amine No. (mg KOH/g)	42	45	41	42	42
Viscosity (25°C) (mPas)	12,500	32,400	27,000	6,200	7,600

Tab. 8: Recycling polyols from polyether slabstock foam

Item / No.	116	117	119	121
Foam (% by weight)	70,0	57,7	57,7	57,6
DPG (% by weight)	28,3	40,9	40,9	40,9
DBA (% by weight)	1,6	1,4	1,4	1,5
Temperature (°C)/time (min)	200/80	220/80	220/60	220/95
Hydroxyl No. (mg KOH/g)	241	355	361	356
Amine No. (mg KOH/g)	41	41	41	41
Viscosity (25°C) (mPas)	57,750	4,200	3,880	3,780
Appearance	amber, with particles	light amber, clear	yellow, clear	yellow, clear

ature was preferred because of the much lower viscosity of the recycling polyol. The filtered recycling polyol was used as an additive up to 25% by weight in a typical formulation to produce polyether slabstock foams again.

When aiming at dispersed solids in the recycling polyols the technology and the solvolysis mixture had to be changed: the rate of the stirrer was increased to about 1200 rpm and the solvolysis mixture adjusted to a higher surface tension by the choice of the glycols. Some results are presented in table 10.

As shown in the table, by the process and technology developed recycling polyols with homogeneously dispersed non-settling solids and rather low viscosities could be obtained when applying a solids load between 55 and 70% by weight. The viscosities as measured by oscillation or rotation mode (Haake Rheostress® 300) possess a difference of roughly 800 mPas at 25°C which shows a high degree of structural viscosity originating from the combined action of the grafted polymers and the oligoureas present in the mixture.

The polyols thus obtained were introduced into a simple flexible foam mixture in the free rise mode (see formulation S1065 for details). In this formulation, part of the polyether polyol Lupranol® 2085 was substituted by the recycling polyols. The composition and some properties of the foams obtained are shown in table 11.

Tab. 9: Solvolysis of grafted polyether based flexible slabstock foam aimed at filterable solids (temperature always 220°C, reaction time 30 minutes)

Item/No.	141	142	145
PUR foam (% by weight)	40,0	40,0	40,0
DPG (% by weight)	43,1	48,1	51,7
Short chain triol (% by weight)	14,4	9,4	5,8
DBA (% by weight)	2,5	2,5	2,5
Appearance	Grey liquid with needle-like solids	Yellow liquid with solid phase	Yellow liquid with solid particles
Hydroxyl No. (mg KOH/g)	445	437	450
Amine No. (mg KOH/g)	44	45	43
Viscosity (25°C) (mPas)	1,480	1,670	1,560

Tab. 10: Solvolysis of grafted polyether based flexible slabstock foam aimed at homogenous polyols

Item/No.	139	105	195	196	197
Foam (% by weight)	50,0	50,0	60,0	55,0	65,0
DPG (% by weight)	36,0	37,6	29,75	34,85	26,4
DEG (% by weight)	12,0	9,4	5,25	6,15	4,6
DBA (% by weight)	2,0	3,0	5,0	4,0	4,0
Temperature (°C)	200	200	220	220	220
Time (min)	80	60	70	85	60
OH-No. (mg KOH/g)	381	434	329	374	284
Amine No. (mg KOH/g)	-	62	24,4	24,5	44
Viscosity oscillation mode (25°C) (mPas)	-	-	10,600	5020	7050
Viscosity rotation mode (25°C) (mPas)	-	8,100	10,500	4300	6200
Appearance	slurry	homogeneous, amber	homogeneous, dispersion	homogeneous, dispersion	homogeneous, dispersion

Tab. 11: Free rise foam composition and properties with the addition of the recycling polyols received from flexible slabstock foam based on grafted polyether alcohols (amounts given in % by weight)

Item/No.	S1040	S1045	S1046	S1042	S1043
Polyol 195	0	15.8	23.1		
Polyol 196	0	0	0	7.85	15.8
Lupranol® 2095	78.8	63.0	53.9	71.0	63.1
Polycat® NP40	0.33	0.33	0.32	0.33	0.33
TEGOSTAB® 8433	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Water	1.05	1.06	1.02	1.05	1.05
Lupranat® M20A	19.7	19.7	19.2	19.7	19.7
Start (s)	20	17	21	17	17
Index	90	60	50	70	57

Tab. 12: Recycling polyols obtained from polyester shoe soles

Item/No.	172	173	174
PUR (% by weight)	65	70	70
DPG (% by weight)	32,5	27,5	26,5
DBA (% by weight)	2,5	2,5	3,5
Reaction temperature (°C)	200	200	200
Reaction time (min)	60	60	60
Hydroxyl No. (mg KOH/g)	296	248	257
Amine No. (mg KOH/g)	23	16	18
Viscosity (25°C) (mPas)	22,370	87,500	66,000

The compression strength of the foam is decreased by only 12% when adding up to 20% by weight of the recycling polyol while compression set shows no change. When adding larger amounts of the recycling polyols the foams tend to get a higher proportion of closed cells and to shrink. The reason for this phenomenon has not been elucidated but maybe attributed to the cell stabilizers originally present in the foam formulations. The demoulding times turn out to be under lab conditions somewhat shorter than the formulation based on primary polyols.

When using recycling polyols of this type the hardness of the free rise foams is efficiently controlled by the isocyanate index (Behrendt & Pohl 1998). It has to be pointed out that the higher the amount of recycling polyol added the lower the isocyanate index should be formulated so as to produce maximum flexibility of the foams. When

employing 30% by weight of the recycling polyol the index may kept as low as 50 in the total stoichiometric balance (including water). Thus, the formulation is produced more economically by reducing the amount of polymeric MDI necessary for foaming.

3.3 SHOE SOLE PRODUCTION WASTES

Wastes of the shoes sole production are of polyether or polyester type (Stoychev et al. 2010). Both types were subjected to solvolysis and introduced into the original systems again. The solvolysis did not need a change in batch technology but in the continuous mode. The following table 12 shows some results obtained with both polyether and polyester shoe soles at various degrees of solids content.

The originally employed polyester diols used in shoe sole production are at room temperature semi solid or

solid materials. The viscosity is measured and presented at 25°C while the temperature at working conditions is in the range of 55°C. Hence, the viscosities of the recycling polyols are at 55°C in the range of the original polyesters. Depending on the technology of the customer, the amount of solids in the mixture maybe as high as 80% by weight to give a material being semi solid (paste-like) at room temperature and having a viscosity of about 2500 mPas at 55°C.

Polyether based shoe sole wastes were solvolysed in the same way. As in any other case, also with this material the conditions had to be developed and adjusted to the material. Some of the results with higher proportions of solids are depicted in table 13.

Tab. 13: Recycling polyols obtained from polyether shoe soles

Item/No.	056	057	059	060	061
PUR (% by weight)	60	55	70	63	65
DPG (% by weight)	35,5	40,5	26,5	33,0	30,5
DBA (% by weight)	4,5	4,5	3,5	4,0	4,5
Reaction temperature (°C)	200	200	200	200	200
Reaction time (min)	30	30	30	30	30
Hydroxyl No. (mg KOH/g)	380	383	257	279	254
Amine No. (mg KOH/g)	15	18	27	31	18
Viscosity (25°C) (mPas)	2,720	1,780	11,930	2,430	8,800

Due to the general lower viscosities of the polyether polyols there are two choices: either the viscosity can be kept low, e. g. at about 3000 mPas (25°C) having a solids content of about 63 % by weight, or the amount of solids is high, e. g. 70% by weight, when the viscosity is apt to be processed by the technology employed by the applicant and easily reaches 15,000 mPas (25°C). Even higher percentages of solids are possible. It was shown that even at 85 % by weight of solids a semi solid recycling polyol can be produced showing a viscosity at 25°C of about 80,000 mPas. In any case, the applicant of such recycling polyols has to carefully determine the parameters aimed at which should be completely in concordance with the technology employed.

The recycling polyols were introduced into typical shoe sole systems at rates up to 40% as calculated on the basis of the premix component. If the premixes are changed by the applicant or supplier, especially by eliminating some of the chain extenders ethylene glycol and/or butane-1,4-diol, the glycol of the solvolysis mixture may take over part of their function in establishing a certain phase segregation in the polyurethane and further adding to the rigidity of the material (Stoychev et al. 2011). Such experiments are under way.

4. CONCLUSIONS

The combined glycolysis/aminolysis is the basis of a new polyurethane recycling process well suited to produce recycling polyols of good quali-

ty from various polyurethane sources. It has been shown by a multitude of lab and semi-technical scale experiments that for each type of polyurethane a special formulation has to be developed, that a formulation fitting for one product cannot be transferred without problems to another product even of the same type but the solvolysis mixture has always to be carefully reformulated and adjusted to the product under consideration. Further, it has been shown that the recycling polyols maybe produced at various scales with identical parameters as shown with the hydroxyl numbers and viscosity. The reaction conditions further influence the quality of the product with respect to homogeneity and colour. The colour of the recycling polyols – in general yellow to dark amber – does not affect the foam properties and is not a result of oxidation during the process but more that of a side reaction of minor contaminants and does not deepen on longer addition or reaction times. Fillers or pigments remain in the recycling polyols, thus leading to products with the colour of the original polyurethane or – in case of mixtures of several colours – of a mixed colour. In some cases a solids content of the polyurethanes up to 20 % by weight was found and stabilized in the recycling polyol either by the viscosity (where the appearance of tixotropy has to be avoided) or at lower viscosities (e. g. 2000 mPas) with agitation of the polyol in the storage container. The polymers grafted to polyether alcohols as in the grafted polyols may either be formed into a needle-like material and filtered off or finely dis-

persed and remain in the recycling polyol to be introduced into the new polyurethane again.

The solids content of the recycling polyol is in case of elastic types usually in the range of 60 % by weight to meet viscosity requirements. It maybe increased to up to 85 % by weight but in these cases the viscosity at 25°C exceeds processing conditions so that processing is possible only at elevated temperatures. The latter holds especially in the case of polyester based shoe soles. With rigid foams the amount of solids is limited to about 50% by weight to meet acceptable viscosities.

The recycling polyols maybe used as single components in the production of composites, coatings, or sealants, i. e. a new type of material. Attempts to introduce them into formulations similar to the original products have shown that depending on the type of polyurethane produced between 15 and 40 % by weight of the premix component maybe substituted by the recycling polyol without detrimental effects on the final product properties.

Thus, the solvolysis by combined aminolysis and glycolysis represents not only a much faster and simpler way to produce recycling polyols from a variety of polyurethane products but also gives recycling polyol with qualities allowing them to be introduced into formulations of the original products as well as in such for completely different products. The process and the apparatus to perform the process are available up to volumes of 6 met-

ric tonnes thus allowing for an annual production of up to 4,500 metric tonnes in the three shift system. The process is economical in that way as the production costs at an annual production exceeding 250 metric tonnes are far below the primary raw materials and usually in the range of € 0.50 (or equivalent \$ 0.62).

Remark: Article based on a presentation held at STI Conference Nyeri (Kenia), 04.-07.11.2014

REFERENCES

- Behrendt G, Naber BW (2009) The chemical recycling of polyurethanes. J Univ Chem Technol Metallurgy 44(1):3–23
- Behrendt G, Pohl M (1998) Verfahren zur Herstellung von Polyurethanen. Patent Application DE 198 17 539.6, PCT/EP1999/002604, 16 Apr 1998
- Behrendt G, Pohl M (1999) Verfahren zur Herstellung von Polyolen sowie Polyole. Patent DE 199 17 932, 21 Oct 1999
- Behrendt G, Pohl M (2004a) Method for producing polyols and polyols. Patent US 6,683,119, 27 Jan 2004
- Behrendt G, Pohl M (2004b) Verfahren zur Herstellung von Polyolen sowie Polyole. Patent EP 1 086 169, 11 Feb 2004
- Belke M, Pniok I, Evtimova R, Langenstraßen R, Behrendt G (2003) Closed Loop of Polyurethane Flexible Slabstock Foam Wastes by a Chemical Process. In: Polyurethane Foam Association Conference, Oct 2003, Montreal, Canada
- Evtimova R, Madjarova R, Georgieva D, Hunger H, Behrendt G (2004) Polymer Wood Composites Based on Recycling Products from Condensation Polymers. In: Conference on Manufacturing and Management, 2004, Ohrid
- Langenstraßen R, Behrendt G, Diener R, Gebert B (2001) Verfahren und Vorrichtung zur kontinuierlichen Herstellung von Polyurethan-Recyclingpolyolen. Patent Application DE 103 13 150.7, 11 Jan 2001
- Schmidt K, Koch H, Pohl M, Huth H, Ivanyi S, Stürmer O, Behrendt G (2001) Entwicklung von Polyurethan-Beschichtungssystemen auf der Basis von Recyclat-Polyolen aus Polyurethan-Weichschaumstoffen. Wiss Beitr TFH Wildau 6:28–37
- Stoychev V, Evtimova R, Herzog M (2011) Recycling von Polyurethanen mittels Aminolyse. PU-Magazin 11(4):193–196
- Stoychev V, Herzog M, Behrendt G (2010) Chemical Recycling of Polyurethane Integral Foams and Shoe Soles. In: Advanced Topics in Manufacturing Engineering and Management, 25–26 Nov 2010, Košice, Częstochowa, pp 24–27

AUTHORS

Dipl.-Chem. Silke Beckmann
Technische Hochschule Wildau
silke.beckmann@th-wildau.de

Prof. Dr. rer. nat. Michael Herzog
Technische Hochschule Wildau
michael.herzog@th-wildau.dee

Informationsgewinnung im cyberphysischen Produktionssystem

René von Lipinski*, Markus Richter, Jörg Reiff-Stephan

Zusammenfassung

Im Fokus vieler industrieller Forschungsprojekte steht die intelligente Vernetzung von Entitäten im produktionstechnischen Umfeld. Im Rahmenkonzept Industrie 4.0 wird zum Wandel bestehender hierarchischer Betriebsstrukturen in ein cyberphysisches Produktionssystem beigetragen. Priorität haben Untersuchungen sensorischer Komponenten und deren Verkettung als Führungselement im zukünftigen Produktionsumfeld, welches durch Selbstanalyse, Selbstorganisation und Selbstoptimierung geprägt sein wird. Ziel des Hochschulprojektes (iSensPK) ist die Abwandlung bestehender Sensorkonzepte und deren Nutzbarmachung für das Internet der Dinge. Einen Schwerpunkt wird dabei insbesondere die Definition und Verknüpfung stabiler Kommunikationswege darstellen. Als Demonstrator erfolgt der Aufbau eines 6-Komponenten Kraftmesssystems zur Prüfung und Kalibrierung moderner Greifertechnologien unter Feldbedingungen. Durch die umfangreiche Vernetzung verschiedener Sensoren erfolgt die Erfassung von Störgrößen im Testumfeld. Das gewonnene Abbild der physischen Umgebung dient zur Korrektur der Kraftmessungsergebnisse. Für die Realisierung eines derartigen Kraftmess- und Umfelderkennungssystems wird in den sensorisch relevanten Bereichen der Kommunikation, Sensordatenfusion, Multifunktionsintegration und Selbstorganisation nach Lösungsansätzen gesucht.

Abstract

The main focus of different industrial R&D projects explores possible starting points for the intelligent interconnection of entities in a productional environment. Against a background of 'Industrie 4.0', this contributes to a transformation of existing, hierarchical structures into a cyber physical production system. The focus here is on investigating sensor components and their interlinking as a main element in a future production environment which will be characterised by self-analysis, self-organisation and self-optimisation. The aim of the project iSensPK is to modify sensor concepts in being to facilitate their utilisation in the Internet of Things. Emphasis rests on defining and combining stable lines of communication. A demonstrator is set up, including a six-component force measuring system to enable inspecting and calibration of modern gripping technologies within field conditions. Through adequate linkage of different sensors, the capture of disturbance variables is made possible. The resulting image of the physical environments serves to readjust any measured force values. To implement such a force measuring and environment detecting system, sensorial relevant fields of communication, sensor data fusion, multifunctional integration and self-organisation are searched to conclude approaches to solutions.

1. EINLEITUNG

Wirtschaftliche Produktionsprozesse sind in zunehmendem Maße unter dem Blickwinkel der Effektivität und Effizienz auf dem globalen Anbietermarkt zu steuern. Hierbei wird die Aufnahme und Verarbeitung von Informationen als einer der wichtigsten Innovationstreiber in der industrialisierten Produktionswelt angesehen. Das Internet der Dinge/Dienstleistungen/Daten (iD3) manifestiert sich hierbei in dem Szenario der „Industrie 4.0“-Produktions-Gesellschaft.

Der Begriff Industrie 4.0 (kurz: i4.0) steht für die vierte industrielle Revolution (Abbildung 1) und ist ein Teilaspekt der Hightech-Strategie der Deutschen Bundesregierung (Kagermann et al. 2013). Durch vertikale und horizontale Vernetzung industrieller Strukturen entstehen neue Wertschöpfungsnetzwerke, welche auch zukünftig erfolgreich am weltweiten Markt partizipieren sollen.

Was die vierte industrielle Revolution jedoch deutlich von vorhergegangenen

unterscheidet, ist die Tatsache, dass sie nicht auf einzelnen, bahnbrechenden technologischen Neuerungen beruht. Vielmehr ist Industrie 4.0 geprägt von der Symbiose bestehender Technologien. Im Fokus stehen hier unter anderem Anwendungen aus den Bereichen der Informatik, Kommunikationstechnik, Aktorik und Sensorik. Der freie Zugang zu Informationen und eine umfassende Vernetzung gehören heute im Privatleben vieler Menschen zum Alltag. Mit Hochdruck wird an Konzepten zur Übertragung derartiger

* korrespondierender Autor

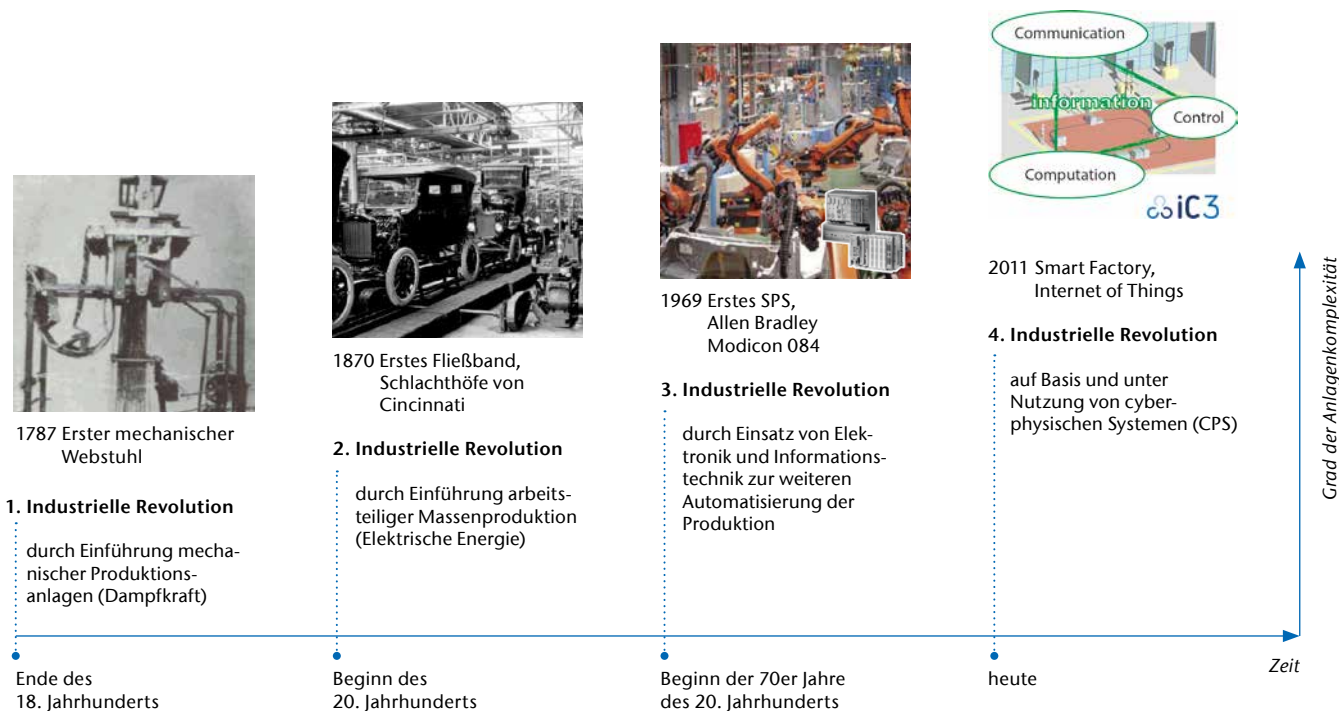


Abb. 1) Übersicht der vier industriellen Revolutionen.

Strukturen auf das industrielle Umfeld geforscht. Ziel der Forschung ist die Realisierung des Internets der Dinge sowie cyberphysischer Produktionssysteme (CPPS). Diese sollen zu einem Paradigmenwechsel innerhalb der deutschen Industrielandschaft führen und die hierarchischen Strukturen der gegenwärtigen Automatisierungspyramide ablösen (Abbildung 2) (Spath 2013, Sauerer 2013).

CPPS bestehen aus einer Summe eingebetteter Systeme, welche ihre Umwelt sensorisch erfassen und durch Aktoren auf selbige einzuwirken vermögen (Zhang et al. 2013, Reinhart et al. 2013).

Durch Verbindung mit digitalen Netzen können verfügbare Daten und Dienste genutzt werden, zudem ist eine Schnittstelle zur Mensch-Maschine-Kommunikation vorgesehen. Ein wichtiger Punkt ist hierbei unter anderem die Fähigkeit zum Sammeln, Auswerten und Bereitstellen von Daten (Vogel-Heuser et al. 2013). Vielfältig existieren bereits technische Lösungen zur Umsetzung der Industrie 4.0-Ansätze in bestehende oder neue Produktionsketten. Es gilt nun, aus der Vielfalt von Sensorik-, Aktorik- und Netzwerkkomponenten

auszuwählen und aus diesen sinnvoll ein Gesamtsystem zusammenzustellen.

Im Rahmen des Projektes „Intelligente Sensorsysteme für selbstoptimierende Produktionsketten“ (iSenSPK) wird an der Nutzbarmachung bestehender Sensortechnologie für cyberphysische Produktionssysteme geforscht. Eine Prüfeinrichtung für die Kraftmessung an unterschiedlichen Greifersystemen dient hierbei als Demonstrator.

Durch die Vernetzung von Sensoren soll ein intelligentes Umfelderkennungssystem geschaffen werden. Das genaue Abbild der Umgebungsbedingungen soll dabei helfen, die Ergebnisse der Kraftmessungen zu verbessern. Zusätzlich werden die Testbedingungen und Ergebnisse protokolliert und im digitalen Gedächtnis des Greifers festgehalten. Diese Daten können dann von anderen Entitäten im Produktionsprozess abgefragt werden. Erfüllt ein Greifer nicht die für den Handhabungsprozess notwendigen Parameter (Reiff-Stephan 2013), kann dann die entspre-

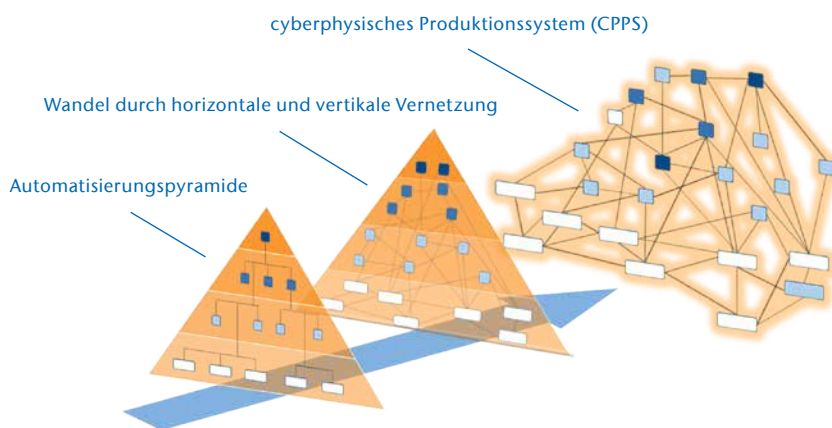


Abb. 2) Wandel der Automatisierungspyramide zum cyberphysischen Produktionssystem.

chende Entität den Einsatz des Greifers verweigern und somit unsichere Situationen vermeiden.

2. MARKTANALYSE I4.0-FÄHIGER KOMPONENTEN

2.1 KLASSIFIKATIONSANSATZ

Richtlinien und Normen zur Beurteilung, ob eine technische Lösung den Anforderungen einer Industrie-4.0-Anwendung gerecht wird, befinden sich im Entstehungsprozess. Ein erster Ansatz für eine entsprechende Klassifizierung resultiert aus den Bemühungen des VDI. Ein Bewertungsschema, ähnlich dem der von Elektrogeräten bekannten IP-Schutzklassen, beurteilt ein System oder einzelne Komponenten nach deren Kommunikationsfähigkeit und deren Bekanntheitsgrad im Informationssystem (siehe Abbildung 3) (Epple et al. 2014).

Technische Lösungen mit einem Communication-Presentation Index (CP) von CP43 oder CP44 werden demnach als I4.0-Komponenten bezeichnet. I4.0-Komponenten können einzelne Bauteile, aber auch Subsysteme sein, deren Bestandteile erst als Baugruppe die geforderte CP-Klasse erfüllen (Epple et al. 2014). Im Folgenden soll näher auf die am Markt erhältlichen Lösungen aus dem Bereich der Sensorik eingegangen werden, welche sich für die Realisierung einer I4.0-Komponente eignen.

2.2 INTELLIGENTE SENSOREN

Die neueste, auf dem Markt vertretene Generation intelligenter Sensoren wird auch als Smart Sensor bezeichnet. Dabei gibt es einige Anforderungen, die eine solche Komponente für den erfolgreichen Einsatz in einer Industrie 4.0-Umgebung erfüllen muss. Bei Anschluss eines Sensors muss sich dieser selbstständig im System anmelden und eine eindeutige Identifizierung ermöglichen. Durch Selbstdiagnose sind die Sensoren in der Lage, Störungen und Einbrüche der Performance zu erkennen und selbstständig anzuzeigen (Reiff-Stephan & Lipinski 2014). Unterstützt durch die Lokalisierung des Sensors am Mensch-Maschine-Interface ist so eine zeitnahe War-

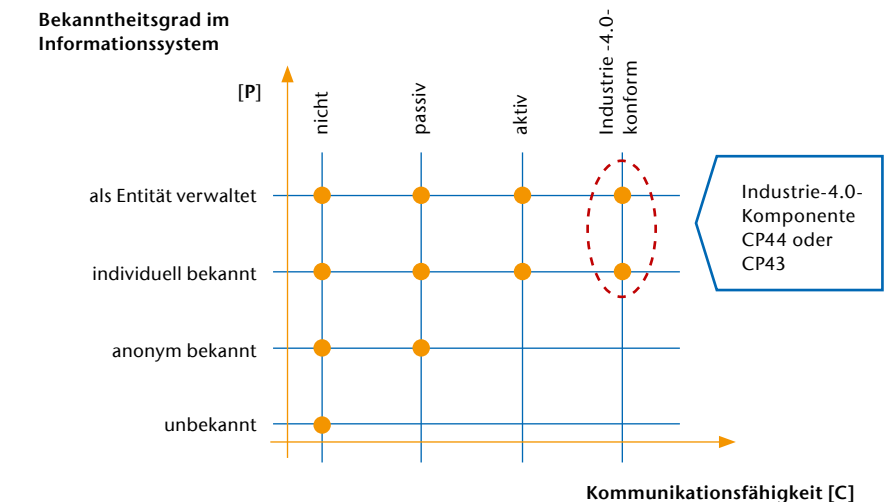


Abb. 3) Klassifizierungsansatz I4.0-Komponenten nach Epple et al. (2014).

tung möglich. Dank Speicherung der applikationsspezifischen Parameter der Sensoren kann im Versagensfall ein 1:1-Austausch erfolgen, da das Automatisierungssystem automatisch die Richtigkeit des neuen Sensors prüft und die Parameter setzt. Gleichermassen können auch für verschiedene Produktionsaufgaben die entsprechenden Einstellungen hinterlegt und bei Bedarf eingespielt werden. Ein wesentlicher Aspekt liegt jedoch in der Dezentralisierung intelligenter Funktionen, sodass Sensoren immer mehr Anteil an der Steuerung nehmen, etwa lediglich für den Regelungsprozess relevante Daten weitergeben, beispielsweise erst dann, wenn Abweichungen vom Normal auftreten. Diese Vorgehensweise stellt sicher, dass weder Bandbreite noch Rechenkapazität der Steuerung mit überflüssigen Informationen belastet werden, die den Prozess stören. Vorteilhaft ist auch, dass nicht erst auf eine Verarbeitung und Rückmeldung des zentralen Steuersystems gewartet werden muss, sodass die für Hochgeschwindigkeitsanwendungen notwendigen, minimalen Reaktionszeiten erreicht werden können. Selbst auf die Verwendung statistischer Daten zum Abgleich muss nicht verzichtet werden, da diese auf den Sensoren hinterlegt werden können. Die Steuerung muss dann im Optimalfall lediglich ein binäres Signal auswerten (Sauerer 2013).

2.3 KOMMUNIKATIONSTECHNOLOGIEN

Für die Kommunikation zwischen Sensoren, Aktoren und Steuerungseinheiten gibt es verschiedene Schnittstellen und Kommunikationswege. Durch den vermehrten Einsatz von Sensoren wird es zunehmend wichtiger, ein zuverlässiges, kollisionsfreies Netzwerk aufzubauen. In der Feldebene werden Sensoren und Aktoren üblicherweise mit einem Bussystem verbunden. Nachteilig ist hier die Inkompatibilität der verschiedenen Systeme zueinander. Unterschiede bestehen in physikalischen Spezifikationen und verschiedenen Infrastrukturkomponenten. Selbst Sensoren sind häufig bereits für ein bestimmtes Bussystem ausgelegt, zusätzlich hat jeder Sensorhersteller seine eigene Schnittstelle entwickelt. Die aus Variantenvielfalt und Kompatibilitätsproblemen resultierenden Nachteile führen zu zwei Standardisierungstrends im Bereich der Sensorik. Einerseits die Verwendung einer universellen Schnittstelle, wobei sich IO-Link vielversprechend zeigt. Andererseits die Verwendung einer standardisierten Kommunikationstechnologie, wobei sich die bereits bestehende Struktur des Ethernets anbietet. So wird auch der Einsatz diverser Funktechnologien erleichtert, wobei sowohl W-LAN als auch Bluetooth in ihren Varianten Anwendung finden.

2.4 IO-LINK

Das bislang in der Sensorik verwendete Interface nach DIN EN 60947-5-2 ist für die heutigen Sensoranwendungen schon lange nicht mehr ausreichend, da sich nur ein oder zwei Schaltbits übertragen lassen. Viele Hersteller haben deshalb eigene, spezielle Schnittstellen entwickelt, sodass auf dem Markt vielfältig Multipolstecker und -kabel zu finden sind, je nachdem welcher Sensor damit integriert werden soll (Kräußlich 2013). Der „USB-Standard für die Fabrikautomation“ wie der IO-Link auch genannt wird, setzt genau an dieser Stelle an. Den Anstoß dazu gab Siemens durch Herantreten an die Sensorhersteller und die resultierende Gründung des IO-Link-Konsortiums, im Rahmen dessen man sich auf ein Interface mit rückwärtskompatibler Dreileiter-Physik einigte. Somit ist es möglich, sowohl herkömmliche als auch hochkomplexe Sensoren parallel in einem System zu betreiben und dabei für die digitale IO-Link-Übertragung lediglich ein ungeschirmtes, dreidrahtiges Industriekabel zu verwenden (Abbildung 4). Dadurch sind sämtliche Sensoren und Aktoren unabhängig von den in der Steuerungsebene verwendeten Bussystemen, da sie lediglich via Punkt-zu-Punkt-Kommunikation mit dem IO-Link-Master verbunden sind. Weitere Vorteile liegen in den Gewichts- und Materialeinsparungen sowie der geringeren Kabelbruchgefahr im Industriekabel.

Der in der IEC 61131-9 definierte Standard ermöglicht somit eine wenig komplexe, bidirektionale Kommunikation, über welche etwa Parameter gesetzt und auf später oder ersatzweise angeschlossene, baugleiche Sensoren übertragen werden können. Zudem ist jede IO-Link-Komponente über die IODD, die IO-Link Device Description, eindeutig identifizierbar und in der Lage, sich eigenständig mit einer vollen Funktionsbeschreibung in einem System anzumelden – gemeinsam mit der Kommunikationsfähigkeit eine der Grundvoraussetzungen für das zukünftige Industrie-4.0-Sensorkonzept.



Abb. 4) Verglichen mit konventionellen Kabeln (links) benötigen IO-Linkkabel weniger Adern für die Realisierung mehrerer digitaler Ausgänge (rechts) (CNC-kompakt n/a., SPS-MAGAZIN 2011).

2.5 INDUSTRIELLES ETHERNET

Das offene Ethernet-Protokoll ermöglicht eine direkte, vertikale Integration, wobei sich das industrielle Ethernet jedoch vom Standard nach IEEE 802.3, wie er üblicherweise in Büronetzwerken Verwendung findet, abhebt. Weltweit kommen rund 30 verschiedene Industrial-Ethernet-Systeme zum Einsatz, häufig haben dabei Feldbus-Hersteller eigene Protokolle geschrieben. Zu den bekanntesten Systemen zählen etwa PROFINET, POWERLINK, EtherNet/IP, EtherCat und SERCOS III. Entscheidend sind die Unterschiede zum Standard-Ethernet, insbesondere betreffs der Echtzeitfähigkeit, d. h. der Fähigkeit, sämtliche Datenpakete innerhalb eines vorgegebenen Zeitrahmens (harte Echtzeit) oder mit einer noch zulässigen Abweichung (weiche Echtzeit) zu übermitteln. Dabei bewegen sich die zu erreichenden Zykluszeiten bzw. Taktungengenauigkeiten (Jitter) im zwei- bis dreistelligen Millisekundenbereich – etwa bei Temperaturmessungen – bis hin zu Mikrosekunden für digitale Regelsysteme oder Motion-Control-Anwendungen, siehe auch (Meindl 2014). Die Vorzüge des Ethernets liegen insbesondere in den bereits genormten Steckerverbindungen sowie in der im Vergleich zu Bussystemen unweit größeren verfügbaren Bandbreite. So lassen sich beispielsweise mit einem PROFIBUS-System (Siemens) 12 MBit/s erreichen, während sich Ethernet bereits in Bereichen jenseits der 1 GBit/s-Grenze bewegt (Lachello et al. 2013).

3. TESTSTAND-VERSUCHSAUFBAU

Resultierend aus den getroffenen Vorüberlegungen werden verschiedene Sensoren für den Einsatz im Teststand ausgewählt. Als Fallbeispiel dient hierbei eine sechssachsige Kraftmessung für verschiedene Greifersysteme bei gleichzeitiger Erfassung der Umgebungsparameter. Berücksichtigt werden unter anderem Druck, Temperatur und Feuchtigkeit der Umgebungsluft, aber auch Drücke innerhalb pneumatischer Greiferkomponenten oder die Werkstücktemperatur beim Einsatz von Gefriergreifern. Durch Abgleich und Auswertung der Daten soll die Qualität der Kraftmessung erhöht sowie realisiert werden. Zudem kommen verschiedene Kommunikationsschnittstellen zum Einsatz, so werden die Austauschbarkeit von Komponenten überprüft sowie Vor- und Nachteile abgebildet. Abbildung 5 zeigt ein digitales Mock-Up des geplanten Aufbaus. Kernstück des Teststands bildet eine einachsige Lineareinheit, welche eine Kraft von bis zu 1.000 N in das System einbringen kann. Durch exzentrischen Kraftangriff können auch mehrachsige Spannungszustände hervorgerufen und betrachtet werden. Der Teststand ist mobil ausgeführt, sodass er in verschiedenen Umgebungen mit entsprechend variierenden Umgebungsbedingungen zum Einsatz gebracht werden kann. Für die Kraftmessung stehen verschiedene Greifersysteme zur Auswahl. Neben einem gewöhnlichen Zwei-Finger-Greifer können auch Gefriergreifer für biegeschlaffe Bauteile getestet werden. Diese benetzen das

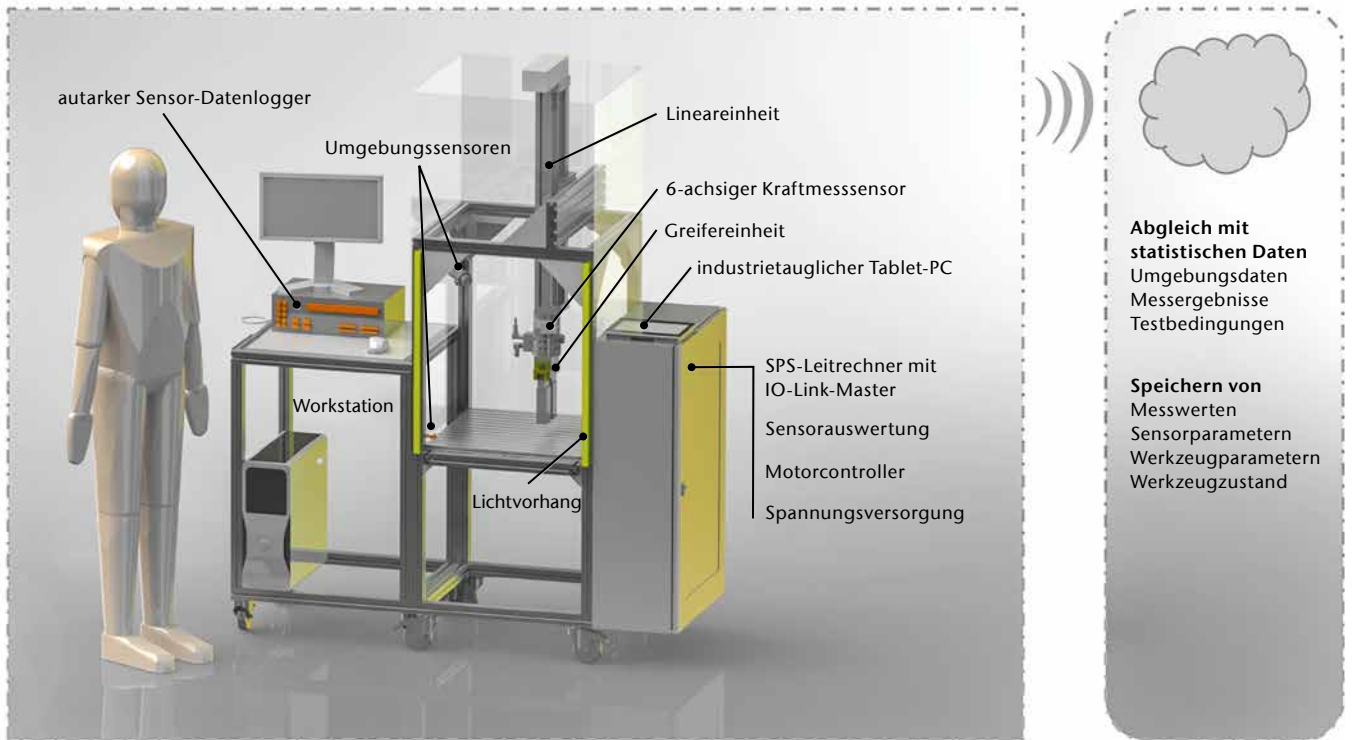


Abb. 5) 3D-Modell des Teststands mit Erläuterung.

Bauteil mit einem dünnen Wasserfilm und schaffen durch Unterschreiten dessen Gefrierpunkts eine hydroadhäsive Verbindung. Je nach Positionierung des Kraftmessensors auf der Grundplatte oder direkt an der Greifereinheit können unterschiedliche Feldbedingungen wie etwa der Abriss eines Bauteils simuliert werden. Im weiterführenden Einsatz ist es denkbar, das Linearsystem mit einer Robotereinheit zu substituieren und so auch dynamischere Messungen, beispielsweise für auftretende Beschleunigungen bei Schwenkbewegungen, durchzuführen.

Zentrale Komponente des Kraftmesssystems ist ein sechssachsiger, auf Silizium-Dehnmessstreifen basierender Kraftmesssensor. Die Auswahl eines entsprechenden Sensors erfolgt auf Basis einer Marktanalyse bezüglich Netzwerktauglichkeit und Auflösung. Deren Ergebnisse zeigen, dass die eigenständige Netzwerkanmeldung und Eingliederung des Sensors über Ethernet-Schnittstelle und MAC-Adresse in Kombination mit einer sehr feinen Auflösung von 1,0 – 1,5% (je nach Achse) momentan nur durch einen Kraftmesssensor des Herstellers Schunk zu realisieren ist. Im Teststand kommt das Modell FT-Ome-

ga85 mit einem Messbereich von bis zu 950 N bzw. 40 Nm zum Einsatz (Abbildung 6).

Um die Anwendungsmöglichkeiten des zugrunde liegenden Prinzips zu zeigen, werden diese auf ein reales Einsatzgebiet abgebildet. Ein Beispiel ist die Überwachung des Zustandes verwendeter Werkzeuge, wobei ermittelte Messwerte und Ergebnisse sowie Protokolle direkt im in das Werkzeug eingebrachten RFID-Transponder abgelegt werden. So wird es möglich, vor dem Einsatz des Greifers aktuelle Testergebnisse auszulesen und so nötig Prozessparameter anzupassen, Ersatzteile bereitzuhalten und anschließend die abgelegten Daten durch neuere zu ergänzen. Auf diese Weise können die erreichbaren Genauigkeiten eines Werkzeuges mit den Anforderungen an den Fertigungsprozess abgeglichen werden. Bereits vor der Inbetriebnahme können Abweichungen prognostiziert und über die Freigabe der Bearbeitung entschieden werden. Doch nicht nur an der Maschine, direkt im Lager kann die Vorauswahl erfolgen, sodass auch mit höherem Verschleiß behaftete Werkzeuge noch für Fertigungsaufgaben mit geringeren Qua-

litätsansprüchen Verwendung finden können. Wird im Einsatz die voreingestellte Grenze der Werkzeugparameter überschritten und ist eine Kalibrierung nicht mehr möglich, so kann dies automatisiert gemeldet und das Werkzeug für den Einsatz gesperrt werden. Durch die ständige Überwachung liegen die entsprechenden Ersatzteile schon einige Zeit vor dem Ausfall bereit.



Abb. 6) Foto des Kraftmessensors FT-Omega85.

4. FAZIT UND AUSBLICK

Basierend auf den Untersuchungen zu i4.0-Entitäten ist ein Messstand zur dynamischen Ermittlung von Aktparametern im industriellen Umfeld entworfen und ein erstes Mock-up erstellt worden. Im weiteren Projektverlauf wird der Teststand aufgebaut, sodass Versuchsdurchführungen und Untersuchungen der Kommunikationswege möglich werden. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse werden Ansatzpunkte zur intelligenten Vernetzung von Entitäten im produktionstechnischen Umfeld betrachtet. Es wird gezeigt, dass die technischen Voraussetzungen für ein solches System bereits vorhanden sind und lediglich eine Umsetzung erfolgen muss. Weiter werden Möglichkeiten für den Einsatz in verschiedenen Branchen, etwa Life Science oder Kunststoffverarbeitung aufgezeigt. Als Teilprojekt der vierten industriellen Revolution wird so ein Beitrag für den Wirtschaftsstandort Deutschland geleistet. Ziel ist der Wandel bestehender hierarchischer Betriebsstrukturen hin zum cyberphysischen Produktionssystem. In der Synthese können die im Fallbeispiel verwendeten Strukturen auf ein größeres Anwendungsfeld ausgeweitet werden. So ist es häufig etwa möglich, durch Sensordatenfusion die Aussagefähigkeit von Messungen zu steigern und so das Ersatzteilmanagement oder die Produktionsqualität zu verbessern. Durch die Erweiterung des Teststands um einen Roboter sind deutlich komplexere Strukturen abbildbar, sodass hier eine gute Grundlage für weiterführende Projekte gelegt wird. Auch der Einsatz verschiedener Werkzeuge und neuer Sensoren ist denkbar.

LITERATUR

- CNC-kompakt (n/a) Kabel 4-adrig geschirmt. http://www.cnc-kompakt.de/images/product_images/original_images/kabel_geschirmt.jpg. Accessed 15 Sep 2014
- Epple U, Bangemann T, Barbian M, Bauer C (2014) Statusreport Industrie 4.0 – Gegenstände, Entitäten, Komponenten. http://www.vdi.de/fileadmin/vdi_de/redakteur_dateien/gma_dateien/VDI_Industrie_4.0_Komponenten_2014.pdf. Accessed 08 Sep 2014
- Kagermann H, Wahlster W, Helbig J (2013) Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. http://www.bmbf.de/pubRD/Umsetzungsempfehlungen_Industrie4_0.pdf. Accessed 08 Sep 2014
- Kräußlich W (2013) Sensorik und IO-Link als Wegbereiter für die Fabrik der Zukunft. <http://www.konstruktion.de/topstory/sensorik-und-io-link-als-wegbereiter-fur-die-fabrik-der-zukunft>. Accessed 13 Jun 2014
- Lachello L, Wratil P, Meindl A, Schönegger S, Karunakaran BS, Song H, Potier S (2013) Systemvergleich: Die 5 wesentlichen Systeme. Industrial Ethernet Facts 8(2):1 – 36
- Meindl A (2014) Ultraschnelle Automatisierung: reACTION Technology. Automotion 2014(5):3–6
- Reiff-Stephan J (2013) Probleme mit dem Greifen. A&D Vorsprung Automation 15(4):116–119
- Reiff-Stephan J, Lipinski R von (2014) Selbstoptimierende Prozesse als Schlüsseltechnologien zur Automatisierung der FVK-Produktion. In: Purschwitz A, Hartstock A, Schneider R (eds) Tagungsband zur 11. AALE-Fachkonferenz. Deutscher Industrieverlag, München, pp 379–382
- Reinhart G, Engelhardt P, Geiger F, Philipp TR, Wahlster W, Zühlke D, Schlick J, Becker T, Löckelt M, Pirvu B, Stephan P, Hodek S, Scholz-Reiter B, Thoben K, Gorltd C, Hribernik KA, Lappe D, Veigt M (2013) Cyber-Physische Produktionssysteme. Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerung durch die Vernetzung intelligenter Systeme in der Fabrik. wt Werkstattstechnik online 103(2):84–89
- Sauerer J (2013) Smart Sensors. In: Reuter A, Schütze A (eds) Sensorik für Erneuerbare Energien und Energieeffizienz. Beiträge zum Workshop AMA Fachverband für Sensorik und Forschungsverbund Erneuerbare Energien, März 2013, Berlin, pp 18–24
- Spath D (ed) (2013) Produktionsarbeit der Zukunft – Industrie 4.0. Studie. Fraunhofer-Verlag, Stuttgart
- SPS-MAGAZIN (2011) Ventilinselstecker ersetzen akortseitig die bisherige Parallelverdrahtung von Ventilinseln durch eine schlanke serielle IO-Link-Verbindung. <http://www.sps-magazin.de/bilder/artikel/77879.jpg>. Accessed 15 Sep 2014
- Vogel-Heuser B, Rösch S, Friedrich A, Göhner P (2013) CPS – eine Fallstudie. Eine Anwendung von CPS im Bereich der Wartung in der Produktautomatisierung. atp edition 55(4):50–56
- Zhang L, Fallah YP, Jihene R (2013) Cyber-Physical Systems: Computation, Communication, and Control. Intl J Distrib Sensor Netw 2013(475818):1–2. doi: 10.1155/2013/475818

AUTOREN

- M. Eng. René von Lipinski**
Technische Hochschule Wildau
Automatisierungstechnik
rene.von_lipinski@th-wildau.de
- Prof. Hon.-Prof. Dr.-Ing. Jörg Reiff-Stephan**
Technische Hochschule Wildau
Professur Automatisierungstechnik/Produktionstechnik
joerg.reiff-stephan@th-wildau.de
- M. Eng. Markus Richter**
Technische Hochschule Wildau
Automatisierungstechnik
markus.richter@th-wildau.de

Entwicklung und Leistungsbestimmung einer 2,2 kW Tesla Turbine

Roberto Lisker*, Udo Hellwig, Franz Xaver Wildenauer

Zusammenfassung

Im Folgenden wird die Entwicklung und Evaluation eines 2,2 kW Tesla Turbinen Prototyps beschrieben. Ausgehend von der konstruktiven Verbesserung der Ein- und Auslassströmung – mit dem Ziel der Steigerung des isentropen Wirkungsgrades – wurde ein Turbinenprototyp gefertigt und auf einem Turbinenversuchsstand erprobt. Hierbei wurde untersucht, ob eine Wirkungsgradsteigerung mit einem Profileinsatz möglich ist. Die gewonnenen Ergebnisse lagen im Erwartungsbereich und zeigten, dass der Profileinsatz zu einer Wirkungsgradsteigerung bei beiträgt.

Abstract

This article deals with the development and evaluation of a 2.2 kW Tesla Turbine prototype. Based on design improvements of the in- and outflow of the turbine, with the goal of increasing the isentropic efficiency, a Tesla Turbine Prototype has been built and tested in a turbine test rack. It was investigated whether a profiled shaft inset can increase the isentropic efficiency of the turbine. The results were achieved and demonstrated that a profiled shaft can increase the efficiency of the turbine.

1. EINLEITUNG

Im Jahr 1911 meldete der Ingenieur Nikola Tesla eine neuartige Turbine, die auf den Prinzipien der Adhäsion und Viskosität basiert, zum Patent an (Tesla 1911). Diese besteht aus mehreren planparallelen, koaxial auf einer Welle angeordneten Scheiben, die im Rotationszentrum einen Auslass besitzen. Das Arbeitsmedium strömt – mit hoher thermischer und kinetischer Energie – vom äußeren Radius in den Spalt zwischen den Scheiben und bewegt sich auf einer annähernd spiralförmigen Bahn zum Auslass hin. Wegen des geringen Abstandes der Scheiben zueinander kommt es zur Ausbildung einer Grenzschichtströmung, in der hohe Scherkräfte entstehen und eine Rotationsbewegung der Scheiben erzeugen. Der Betrag der Scherkraft F_S ist abhängig von dem Geschwindigkeitsgradienten $\partial w/\partial z$ und der Viskosität des Arbeitsmediums (vgl. Gl. 1).

$$\text{Gl. 1) } F_S = \eta \frac{\partial w}{\partial z} A$$

Wobei A die Scheibenfläche, w die tangentielle Geschwindigkeit und z den Abstand zur Scheibe darstellt. Das so erzeugte Drehmoment kann nun zum Betreiben eines Generators verwendet werden.

Die erste Tesla Turbine war 1911 Teil einer Versuchsanlage der Edison-Elektrizitätswerke in Waterside Station New York. Die Turbine bestand aus 25 Scheiben mit einem Durchmesser von 0,45 m und lieferte eine Wellenleistung von 149 kW. Der isentrope Wirkungsgrad wurde mit 46,6 % angegeben (Anonymus 1911). In den 60er Jahren des 20. Jahrhunderts erfolgte eine erste wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Turbine. Hierbei waren besonders die Einflussfaktoren auf die Leistungserzeugung von Interesse. Rice untersuchte den Einfluss der Scheibenanzahl und der Spaltbreite auf die Leistung (Rice 1965). Nendl hingegen setzte sich mit der theoretischen Betrachtung des Geschwindigkeitsfeldes, des Strömungsregimes und der Kraftübertragung in einem Spalt auseinander (Nendl 1966). Seit 2008 ist die Tesla Turbine Gegenstand der Forschung an der Technischen

Hochschule Wildau. Erste Arbeiten beschäftigten sich mit der numerischen Simulation des Geschwindigkeitsfeldes, mit dem Ziel, den Drall am Turbinenauslass zu minimieren (Lisker 2009, Meller 2013). Parallel zur Simulation und analytischen Betrachtung wurden erste Prototypen unter fertigungsoptimierenden und kostenreduzierenden Aspekten entworfen (Pannasch 2011, Holz 2014).

Ziel der genannten Aktivitäten ist die Entwicklung einer kostengünstigen Turbine für den Einsatz in Organic-Rankine-Kreisläufen (ORC), wie z. B. in Nachverstromungseinheiten von Biogasanlagen. Unter Nachverstromung versteht man die Nutzung von Abwärme aus industriellen Prozessen zur Stromerzeugung. Aufgrund des geringen Temperaturniveaus der Wärmequellen eignen sich nur niedrig siedende, organische Medien zum Betrieb eines energetischen Prozesses. Derzeit auf dem Markt erhältliche Nachverstromungseinheiten im unteren Leistungsbereich (1–50 kW) haben spezifische Investitionskosten von 5.000–8.000 € pro kW (Quoilin

et al. 2013). Diese werden maßgeblich durch die eingesetzte Turbine beeinflusst. Üblich im ORC sind umgebaute Schrauben- und Turbokompressoren aus der Kältetechnik, welche aufgrund ihrer komplexen Geometrie teuer in der Fertigung und Optimierung sind. Der innovative Ansatz der Forschungsarbeit in Wildau ist: der Einsatz einer Tesla Turbine anstelle von heute gängigen ORC-Turbinen. Diese lässt sich aufgrund ihrer Simplität einfach und kostengünstig fertigen und über den Scheibenabstand individuell an das Arbeitsmedium anpassen. Da die erzeugte Leistung der Tesla Turbine maßgeblich von der Viskosität des Arbeitsmediums abhängt, eignen sich organische Fluide wie z.B. Ethanol im niedrigen Temperaturbereich besser als Wasser. Literaturrecherchen diesbezüglich ergaben, dass der Ansatz, eine Tesla-Turbine mit einem organischen Fluid zu betreiben, bislang einmalig ist. Um das Ziel zu erreichen, fehlten allerdings Erfahrungen in der Auslegung und dem Betrieb einer Tesla-Turbine. Diese sollen an einem ersten Prototyp, der mit Wasserdampf betrieben wird, gesammelt werden.

2. ENTWICKLUNG UND TEST EINER 2,2 KW TESLA TURBINE

Für die Entwicklung eines Turbinen-Prototyps ist der isentrope Wirkungsgrad entscheidend. Er gibt Aufschluss über die erreichbare Leistung bezogen auf die Ein- und Ausgangsparameter. In der Literatur wurden stark divergierende Wirkungsgrade gefunden. So ermittelte Armstrong mit Wasserdampf einen isentropen Wirkungsgrad von 4 % (Armstrong 1952), während Rice einen von 46 % erzielte (Rice 1965). Er konkludierte aus seinen Messungen einen maximalen Wirkungsgrad von 65 % (Rice 1991). Aufgrund der breiten Streuung der in der Literatur hinterlegten Wirkungsgrade wurde beschlossen, eigene Versuche durchzuführen, um validierte Aussagen zu tätigen.

2.1 KONSTRUKTION DES TESLA TURBINENPROTOTYPS

Die Konstruktion des Prototyps geschah – mit Ausblick auf eine spätere Serienfertigung – unter zwei Prämissen: zum einen die Maximierung des

Turbinenwirkungsgrades und zum anderen eine hinsichtlich der Fertigung günstige Gestaltung. Mithilfe eigener numerischer Simulationen und von Ergebnissen aus der Literaturrecherche wurden Optimierungsansätze abgeleitet, die im Folgenden erläutert werden.

Düse und Massenstromverteilung

Die Düse hat einen erheblichen Einfluss auf die Leistung und Effizienz der Turbine. Sie bestimmt die Eintrittsgeschwindigkeit und Verteilung des Arbeitsmediums über die Rotorbreite. Dabei muss auf eine Gleichverteilung des Medienstromes geachtet werden, um die Entstehung von Schwingungen – verursacht durch Druckschwankungen im Medienstrom – zu vermeiden. Armstrong kam 1952 zu der Erkenntnis, dass ein rechteckiger Querschnitt vorteilhaft ist, da er das Arbeitsmedium über die Breite des Rotors gleichmäßig verteilt (Armstrong 1952). Ausgehend von dieser Überlegung wurde eine Düse mit rechteckigem Querschnitt konstruiert, die das Arbeitsmedium auf eine Geschwindigkeit von 200 m s^{-1} beschleunigen soll. Der Spalt zwischen Rotor, Düse und Gehäuse stellt sich als weitere konstruktive Herausforderung dar. Das Arbeitsmedium muss nach Verlassen der Düse in die entsprechenden Spalte geführt werden. Aufgrund des Abstandes zwischen Rotor, Düse und Gehäuse verliert dieses jedoch kinetische Energie durch Reibung. Um diese Verluste zu minimieren, wurde der Spalt zwischen Düse, Rotor und Gehäuse eng gestaltet, damit das Arbeitsfluid möglichst schnell in den Spalt gelangt.

Ein weiterer, signifikanter Verlustfaktor ist die Interaktion zwischen den beiden äußeren Scheiben des Rotors und der Gehäusewand. Der Fluidstrom gibt in diesem Spalt kinetische Energie an die Gehäusewand ab, die nicht mehr zur Drehmomenterzeugung beiträgt. Daher ist es notwendig, den Medienstrom durch diesen Spalt zu begrenzen. Hierzu wurden die beiden Randscheiben größer gestaltet als die inneren. Sie umschließen die Düse und verringern den Arbeitsmedienstrom in die äußeren Spalte. Ein zusätzlicher Vorteil dieser Gestaltung ist, dass das Medium gleichmäßiger über die Breite des Rotors verteilt wird, da es durch die Randscheiben begrenzt und geführt wird.

Die Verteilung des Arbeitsmediums

wird durch zwei Düsen gewährleistet. Obwohl Rice berichtet, dass die Anzahl der Düsen keinen Einfluss auf die Effizienz der Turbine hat (Rice 1965), wurde eine zweite Düse installiert. Das ermöglicht die Versuchsdurchführungen im Teillastbereich und führt zu einer besseren Kontrolle des zugeführten Massenstroms.

Gestaltung der Auslassströmung

Aufgrund der Impulserhaltung beschleunigt das Arbeitsmedium auf dem Weg zum Auslass und gibt Energie an die Scheiben ab. Dabei steigt das spezifische Volumen des Arbeitsmediums. Da die Querschnittsfläche mit kleiner werdendem Radius schrumpft, aber konträr mehr Volumen gefördert werden muss, führt dies zu einem Anstieg der tangentialen und radialen Geschwindigkeit des Arbeitsmediums. Um die maximale Leistung zu erreichen, muss die tangentielle Geschwindigkeitskomponente jedoch am Auslass abgebaut werden. Dieses wird mit der Verwendung von sechs strömungsgünstigen Profilen im Auslassbereich erreicht. Diese lenken die tangentielle Geschwindigkeitskomponente in entgegengesetzte Richtung und ermöglichen ein radiales Ausströmen aus dem Spalt (Abb. 1, rechts). Nach der Entspannung im Spalt verlässt das Arbeitsfluid die Turbine über eine mit dem Rotor verbundene Hohlwelle. Durch die Rotation wird über die Hohlwelle erneut eine verlustige, tangentielle Komponente auf das Arbeitsmedium gegeben und ein Wirbel entsteht im Rotationszentrum (Abb. 1, links). Um das zu unterbinden, wurde in die Welle ein Profileinsatz montiert, der diese zurückstellt und somit den Wirkungsgrad erhöht.

Turbinen-Prototyp

Die Skalierung der Turbine für den angestrebten Leistungsbereich von 1–50 kW wurde mittels einer Normzahlenreihe umgesetzt. Normzahlen geben ein definiertes, geometrisches Verhältnis an, mit welchem eine günstige Stufung der Turbine erfolgt. Viele für die Skalierung notwendige Komponenten (z. B. Dichtungen, Lager und Schrauben) werden ebenfalls nach Normzahlenreihen gefertigt. Hierdurch ist sichergestellt, dass für die geplante Serienproduktion ge-

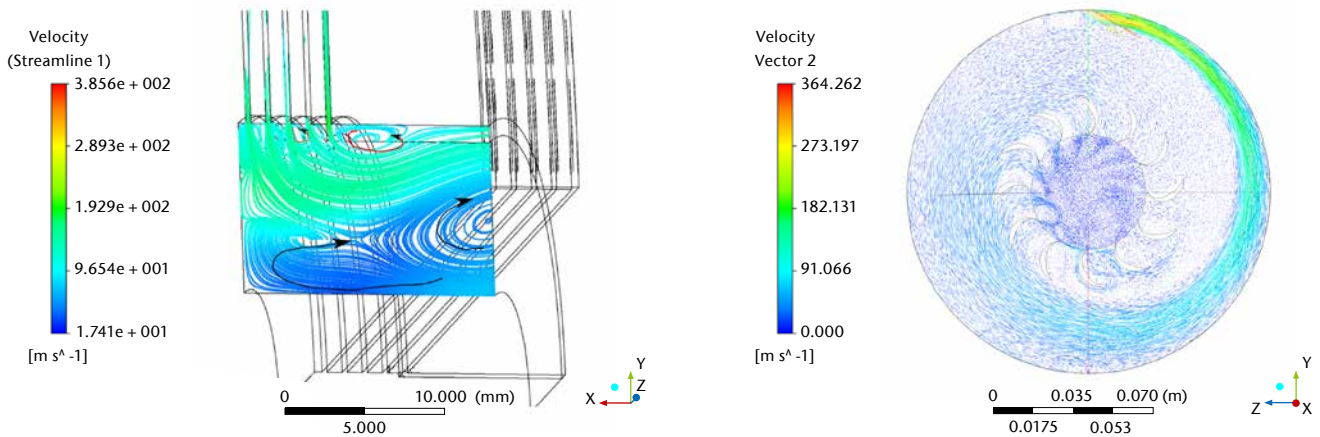


Abb. 1) links: Stromlinienverlauf des Arbeitsmediums am Turbinenausritt. Es sind Verwirbelungen zu erkennen, welche den Wirkungsgrad der Turbine mindern (Lisker 2009). Rechts: Vektorplot des Geschwindigkeitsfeldes mit strömungsgünstigen Profilen (Meller 2013).

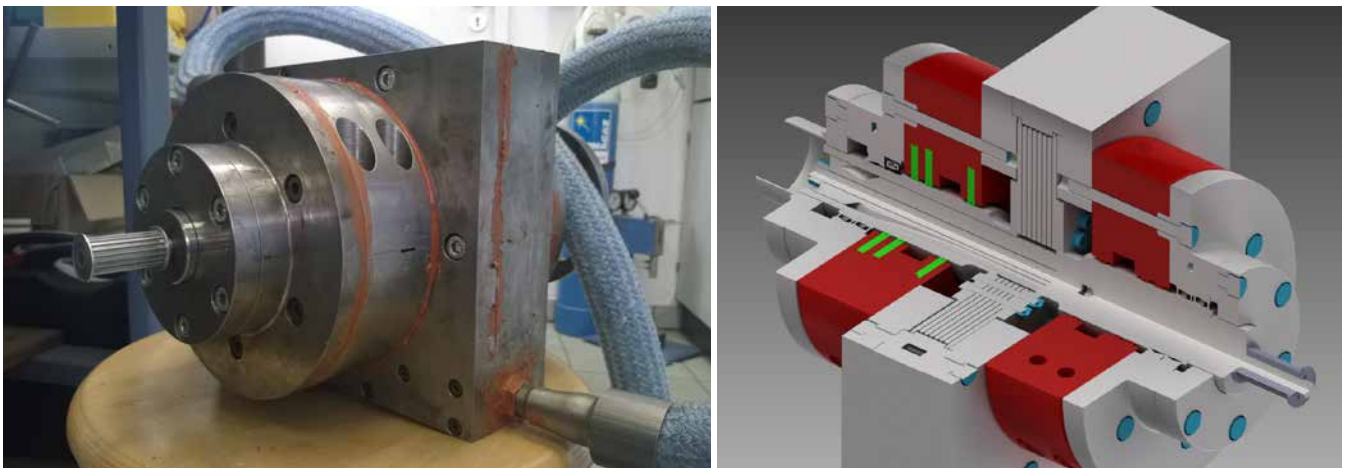


Abb. 2) oben links: 2,2-kW-Tesla-Turbinen-Prototyp mit montierten Dampfleitungen. Oben rechts: Viertelschnitt durch ein 3D-Modell der 2,2-kW-Tesla-Turbine. Rot dargestellt die Kohleschwimringdichtung und grün die Kohleschwimringe.

eignete und kostengünstige Komponenten zur Verfügung stehen. Für die Skalierung der Tesla-Turbine wurde die Normzahlreihe 40 mit der Stufe 7 gewählt. Daraus resultieren Turbinen mit der Leistung 1; 2,2; 15; 25 und 50 kW (Holz 2014). Die konstruktive Auslegung erfolgte über ein geschriebenes Programm, das anhand der thermodynamischen Eingangsparameter (Arbeitsmedium, Temperatur, Druck) die Scheibenzahl, Spaltbreite und den Durchmesser des Rotors ermittelte. Die Wahl eines ersten Prototyps für die notwendigen Untersuchungen fiel auf die 2,2 kW Turbine, da diese von den geometrischen Abmaßen und vom Gewicht gut zu handhaben ist. Der Rotor besteht aus 8 Scheiben mit einem Durchmesser von 175 mm und einem Scheibenabstand von 0,5

mm. Die Auslegung erfolgte für das Arbeitsmedium Wasserdampf mit einem Druck von 1 MPa bei 320 °C und einem Massenstrom von 0,016 kg s⁻¹. Nach der Entspannung in der Turbine auf Umgebungsdruck, soll das Arbeitsmedium noch eine Temperatur von 125 °C besitzen. Die Drehzahl des Rotors wurde mit 21855 U min⁻¹ bestimmt und stellte hohe Anforderungen an die Lager und Dichtungen. Aufgrund der hohen Gleitgeschwindigkeit zwischen Welle und Dichtung sind nur Kohleschwimringdichtungen in der Lage, eine ausreichende Dichtheit zu gewährleisten. Die nachfolgenden Abbildungen zeigen den fertigen Turbinenprototypen und einen Schnitt durch das dreidimensionale Modell.

3. TURBINENVERSUCHSSTAND

Die Leistungsmessung der Turbine erfolgte an einem Turbinenversuchsstand im Technikum für regenerative Energietechnik an der Technischen Hochschule Wildau. Der Turbinenversuchsstand entspricht dem Clausius-Rankine-Wasser-Dampf-Kreislauf, bestehend aus einem Dampferzeuger, einem Überhitzer, der Turbine und dem Kondensator. Das Wasser wird durch die im Verdampfer integrierte Speisewasserpumpe auf 1 MPa verdichtet, bei 180 °C verdampft und anschließend mit dem Strömungsüberhitzer auf die Versuchstemperatur überhitzt. Durch eine Modulation des Überhitzers kann die Dampftemperatur zwischen 180 und 350 °C stufenlos eingestellt werden. Nach der Entspannung des Dampfes in der Turbine

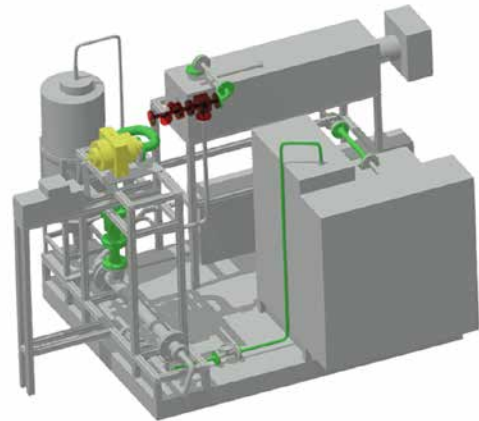


Abb. 3) Turbinenversuchsstand im Technikum für regenerative Energietechnik. Links: Realer Versuchsstand mit dem Tesla-Turbinen-Prototyp. Rechts: 3D-Modell des Versuchsstandes.

gelangt der entspannte Dampf in den Kondensator, wo dieser kondensiert. Das entstandene Kondensat wird im Anschluss über einen Kondensatheber in den Vorlagentank des Verdampfers rückgeführt. In dem aktuellen Aufbau wird ein Siemens-1FT5074-Drehstrom-Servomotor mit Inkrementalgeber ROD320 als Generator verwendet, dessen erzeugter Strom in mehreren parallel geschalteten Ohm'schen Widerständen verbraucht wird. Zur Ermittlung der thermodynamischen Zustände des Arbeitsmediums werden im Dampfkreislauf an mehreren Stellen Druck, Temperatur und Massenstrom gemessen. Die Messung der Temperatur und des Druckes erfolgt vor und nach der Turbine, um Aussagen zum Enthalpieabbau über den Turbinenkörper und damit die Leistung zu tätigen. Der Massenstrom des Dampfes wird mittels eines Vortex-Strömungssensor hinter dem Verdampfer bestimmt.

4. VERSUCHSDURCHFÜHRUNG/ ERGEBNISSE

Die Ziele der Versuchsdurchführung sind die Ermittlung der Turbinenleistung und des isentropen Wirkungsgrades sowie die Auswirkung des Profileinsatzes auf die Leistungsgenerierung. Dazu wurden mehrere Versuche unter der systematischen Variation der Eingangsparameter Druck und Massenstrom durchgeführt. Untersuchungen mit Variation der Eingangstemperatur konnten nicht durchgeführt werden, da der Überhitzer zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung

nicht einsatzbereit war. Aus diesem Grund konnten die Messungen nur mit Satttdampf erfolgen. Das bedeutet, dass der Auslegungspunkt nicht erreicht wird und somit die vollständige Turbinenleistung nicht abgerufen wird. Vor der Versuchsdurchführung wurde der Versuchsdruck am Verdampfer eingestellt und das System auf Betriebstemperatur gebracht. Anschließend wurde die Turbine in Betrieb genommen. Erst nachdem der statische Betriebszustand erreicht und die Eingangsparameter nicht mehr variierten, wurden die entsprechenden Messungen durchgeführt. Insgesamt wurden 24 Messungen unter der Variation von Eingangsdruck und Massenstrom getätigt. Während der Versuchsdurchführung zeigte sich, dass die angestrebte Drehzahl von 21855 U min⁻¹ nicht erreicht wird. Dies bedeutet, dass der Profileinsatz und die Profile nicht optimal wirken und dass mit einer geminderten Effizienz gerechnet werden muss. Die Ergebnisse aus den Versuchen sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Abbildung 4 zeigt die erreichte Leistung in Abhängigkeit vom Eingangsdruck und Enthalpieabbau. Es zeigt sich, dass die Leistung bei Verwendung eines Profileinsatzes zunimmt. Dieses ist insbesondere bei hohem Einlassdrücken erkennbar. Die Leistungssteigerung beträgt hier bis zu 200 W.

Weiterhin ist erkennbar, dass mit der Steigerung des Einlassdruckes die generierte Leistung zunimmt. Die Ursache hierfür liegt in der Dichte des Arbeitsmediums. Der Massenstrom ist

über die Dichte mit dem Druck gekoppelt und bei höherem Drücken können höhere Massenströme realisiert werden, die in einer Leistungszunahme resultiert. Die generierte Leistung P einer Turbine ist in Gl. 2 dargestellt. Sie ist das Produkt aus Massenstrom und Enthalpieabbau Δh .

$$\text{Gl. 2) } P = \dot{m} \Delta h$$

Abbildung 5 zeigt dies in Abhängigkeit vom Massenstrom. Auch hier ist zu erkennen, dass trotz leicht erhöhter Massenströme die erzielten Leistungen mit dem Profileinsatz höher sind. Es wird jedoch darauf verwiesen werden, dass die vollständige Leistung der Turbine nicht realisierbar war, da der Auslegungsmassenstrom von 0,016 kg s⁻¹ nicht erreicht wurde.

Der isentrope Turbinenwirkungsgrad ist das Maß, wie effizient eine Turbine die angebotene Energie umsetzt. Er ist das Verhältnis von gewandelter Energie zur idealen Energieumsetzung. In diesem Fall sind es die spezifischen Enthalpiedifferenzen des Arbeitsmediums vor und nach der Turbine, welche für die Bestimmung genutzt werden (vgl. Gl. 3).

$$\text{Gl. 3) } \eta_{isen} = \frac{h_{T_{in}} - h_{T_{out}}}{h_{T_{in}} - h_{T_{outideal}}}$$

Wobei $h_{T_{in}}$ die spezifische Enthalpie am Turbineneinlass, $h_{T_{out}}$ die über Druck und Temperatur ermittelte und $h_{T_{outideal}}$ die ideale spezifische Enthalpie am Auslass der Turbine repräsentieren.

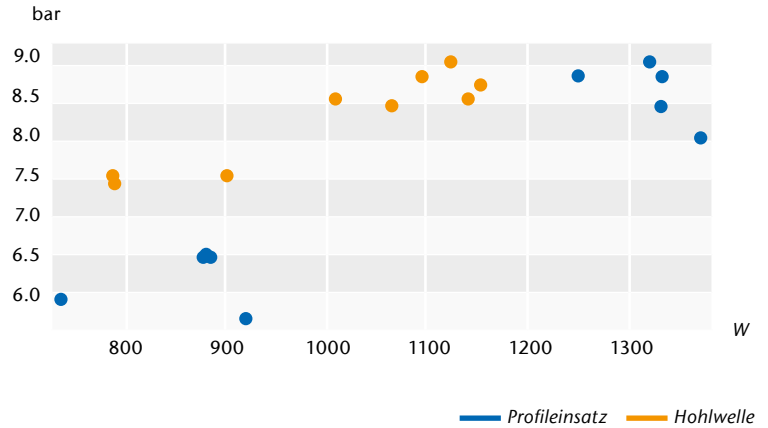
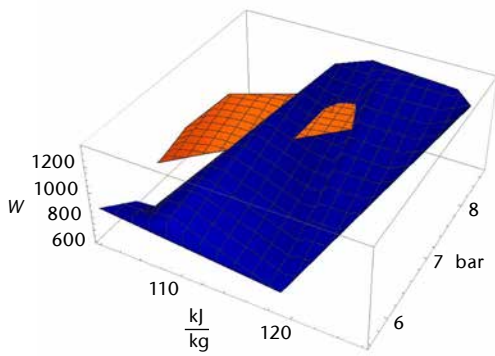


Abb. 4) Turbinenleistung in Abhängigkeit vom Eingangsdruck.

Nach dieser Methode wurde für die Tesla-Turbine ein isentroper Wirkungsgrad von 0,38 mit und Profileinsatz und 0,3 für die Hohlwelle ermittelt.

5. DISKUSSION

Obwohl die Messungen im Sattdampf-bereich durchgeführt wurden und der eigentliche Betriebspunkt (320°C, 1 MPa, 0,016 kg s⁻¹) nicht erreicht wurde, zeigte sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung mit den angenommenen Konstruktionsparametern. Die bisher bestimmten Teillastwerte lassen unter der Voraussetzung einer linearen Leistungsentwicklung – wie sie aus Abbildung 4 und 5 ersichtlich ist – den Schluss zu, dass die Turbine die angestrebte Nennleistung von 2,2 kW am Auslegungspunkt erreichen wird. Weiterhin zeigte sich, dass der Profileinsatz einen höheren Enthalpieab-

bau ermöglicht und damit die Leistung und Effizienz der Turbine erhöht. Hier ist zu betonen, dass der Profileinsatz für eine weitaus höhere Nenndrehzahl ausgelegt wurde, als in den Versuchen erreicht wurde. Das bedeutet, es kommt weiterhin zur Wirbelbildung am Auslass. Ein Grund für die dennoch erfolgte Leistungssteigerung ist aus Abbildung 1, links ersichtlich. Im Rotationszentrum bildet sich ein Wirbel, der weit in den Turbinenkörper hineingeht. Durch das Montieren eines Einsatzes wird der Querschnitt des Auslasses verringert und die Erzeugung dieses Wirbels unterbunden. Ein weiterer Einflussfaktor auf die Drehzahl ist der Düsenverlust, der durch die Düsengeometrie verursacht wird. Diese ist für den Betrieb Wasserdampf bei 320°C und 10 bar ausgelegt. Eine Abweichung davon hat aufgrund einer geänderten Dichte des

Arbeitsmediums eine geringere Eintrittsgeschwindigkeit zur Folge, woraus eine geringere Drehzahl resultiert. Bezogen auf den erreichten isentropen Wirkungsgrad der Turbine ist anzumerken, dass dieser an die Ergebnisse von Rice herankommt (Rice 1965). Das lässt einen optimistischen Blick in die weiterführende Entwicklung dieses Turbinentyps zu.

6. AUSBLICK

Die ersten Versuche erfolgten mit einem zufriedenstellenden Ergebnis, auf denen weitere Untersuchungen folgen werden, um diesen Turbinentyp in ein Serienprodukt zu überführen. Die nächsten unmittelbaren Schritte sind neben der Drehzahlsteigerung auch der Betrieb der Turbine mit überhitztem Wasserdampf, um Messungen am Auslegungspunkt durchzuführen.

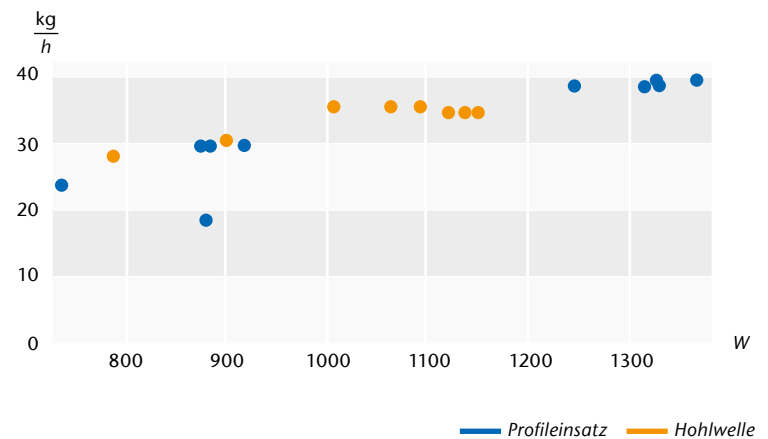
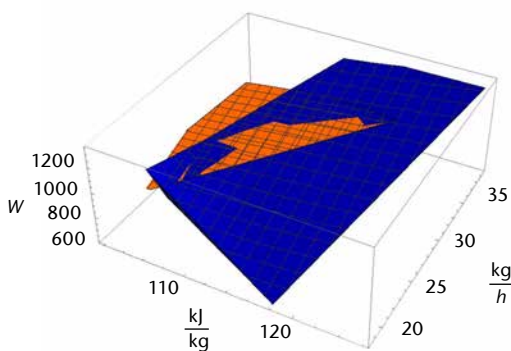


Abb. 5) Turbinenleistung in Abhängigkeit des Massenstroms.

Wenn die Untersuchungen mit Wasserdampf abgeschlossen sind, sollen die Versuche – nach einer Anpassung der Turbine – mit n-Hexan als organisches Arbeitsmedium wiederholt werden, um das eigentliche Ziel – die Entwicklung einer Turbine für ORC-Prozesse – zu erreichen. Für diese Versuche sind Modifikationen am Versuchsstand und der Turbine notwendig, da neben den geänderten Massen und Wärmeströmen auch Sicherheitsauflagen bezüglich Explosionsgefahr, Entflammbarkeit und Umweltverträglichkeit umgesetzt werden müssen.

LITERATUR

Anonymus (1911) The Tesla Steam Turbine. The Rotary Heat Motor Reduced to Its Simplest Terms. *Sci Am* 14(105):296–297

Armstrong JH (1952) An investigation of the performance of a modified Tesla Turbine. Master Thesis, Georgia Institute of Technology

Holz C (2014) Ansätze zur serientechnischen Auslegung von Tesla-Turbinen. Bachelorarbeit, Technische Hochschule Wildau

Lisker R (2009) Numerische Strömungsuntersuchungen an einer Tesla Turbine. Diplomarbeit, Technische Hochschule Wildau

Meller R (2013) Strömungstechnische Untersuchung der Eintritts- und Austrittsströmung an einer Scheibenturbine. Bachelorarbeit, Technische Hochschule Wildau

Nendl D (1966) Eine theoretische Betrachtung der Reibungsturbomaschinen von Nikola Tesla. Dissertation, RWTH Aachen

Pannasch T (2011) Auslegung und Entwurf einer Teslaturbine einschließlich einer Leistungsmesseinrichtung. Diplomarbeit, Technische Hochschule Wildau

Quoilin S, Van Den Broek M, Declaye S, Dewallef P, Lemort V (2013) Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renew Sustain Energy Rev* 22:168–186. doi: 10.1016/j.rser.2013.01.028

Rice W (1965) An Analytical and Experimental Investigation of Multiple-Disk Turbines. *J Eng Gas Turbines Power* 87(1):29. doi: 10.1115/1.3678134

Rice W (1991) Tesla Turbomachinery. Proc. IV International Tesla Symposium, 23-25 Sep 1991, Belgrad, Yugoslavia. <http://www.gyroscope.com/images/teslaturbine/TeslaTurboMachinery.pdf>. Accessed 01 Aug 2014

Tesla N (1911) Turbine. Patent Application US 1,061,206, 17 Jan 1911

AUTOREN

Roberto Lisker M. Eng.
Technische Hochschule Wildau
roberto.lisker@th-wildau.de

Prof. Dr.-Ing. Udo Hellwig
Technische Hochschule Wildau
udo.hellwig@th-wildau.de

Prof. Dr. rer. nat. Franz-Xaver Wildenauer
Technische Hochschule Wildau
franz.wildenauer@th-wildau.de

Strukturdynamik- und Maschinendiagnose an einem Cherenkov-Teleskop

Torsten Schneider, Robert Paeschke, Daniel Alarcón, Peter Blaschke*

Zusammenfassung

Das Deutsche Elektronen-Synchrotron (DESY) in Zeuthen entwickelt zurzeit die 12m-Teleskope im Rahmen des internationalen Cherenkov-Telescope-Array (CTA)-Konsortiums. Es ist geplant, die Teleskope über einen Zeitraum von mindestens 30 Jahren kostengünstig zu betreiben. Dabei führt der autarke Betrieb von Teleskopen an abgelegenen Standorten zu speziellen Anforderungen an die Ausfallsicherheit. Diese Anforderungen gelten sowohl für die Tragstruktur als auch für die Antriebskomponenten. Zustandsüberwachung und Verschleißanalysen sind in diesem Anwendungsfall mit klassischen Methoden der Maschinen- und Strukturüberwachung nur eingeschränkt möglich. Methoden der Mustererkennung aus dem Bereich der Psychoakustik konnten erfolgreich verwendet werden, um den Langsamlauf zu analysieren. In diesem Beitrag werden Ergebnisse von Schwingungsuntersuchungen an einem 1:1-Prototyp des Teleskops vorgestellt. Zusätzlich wird die Frage beantwortet, wie ein kostengünstiges Überwachungssystem mit minimaler Sensoranzahl realisiert werden kann.

Abstract

The Deutsche Elektronen-Synchrotron (DESY) in Zeuthen currently develops telescopes with 12 m diameter in the framework of the international Cherenkov Telescope Array (CTA) consortium. These telescopes are supposed to work cost-efficiently for a period of at least 30 years. Their operation at remote locations leads to special demands for the telescope's support structure and drive components system stability. In this case, traditional methods of condition monitoring and structural health monitoring reach their limits. Psychoacoustical methods could be successfully applied in order to analyse low revolution speed regime. In this paper, we present results of a structural dynamic analysis of a real-sized telescope prototype. Additionally, the question of how to realise a monitoring system with a minimum amount of sensors is addressed.

1. EINLEITUNG

Das Cherenkov Telescope Array (CTA) wird ein Verbund von ca. 100 optischen Teleskopen zur Analyse von astronomischen Gammateilchen (Actis et al. 2011). Für die CTA-Teleskope sieht die Planung einen kostengünstigen Betrieb über mindestens 30 Jahre an abgelegenen Standorten vor, wobei der Teleskopverschleiß die Messpräzision und die Ausfallsicherheit direkt beeinflusst (Schulz 2012, Schneider et al. 2014). So müssen z.B. Ausfälle des Antriebs während der Messungen unbedingt vermieden werden, damit immer eine Parkposition zum Schutz vor Wind und direkter Sonneneinstrahlung der empfindlichen Kamera erreicht wird.

Das CTA wird aus Teleskopen in drei verschiedenen Größen bestehen. Die mittelgroßen Teleskope mit 12 m Spiegeldurchmesser werden durch das Deutsche Elektronen-Synchrotron (DESY) in Zeuthen entwickelt. Abbildung 1, links, zeigt ein Foto des 2013 in Berlin-Adlershof errichteten 1:1-Prototyps, der dem Test des Konzepts und der Überprüfung der Spezifikationseinhaltung dient sowie das Sammeln von Erfahrungen beim Bau und Betrieb des Teleskops ermöglicht.

Aus schwingungstechnischer Sicht ist das Teleskop ein Hybrid aus Gebäude und Maschine, vergleiche Abbildung 1, rechts. Einerseits kann die (Trag-) Struktur wie ein Turm mit Stahlausleger schwingen, was zu ungewollten

Verschiebungen zwischen Kamera und Spiegeleinheit und somit zu Messungenauigkeiten oder schlimmstenfalls zu Schäden am Teleskop führen kann. Auf der anderen Seite enthält das Teleskop zur Ausrichtung mehrere Antriebe, deren Komponenten Maschinenschwingungen verursachen. Gemeinsam haben Gebäude- und Maschinenschwingungen, dass die Charaktere der Schwingungen Maßstäbe für den Zustand der Struktur bzw. des Antriebs enthalten. Diese Schwingungen sind damit ein günstiger, zerstörungsfreier Zugang zur Erfassung des jeweiligen Verschleißzustands. Abbildung 2 zeigt eine Einteilung der möglichen Analysetiefe.

* korrespondierender Autor

Zustandsüberwachung hat Alternativen, wie z. B. Fahren bis zum Bruch oder intervallbasierte Überwachung. Hauptvorteil der Zustandsüberwachung ist, dass zustandsorientierte Instandhaltung möglich wird, wodurch der Abnutzungsvorrat besser ausgeschöpft, unnötige Demontagen vermieden, beginnende Schäden frühzeitig erkannt und Folgeschäden weitgehend ausgeschlossen werden. Demgegenüber stehen als Hauptnachteil die Kosten für Planung, Sensorik, Messungen und Auswertungen.

Bei der Zustandsüberwachung wird zu Beginn ein Start-Zustand erfasst. Anschließend wird über einen längeren Zeitraum die Abweichung der Ist-Daten vom Start-Zustand beobachtet. Um Aussagen aus den Ist-Daten ableiten zu können (Zustandsdiagnose), sind zusätzliche Informationen aus Konstruktions- und Betriebsparametern notwendig (Theorie-Daten wie z. B. Drehzahl, Zahneingriffsverhältnisse und Schwingungsfrequenzen einzelner Getriebe-komponenten). Die Zusammenführung von Konstruktions- und Betriebsparametern mit dem Neu- und Ist-Zustand ermöglicht die Zuordnung von Veränderungen dem Verschleiß einzelner Komponenten. Eine Zustandsprognose wird möglich, wenn Erfahrungen mit dem Verschleiß der einzelnen Komponenten vorliegen. Diese Erfahrungen können aus simulierten Schäden, aus einer Schadensdatenbank oder aus Expertenwissen stammen.

Nach den unterschiedlichen Anwendungsgebieten unterscheidet man das Condition Monitoring im Maschinenbau und das Structural Health Monitoring im Bauingenieurwesen (Kolerus 1995, Balageas et al. 2006). In diesem Beitrag wird eine ähnliche Zweiteilung genutzt. Im ersten Abschnitt werden die Besonderheiten und Einsatzmöglichkeiten von Maschinendiagnose für den Teleskop-Antrieb dargestellt. Der zweite Abschnitt erläutert den Einsatz und die Vorteile von Betriebsmodalanalysen zur Überwachung der Teleskopstruktur.

2. UNTERSUCHUNG DES ANTRIEBS

Das mittelgroße Cherenkov-Teleskop enthält zwei unterschiedliche Antriebe

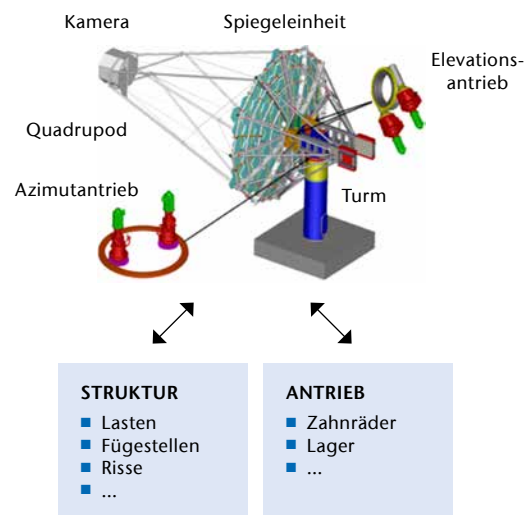


Abb. 1) links: Panoramafoto des Teleskop-Prototyps in Berlin-Adlershof vom Januar 2014. Rechts: Illustration des Teleskops und der schwingungstechnischen Aufteilung.

ZUSTANDS-

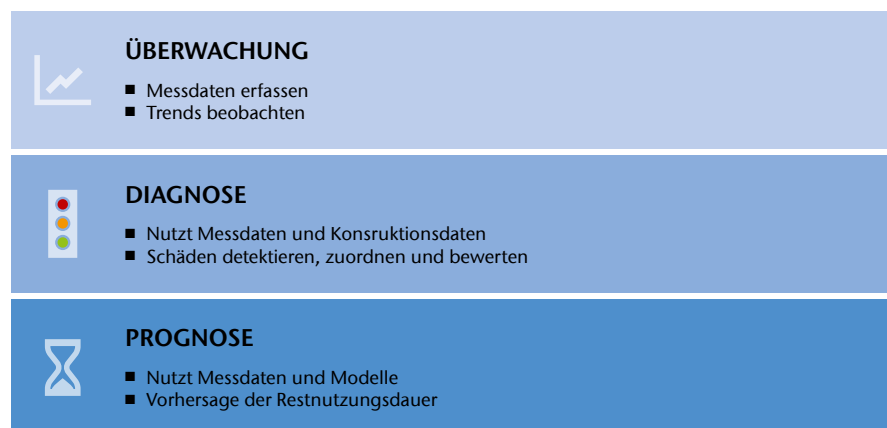


Abb. 2) Einteilung von Schwingungsanalysen im Bereich der Zustandsbeurteilung.

(vergleiche Abbildung 1, rechts): den Azimutantrieb für die Ausrichtung in horizontaler Richtung und den Elevationsantrieb für die vertikale Ausrichtung.

2.1 MASCHINENDIAGNOSE

Für die Maschinendiagnose werden Strukturschwingungen am Gehäuse der Antriebseinheit erfasst. Die Anregungsquelle der Strukturschwingungen sind die bewegten Lager und Zahnräder. Deshalb kann aus den gemessenen Schwingungsdaten auf die Anregungsquellen und deren Verschleiß bzw. Schäden zurückgeschlossen werden. Für den Stand der Technik im Bereich Maschinendiagnose kann z. B. das Nor-

men- und Richtlinienwerk als Grundlage dienen (Gellermann & Kolerus 2014). Obwohl es sich beim Teleskop nicht um Windenergieanlagen handelt, können aus diesem Bereich wertvolle Hinweise entnommen werden. Dies liegt daran, dass im Bereich der Windenergieanlagen nicht nur Maschinenschwingungsemissionen, sondern auch -immissionen berücksichtigt werden.

Im Vergleich zu Standardmaschinen und -zustandsüberwachungen liegt allerdings eine Besonderheit des Teleskops vor: der extreme Langsamlauf des Antriebs mit bis zu $0,002 \text{ min}^{-1}$. Aus diesem Grund muss die Anwendbarkeit der Standardmethoden erst nachgewiesen werden.

Da der Prototyp nahezu neu ist, sind typischerweise keine oder nur minimale Zahnrad- und Lagerschäden vorhanden. Die Herausforderung dieser Studie besteht in der Tatsache, dass noch keine Erfahrungsdaten vom Prototyp vorhanden sind. Es ist demnach unbekannt, ob Fehler vorliegen, ob sie gegebenenfalls detektierbar sind und mit welchen Diagnosemethoden sie nachgewiesen werden können.

2.2 STUDIE ZUR ANTRIEBSÜBERWACHUNG

Ziele dieser Machbarkeitsstudie sind a) der Nachweis, ob über die Messung von Strukturschwingungen mit Beschleunigungsaufnehmern einzelne Antriebskomponenten den Messdaten zugeordnet werden können (Zuordnung Ist- vs. Theorie-Daten); b) die Identifizierung geeigneter Messstellen.

2.2.1 MATERIAL UND METHODEN

Auswahl der Messstellen

Der Prototyp besitzt zwei Motor-Getriebe-Einheiten für die Azimutbewegung und vier Motor-Getriebe-Einheiten für die Elevationsbewegung. Für diese Machbarkeitsstudie wurde als Beispiel der Strang 1 des Azimutantriebs ausgewählt. Dies geschah aus zwei Gründen: a) bessere Zugänglichkeit und Montagemöglichkeit für die Sensoren; b) Übertragbarkeit der Ergebnisse auf den zweiten Azimutantriebsstrang und auf den Elevationsantrieb sind möglich.

Messstellen

Abbildung 3 zeigt die Bezeichnungen und die Sensorpositionen. Für die Messung der Strukturschwingung wurde der Antriebsstrang 1 mit piezoelektrischen Beschleunigungssensoren bestückt. Entsprechend der Unterteilung des Antriebsstrangs erfolgte jeweils die Montage eines Sensors. An jedes Gehäuse dieser Bauteile wurde mittig und radial von außen ein Sensor montiert. Die Beschleunigungssensoren wurden mit Paraffinwachs ablösbar an die Oberfläche geklebt.

Messtechnik

Aus den Theorie-Daten folgt, dass die höchste Frequenz des Azimutantriebs bei 1640 Hz liegt. Diese Frequenz

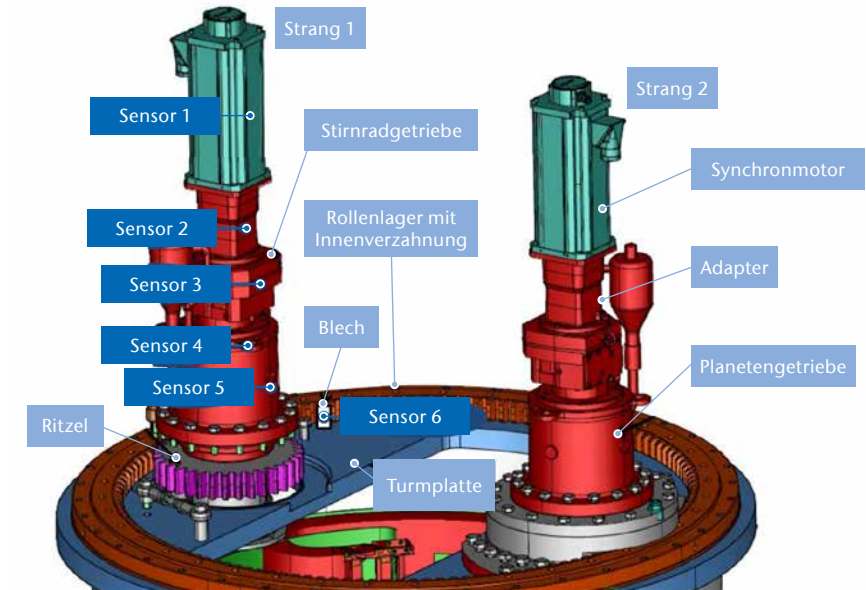


Abb. 3) Azimutantrieb mit Bezeichnung der Stränge, Antriebskomponenten und Sensorpositionen.

kann von der gesamten Messkette erfasst werden. Die Aufnahme der Sensordaten erfolgte über das mobile Datenerfassungssystem SQuadriga II der Firma HEAD Acoustics (Herzogenrath, Deutschland) mit acht synchron abgetasteten Eingangskanälen mit einer Abtastrate von 32 kS/s. Die Tiefpassfilterung für das Anti-Aliasing erfolgte intern im Gerät. Für die Schwingungsmessungen wurden piezoelektrische 1- und 3-Achs-Beschleunigungssensoren der Firma PCB (PCB Piezotronics, NY, USA) verwendet.

Messdurchführung

In Abstimmung mit dem DESY wurde als repräsentative, reproduzierbare Betriebsbedingung folgende Konfiguration gewählt (im Folgenden: Diagnose-Fahrt): azimutale Drehung von -269° bis $+269^\circ$ mit Elevationswinkel 0° bei maximaler Geschwindigkeit. Während der Diagnose-Fahrt wird das Teleskop beschleunigt, erreicht und hält die maximale Geschwindigkeit v_{\max} und wird anschließend wieder abgebremst. Während der Messung konnten die Antriebsdaten nicht synchron erfasst werden. Deshalb werden für diese Studie repräsentative Daten zur Analyse aus einer anderen Messung herangezogen. Die Drehzahl des Motors ist nach der Beschleunigungsphase nahezu konstant und beträgt $3942 \pm 0,5 \text{ min}^{-1}$ (Mittelwert \pm Standardabweichung).

2.2.2 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Messwertevergleich

Die gemessenen Beschleunigungen liegen als Zeitverläufe vor. Abbildung 4 zeigt eine beispielhafte Gegenüberstellung von verschiedenen Signalen.

In Abbildung 4 wird deutlich, dass während der Diagnose-Fahrt an allen Messstellen für Analysen ausreichende Signalamplituden nachgewiesen wurden. Dabei sind die Beschleunigungsamplituden an Motor, Adapter und Stirnradgetriebe ähnlich groß. Als ergänzende Testmessung wurde eine Aufnahme im Teleskopstillstand zur Bestimmung des Signal-Rausch-Verhältnisses durchgeführt: Die maximale Amplitude der gemessenen Hintergrundschwingungen beträgt ca. 0,4% der Amplituden während der Diagnose-Fahrt bei v_{\max} und ist damit vernachlässigbar klein. Um eine Auswahl für eine repräsentative Messstelle treffen zu können, wurde zusätzlich nachgewiesen, dass die gesuchten spektralen Anteile an allen Sensorpositionen enthalten waren.

Musteranalysen

Methoden der Mustererkennung aus dem Bereich der Psychoakustik konnten erfolgreich verwendet werden, um den Langsamlauf zu analysieren. Musteranalysen werden möglich, wenn die Frequenzanalyse zeitaufgelöst erfolgt. Muster werden dann

in Zeitrichtung (z. B. Amplitudenmodulation), in Frequenzrichtung und kombiniert (komplexe Geräusche wie Quietschen) detektierbar. In den entstehenden Spektrogrammen ist in der Zeit-Frequenz-Ebene die Amplitude der einzelnen Frequenzen farbcodiert dargestellt. Abbildung 5 zeigt ein Beispielspektrogramm. Drehzahlunabhängige Schwingungsquellen lassen sich in den Beschleunigungsphasen anhand ihrer zeitachsenparallelen Frequenzverläufe klar von drehzahlabhängigen Quellen mit variablen Frequenzverläufen trennen. Drehzahlunabhängig sind am Teleskop beispielsweise die Grundfrequenzen (4 kHz) der Motorelektronik und deren Harmonische. Drehzahlabhängige Schwingungsquellen sind z. B. die Zahnräder und die Lager des Antriebs. Deren Frequenzverläufe starten beim Stillstand von 0 Hz und folgen der Motordrehzahl. Bei konstanter Fahrt mit v_{max} beschreiben sie auch eine zeitachsenparallele Linie. Mit abnehmender Fahrt sinkt ihre Frequenz zurück auf die Nulllinie. Amplitudenmodulationen werden als Änderungen in der Farbkodierung entlang der Frequenzverläufe erkennbar. In diesen Modulationen können auch sehr niedrige Frequenzen identifiziert werden. Dies gilt bis unterhalb der unteren Grenzfrequenz des Messsystems (hier ca. 5 Hz, bedingt durch die Sensorbauart und die Frequenzauflösung der Analyse).

Komponentenidentifikation

Insgesamt enthält ein Antriebsstrang 31 Lager- und Zahnradkomponenten bzw. Schwingungsquellen. Dabei ist zu beachten, dass im Spektrogramm einer Diagnose-Fahrt weit mehr Frequenzen prominent erscheinen, als in den Theorie-Daten enthalten sind. Dies hat verschiedene Ursachen: a) Schwingungsquellen, die nicht zu den mechanischen Komponenten des Antriebs gehören (z.B. Frequenzumrichter); b) es treten aufgrund von Nichtlinearitäten auch Harmonische und Nebenbänder der theoretisch berechneten Frequenzen auf.

Ein Ziel dieser Studie war es, zu zeigen, in welchem Frequenzbereich Komponenten in den Messdaten identifiziert werden können, wobei der Betriebsfrequenzbereich der Antriebskom-

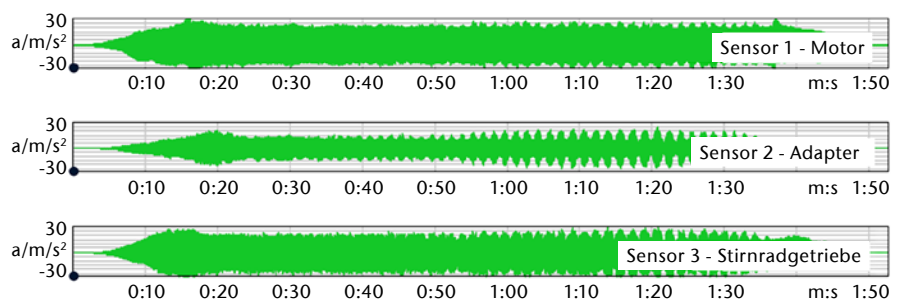


Abb. 4) Gegenüberstellung von gemessenen Zeitverläufen während der Diagnose-Fahrt an verschiedenen Sensorpositionen.

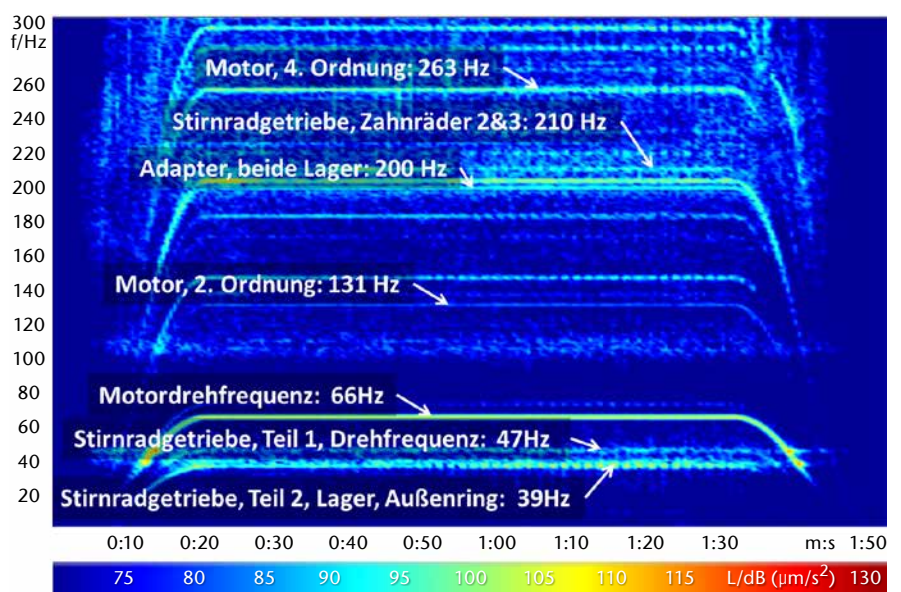


Abb. 5) Spektrogrammausschnitt (0 bis 300 Hz) der Diagnose-Fahrt mit beispielhafter Zuordnung von Antriebskomponenten.

ponenten bei v_{max} zwischen 1640 Hz und 2 Hz liegt. Diese Identifizierung war im Bereich zwischen 1640 Hz und 39 Hz möglich. Damit können gegenwärtig die Komponenten des Motors und des Stirnradgetriebes identifiziert werden. Ursache für das Fehlen der motorfernen Komponenten ist deren Langsamlauf. Damit ist im ungeschädigten Komponentenzustand eine kleinere Quellenstärke verbunden. Es ist zu erwarten, dass bei beginnendem Verschleiß auch die Frequenzen der motorfernen Komponenten an Prominenz gewinnen.

2.3 EMPFEHLUNGEN FÜR DEN CHERENKOV-TELESKOP-ANTRIEB

Empfehlung 1

Weitere Messungen sollten für Trend-

analysen durchgeführt werden. Die vorliegenden Analysen liefern einen Satz von Neudaten für zukünftige Diagnosen. Für die Entwicklung und die Implementierung eines CTA-Maschinendiagnosesystems ist eine möglichst vollständige Trendbeobachtung und umfangreiche Erfahrungsbasis notwendig. Diese kann nur auf kontinuierlich wiederholten Messungen mit frequenz aufgelösten Vergleichen über lange Betriebszeiten basieren. Stück für Stück wird eine Wissensdatenbank aufgebaut, die Ursachentifizierung sowie Festlegungen von Toleranzschemen, Warn- und Alarmwerten ermöglicht.

Empfehlung 2

Die Zustandsüberwachung einer Antriebseinheit (Motor + Getriebe) ist

mit einem Beschleunigungssensor möglich. Die Analysen haben gezeigt, dass ein Beschleunigungssensor wegen der hohen Gehäusesteifigkeiten prinzipiell die Betriebsfrequenzen aller Antriebskomponenten erfassen kann. Wenn möglich sollte der eingesetzte Sensor speziell für den Betriebsfrequenzbereich von 2 Hz bis 1640 Hz angepasst sein.

Empfehlung 3

Es sollte ein Lastenheft für ein Maschinendiagnosesystem erstellt werden. Da nachgewiesen wurde, dass am Prototyp durch die Anwendung der Diagnose-Fahrt auswertbare Daten gemessen und bereitgestellt werden können, kann auf dieser Basis ein Lastenheft erstellt werden. Für die Erstellung sollte klar definiert werden, was die gewünschten Ziele des CTA-Diagnosesystems sind bzw. welche Möglichkeiten der Schwingungs- und Zustandsbeurteilung benötigt werden (Beurteilung der Schwingungen; Ampelsystem für Antriebszustand; zusätzliche Alarmanzeige für Spezialereignisse; Überlast; Verfolgung des Zustands als Trendkurven von Kennwerten; Grad der Auswertautomatisierung etc.).

Empfehlung 4

Der Betriebszustand sollte bei Schwingungsmessungen mit erfasst werden. In der Antriebssteuerung liegen Daten bezüglich Drehzahl, Drehmoment, Drehrichtung und Ausrichtung vor. Für zukünftige Schwingungsmessungen sollten diese zusammen mit den Wetterdaten in die Datenerfassung integriert werden. Des Weiteren ist die Erfassung der Betriebszustände und -zeiten empfehlenswert, um die Zuordnung von Komponentenveränderungen zur Belastungshistorie möglich zu machen.

3. UNTERSUCHUNG DER STRUKTUR

Die Tragstruktur des Teleskops ist eine seilverspannte Stahlkonstruktion. Auf dem festen Turm ist der Ausleger beweglich gelagert. Die Hauptkomponenten des Auslegers sind die Spiegeleinheit mit 12 m Durchmesser, der Quadropod mit einer Tiefe von ca. 20 m, die Gegengewichte und die ca. 2 t schwere Kamera. Die Struktur muss

neben statischen Lasten insbesondere Schwingungen durch dynamische Windlasten widerstehen.

3.1. MÖGLICHKEITEN DER STRUKTURDIAGNOSE

Sind für ein System die anregenden Kräfte und die Schwingungsantwort bekannt, kann aus deren Verhältnis auf die dynamischen Eigenschaften der Struktur in Form von Eigenfrequenzen, Eigenformen und modalen Dämpfungen geschlossen werden. Dieses klassische Verfahren ist als Struktur- oder speziell experimentelle Modalanalyse etabliert (Ewins 1984). Die kontinuierliche Kenntnis der modalen Eigenschaften einer Struktur ermöglicht die Zustandsüberwachung und -diagnose der Struktur. Dies ist möglich, da Verschleiß und Schäden die modalen Parameter z. B. über Steifigkeitsänderungen oder zusätzliche Fügstellendämpfung beeinflussen. Bei großen Objekten und Gebäuden besteht allerdings das Anwendungsproblem, dass die anregenden Kräfte unbekannt sind und als Störgröße in die Analyse eingehen.

Eine Alternative zur klassischen Modalanalyse bietet die Betriebsmodalanalyse (Operational Modal Analysis, OMA). Die OMA ermöglicht über statistische Analysen von Schwingungsantworten (output only) die Bestimmung der modalen Eigenschaften, was die Anforderungen an Versuchsaufbau und -durchführung erheblich vereinfacht (Andersen 1997).

3.2 STUDIE ZUR STRUKTURÜBERWACHUNG

Zur Untersuchung, ob der Teleskop-Prototyp die CTA-Spezifikationen erfüllt, hat das DESY ein Sensorsystem installiert. Dieses sollte für Voruntersuchungen genutzt werden, um die Frage zu beantworten, inwieweit diese Zeitreihendaten auch für die Durchführung von Betriebsmodalanalysen genutzt werden können.

3.2.1 MATERIAL UND METHODEN

Der Elevationswinkel des Teleskops war während der Messungen 0° und die Schwingungsanregung erfolgte

durch Wind. Es wurden insgesamt fünf zweiachsige, kapazitive Beschleunigungs-(Neigungs-)Sensoren des Typs KAS901-5X (Kelag, Schwerzenbach, Schweiz) eingesetzt. Die Abtastung erfolgte mit NI-9205-Analogmodulen (16 bit, Summenabtastrate 250 kS/s) im NI cDAQ-9188 Chassis (National Instruments, Austin, Texas, USA). Die Sensoranordnung ist in Abbildung 6 und die Messkomponenten sind in Tabelle 1 dargestellt.

Die Messdaten werden mit einem digitalen Tiefpass bei einer Grenzfrequenz von 100 Hz gefiltert und als ca. 45 min lange Messschriebe gespeichert.

Zusätzlich wurden Finite-Element-Simulationen (FEM) der ersten Struktur-Eigenfrequenzen des Teleskop-Prototyps durch das DESY berechnet. Ausgehend von diesen Daten der simulierten FEM-Moden wurden Frequenzen bis 10 Hz als interessanter Bereich ausgewählt.

Zur Durchführung der Betriebsmodalanalysen wurde die kommerzielle Software ARTEMIS Modal 2.5.0.5 (Structural Vibration Solutions A/S, Aalborg, Dänemark) eingesetzt. Die DESY-Daten wurden importiert und im Originalformat (in Volt) belassen, da dies keinen Einfluss auf die ermittelten modalen Größen (Frequenzen, Dämpfung, Formen) hat. Vor der Berechnung der modalen Parameter wurden die Daten auf eine Auflösung von 10 Hz reduziert (resampling). Zur Visualisierung der Eigenformen wurde eine vereinfachte Skelett-Geometrie der Messpunkte erstellt.

3.2.2. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Abbildung 7 zeigt die Singular Value Decomposition der Messungen, die einer Eigenwertzerlegung entspricht. Einfach gesagt: Die Spitzen in diesem Graphen könnten zu Eigenfrequenzen gehören. Abbildung 7 zeigt auch einige Eigenschaften der analysierten Daten: a) unter 2 Hz sind die Daten relativ stark verrauscht und b) für 1,135 Hz, 2,293 Hz, 2,637 Hz, 5,848 Hz und 6,877 Hz werden automatisch Kandidaten für Schwingungsmoden erkannt (Modal Domain). Zur Ermittlung der modalen Parameter wur-

den EFDD-Auswertungen (Enhanced Frequency Domain Decomposition) durchgeführt (zu den Details dieser Methode siehe Jacobsen et al. (2006)). Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 gelistet.

Die Eigenformen aus FEM-Simulationen und OMA passen sehr gut zusammen. Die Absolutwerte in Tabelle 2 zeigen allerdings bemerkenswerte Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen Eigenfrequenzen. Abweichungen zwischen Simulation und Experiment sollten eigentlich im Bereich von 10% liegen. Ein Grund für die größeren Abweichungen könnte im FEM-Modell liegen. Dies ist aber kein Fehler der FEM, sondern resultiert aus notwendigen, unsicheren Annahmen. Erst wenn Kenntnisse von realen Messergebnissen vorliegen, kann die Unsicherheit der Annahmen reduziert werden. So sind FEM-Simulationen typischerweise zu steif (feste Verbindungen zwischen einzelnen Elementen), was in zu hohen Eigenfrequenzen resultiert. Auch die Modellierung von Getriebesträngen mit vielen einzelnen Zahnrad- und Wellensteifigkeiten erfordert fast immer eine Modellaktualisierung auf der Basis von Messwerten. Die Klärung dieser These erfordert eine Analyse und Aktualisierung des FEM-Modells.

Die ermittelten modalen Dämpfungen der ersten beiden Moden mit 7% und 11% sind relativ hoch. Für „normale“ Strukturschwingungen werden Dämpfungen im niedrigen einstelligen Prozentbereich erwartet. Allerdings müssen zwei Aspekte bei der Beurteilung berücksichtigt werden: a) die hohe Dämpfung könnte aus der Anbindung an die Getriebe und damit aus einer Kombination aus Struktur- und Getriebebeschwingung stammen (1. Mode – Schwingung um Azimutantrieb; 2. Mode – Schwingung um Elevationsantrieb) und b) die ersten beiden Moden sind in Abbildung 7 nur verrauscht zu erkennen.

Zur Validierung der OMA-Ergebnisse kann das Modal Assurance Criterium als MAC-Matrix herangezogen werden. In Kürze: Die Einträge der MAC-Matrix geben an, ob die einzelnen Moden (wie theoretisch gewünscht)

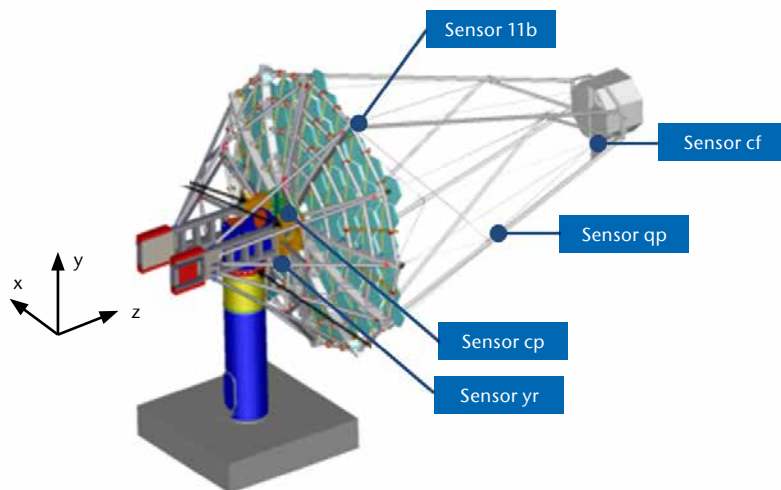


Abb. 6) DESY-Sensorsystem zur Erfassung von Strukturschwingungen.

Tab. 1: Übersicht zu Sensorpositionen am Teleskop-Prototyp (cf camera frame; qp quadropod; 11b 11 o'clock beam; cp center plate; yr yoke right).

Sensornr.	1		2		3		4		5	
Position	cf	cf	qp	qp	11b	11b	cp	cp	yr	yr
Richtung	-x	-y	x	-y	-x	-z	x	y	-z	-x

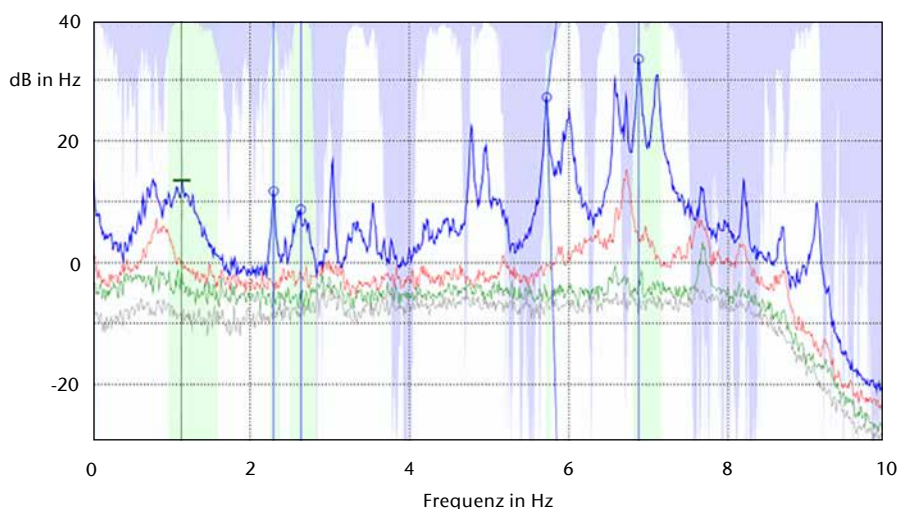


Abb. 7) Singular Value Decomposition der DESY-Daten zusammen mit automatisch detektierten Modalgebieten (grün).

Tab. 2: Gegenüberstellung von modalen Größen aus Finite-Element-Simulationen (FEM) und experimenteller Betriebsmodalanalyse (OMA). Nur im Experiment kann die Dämpfung bestimmt werden.

Mode	Form	Eigenfrequenz in Hz		Dämpfung in %
		FEM	OMA	OMA
1	Teleskop-Kopf-Gieren	1,549	0,778	6,917
2	Teleskop-Kopf-Nicken	2,052	1,135	11,243
3	Teleskop-Kopf-Rollen	2,765	2,293	0,975

zueinander linear unabhängig sind. Dabei stehen Werte nahe Eins für lineare Abhängigkeit (erwartet nur für den Vergleich derselben Moden und damit für Einträge auf der Matrixdiagonalen) und nahe Null für lineare Unabhängigkeit (erwartet für alle anderen Matrixelemente). Abbildung 8 zeigt die MAC-Matrix der ermittelten Moden. Dieses Ergebnis bestätigt, dass die ermittelten Moden linear unabhängig sind und dass damit jeweils Eigenfrequenzen vorliegen.

3.3. EMPFEHLUNGEN FÜR DIE CHERENKOV-TELESKOP-STRUKTUR

Empfehlung 1

Es wird empfohlen, eine OMA mit ausreichend vielen Sensoren an ausgewählten Positionen durchzuführen. Mit dieser Untersuchung kann gezielt der Grundzustand des Prototyps charakterisiert, das FE-Modell aktualisiert und die notwendigen (wenigen) Schlüsselpositionen für Sensoren eines Strukturdiagnosesystems identifiziert werden.

Empfehlung 2

Zwischenzeitlich wird empfohlen, weiter Intervallmessungen mit dem vorhandenen Sensorsystem durchzuführen. Durch den Aufbau einer Messhistorie inklusive Grundzustand kann eine Datenbasis für ein Strukturdiagnose-Konzept und die Entwicklung von angepassten Trendanalysen bzw. Warnwerten erstellt werden. Dabei kann der Einfluss verschiedener Umgebungs-, Datenerfassungs- und Teleskop-Parameter (z.B. Temperatur, Windrichtung und -stärke, digitale Tiefpassfilterung, Elevationswinkel) auf die modalen Eigenschaften (Frequenzen, Dämpfungen) berücksichtigt werden.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die in dieser Studie präsentierten Ergebnisse von Schwingungsuntersuchungen stellen den momentanen Zustand des Antriebs und der Struktur des Cherenkov-Teleskop-Prototyps dar. Die Anwendbarkeit der Zustandsüberwachungsmethoden wurde in beiden Anwendungsfällen erfolgreich nachgewiesen: Wichtige Antriebskomponenten konnten in den Maschinenschwingungsdaten identifiziert und die

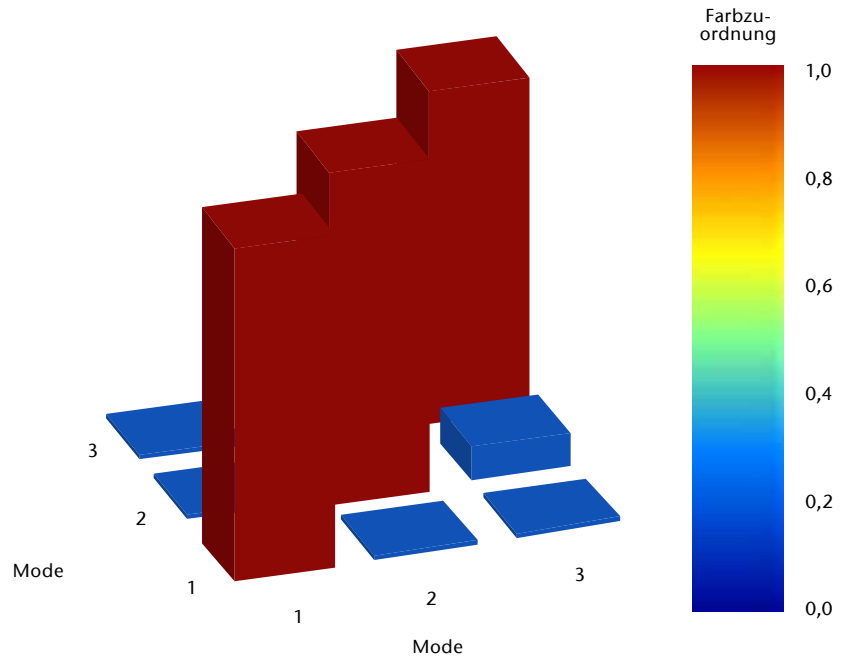


Abb. 8) Matrix des Modal Assurance Criterium (MAC) zu den ersten drei Moden aus der EFDD-Analyse.

modalen Parameter der Tragstruktur ermittelt werden. Es wurde gezeigt, wie es durch die Wahl von geeigneten Messpositionen und -bedingungen möglich ist, die Sensoranzahl zu minimieren. Damit reduziert sich der Aufwand für die Überwachung auf wenige Sensoren, was ein Vorteil für die serienmäßige Installation eines CTA-Teleskop-Diagnosesystems ist.

Allerdings wurden auch die Grenzen der durchgeführten Messungen aufgezeigt. Für die Diagnose von Antriebskomponenten muss die zugehörige Anregungsamplitude ausreichen bzw. der Sensormessbereich abgestimmt sein. Um den Einsatzbereich der Methode auszuloten, ist geplant, Schwingungen an einer Antriebseinheit mit künstlich eingefügten Lagerschäden zu vermessen. Die Strukturdiagnose benötigt lange Messdatenreihen, eine angepasste Datenerfassung und die Durchführung einer genaueren Betriebsmodalanalyse/OMA mit einem dichten Netz von angepassten Sensoren.

Der nächste Schritt liegt in der Erstellung einer Messhistorie durch kontinuierlich fortgesetzte Langzeitmessungen und Trendanalysen. Diese Datenbasis ist einerseits notwendig, um Grenzwerte für ein Teleskop-Dia-

gnosesystem festlegen zu können und um andererseits Wissen für die weitere Teleskop-Entwicklung zu sammeln.

DANKSAGUNG

Diese Studie wurde aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds und des Ministeriums für Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Brandenburg finanziert (Projektnr. 1392533). Zusätzlich danken die Autoren A. Schubert, J. Schultze und R. Sternberger vom DESY-Zeuthen für die Unterstützung während der Messungen.

LITERATUR

Actis M et al. (2011) Design concepts for the Cherenkov Telescope Array CTA: an advanced facility for ground-based high-energy gamma-ray astronomy. *Exp Astron* 32(3):193–316. doi: 10.1007/s10686-011-9247-0

Andersen P (1997) Identification of Civil Engineering Structures using Vector ARMA Models. PhD Thesis, Aalborg University

Balageas D, Güemes A, Fritzen C (eds) (2006) Structural health monitoring. ISTE, London, Newport Beach, CA. ISBN: 978-1-905209-01-9. doi: 10.1002/9780470612071

Ewins DJ (1984) Modal Testing: Theory and Practice. Mechanical engineering research studies, Engineering dynamics series, vol 2. Research Studies Press/Wiley, Letchworth, New York

Gellermann T, Kolerus J (2014) Schwingungsbeurteilung und Diagnostik von Windenergieanlagen im Spiegel von Normen und Richtlinien. In: Sauer B (ed) 5. VDI-Fachtagung Schwingungen von Windenergieanlagen. VDI-Verlag, Düsseldorf, ISBN: 978-3-18-092220-1

Jacobsen N, Andersen P, Brincker R (2006) Using Enhanced Frequency Domain Decomposition as a Robust Technique to Harmonic Excitation in Operational Modal Analysis. In: Proceedings of ISMA2006: International Conference on Noise and Vibration Engineering, pp 18–20

Kolerus J (1995) Zustandsüberwachung von Maschinen, 2nd edn. Kontakt & Studium, 187: Maschinenbau. Expert-Verlag, Renningen-Malmsheim. ISBN: 978-3-8169-1168-5

Schneider T, Paeschke R, Alarcón D, Schulz S, Coswig D, Blaschke P (2014) Zustandsüberwachung von Teleskopen durch Schwingungsanalysen. In: Hochschule Magdeburg-Stendal (ed) 15. Nachwuchswissenschaftlerkonferenz, 24 Apr 2014, Magdeburg

Schulz S (2012) Erstellung eines Konzeptes zur strukturellen Zustandsüberwachung an Teleskopkomponenten. Bachelorarbeit, Technische Hochschule Wildau

AUTOREN

Dr.-Ing. Torsten Schneider
Technische Hochschule Wildau
Nachwuchsforschergruppe für
strukturelle Optimierung
torsten.schneider@th-wildau.de

Dipl.-Ing. Robert Paeschke
Technische Hochschule Wildau
Nachwuchsforschergruppe für
strukturelle Optimierung
robert.paeschke@th-wildau.de

B. Eng. Daniel Alarcón
Technische Hochschule Wildau
Nachwuchsforschergruppe für
strukturelle Optimierung
daniel.alarcon@th-wildau.de

Prof. Dr. Peter Blaschke
Technische Hochschule Wildau
Professur für Maschinendynamik,
Konstruktion und CAD
peter-g.blaschke@th-wildau.de

<http://www.th-wildau.de/maschinendynamik>

Visualisierung von Optimallösungen logistischer Probleme

Matthias Forster*

Zusammenfassung

Viele Optimierungsprobleme aus der Logistik lassen sich mit Graphen und Netzwerken visualisieren. Bilder von Materialflüssen zeigen die Struktur eines Modells in geeigneter Weise. Das leistungsfähige Optimierungssystem GAMS (General Algebraic Modeling System) kann große Modelle lösen. GAMS stellt aber kein Werkzeug für das Zeichnen von Materialflüssen zur Verfügung. Der Autor hat das Programm Graph.gms implementiert, das als Tool zur Modellvisualisierung von GAMS aus verwendet werden kann.

Abstract

Many optimisation problems from logistics can be visualised using graphs and networks. Pictures of material flows show the structure of a model in a suitable way. The powerful optimisation system GAMS (General Algebraic Modeling System) is able to solve big models. GAMS provides no tool that visually presents material flows. The author's program Graph.gms can be used for visualising models from GAMS.

1. EINLEITUNG

Viele Fragestellungen der Logistik lassen sich als Optimierungsprobleme formulieren. Das algebraische Formulieren von Modellen unterstützen Systeme wie GAMS (General Algebraic Modeling System) oder AMPL (A Mathematical Programming Language). Mithilfe von GAMS oder AMPL kann man leistungsfähige Optimierer für alle relevanten Modelltypen nutzen: lineare Programme, gemischt-ganzzahlige Probleme, nichtlineare und gemischt-nichtlineare Probleme lassen sich in übersichtlicher Form eingeben und mit einem geeigneten Optimierer lösen (AMPL 2014, GAMS 2014). Die Rechenergebnisse werden in Listenform ausgegeben, d.h. im einfachsten Fall als Liste der Variablen mit den zugehörigen Optimalwerten.

In der Regel haben algebraische Modelle aus der betrieblichen Praxis oder der Logistik 5.000 Variablen und mehr. Eine sehr übersichtliche Darstellungsform von Modell und Ergebnissen erhält man, wenn z.B. Materialflüsse grafisch präsentiert werden. Die Visualisierung des Problems erleichtert

die Kommunikation mit den Entscheidungsträgern, da die wesentlichen Inhalte des Modells ohne Variablen, Gleichungen und Ungleichungen vermittelt werden. Beispiele für die grafische Darstellung zahlreicher Modelle findet man in Ahuja et al. (1993). Die bildhafte Darstellung ist gleichzeitig Grundlage für die Präsentation der Optimallösung. So ist die einheitliche Form des Kommunizierens von Problem und Lösung gesichert. Historisch wurden GAMS und AMPL als reine Modellformulierungssprachen ohne grafische Ausgabe konzipiert und realisiert. Heute kann GAMS Ergebnisse grafisch ausgeben, aber nur als Balkendiagramme, Kreisdiagramme und Ähnliches. Das Zeichnen von Diagrammen für Flüsse, Prozesse, Netzwerke usw. ist nicht möglich. Grundlage der Modellformulierung in der Sprache GAMS bilden Mengen und Relationen. Grundlage der hier vorgestellten Visualisierung sind gerichtete Graphen, also Objekte aus einer endlichen, nichtleeren Menge von Knoten und einer Menge von (gerichteten) Kanten. In Abbildung 1 sind die Knoten des Beispiels als Ellipsen dargestellt. Die Kanten verbinden

je zwei Knoten und sind als Pfeile zu erkennen. Der Autor hat das Programm Graph.gms in der Sprache GAMS implementiert. Mit diesem Programm kann man aus einem GAMS-Modell einen Graphen erzeugen, der das Problem geeignet visualisiert. Das vorhandene GAMS-Modell ist nur durch wenige GAMS-Anweisungen zum Erzeugen des Graphen zu ergänzen. Das Prinzip soll am Beispiel eines Modells aus der Distributionsplanung vorgestellt werden. Zum Zeichnen des Graphen wird die Software yEd genutzt. Das Programm yEd ist ein Graphen-Editor und ein Werkzeug zum geeigneten Darstellen und Untersuchen von Graphen, Netzwerken und Diagrammen wie z.B. Organigrammen, Flussdiagrammen, semantischen Netzen usw. Der Graphen-Editor yEd kann die Daten im sogenannten GML-Format einlesen (Graph Modelling Language). GML-Dateien sind normale ASCII-Dateien, welche den Graphen in einer hierarchisch aufgebauten Weise repräsentieren. Das Programm Graph.gms schreibt den Graphen zu einem gegebenen GAMS-Modell in eine GML-Datei, die dann yEd in ein Bild verwandelt (yWorks 2014).

* korrespondierender Autor

2. EIN DISTRIBUTIONSPROBLEM

Die Visualisierung sei an einem Beispiel aus der Distributionsplanung veranschaulicht: An mehreren Fabrikstandorten (Fab) wird jeweils eine Anzahl von Produkten (Prd) hergestellt. Diese Produkte sind an Regionalläger (ReL) zu liefern, sodass deren Nachfrage befriedigt wird. Das Ziel ist die Minimierung der gesamten Transportkosten. In der Sprache GAMS wird das Distributionssystem mithilfe von Mengen und Relationen dargestellt wie folgt:

```
set Fab/F1, F2/, ReL/R1, R2, R3/,
    Prd/P1, P2, P3, P4/;
```

```
set Produktion (Fab, Prd)/F1.(P1, P2,
    P3), F2.(P3, P4)/;
```

```
set RegLager (ReL, Prd)/R1.(P1,P2), R2.
    (P1, P2, P3, P4), R3(P3, P4)/;
```

Die GAMS-Anweisungen sind so zu lesen: Basis der Modellformulierung sind die Mengen $Fab = \{F1, F2\}$ der beiden Fabriken, $ReL = \{R1, R2, R3\}$ der drei Regionalläger, $Prd = \{P1, P2, P3, P4\}$ der vier Produkte und die Relationen Produktion, einer Teilmenge von $Fab \times Prd$, und RegLager, einer Teilmenge von $ReL \times Prd$. Die Produktionsknoten bilden eine echte Teilmenge von $Fab \times Prd$, weil nicht jede Fabrik alle Produkte herstellen kann. Bei der Definition von Relationen in GAMS hat die Punktnotation eine besondere Bedeutung: „F1.P1“ ist hier ein geordnetes Paar, für das in der Mathematik die Schreibweise $(F1, P1)$ üblich ist. Und „F1.(P1, P2, P3)“ steht in GAMS für die Menge $\{(F1, P1), (F1, P2), (F1, P3)\}$.

Abbildung 1 zeigt das Distributionssystem: Die Regionalläger R1, R2 und R3 haben Bedarfe der Güter P1, P2, P3 und P4. Diese Produkte werden an den Standorten F1 und F2 hergestellt und über geeignete Distributionswege an die Regionalläger geliefert. Ziel ist die Minimierung der Summe aus Produktions-, Transport- und Lagerkosten. Abbildung 1 stellt das Distributionssystem mit allen Produktions- und Liefermöglichkeiten dar. Fabrik F1 z. B. kann die Produkte P1, P2 und P3 herstellen. An den Orten R1 und R2 wird Produkt P1 nachgefragt. Daher gehen zwei Pfeile von F1P1 aus (nach R1P1 und nach R2P1). Die Regionalläger führen

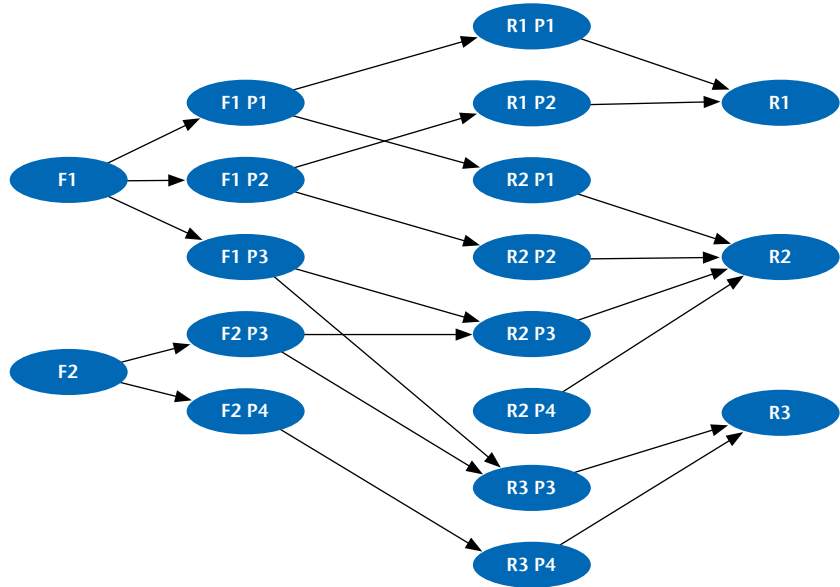


Abb. 1) Distributionssystem (Fabriken F, Produkte P und Regionalläger R).

unterschiedliche Sortimente. Daher ist RegLager eine echte Teilmenge von $ReL \times Prd$. In einem vollständigen GAMS-Modell sind nach den set-Anweisungen die Variablen zu deklarieren und die Nebenbedingungen (Gleichungen und Ungleichungen) zu formulieren. Für die Visualisierung haben die Variablen und Nebenbedingungen keine Bedeutung. Die wesentliche Struktur des Modells ist mit den Mengen und den Relationen gegeben. Die Eingabe der Variablen und Nebenbedingungen wird hier nicht behandelt.

Die Knoten- und Kantenmengen des Graphen der Abbildung 1 werden als weitere Mengen definiert. Zuerst sind die Menge der Knotentypen und die Menge der Knoten zu definieren. Das Zeichen * bezeichnet in GAMS die Obermenge aller sinnvoll definierbaren Mengen, d. h. an der Stelle * darf jedes Element stehen:

```
set Typ/TFab, TReL, TProduktion,
    TRegLager/;
```

```
set Knoten (Typ, *, *)/TFab.(F1, F2) .o,
    TReL. (R1, R2, R3).o, TProduktion. (F1.
    P1, F1.P2, F1.P3, F2.P3, F2.P4), TRegLa-
    ger.(R1.P1, R1.P2, R2.P1, R2.P2, R2.P3,
    R2.P4, R3.P3, R3.P4)/;
```

In diesem Beispiel ist die Knotenmenge eine dreistellige Relation mit dem Typ an erster Stelle. Abhängig vom Typ

folgt die Fabrik bzw. das Regionallager bzw. eine Kombination aus Fabrik und Produkt oder aus Regionallager und Produkt entsprechend Abbildung 1. Das „o“ in dem Ausdruck „TFab.(F1, F2).o“ bedeutet, dass die dritte Stelle im Falle der Fabriknoten keine Bedeutung hat. Mithilfe der Knotenmenge lassen sich mit wenigen Befehlen die Knoten nummerieren und die x- und y-Koordinaten zum Zeichnen des Graphen berechnen. Das setzt aber Kenntnisse der Sprache GAMS voraus und wird hier nicht im Detail behandelt. Die Kantenmenge wird als Teilmenge von $Knoten \times Knoten$ definiert:

```
set Kanten(Knoten, Knoten);
```

Die Kanten sind natürlich nicht einzeln einzugeben. In GAMS lassen sich die logischen Ausdrücke verwenden, die man aus jeder höheren Programmiersprache kennt. Die Menge der Kanten ist mit logischen Ausdrücken leicht zu definieren und wird automatisch generiert. Die Knoten, Kanten und weitere Daten (x-Koordinaten, y-Koordinaten, Werte von Modellvariablen) werden als Parameter an das Programm Graph.gms übergeben. Das Programm schreibt eine GML-Datei (Graph Modelling Language), die alle Informationen des Graphen enthält und von dem Programm yEd gelesen werden kann: yEd ist ein frei verfügbares Visualisierungsprogramm zum

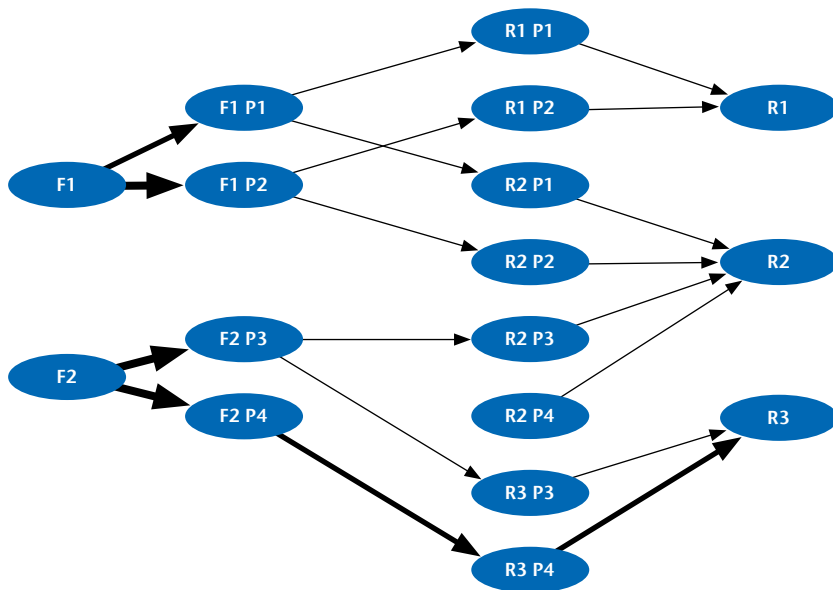


Abb. 2) Lösung (optimiertes Distributionssystem).

Zeichnen von Graphen, die gegebenenfalls auch sehr groß sein können. Es kennt zahlreiche Darstellungsoptionen, eine Zoom-Funktion und Analysemethoden, um Strukturen in Graphen zu finden. Die Abbildungen 1 und 2 wurden mit yEd hergestellt.

3. DIE VISUALISIERUNG DER LÖSUNG

Nach dem Aufrufen eines geeigneten Optimierers und der Bestimmung der Optimalwerte aller Entscheidungsvariablen folgt die Visualisierung der Lösung. Die Lösung wird wie das Problem als Graph mit yEd gezeichnet. Abbildung 2 zeigt den Graphen der Lösung. Im Graphen der Lösung sind nur Kanten enthalten, auf denen Material transportiert wird bzw. die eine echt positive Produktmenge symbolisieren. Die Anweisungen für das Erzeugen des „Lösungs-Graphen“ unterscheiden sich nicht von den Anweisungen zum Erzeugen des „Problem-Graphen“. Nur eine weitere Regel ist zu beachten: Die Kante zu der Variablen x ist nur dann zu zeichnen, wenn $x > 0$ ist! Den Wert einer Variablen symbolisiert in Abbildung 2 die Breite der entsprechenden Linie. Das Bild zeigt, dass Fabrik F2 viel von den Produkten P3 und P4 herstellt und die Produktionsmengen auf die Regionallager R2 und R3 aufteilt. Mehrperiodenmodelle sind nicht leicht zu zeichnen. Modelle mit mehreren

Planungsperioden haben sehr viele Variablen, Knoten und Kanten. Der vollständige Graph eines Mehrperiodenmodells könnte sehr unübersichtlich werden. Durch geeignete Aggregation der Lösung bekommt man auch im Falle eines Mehrperiodenmodells eine gute Darstellung. Im Beispiel hätte jeder Knoten einen weiteren Index t für die Zeit mit $t = 1, 2, \dots, T$. Die Variable $x(Fab, ReL, Prd, t)$ würde in der Optimallösung angeben, welche Menge des Erzeugnisses Prd die Fabrik Fab in Periode t an das Regionallager ReL zu liefern hat. Eine Möglichkeit der Aggregation ist in diesem Fall die Berechnung der Summe

$$xsum(Fab, ReL, Prd) = \sum(t, x(Fab, ReL, Prd, t));$$

Mit dieser einzeiligen GAMS-Anweisung hat man eine neue Variable $xsum(Fab, ReL, Prd)$, die auch im Graphen des Einperiodenmodells vorkommt. Man kann daher den Graphen des Einperiodenmodells weiter verwenden. Aggregationen der Lösung sind bei großen Modellen aus der spezifischen Fragestellung ableitbar. Oder man zerlegt die Lösung in T Graphen, von denen jeder eine Periode t darstellt. In diesem Falle erscheinen die Lagerbestände nicht im Bild. Eigenschaften der Lösung können auch durch Farben symbolisiert werden. Beispiel: Wenn die Produktionskapazität einer Anlage

zu mehr als 90% ausgelastet ist, dann kann das eine rote Kante symbolisieren, zwischen 50% und 90% grün und unter 50% blau. Die Visualisierung mit Graphen ist sicher schneller zu interpretieren als eine Liste von Zahlen. Das Programm Graph.gms kann man vom Autor auf Anfrage erhalten. Die Ausgabe der Bilder erfolgt mit dem Programm yEd, das im Internet kostenlos zur Verfügung steht (yWorks 2014). Ein kostenloses Demo-System von GAMS ist im Internet unter www.gams.com zu finden (GAMS 2014).

4. AUSBLICK

Das Werkzeug zur Visualisierung von Modellen und Lösungen wird zur Zeit nur für die Ausgabe genutzt. Im Prinzip könnte man auch Eingabefelder in den Graphen „einbauen“. Der Nutzer hätte dann die Möglichkeit, Modellparameter zu ändern und die Auswirkungen auf die Lösung zu untersuchen. Lineare Programme sind in der Regel nach wenigen Sekunden gelöst. Ziel könnte die interaktive Optimierung mit grafischer Lösungsausgabe sein.

LITERATUR

- Ahuja RK et al. (1993) Network Flows. Theory, Algorithms, and Applications, 3rd edn. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. ISBN: 978-0-13-617549-0
- AMPL (2014) A Mathematical Programming Language. <http://ampl.com>. Accessed 10 Sep 2014
- GAMS (2014) General Algebraic Modeling System. <http://www.gams.com/index.htm>. Accessed 10 Sep 2014
- yWorks (2014) yEd Graph Editor. <http://www.yworks.com/en/products/yfiles/yed>. Accessed 10 Sep 2014

AUTOR

Prof. Dr. rer. pol. Matthias Forster
Technische Hochschule Wildau
matthias.forster@th-wildau.de

E-Assessments in der Hochschullehre: Chancen und Herausforderungen

Xenia Valeska Jeremias*, Birgit Sellmer, Ulrike Tippe

Zusammenfassung

Dieser Beitrag stellt die im Rahmen des Forschungsprojekts „SOS – Strukturierung und Optimierung des Selbststudiums“ entwickelten Ansätze zur qualitätsgesicherten Erstellung von E-Assessments vor. Er beleuchtet die Anforderungen an E-Assessments unter verschiedenen Aspekten, wobei der Schwerpunkt auf den Möglichkeiten der inhaltlichen Umsetzung von Fragen liegt.

Der erste Teil behandelt die Erstellung von qualitätsgesicherten elektronischen Fragen, indem fünf verbreitete Vorurteile zu E-Assessments beschrieben und widerlegt werden. Beispiele aus dem im Rahmen des oben genannten Projektes erstellten „Leitfaden zur Erstellung von elektronischen Fragen und Tests der TH Wildau [FH]“ illustrieren dies. Im zweiten Teil werden praktische Erfahrungen mit dem Einsatz von E-Assessments in der Lehre vorgestellt. Dies erfolgt insbesondere unter den Aspekten Einarbeitungsaufwand seitens der Lehrenden, der benötigten personellen Ressourcen sowie der technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen.

Abstract

This article presents an approach for quality assurance of e-assessments that was developed by the research project „SOS – Strukturierung und Optimierung des Selbststudiums“ („Structuring and Improving Self-Studies“). Different requirements for e-assessments are highlighted, emphasising possible implementations in both form and content.

The first part deals with the development of electronic questions and focuses on quality demands. Five prevalent misconceptions relating to e-assessments are discussed and refuted. Examples gathered from the „TH Wildau Guidelines for Development of Electronic Questions and Tests“, which were addressed by the above mentioned research project, illustrate the line of reasoning. The second part covers practical experience using e-assessments in teaching at a tertiary institution. In so doing, the focal points address the efforts required by academics to familiarise themselves with the software, the necessary human resources as well as the general technical and organisational conditions to facilitate this.

1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG

Seit 2011 fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen des Qualitätspakts Lehre die Verbesserung der Lehre an Hochschulen. Die TH Wildau [FH] gehört mit ihrem Projekt „SOS – Strukturierung und Optimierung des Selbststudiums“¹ zu den geförderten Hochschulen und legt dabei mit Mathematik und Rechnungswesen einen Schwerpunkt auf zwei Fachgebiete, die über die Studiengänge hinweg für viele Studierenden eine Herausforderung darstellen.

Des Weiteren werden übergreifende Maßnahmen zur Erhöhung der Lehrqualität entwickelt. Hierzu gehören Blended-Learning-Angebote, für die strukturierte Online-Materialien erstellt werden, sowie die Konzeptionierung und Erprobung von hochschulweiten Unterstützungsstrukturen für das Selbststudium. In diesem Rahmen wird u. a. – ausgehend von den Bedarfen der Lehrenden und Studierenden – seit Mitte 2012 der Einsatz von E-Assessments erprobt.

In diesem Beitrag werden die Ansätze des Projekts SOS zur Sicherung quali-

tativ hochwertiger elektronischer Fragen und Tests in den wissenschaftlichen Kontext eingeordnet. Im zweiten Teil des Beitrags werden Erfahrungen mit dem Einsatz elektronischer Tests in der Lehre diskutiert.

2. CHARAKTERISTIKA VON E-ASSESSMENTS

Mit dem Begriff E-Assessment werden alle elektronischen Formen von Prüfungen, (Selbst-)Tests und Bewertungen gefasst, also nicht nur prüfungsrechtlich relevante Prüfungen.

¹ Erreichbar unter <http://th-wildau.de/selbststudium>. Das Projekt wird aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01PL11042 im Rahmen des Qualitätspakts Lehre gefördert.

E-Assessments bestehen aus verschiedenen Elementen und können diagnostisch, formativ oder summativ eingesetzt werden (Handke & Schäfer 2012: 150 ff.).

Diagnostische E-Assessments: Hierbei handelt es sich typischerweise um Orientierungstests für Studieninteressierte, Einstufungstests für Teilnehmer/innen von Vorbereitungskursen und Eingangstests für Studienanfänger/innen, um beispielsweise die sinnvolle Einteilung in Lerngruppen oder zielgerichtete weitere Lernangebote zu unterstützen.

Formative E-Assessments: Diese können studienbegleitend eingesetzt werden, um Studierenden wie auch Lehrenden eine Rückmeldung über den aktuellen Lernstand zu geben.

Summative E-Assessments: Die Modulprüfung am Ende des Semesters ist ein typisches Beispiel für ein summatives Assessment, das die Leistung von Studierenden bzw. Prüfungsteilnehmenden abschließend prüft.

Im Hochschulbereich ist seit einigen Jahren ein zunehmender Bedarf an Standardisierung und Automatisierung von Prüfungen zu verzeichnen, sodass E-Assessments mittlerweile aus der Diskussion über E-Learning- bzw. Blended-Learning-Szenarien nicht wegzudenken sind. Steht doch vielfach die Hoffnung dahinter, dass durch automatisierte Auswertung und/oder durch Mehrfachverwendung der Fragen (Aufbau eines Fragenpools) die Korrektur und auch die Zusammenstellung von Klausuren insbesondere bei großen Seminargruppen deutlich erleichtert werden. Ob diese Hoffnungen berechtigt sind, sei an dieser Stelle zunächst einmal dahingestellt. Festzuhalten ist vielmehr, dass derartige Szenarien die Hochschulen vor neue Herausforderungen stellen, die sich über die drei Bereiche

- Technik (sowohl Hard- als auch Software),
- Organisation (u.a. Raumausstattung und -größe, Login-Daten, Datenschutz und -sicherheit, Archivierung) sowie

- Inhalt (u. a. Fragetypen und -niveau) erstrecken (Biella et al. 2010: 3 ff.).

Dieser Artikel fokussiert schwerpunktmäßig den letzten Aspekt, den Inhalt und die Möglichkeiten zur Erstellung von niveauvollen Fragen, und beschäftigt sich u. a. mit der Frage, ob E-Assessments so angelegt werden können, dass diese vom Anspruch und der Art der Fragen mit „traditionellen“ Prüfungsformen mithalten können. Des Weiteren wird auf den Aufwand zur Erstellung und die Vor- und Nachteile der Nutzung von E-Assessments eingegangen.

Aus Sicht der Autorinnen rechtfertigt sich ein möglicher zusätzlicher Aufwand bei der Erstellung und Durchführung von E-Assessments, wenn

- die dort gestellten Fragen so abgebildet werden können, dass sie sich vom Niveau und Anspruch her für Prüfungen im Hochschulbereich eignen und
- diese zusätzlich so weit wie möglich automatisiert ausgewertet werden können.

Im nächsten Abschnitt werden zu beiden Aspekten verschiedene Behauptungen aufgestellt, die sich mit teilweise existierenden Vorurteilen zu E-Assessments auseinandersetzen und diese widerlegen.

3. E-ASSESSMENTS: FÜNF VORURTEILE

Vorurteil 1: Elektronische Tests enthalten ausschließlich Multiple-Choice-Fragen.

Tatsächlich sind viele elektronische Tests überwiegend aus Multiple-Choice-Fragen (MC-Fragen) zusammengesetzt; dies muss jedoch nicht so sein. Testtools bieten eine Reihe von weiteren Fragetypen an, die ebenfalls automatisch ausgewertet werden können, beispielsweise numerische Fragen, bei denen eine Zahl als Antwort gesucht ist. Auch Lückentext-, Zuordnungs- oder Rangfolgeaufgaben sind in der Regel automatisch auswertbar. Ob sich die

Frage als Prüfungsfrage eignet, hängt ohnehin nicht allein vom Fragetyp, sondern von der prinzipiellen Gestaltung der Frage ab. Empfehlenswert ist eine Mischung der Frageformate, da abwechslungsreiche Tests für die Nutzer/innen attraktiver sind.

Vorurteil 2: Mit Multiple-Choice-Fragen kann nur Faktenwissen abgefragt werden.

Kompetenzen, die in Studienmodulen erworben werden sollen, erfordern in der Regel mindestens die Fähigkeit, Gelerntes adäquat auf neue Sachverhalte anzuwenden, zum Teil auch eine anspruchsvollere Auseinandersetzung mit dem Lerngegenstand, beispielsweise durch Vergleiche oder Bewertungen verschiedener Methoden. Die reine Wiedergabe von deklarativem Wissen, d. h. von Fakten, ist demnach selten geeignet für Aufgaben und Prüfungen im Hochschulbereich. Der Schwerpunkt liegt vielmehr auf Fragestellungen, die prozedurales oder konditionales Wissen verlangen. Während deklaratives Wissen lediglich das Wissen um die Existenz bestimmter Strategien und Tatsachen beinhaltet, umfasst prozedurales Wissen darüber hinaus das Wissen um die Anwendung dieser Strategien; konditionales Wissen beinhaltet zudem das Wissen, wann bzw. in welchem Kontext welche Strategie sinnvoll eingesetzt werden kann (Paris et al. 1983: 302 ff.). In der Tat sind Fragetypen wie numerische Fragen häufig besser dazu geeignet, prozedurales und konditionales Wissen zu überprüfen als MC-Fragen; jedoch ist dies (siehe Abbildung 1) auch mit MC-Fragen möglich, wenn diese entsprechend konstruiert werden (Bücking 2011: 40).

Abbildung 1 zeigt drei Varianten einer mathematischen Aufgabenstellung. Die erste Variante in Form einer MC-Frage ist insofern problematisch, als sie ausschließlich Faktenwissen abfragt. Die zweite Variante – ebenfalls eine MC-Frage – wäre zu bevorzugen, da in dieser Form Anwendungswissen geprüft wird. Allerdings ist hier eine Annäherung an die richtige Lösung über das Ausschlussprinzip möglich. Noch besser ist jedoch die

dritte Variante, eine numerische Frage, die den Lösungsweg nur minimal vorgibt und einer „konventionellen“ Frage in Papierform am nächsten kommt. Mit dieser Gestaltung der Frage wird prozedurales Wissen geprüft.

Die Aufgabengestaltung unter Qualitätssicherungsaspekten ist insbesondere bei MC-Fragen nicht ganz trivial. Daher wurde an der TH Wildau [FH] ein Leitfadens² für die Erstellung von Aufgaben entwickelt. Zu den Qualitätsaspekten gehört u.a., dass die Antwortvorgaben dicht an der richtigen Antwort liegen, etwa gleich lang und gleich komplex sind, sich jedoch nicht überschneiden sowie möglichst typische Fehler und Fehlkonzepte enthalten. Selbstverständlich sollte es nicht möglich sein, die Frage ohne Fachkenntnis, d.h. allein durch die Kombination der in der Frage und den Antwortmöglichkeiten enthaltenen Informationen, richtig zu beantworten (Krebs 2004: 6 ff.). Wird dies bei der Aufgabengestaltung beachtet und der Fokus auf prozedurales Wissen gelegt, wie beispielhaft in Abbildung 2 gezeigt, spricht aber nichts gegen die Verwendung von MC-Aufgaben. Somit wird deutlich, dass die Möglichkeiten solcher Fragen nur in geringem Maße ausgeschöpft werden, wenn diese ausschließlich Fakten (z. B. Begriffsdefinitionen) abfragen.

In den folgenden Beispielen kann die richtige Antwort jeweils nur gegeben werden, wenn die entsprechenden Zusammenhänge grundsätzlich verstanden wurden. Die Studierenden müssen das entsprechende Wissen also anwenden und nicht nur reproduzieren. Des Weiteren zeigt das erste Beispiel eine Möglichkeit, wie eine Aufgabe, bei der auf Papier ein Graph gezeichnet werden müsste, durch das Verwenden von Bildern als elektronische Variante gestaltet werden kann. Im zweiten Beispiel geht es – im Gegensatz zur reinen Abfrage von bestimmten Eigenschaften – um eine Begründung bzw. Erklärung.

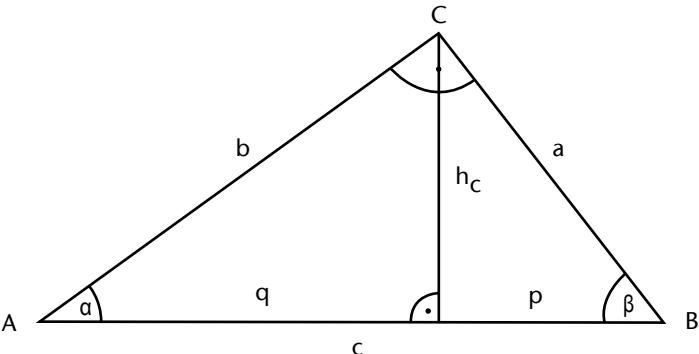
Mit welcher Formel können Sie bei einem rechtwinkligen Dreieck die Hypotenuse c berechnen, wenn die beiden Katheten a und b gegeben sind?

$a^2 + b^2 = c^2$

$a^2 \times b^2 = c^2$

$a + b = c$

$a^2 - b^2 = c^2$



In dem gegebenen Dreieck seien die Katheten 6,3 cm und 3,6 cm lang.

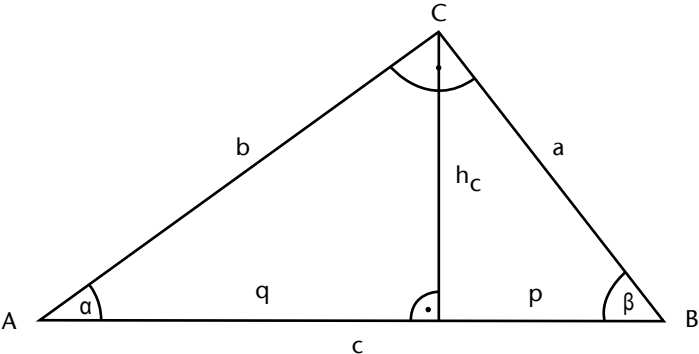
Wie lang ist die Hypotenuse?

5,17 cm

7,26 cm

9,90 cm

22,68 cm



In dem gegebenen Dreieck seien die Katheten 6,3 cm und 3,6 cm lang.

Wie lang ist die Hypotenuse?

Runden Sie – wenn nötig – auf zwei Stellen nach dem Komma!

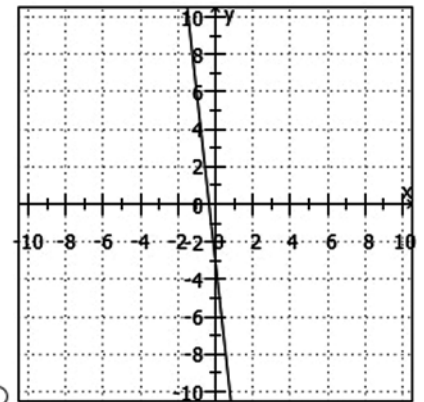
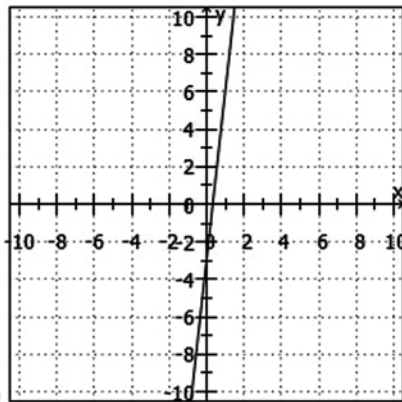
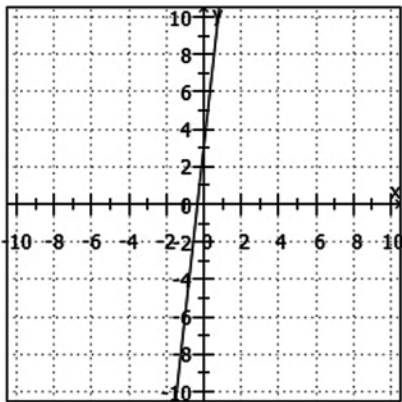
$c = \underline{\hspace{2cm}} \text{ cm}$

Abb. 1) Drei Varianten einer Beispielaufgabe.

² Abrufbar unter www.th-wildau.de/eassessment. Alle hier gezeigten Beispiele sind diesem Leitfaden entnommen.

Gegeben sei die Funktion $f(x) = 9x - 3$

Welcher Graph bildet diese Funktion ab?



Vorgehensweisen beurteilen / begründen / erklären

Warum hat Wasser einen so hohen Siedepunkt, eine hohe Wärmekapazität und eine hohe Verdampfungswärme?

- durch die starke H-O-sigma-Bindung
- durch Dipol-Dipol-Wechselwirkungen
- durch die hohe Dichte des Wassers
- durch die freien Elektronenpaare am Sauerstoff, die eine Pi-Überlappung eingehen
- durch Wasserstoffbrückenbindungen

Abb. 2) Abfrage von prozeduralem Wissen mittels MC-Fragen.

Vorurteil 3: Aufgaben mit längeren Textantworten eignen sich nicht für elektronische Tests.

Sicherlich können Freitextaufgaben nicht automatisch ausgewertet werden, sondern müssen vom Lehrenden kontrolliert und individuell bewertet werden, doch können auch bei diesem Fragetyp Korrekturzeiten eingespart werden. Im Vergleich zu automatisch auswertbaren Fragetypen wie Auswahl-, Zuordnungs- und Rankingfragen werden bei Freitextantworten Korrekturzeiten sogar in höherem Maße eingespart (Schulz & Apostolopoulos 2011: 37 ff.), was vor allem auf die bessere Lesbarkeit und Struktur der Antworten zurückgeführt wird. Freitextaufgaben können also nicht nur einfach erstellt und in E-Assessments integriert werden – sie sind auch empfehlenswert!

Vorurteil 4: Die Qualitätsansprüche, die an schriftliche Aufgaben gestellt

werden, können durch elektronische Tests nicht erfüllt werden.

Die Qualität von Prüfungs- und Übungsaufgaben ist ein integraler Bestandteil guter Lehre. Prüfungsleistungen sind die Grundlage für die Vergabe von Leistungspunkten nach ECTS und somit für den Studienabschluss, der bescheinigt, dass die in den Modulbeschreibungen festgelegten Kenntnisse, Fertigkeiten und Kompetenzen erreicht worden sind. Durch die Prüfungsleistungen – unabhängig von einer schriftlichen oder elektronischen Form – müssen die Studierenden nachweisen, dass sie die entsprechenden Lernziele erreicht haben.

Für jede Art von Test muss gelten:

- Inhaltliche und formale Richtigkeit
- Validität
- Beachten der rechtlichen Vorgaben

Darüber hinaus muss bei elektronischen Prüfungen gegeben sein:

- Datensicherheit und Datenschutz
- Technische Sicherheit

Bezüglich anderer wichtiger Aspekte der Fragen- und Testerstellung gelten für elektronische Prüfungen im Prinzip die gleichen Anforderungen wie für herkömmliche (Bücking 2011: 40). So muss u. a. eine Kohärenz zwischen Lernziel, Lehr-/Lernform und Prüfungsform bestehen und ein didaktisch sinnvoller Aufbau der Prüfungsfragen gewährleistet sein. Die zu beachtenden qualitätssichernden Aspekte werden bei E-Assessments durch die explizit zu treffenden Entscheidungen bezüglich der Fragegestaltung und -bewertung in mindestens gleicher Weise nahegelegt wie bei „Paper-and-Pencil-Prüfungen“. So verlangt z. B. eine Prüfungssoftware in der Regel die vorherige Festlegung

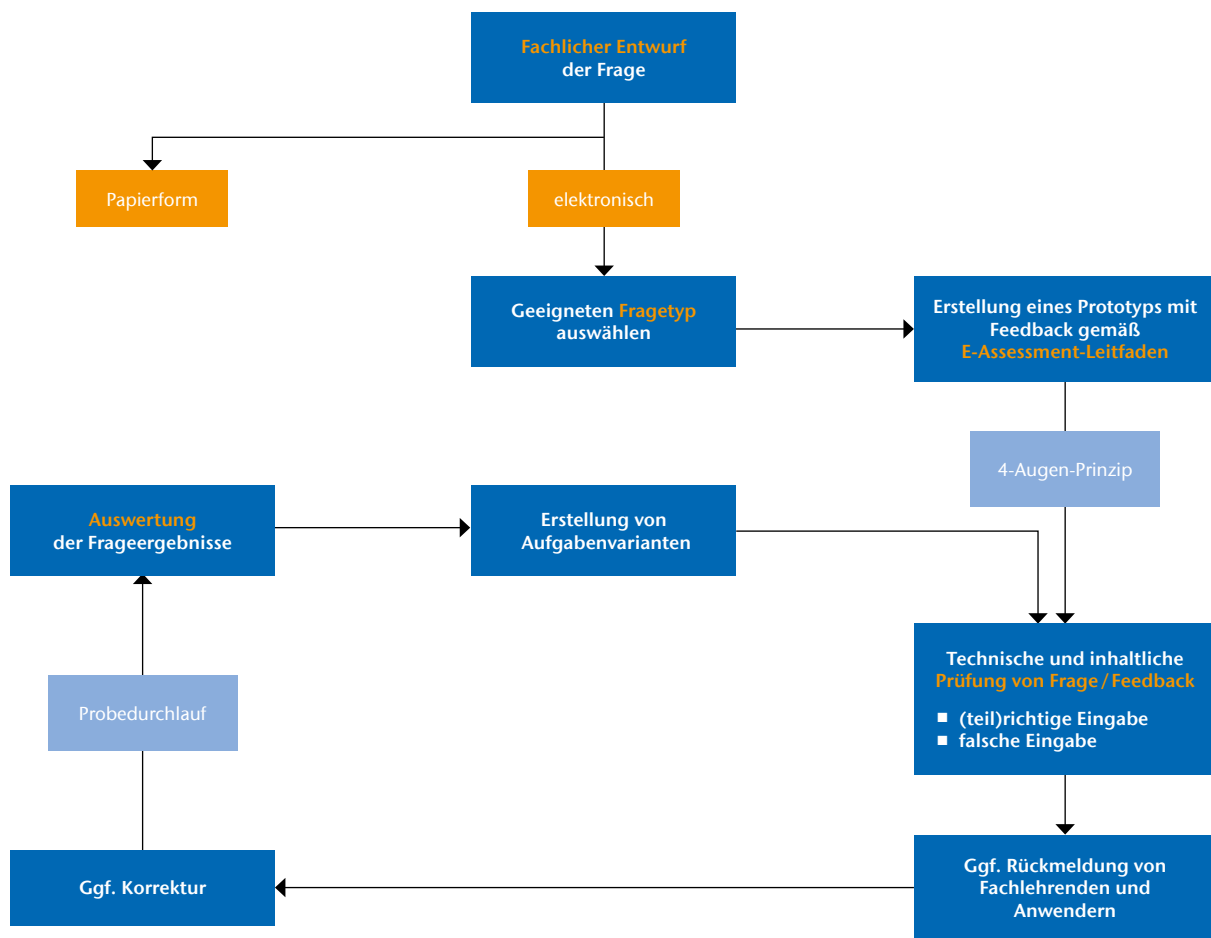


Abb. 3) Ablauf zur Qualitätssicherung von elektronischen Fragen.

der Punkteverteilung. Da für derartige Software ohnehin eine Schulung nötig ist, ist hier ein Rahmen gegeben, in dem Qualitätsaspekte besprochen werden können.

Elektronische Aufgaben müssen in jedem Fall in Übereinstimmung mit den Lernzielen des Moduls erstellt werden (Case & Swanson 2002: 10). Sie unterscheiden sich dabei in einigen Punkten, je nachdem, ob es sich um Prüfungs- oder Übungsaufgaben handelt. Während bei Prüfungsaufgaben die zu erreichenden Kenntnisse, Fertigkeiten und Kompetenzen auf Modulniveau abgefragt werden, geht es bei Übungsaufgaben vor allem darum, das Verständnis – eventuell durch einen schrittweise ansteigenden Schwierigkeitsgrad – zu fördern. Daher kommt einem differenzierten, lernunterstützend formulierten Feedback bei Übungsaufgaben eine hohe Bedeutung zu. Bei Prüfungsaufgaben stehen hingegen die eindeutig richtige Lösung und die technisch korrekt

funktionierende Bewertung im Vordergrund, um die Rechtssicherheit der Prüfung zu gewährleisten. Formale oder technische Fehler haben zwar bei Übungsaufgaben keine derartigen Folgen, wirken aber demotivierend auf die Übenden, sodass sie das Bearbeiten unter Umständen abbrechen. Durch Qualitätssicherungsschleifen sollten daher sowohl inhaltliche als auch technische Fehler für alle elektronischen Aufgaben möglichst ausgeschlossen werden (Ehlers et al. 2013: 235).

Aus Abbildung 3 wird ersichtlich, dass bei der Entwicklung von elektronischen Aufgaben der Gestaltung eines guten Aufgabenprototyps eine hohe Bedeutung zukommt, wobei das Vorliegen eines Leitfadens den Entwicklungsprozess deutlich erleichtert. Aufgabenvarianten, die natürlich ebenfalls auf technische und inhaltliche Korrektheit geprüft werden müssen, können ausgehend von diesem Prototyp mit weniger Aufwand erstellt werden.

Vorurteil 5: Elektronische Selbsttests können nicht sinnvoll in eine Lehrveranstaltung des Typs Vorlesung – Übung integriert werden.

Vielfach ist die Erfahrung, dass Studierende vermeintlich nicht prüfungsrelevante Aufgaben gerne ignorieren. Dem kann dadurch entgegengewirkt werden, dass die Aufgaben deutlich sichtbar in das Lehrkonzept eingebettet werden und eine zeitnahe Rückmeldung der Ergebnisse an die Studierenden, nötigenfalls eine Anpassung der Vorlesung, erfolgt. Eine gute Möglichkeit, elektronische Aufgaben in das Lehrkonzept zu integrieren, ist das Just-in-Time-Teaching. Dabei bearbeiten Studierende im Selbststudium bereits vor der Präsenzveranstaltung Aufgaben, die in elektronischer Form gestellt werden können. So kann der/die Lehrende Einblick in die Ergebnisse nehmen und feststellen, wo Probleme liegen, die aufgegriffen werden müssen. Für die Studierenden schwierige

Verfahren können nochmals erklärt, nicht oder falsch gelöste Aufgaben intensiv besprochen werden.

Studien haben gezeigt, dass zusätzlich gestellte Aufgaben, beispielsweise Hausaufgaben oder Zwischentests, grundsätzlich einen positiven Einfluss auf das Lernen der Studierenden haben (Case & Swanson 2002: 9), da sie Lücken rechtzeitig erkennen und aufarbeiten können. Aufgrund des hohen Aufwands sind derartige zusätzliche Aufgaben und Tests in Papierform für die Lehrenden kaum zu bewältigen, in elektronischer Form aber möglich. Gleichzeitig ist hier aber Vorsicht geboten, da viele Studierende aus den Aufgaben auf die Anforderungen in dem Modul rückschließen, sodass die Diskrepanz im Anforderungsniveau zwischen den Übungs- und Klausuraufgaben nicht zu groß bzw. transparent sein sollte.

4. E-ASSESSMENTS AN DER TH WILDAU [FH]: EIN PRAXISBEISPIEL

Seit 2008 stellt die TH Wildau [FH] eine zentrale E-Learning-Plattform³ zur Verfügung (Open-Source-Software: Moodle), angesiedelt in der Hochschuleinheit „learn@wildau“. Diese wird zunehmend intensiv genutzt (im Sommersemester 2014 waren 3.567 Aktive auf der Plattform, die insgesamt 213 verschiedene Kurse genutzt haben). Sie enthält alle klassischen Funktionen einer E-Learning-Software und somit auch die Möglichkeit des Erstellens von elektronischen Tests. Deren Funktionalitäten sind bereits recht vielseitig, jedoch nicht so umfangreich, dass sie die Anforderungen an E-Assessments in allen Belangen erfüllen würden. Der Wunsch von Lehrenden, anspruchsvolle Tests und Prüfungen mit automatischer Korrekturfunktion durchzuführen, sodass u. a. auch Zwischentests ohne allzu viel zusätzlichen Aufwand möglich werden, mündete an der TH Wildau [FH] in den Erwerb von Lizenzen und den Aufbau der technischen Rahmenbedingungen für E-Assessments. Zusätzlich zur bestehenden Lernplattform steht nun die E-Assessment-Software „Questionmark® Perception“ zur Verfügung. Dieses Programm bietet wesentlich umfangrei-

chere Gestaltungsmöglichkeiten und lässt außerdem einen Zugriff der Lizenzinhaber auf einen Fragenpool zu, wobei die Zugriffsmöglichkeiten für verschiedene Bereiche gestaffelt werden können (von „nicht sichtbar“ bis „bearbeiten“). So können Fragen hochschulweit genutzt werden, was sich insbesondere für Selbsttestaufgaben in Grundlagenfächern anbietet. Die gemeinsame Nutzung eines Fragenpools hat zudem den Vorteil, dass mehrere Lehrende die Aufgaben fachlich-inhaltlich prüfen und die elektronische Funktion testen können.

Im vorhergehenden Abschnitt wurde gezeigt, dass es durchaus möglich ist, angemessene und niveauvolle Fragen elektronisch abzubilden und Studierende so zu prüfen. Das ermutigt dazu, E-Assessments in der Praxis zu testen, wobei der Schwerpunkt an der TH Wildau [FH] bisher eher auf diagnostischen und formativen Assessment-Formaten lag. Bis Mitte September 2014 wurden knapp 4.300 elektronische Tests absolviert.

Die folgenden Praxisbeispiele aus den Studiengängen Wirtschaftsinformatik (Modul E-Business, Bachelor, 5. Semester) und Business Management (Modul Wissensmanagement, Master, 3. Semester) stellten einen „Probelauf“ für summative Tests, d. h. für Semesterabschlussklausuren, dar: Die Lehrveranstaltungen fanden im Wintersemester 2013/2014 statt. Die Gruppenstärke umfasste in einem Fall 20, im anderen 14 Studierende.

In beiden Lehrveranstaltungen erstellten die Studierenden jeweils eine schriftliche Arbeit bzw. eine Präsentation, die mit einer Note bewertet wurde. Ergänzend zu dieser Prüfungsleistung wurde in beiden Seminargruppen jeweils ein E-Assessment durchgeführt. Dieses musste lediglich „mit Erfolg“ absolviert werden, d. h. bei Erreichen von 50 % der Punkte galt das gesamte Modul als „bestanden“ und der/die Studierende erhielt als Modulnote die Note der schriftlichen Arbeit bzw. Präsentation. Bei weniger als 50 % der Punkte in der Klausur war das Modul „nicht bestanden“ und das E-Assessment musste wiederholt werden.

Bei der Konzeption und Durchführung des E-Assessments standen in Anlehnung an Biella et al. (2010) die folgenden Aspekte im Vordergrund:

- **Zeitaufwand zur Einarbeitung in die Software und Erstellung eines E-Assessments** Nach Installation des Clients auf dem persönlichen Rechner hat die reine Einarbeitung in das Werkzeug im vorliegenden Fall ca. einen halben Arbeitstag gedauert, wobei dabei sicher nur ansatzweise die gesamte Funktionalität der Software erfasst werden konnte. Dennoch war es möglich, nach und nach die (bereits vorbereiteten Fragen) in verschiedene Fragetypen einzubetten und im Fragenpool abzuspeichern. Zusätzlich wurden pro Klausur noch einmal fünf Stunden benötigt, bis diese vollständig und korrekt eingegeben war. Beide Klausuren wurden so konzipiert, dass 50 % der erreichbaren Punkte durch automatisch auswertbare Fragen erzielt werden konnten. Die übrigen Punkte konnten durch Freitextfragen erreicht werden, die von der Lehrenden separat bewertet werden mussten.
- **Benötigte technische Infrastruktur sowie Personalbedarf** Neben der Hard- und Software (Server und Client) ist es erforderlich, dass speziell ausgebildetes Personal zur Verfügung steht, um das System zu warten und die Lehrenden bei der Durchführung von E-Assessments zu unterstützen. Ansonsten benötigt man für die Durchführung lediglich ein Computelabor, das für die Dauer der Klausur keinen Zugriff auf das Internet bzw. externe Informationsquellen zulässt. Die Studierenden erhalten einen individuellen Zugriff auf das System und haben keine andere Anwendung zur Auswahl als das jeweilige E-Assessment. Es sollte darauf geachtet werden, möglichst geräuscharme Tastaturen zu verwenden.
- **Organisatorische Rahmenbedingungen** Es hat sich als hilfreich und nützlich erwiesen, dass ein Administrator für die E-Assessment-

³ Erreichbar unter <http://elearning.th-wildau.de>.

Software sowohl beim Verteilen der Zugangscodes als auch während der Bearbeitung und des Abschlusses der Klausur zugegen ist. Auch im Vorfeld hat dieser die von der Lehrenden erstellten Aufgaben hinsichtlich Aufbau und Fehlerfreiheit der Auswertung geprüft. Dieses Vier-Augen-Prinzip (siehe Abbildung 3) hat sich bei der Durchführung ausgezahlt, was sich u. a. daran gezeigt hat, dass es im Verlauf der Klausur keine Probleme bzw. Verständnisfragen gab.

5. AUSBLICK

E-Assessments sind – ebenso wie andere Anwendungen aus dem E-Learning – kein Allheilmittel und auch kein Selbstläufer. Sie bieten jedoch Vorteile für Lehrende und Studierende, wenn sie fach- und sachgerecht umgesetzt werden und eine hohe Passung zur Lehrveranstaltung aufweisen. Für Lehrende bieten E-Assessments eine Entlastung von Korrekturarbeiten, was semesterbegleitende Tests, die den Lernstand aktuell erfassen, ermöglicht. Die Fehlerdiagnose wird damit erleichtert, ohne dass dafür ein großer Anteil der Präsenzzeiten verwendet werden muss. Dabei muss es nicht immer um eine komplett automatische Korrektur gehen, bereits eine reduzierte Korrekturzeit ist als Vorteil zu werten, wobei eine manuelle Nachkorrektur in jedem Fall möglich sein sollte. Für die Studierenden bieten E-Assessments in Form von Selbsttests ein Feedback zum eigenen Lernfortschritt, welches sie zeit- und ortsunabhängig erhalten können. Da Online-Tests den Mediengewohnheiten vieler Studierender entsprechen, kann die Motivation zum rechtzeitigen Aufarbeiten von Defiziten somit steigen (Bücking 2011: 41). Bei der Evaluation des Praxisbeispiels bewerteten die Studierenden die automatische Teilauswertung unmittelbar nach Beendigung der Klausur sehr positiv, da die meisten dadurch bereits abschätzen konnten, ob sie die Klausur bestanden hatten.

Die Qualität von Übungs- und Prüfungsaufgaben bzw. ihre Zusammenstellung in Tests ist von der Form – elektronisch oder schriftlich – zunächst unabhängig. Die grundsätzlichen Anforderungen sind in beiden Fällen gleich. Auch einige Einschrän-

kungen treffen beide Formen der Leistungsüberprüfung, z. B. kann Präsentationskompetenz kaum anhand einer Klausur geprüft werden. Wird ein gemeinsamer Fragenpool genutzt, ist die Qualitätssicherung bei E-Assessments eher gewährleistet als bei klassischen schriftlichen Prüfungen, da alle zugreifenden Lehrenden die Aufgaben kontrollieren können. Aufgrund der erforderlichen Passung zwischen Lehrveranstaltung und E-Assessment wird allerdings häufig eine Anpassung der elektronischen Aufgaben aus dem Fragenpool auf den Studiengang, die Studiengruppe oder die Schwerpunktsetzungen des/der Lehrenden erfolgen müssen. Auch die Umwandlung in elektronische Aufgaben erfordert unter Umständen eine Anpassung oder Überarbeitung der von den Lehrenden verwendeten Aufgaben.

In diesem Beitrag wurde weiterhin gezeigt, dass die Erstellung kompetenzorientierter Fragen auch im Rahmen eines E-Assessments möglich ist, auch wenn sich dessen Anwendung nicht in allen Fällen anbietet. Beispielsweise ist bisher eine Bewertung des Lösungsweges nur bedingt, durch die Abfrage von Zwischenergebnissen, möglich. Zielen Aufgaben also nicht nur auf Ergebnisse, wird man weiterhin auf schriftliche Tests zurückgreifen oder beide Testarten kombiniert nutzen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist der Auf- und Ausbau einer zuverlässigen technischen Hintergrundstruktur. Einführende Schulungen und ein laufender Support sind dabei notwendig, da ein flexibles Programm entsprechend umfangreiche Funktionalitäten hat sowie unter anderem Updates installiert werden müssen und Teilnahme-Accounts angelegt werden müssen. Bei der Durchführung elektronischer Prüfungen ist ein technischer Support vor Ort unabdingbar, damit bei Problemen sofort reagiert werden kann. Insbesondere wenn Abschlussklausuren als E-Assessments durchgeführt werden, sind die Anforderungen an die technische Sicherheit und die Dokumentation zur Wahrung von Datensicherheit und Datenschutz hoch, sodass entsprechende Rahmenbedingungen und Unterstützungsstrukturen notwendig sind. Diese liegen derzeit an der TH Wildau [FH] noch nicht komplett vor, sodass an dieser

Stelle noch Arbeiten notwendig sind. Das Praxisbeispiel hat jedoch zum Ausdruck gebracht, dass Studierende hinsichtlich E-Assessments wenig bis keine Berührungängste haben und die Situation bei guter Organisation und Unterweisung problemlos bewältigen.

In diesem Sinne heißt es fortan, die Potenziale von E-Assessments weiter zu nutzen, deren Grenzen allerdings stets im Blick zu haben und die verschiedenen Testmöglichkeiten bzw. Instrumente zur Wissens- und Kompetenzüberprüfung intelligent zu kombinieren. Hinsichtlich Technik und Organisation liegen an der TH Wildau [FH] bereits recht gute Rahmenbedingungen vor, die jedoch hinsichtlich formaler Aspekte (z. B. rechtliche Gesichtspunkte, Archivierung) noch auf „sicherere Füße“ gestellt werden müssen. Dennoch soll dieser Artikel dazu ermutigen, auch bereits die Möglichkeiten nicht-prüfungsrelevanter E-Assessments auszuschöpfen und die daraus entspringenden Vorteile zu nutzen.

LITERATUR

- Biella D, Huth D, Striewe M, Kohnen M, Dreibold T, Becke M (2010) Organisation und Implementierung PC-gestützter Prüfungen an der Universität Duisburg-Essen. <http://www.e-teaching.org>. Accessed 10 Sep 2014
- Bücking J (2011) Lessons Learned. Erfahrungen aus 7 Jahren eAssessment. *Hamb eLearning Mag* 7:40–42
- Case SM, Swanson DB (2002) *Constructing Written Test Questions for the Basic and Clinical Sciences*, 3rd edn. National Board of Medical Examiners, Philadelphia, PA
- Ehlers J, Guetl C, Höntzsch S, Usener C, Gruttmann S (2013) Prüfen mit Computer und Internet. Didaktik, Methodik und Organisation von E-Assessment. <http://13t.eu>. Accessed 25 Jul 2014
- Handke J, Schäfer AM (2012) *E-Learning, E-Teaching und E-Assessment in der Hochschullehre. Eine Anleitung*. Oldenbourg, München. ISBN: 978-3-486-70800-4
- Krebs R (2004) *Anleitung zur Herstellung von MC-Fragen und MC-Prüfungen*. Universität Bern, Medizinische Fakultät, Institut für Aus-, Weiter- und Fortbildung IAWF, Abt. für Ausbildungs- und Examensforschung AAE. <https://www.elearning.uni-mainz.de/files/2014/03/Anleitung-zur-Herstellung-von-MC-Fragen-und-MC-Pruefungen-fuer-die-aerztliche-Ausbildung.pdf>. Accessed 11 Sep 2014
- Paris SG, Lipson MY, Wixson KK (1983) Becoming a strategic reader. *Contemp Educ Psychol* 8:293–316. doi: 10.1016/0361-476X(83)90018-8
- Schulz A, Apostolopoulos N (2011) eExaminations Put To Test. Potenziale computergestützter Prüfungen. *Hamb eLearning Mag* 7:37–39

AUTOREN

Dr. Xenia Valeska Jeremias
Technische Hochschule Wildau
ServiceZentrum Lernen und Lehren [SeL²]
xenia.jeremias@th-wildau.de

Birgit Sellmer, M.A.
Technische Hochschule Wildau
ServiceZentrum Lernen und Lehren [SeL²]
birgit.sellmer@th-wildau.de

Prof. Dr. Ulrike Tippe
Technische Hochschule Wildau
Vizepräsidentin für Studium, Lehre und Qualität
ulrike.tippe@th-wildau.de

Gefährdet der demografische Wandel die Innovationsfähigkeit von Unternehmen?

Eine Literaturübersicht zu Kreativität und Alter, Aging Workforce und Innovationsfähigkeit

Sandra Klatt*

Zusammenfassung

Der demografische Wandel verändert die Arbeitswelt in Deutschland nachhaltig. Die Erwerbspersonen werden zahlenmäßig abnehmen, die Belegschaften von Unternehmen im Durchschnitt immer älter. Da einerseits kreative Leistungen im Alter im Allgemeinen abzunehmen scheinen, Kreativität andererseits aber eine wichtige Komponente für Innovationen ist, stellt sich die Frage, ob der demografische Wandel die Innovationsfähigkeit von Unternehmen gefährdet. Der folgende Beitrag fasst hierzu Literatur zu empirischen Befunden und deren Auswertungen zusammen.

Abstract

Demographic change is affecting the world of work in Germany gravely and permanently. The workforce is decreasing in number and aging across the board. On the one hand, creative productivity seems to decrease with age, yet it is this very creativity that comprises a key component of innovation. The question therefore is whether demographic change threatens the innovation ability of enterprises. The following article summarises an overview of literature in this matter, especially with respect to empirical research and theoretical models.

1. AUSGANGSLAGE

Im Jahr 2011 hat das Bundeskabinett die ressortübergreifende „Forschungsagenda der Bundesregierung für den demografischen Wandel: Das Alter hat Zukunft“ (Bundesministerium für Bildung und Forschung 2011) beschlossen. Die Forschungsagenda benennt sechs Handlungsfelder für den demografischen Wandel, darunter auch, wie Kompetenzen und Erfahrungen älterer Menschen für Wirtschaft und Gesellschaft genutzt werden können.

Der demografische Wandel verändert unter anderem die Arbeitswelt in Deutschland nachhaltig.

Die allgemeine demografische Entwicklung der Alterspyramide hin zur Alterspalme (vgl. Abbildung 1) wirkt sich auf die Altersstruktur der Erwerbspersonen dermaßen aus, dass das Durchschnittsalter der Erwerbspersonen in den nächsten Jahren weiter steigen und das potenzielle Arbeits-

kräfteangebot insgesamt zurückgehen wird. Dabei werden immer weniger junge Arbeitskräfte nachrücken, während die geburtenstarken Jahrgänge (sogenannte „Babyboomer“) in den nächsten Jahren verstärkt in den Ruhestand treten. Diese statistischen Erkenntnisse und Prognosen sind mittlerweile allgemein bekannt.

Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) stehen vor der Herausforderung, sich angesichts der demografischen Entwicklung weiterhin wettbewerbsfähig zu positionieren und ihre Innovationsfähigkeit zu erhalten. Entrepreneurship wird durch Kreativität gestärkt (Gielnik 2013), ebenso ist Kreativität eine wesentliche Eigen-

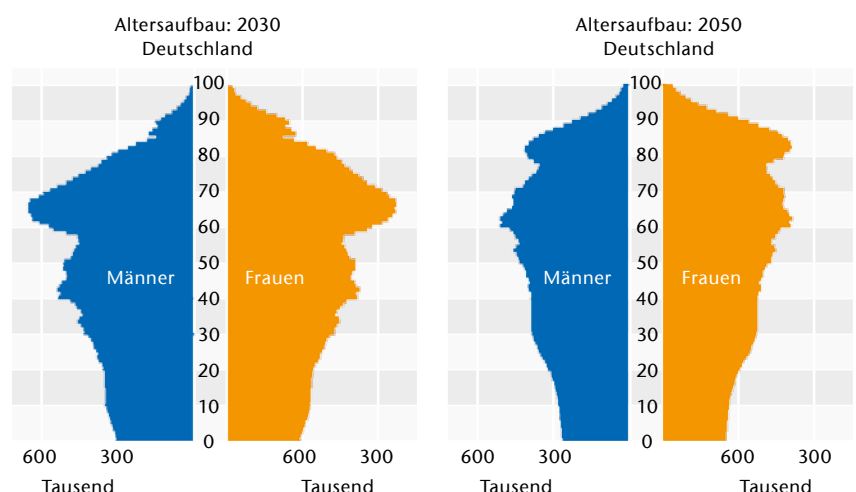


Abb. 1) Bevölkerungsprognosen der 12. koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung, Szenario 1-W1 für 2030 und 2050, Quelle Statistisches Bundesamt 2009.

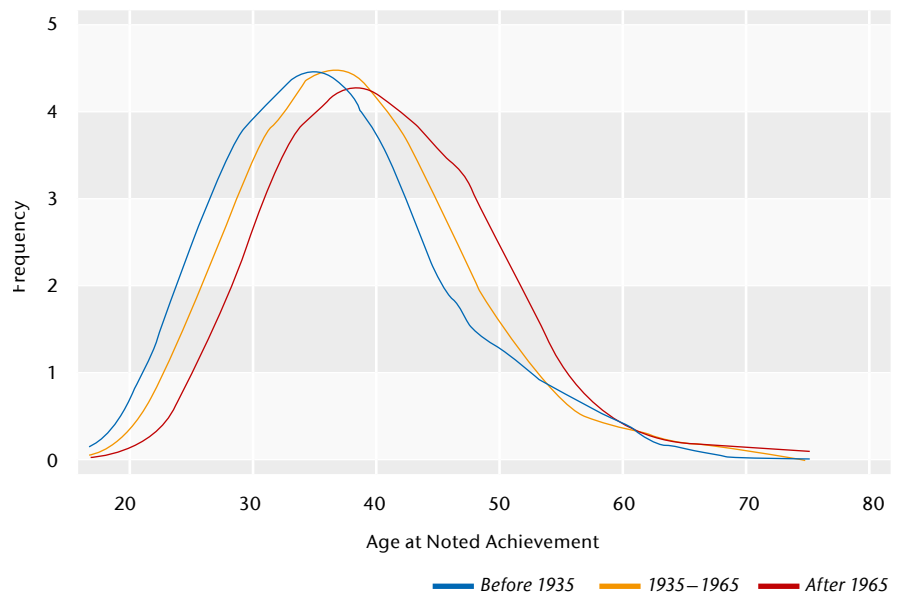
* korrespondierende Autorin

schaft, um Innovationen hervorzu- bringen. Gleichzeitig gibt es Hinweise, dass Kreativität und kreative Produktivität mit zunehmendem Alter abneh- men (Simonton 2013, Kim & Pierce 2013). Gefährdet also der demografi- sche Wandel die Innovationsfähigkeit von Unternehmen? Zur Darstellung und Bewertung des Zusammenhangs von Kreativität, Alter und Innovatio- nen wurde einerseits Literatur zu Kre- ativität und Alter gesichtet, anderseits zum Thema Aging Workforce und In- novationen.

2. KREATIVITÄT – EINE FRAGE DES ALTERS? EMPIRISCHE BEFUNDE

Der Zusammenhang zwischen Kreati- vität und Alter beschäftigt die Litera- tur schon länger. Die erste bekannte empirische Untersuchung zur Themat- ik wurde von Adolfe Quételet 1835 durchgeführt und dokumentiert. Er erfasste kreative Leistungen von be- kannten französischen und englischen Dramaturgen, abhängig vom Alter (vgl. Simonton 2012). Fast ein Jahrhun- dert später fasste Lehman (1953) in ei- ner historiometrischen Annäherung zum Thema Kreativität seine 20-jähri- gen Forschungsarbeiten in dem Buch „Age and Achievement“ zusammen. Lehman zeigt Korrelationen von wis- senschaftlichen, technischen und künstlerischen Leistungen in Abhän- gigkeit zum Alter auf und beschreibt im Wesentlichen eine umgedrehte U-Kurve, die zwischen 20 und 40 Le- bensjahren steil nach oben steigt, bei ca. 40 Jahren den Höhepunkt erreicht, um dann wieder zu fallen. Lehmans grundlegende Erkenntnisse werden bis heute in der Literatur zitiert. Auch andere Untersuchungen kommen zu ähnlichen Ergebnissen. So zeigt die Abbildung 2 als anschauliches Beispiel eine historische Zusammenfassung großer wissenschaftlicher Leistungen in verschiedenen Zeitepo- chen nach Jones (2005, 2010), der Nobelpreis- träger als Untersuchungsgegenstand wählte.

Dem allgemeinen Leistungsverlauf von kreativen Leistungen stehen her- ausragende Leistungen im hohen Alter entgegen, die Lehman in seiner Studie festhält. Dies betrifft philosophische, musikalische und auch literarische



Note: The figure pools the Nobel Prize winner and great inventor data.

Abb. 2) Alter zum Zeitpunkt großer wissenschaftlicher Leistungen, historische Betrachtung nach Jones (2010: 2).

Werke, z.B. Verdi (mit 85 Jahren Te Deum, Ave Maria) oder Alexander von Humboldt (Kosmos im Alter von 76 bis 89 Jahren). Unter Berücksichtigung der relevanten Geburtskohorten – 18. und 19. Jahrhundert mit einer im Ver- gleich zu heute deutlich geringeren Lebenserwartung – sind die Daten zu den Altersleistungen umso höher ein- zuschätzen (Schuler & Görlich 2007). Eine breit angelegte empirische Lang- zeituntersuchung (Kim 2011) in den USA mit ca. 300.000 Teilnehmern von 1966 bis 2008 lässt ebenso den Trend ablesen, dass Kreativität in jungen Jah- ren – während der späteren Schulzeit, wenn die kognitiven Fähigkeiten zum abstrakteren Denken und Ausdrücken ausgereift sind – am höchsten zu sein scheint. In späteren Jahren nimmt die Fähigkeit der Kreativität der unter- suchten Personen im Allgemeinen ab. Als Erklärung dafür werden unter an- derem fehlende Anreize zum Kreativ- sein oder der Druck, sich den Konven- tionen des Alltagslebens zu beugen, genannt (Kim & Pierce 2013). Die empirischen Untersuchungen zum Alter und kreativen Output zei- gen auf, dass eine allgemeine typische Korrelation zwischen dem Alter und dem kreativen Output festzustellen ist (Lehman 1953, Simonton 1997, 2012, Jones 2010). Der Zusammenhang zwi-

schen Alter und Kreativität muss indes genauer betrachtet werden. Unter an- derem gibt es folgende wesentliche Aspekte bei der Interpretation zu be- denken (nach Simonton 1997):

- Abhängig von den Bereichen der Kreativität verschiebt sich der Hö- hepunkt der Kreativität in die spä- teren Jahre (z.B. Erfahrungen und Sprache).
- Der Verlauf der kreativen Produktivität hängt auch davon ab, wann die „kreative Karriere“ begon- nen wurde, losgelöst vom chronologi- schen Alter. Das bedeutet, dass spä- ter gestartete oder neu gestartete Karrieren zu einem späteren Zeit- punkt den Höhepunkt der Kreativität ebenso nach hinten verschieben können.
- Bei den empirischen Resultaten sind quantitative und qualitative kreative Werke zu unterscheiden. Während einige Personen im Laufe ihres Schaffens eine Reihe von kre- ativen Produkten entwerfen und damit mehr als einen sogenannten Höhepunkt der Kreativität auch später im Leben schaffen, kreieren andere Personen nur wenige be- merkenswerte kreative Outputs.

- In Bereichen, die bereits ausgiebig bearbeitet bzw. erforscht sind, bedarf es zunächst viel Zeit und Aufwand, den „State of the Art“ zu erarbeiten. Daher dauert es umso länger, in einem solchen Bereich neue Ideen zu entwickeln. Kreativität ist also erst in späteren Jahren wahrscheinlich.

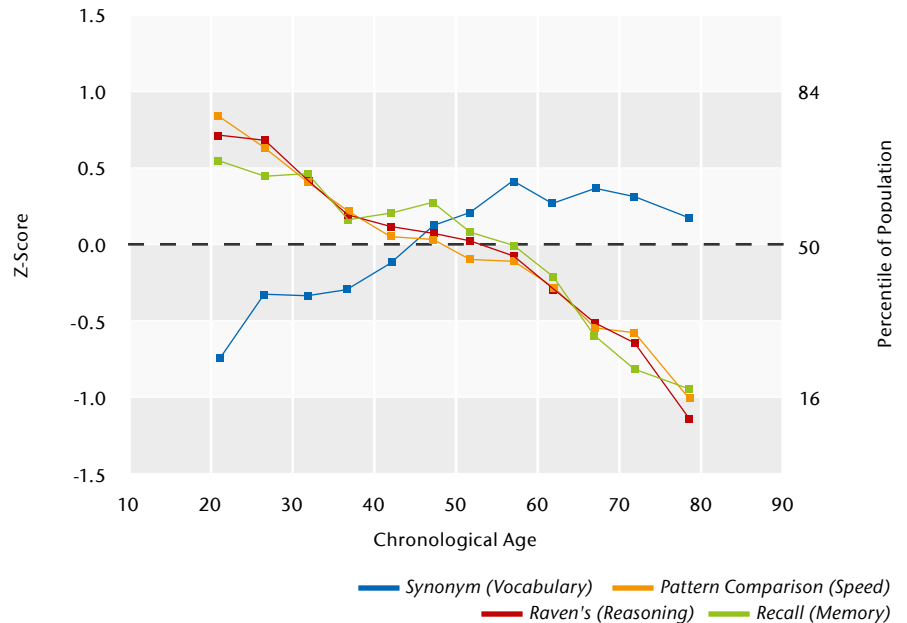
3. ERKLÄRUNGSMODELLE

Sucht man nach Erklärungsversuchen in der Literatur zum Zusammenhang von Alter und kreativen Leistungen, spielt zunächst der altersabhängige Leistungsverlauf kognitiver Fähigkeiten eine Rolle, wie Abbildung 3 verdeutlicht. Danach nehmen Fähigkeiten des spontanen, fluiden Denkens (z. B. raven's – reasoning, recall memory, speed of pattern comparison) mit dem Lebenszeitalter ab, während beispielsweise insbesondere die Sprachkompetenz im Laufe des chronologischen Alters wächst und dann auf einem hohen Niveau verharrt.

3.1. FLUIDE UND KRISTALLINE INTELLIGENZ ALS FAKTOREN DER KREATIVITÄT

Die fluide Intelligenz tritt in den Fokus, wenn Probleme ohne Rückgriff auf Erfahrung relativ schnell gelöst werden sollen. Die kristalline Intelligenz hingegen wird verkörpert durch einen großen Sprachschatz und den Rückgriff auf Erfahrungen (Zweifaktoretheorie nach Horn & Cattell 1967). Während die fluide Intelligenz in jungen Jahren rasant anwächst und mit 30 bis 40 Jahren ihren Höhepunkt erreicht, wächst die kristalline Intelligenz mit zunehmendem Alter, bevor sie auf einem hohen Niveau stagniert und in den späten Lebensjahren wieder abbaut. Diese Feststellungen legen nahe, kreative Leistungen im Hinblick auf ihre primäre Abhängigkeit von der fluiden Intelligenz oder kristallinen Intelligenz zu unterscheiden. Im Hinblick auf ältere Arbeitnehmer kann das bedeuten, die Stärken der Erfahrung und Sprache stärker anzusprechen, um die besondere Kreativität dieser Altersgruppe zu nutzen.

Darüber hinaus gibt es zwei grundlegende theoretische Ansätze, um die Entwicklung der Kreativität im Laufe



Means of performance in four cognitive tests as a function of age. Each data point is based on between 52 and 156 adults.

Abb. 3) Altersabhängiger Leistungsverlauf kognitiver Fähigkeiten (Salthouse 2004: 141).

des Alterns zu erklären, das „Peak and Decline Model“ und das „Life Span Development Model“.

3.2. PEAK AND DECLINE MODEL

Nach dem klassischen Peak and Decline Model steigert sich die Kreativität bis in die späten 30er Lebensjahren, danach nimmt die Kreativität ab. Levy und Langer zeigen gleichzeitig fundamentale Kritik an diesem Modell auf (Levy & Langer 1999, vgl. auch Carlsson & Smith 2011). Simonton hat das Modell weiterentwickelt und verfolgt einen komplexeren Ansatz des „Peak and Decline Models“, losgelöst vom chronologischen Alter. Er führt fünf Erklärungsansätze zur kreativen Produktivität aus, um diese anschließend zusammenzuführen (nach Simonton 2013):

- Die körperliche Gesundheit geht in den späten Lebensjahren in der Regel spürbar zurück, was zu einem Rückgang der Kreativität führen kann. Zu bedenken ist jedoch, dass die Menschen älter werden und dabei länger fit und gesund bleiben und damit auch die Spanne der Kreativität verlängert wird. Kreative Produkte hängen aber nicht zwingend von der körperlichen Verfassung ab: Das Beweisen eines mathematischen Satzes ist körper-

lich weniger fordernd als eine geologische Expedition.

- Kreative Produktivität kann von spezifischen psychologischen Variablen abhängen, die sich über die Zeit ändern. Kreativität korreliert mit Offenheit für Erfahrung, divergentem Denken und fluider Intelligenz. Diese Variablen nehmen in der Regel mit dem Alter ab, z. B. die Fähigkeit des divergenten Denkens nach dem 40. Lebensjahr. Ein großer Nachteil dieser Erklärung ist, dass das chronologische Alter und nicht das Karrierealter zugrunde gelegt wird. Dementsprechend könnte eine spät gestartete Karriere ihren Höhepunkt nicht in den 50er oder 60er Jahren erwarten.
- Kreative Leistung im Laufe der Zeit kann eine Folge des akkumulierenden Vorteils sein (Cumulative advantage, auch sogenannter Matthäus-Effekt nach DiPrete & Eirich 2006). Diejenigen, die früh in ihrer Karriere belohnt werden, werden mehr Ressourcen und Anreize erhalten als die weniger erfolgreichen Kreativen. Früher Erfolg führt dann zu mehr Erfolg und eine erweiterte produktive Karriere, während ein Anfangsfehler sogar dazu führen kann, sich ganz aus den kreativen Prozessen zurückzuziehen. Nach

der Erklärung des kumulativen Vorteils können alle Kreativen die gleichen Fähigkeiten als Voraussetzung haben und doch werden ganz ungleiche Leistungen hervorgebracht. Ein Einwand gegen diesen Erklärungsansatz ist, dass nicht erklärt wird, warum sich die altersbezogenen Relationen zwischen Alter und Kreativität in verschiedenen Tätigkeitsbereichen unterscheiden. Ein weiterer Einwand ist, dass damit keine offensichtliche Erklärung für den Post-Peak-Rückgang von kreativen Leistungen erbracht wird.

- Ökonomen interpretieren die empirischen Befunde mit Investitionen in „Humankapital“. Bildung und Ausbildung in einer bestimmten Domäne bilden die Basis für kreative Produktivität, dieses erworbene Know-how wird „verbraucht“, während Karriere fortschreitet. Ideen werden zunehmend veraltet oder altmodisch, sodass man nicht mehr „State of the Art“ ist. Wenn einmal die Karriere begonnen wurde, wird es sehr anspruchsvoll, das Humankapital wieder aufzufüllen und die Expertise auf einem hohen Level zu halten. Der Rückgang der Kreativität wird dann unvermeidlich. Dieser Ansatz erklärt zwar einen Rückgang der Kreativität, jedoch nicht deren Anstieg.
- In einem weiteren Erklärungsmodell wird das Verhältnis Alter – Kreativität als eine mathematische Funktion eines zweistufigen kombinatorischen Verfahren gebildet, mit dem kreative Ideen produziert werden. Das Ergebnis ist ein komplexes Modell, das die wesentlichen Merkmale der Beziehung zwischen Alter und kreative Produktivität erklären kann. Der Hauptnachteil dieser Erklärung ist die Komplexität und Abstraktion, da die ganze Theorie als mathematisches Modell ausgedrückt wird.

Simonton stellt zusammenfassend fest, dass die dargestellten Erklärungsansätze verschiedene Herangehensweisen widerspiegeln und keine der Erklärungsversuche für sich allein das Phänomen theoretisch erklärt. Die Relation Alter und kreative Produktivität

scheint zu komplex zu sein, um nur mit einer Theorie erklärt zu werden. Vielmehr spielen verschiedene Theorien zusammen, nach Simonton sowohl in verstärkender als auch in widersprüchlicher Form.

3.3. LIFE SPAN DEVELOPMENT MODEL

Im „Life Span Development Model“ wird die Kreativität im Prinzip weder gesteigert noch geht sie zurück. Vielmehr wandelt sich die Kreativität in verschiedenen Lebensabschnitten und wird zudem unterschiedlich ausgedrückt. Zentrale Annahme ist, dass die Kreativität durch die Persönlichkeitsentwicklung einer Person in neue Formen und Ausdrucksarten mündet. Lebensabschnitte, Erfahrungen und unbewusste kognitive Prozesse formen nicht nur den Menschen, sondern auch die Art und Weise der Kreativität. Daher wird die Kreativität auch nicht mit Produktivität (kreative Werke) gleichgesetzt, sondern es wird vielmehr eine qualitative Analyse z. B. bekannter Kreativer als empirisches Sample herangezogen (Levy & Langer 1999).

In der Neuauflage der Encyclopedia of Creativity, Edition 2 (Runco & Pritzker 2011) wird das „Life Span Development Model“ in den Mittelpunkt gestellt. Carlsson und Smith fassen darin die neuere Diskussion um Kreativität und Alter insbesondere aus der psychodynamischen und neuropsychologischen Sicht nach Cohen zusammen. So hat danach der Gerontologe Gene Cohen für die zweite Hälfte des Lebens folgende Phasen identifiziert (Cohen 2001):

Phase 1: Neuausrichtung – Zwischen Anfang 40 und Ende 50 kommt es in der Regel zu einer tiefen Reflexion, zur Neuorientierung oder gar einem Umbruch. Die Hirnentwicklung unterstützt diese Phase durch die Reifung der Selbstkontrolle, der Selbsterkenntnis und der sozialen Fähigkeiten.

Phase 2: Befreiung – Nach Cohen prägt das Bedürfnis nach Experimenten und Innovationen diese Phase, zumeist in den späten 50er Jahren bis Anfang 70. Hirnforscher haben festgestellt, dass sich im Gehirn neue Zellen/Neurone bilden, in Bereichen, die

für die Verarbeitung neuer Eindrücke wichtig sind. Körperliche Bewegung und anspruchsvolle geistige Tätigkeit regen diese Neurogenese an, Stress kann negativ wirken.

Phase 3: Resümee – Cohen beschreibt als typisch für die dritte Phase des späten Erwachsenenlebens das Bedürfnis, sein Wissen und seine Erfahrungen weiterzugeben. In der Regel erlebt man sie zwischen Ende 60 und Ende 80. Ältere Erwachsene setzen beim Nachdenken über vergangene Ereignisse und Erfahrungen den linken und den rechten Hippocampus gleichermaßen ein, während bei Jüngeren vorwiegend der linke aktiv ist. Cohen folgert daraus, dass die Erinnerungen Älterer damit anschaulicher und detaillierter werden.

Phase 4: Encore – Hier greift der alte Mensch nach Cohen alte Lebensthemen erneut auf. Wiederum entwickelt sich das Hirn weiter. Negative Gefühle wie etwa Angst oder Wut werden mit zunehmendem Alter weniger stark empfunden, stattdessen dominiert eine positive Grundstimmung zum Lebensabend.

Cohen versteht die Phasen als Möglichkeiten, für das vorhandene kreative Potenzial in unterschiedlichen Lebensabschnitten ein Bewusstsein zu schaffen und so der Kreativität entsprechend Spielräume zu ermöglichen (Cohen 2001).

Nach Carlsson & Smith (2011) bedarf Kreativität einer individuellen, von innen heraus kommenden und einer von der Umwelt geprägten, externen Komponente (so auch Csikszentmihalyi 1996). Dabei können die Eigenschaften der Kreativität mit einer Mischung aus Jung und Alt definiert werden, der lebenserfahrene Mensch kommt mit seinem „inneren Kind“ stärker in Berührung – Emotionalität, Neugier auf Neues, Sensibilität und Verspieltheit komplementär zu Erfahrung und Weisheit.

Die aktuelle Forschung nimmt zwar auch Erkenntnisse des Peak and Decline Models auf, jedoch wird in der neueren Forschung die Theorie des Life Span Development Models mit einem positiven Ausblick für die Älteren propagiert (vgl. Cohen 2001, Carlsson & Smith 2011).

4. AGING WORKFORCE UND INNOVATIONSFÄHIGKEIT – EMPIRISCHE BEFUNDE

Das Thema der Innovationsfähigkeit älterer Arbeitnehmer erfährt in den letzten Jahren angesichts der demografischen Entwicklung und deren Auswirkung auf die Altersstruktur der Belegschaften eine neue Aktualität und Dringlichkeit, die sich auch in den Untersuchungen und Forschungsvorhaben zu dem Thema bemerkbar macht. So untersuchen abgeschlossene und aktuelle Forschungsvorhaben den Einfluss der alternden Belegschaft auf die Innovationsfähigkeit der Unternehmen.

Annäherungen zur Feststellung der Innovationsfähigkeit von Älteren finden in der Regel entweder auf Ebene des Beschäftigten (Individualbetrachtung) oder auf Ebene des Unternehmens (aggregierte Betrachtung) statt. Beide Herangehensweisen haben methodische Vor- und Nachteile. Nach Frosch (2011) überwiegen die Vorteile auf der aggregierten Ebene der Unternehmen, da die durchschnittliche Innovationsfähigkeit einer Altersgruppe so besser dargestellt wird, d. h. die individuellen Umstände, die zu einer Innovation führen (z. B. wichtige Inputs für die Innovation kamen von verschiedenen Mitarbeitern, die aber mit der Innovation nicht direkt in Verbindung gebracht werden), werden bewusst ausgeblendet. Vor diesem Hintergrund wird als am geeignetsten die Betrachtung auf Firmenebene angenommen, allerdings müssen auch hier methodische Defizite in Kauf genommen werden (Frosch 2011). Insbesondere stellt die Interpretation der empirischen Befunde eine große Herausforderung dar. Es gibt Anzeichen dafür, dass generalisierende Schlussfolgerungen zur Altersabhängigkeit innovativer Leistungen nicht sinnvoll sind (vgl. Frosch 2011: 426). Im Gegensatz dazu konzentrieren sich zum Beispiel Müller et al. (2012) auf die Individualebene, da Innovationen „letztlich immer noch an Individuen geknüpft sind, welche durch Fähigkeiten und Anreize charakterisiert werden, die

sich im Altersverlauf wandeln dürften“ (Lutz Schneider, zitiert in Müller et al. 2012: 18).

4.1. INDIVIDUALEBENE

Frosch (2011) gibt einen profunden Überblick zur Literatur zum Thema Innovation und Alter der Belegschaft.¹ Untersuchungen auf der Individualebene führen danach zurück zu Lehman (1953), Jones (2005, 2010) und Simonton (1997, 2012, 2013), die die kreative Produktivität untersuchten. Zentrales Ergebnis ist die umgedrehte u-förmige Kurve der kreativen Produktivität Einzelner (vgl. obige Ausführungen). Eine gute Datengrundlage für Innovationstätigkeiten bietet das EU-Projekt PatVal. Die Auswertung der Europäischen Patentanmeldungen des Pat-Val EU 1 von Giuri et al. (2007) zeigt, dass das Durchschnittsalter der Erfinder bei ca. 45 Jahren liegt. Des Weiteren konnten Aussagen zur allgemeinen Altersstruktur der Erfinder getroffen werden (Giuri et al. 2007: 1111f.): 60 % der Erfinder waren zwischen 30 und 50 Jahren alt, jeweils 5 % waren jünger als 30 oder älter als 60 Jahre. Im PatVal 2 liegt das Durchschnittsalter ebenfalls bei rund 45 Jahren² (Gambardella 2012). Zusammengefasst zeigen empirische Untersuchungen auf Individualebene, dass die höchsten innovativen Leistungen im Alter zwischen 30 und 50 gezeigt werden. Allerdings scheint es von großer Bedeutung zu sein, in welchem Fachbereich die innovativen Leistungen erbracht werden. So wird festgestellt, dass in wissensintensiven Bereichen die Innovatoren eher jung sind (z. B. IT), während in anderen Bereichen innovative Höchstleistungen zu einem späteren Zeitpunkt stattfinden bzw. die innovative Leistung auf einem relativ hohen Niveau verharrt; zudem ist festzuhalten, dass die Qualität der Erfindungen nicht unbedingt mit zunehmendem Alter abnehmen muss (Frosch 2011).

Das Projekt Demotrans kommt zum Thema Innovativität von alternden Belegschaften auf Individualebene zu einem anderen Ergebnis (Buck & Schletz 2004). Danach hängt innovatives Verhalten nicht vom Alter der Be-

schäftigten ab, sondern vielmehr vom Arbeitsumfeld, das anregend auf die Innovationsfähigkeit und -bereitschaft wirken soll. Dabei können jüngere wie ältere Mitarbeiter gleichermaßen innovativ agieren, sofern sie die grundlegenden Kompetenzen besitzen, um zu innovieren. Es wurde insofern ein Zusammenhang zwischen dem Alter und der Innovationsfähigkeit bzw. -bereitschaft festgestellt, als Ältere stärker vom Arbeitsumfeld beeinflusst werden (müssen). Ältere sind oft eher zufrieden und streben weniger nach Veränderungen und Neuem, sodass besondere (oder auch andere) Impulse gegeben werden müssen, um die Innovationsfähigkeit bzw. -bereitschaft zu erhöhen (vgl. Jasper et al. 2001). Insgesamt wird festgestellt, dass geeignete empirische Langzeitstudien fehlen, um tatsächlich evidente Rückschlüsse vom Alter der Arbeitnehmer auf die Innovationsfähigkeit ziehen zu können. Gleichzeitig gibt es keine geeigneten Querschnittsuntersuchungen auf Individualebene, die den älteren Arbeitnehmer über das Alter hinaus angemessen im Kontext einordnen könnten, zum Beispiel im Hinblick auf Bildung, Aktualität seines Know-hows, beruflichen Werdegang oder aktuelle Position. Die Erhebung und Auswertung solcher Daten auf Individualebene werden als sehr kostenintensiv angesehen (Frosch 2011).

4.2. AGGREGIERTE UNTERNEHMENSEBENE

Schneider (2007) hat in einem Linked-Employer-Employee-Datensatz (LIAB – Daten von 2004) die Innovations-tätigkeit in Abhängigkeit zur Beschäftigtenstruktur gesetzt, um Schlüsse dahingehend zu ziehen, wie sich bestimmte Altersgruppen auf die Innovationsfähigkeit auswirken und welche Rolle eine Altersheterogenität spielen kann. Schneider zeigt auf, dass mit zunehmendem durchschnittlichen Beschäftigungsalter die Innovationstätigkeit erheblich abnimmt. Allerdings zeigt die Betrachtung speziell der Ingenieure – als Innovationstreiber –, dass in diesen Berufsgruppen zwar auch eine negative Tendenz mit zu-

¹ Zum Literaturüberblick vergleiche auch Müller et al. (2012).

² Zu beachten ist, dass die Datengrundlage für PatVal 2 mehr Länder bzw. Samples umfasst als PatVal 1 und somit für einen direkten Vergleich eine entsprechende Analyse durchzuführen wäre. Das Durchschnittsalter im PatVal 2 ist in Japan am jüngsten mit 39,6 Jahren und in den USA am höchsten mit 48,4 Jahren.

nehmendem durchschnittlichen Alter festzustellen ist, jedoch nicht im signifikanten Bereich. Schneider zieht daraus den Schluss, dass eine Anhebung des Durchschnittsalters in den für den Innovationsprozess relevanten Berufsbildern wiederum keinen erheblich negativen Einfluss auf die Innovationstätigkeit hat (Schneider 2007). Die Altersgruppe um die 40 Jahre wird als aktivste Innovationskraft identifiziert. Anders als bei den Ingenieuren konnte bei den kaufmännischen Managern kein Einfluss der Altersgruppe auf die technologischen Innovationen gemessen werden. Schneider erklärt dies mit dem kognitiven Zweifaktorenmodell, wonach für die technologische Produktinnovation eher die fluide Intelligenz wichtig zu sein scheint, während für Managementaufgaben das Erfahrungswissen etwaige Altersdefizite mindestens ausgleichen kann.

Schneider weist darauf hin, dass die Untersuchung nicht die individuelle Innovationsfähigkeit auf der Ebene des Beschäftigten abbildet.

Auch Verworn et al. (2007) haben die These untersucht, ob ältere Mitarbeiter weniger innovativ sind als jüngere und somit die Innovationsfähigkeit von Unternehmen durch die demografische Entwicklung bzw. das Altern der Belegschaft als gefährdet zu betrachten ist. Auf Grundlage einer Sekundäranalyse nach dem Mannheimer Innovationspanel von 2001 sind folgende signifikante Ergebnisse festzuhalten: Bei Unternehmen mit einem hohen Anteil hoch qualifizierter Mitarbeiter lässt sich eine höhere Wahrscheinlichkeit feststellen, höhere Umsätze mit verbesserten Produkten zu erzielen. Jedoch hatte der Anteil älterer Mitarbeiter keinen messbaren Einfluss auf den Innovationsoutput. Die Analyse weist aber darauf hin, dass eine genauere Betrachtung der in Innovationsprozesse involvierten älteren Mitarbeiter wünschenswert wäre, um belastbare Ergebnisse abzuleiten, zumal die Datengrundlage aus dem Jahr 2001 stammt. Eine wichtige Feststellung der Untersuchung ist, dass Unternehmen mit einem hohen Anteil älterer Mitarbeiter geringere Aufwendungen für Weiterbildung betreiben. Dies widerspricht der For-

derung nach lebenslangem Lernen (Verworn et al. 2007).

5. FAZIT

Es gibt zunächst empirische Hinweise, dass Ältere weniger (messbare) kreative Leistungen zeigen. Erklärungsansätze hierfür sind vielfältiger Natur und nicht unbedingt mit dem chronologischen Alter verknüpft. Diese Erkenntnisse lassen sich jedoch nicht ohne weiteres auf die Innovationsfähigkeit von Unternehmen übertragen. Noch ist die Innovationsfähigkeit von Unternehmen angesichts alternder Belegschaften nur unzureichend erforscht, vorhandene Ergebnisse zeigen sich widersprüchlich. Die Komplexität von Innovationsprozessen erschwert eine abstrakte Fokussierung auf den Zusammenhang von Alter und den Beitrag einzelner Beschäftigter zur Innovation. Im Rahmen der Forschungsagenda der Bundesregierung werden mehrere Forschungsvorhaben gefördert, die verschiedene Facetten der alternden Belegschaft und Innovationstätigkeiten von Unternehmen beleuchten. Die Forschungsvorhaben versuchen zum Beispiel die unterschiedlichen Kompetenzen Jüngerer und Älterer zu kombinieren, um Innovationen zu stärken. Ein weiterer Fokus ist verstärkt auf die Rahmenbedingungen für Kreativität und Innovationen im Unternehmen zu legen und welche Rolle Einzelne und Teams – auch im Hinblick auf das Alter – spielen. Dies bezieht sich auf HR-Strategien wie Teamzusammensetzung, Methoden, Führungsstil, Motivation, aber auch auf kreative Prozesse, wichtige Soft Factors wie Räumlichkeiten, Wohlbefinden und zielgerechte Ansprache unterschiedlicher Typen im Hinblick auf Bildung, Alter oder Erwerbsbiografie. Wie sehen Kreativprozesse der Zukunft aus? In Anbetracht des demografischen Wandels müssen wir diskutieren, wie Ältere neu, besser oder anders in kreative Prozesse eingebunden werden und wie die Stärken und Kompetenzen der Älteren in die Innovationsprozesse eingebracht werden können.

HINWEIS

Die Literaturanalyse wurden im Rahmen des Projekts lab[2]learn recherchiert. Das Projekt wird durch das Ministerium für Arbeit, Soziales, Frauen und Familie aus Mitteln des Europäischen Sozialfonds und des Landes Brandenburg gefördert.

LITERATUR

Buck H, Schletz A (eds) (2004) Ergebnisse des Transferprojektes Demotrans. Öffentlichkeits- und Marketingstrategie demographischer Wandel. Demographie und Erwerbsarbeit, vol 16. Fraunhofer IRB, Stuttgart. ISBN: 978-3-8167-6428-1

Bundesministerium für Bildung und Forschung (2011) Das Alter hat Zukunft: Forschungsagenda der Bundesregierung für den demografischen Wandel. <http://www.das-alter-hat-zukunft.de>. Accessed 06 Mar 2014

Carlsson IM, Smith G (2011) Aging. In: Runco MA, Pritzker SR (eds) *Encyclopedia of Creativity*, 2nd edn. Academic Press, Amsterdam, Boston, ISBN: 978-0-12-375037-2, pp 29–32. doi: 10.1016/B978-0-12-375038-9.00006-6

Cohen GD (2001) Creativity with aging: Four phases of potential in the second half of life. *Geriatrics* 56(4):51–54

Csikszentmihalyi M (1996) *Creativity. Flow and the psychology of discovery and invention*. HarperCollins, New York. ISBN: 978-0-06-017133-9

DiPrete TA, Eirich GM (2006) Cumulative Advantage as a Mechanism for Inequality: A Review of Theoretical and Empirical Developments. *Annu Rev Sociol* 32:271–297. doi: 10.1146/annurev.soc.32.061604.123127

Frosch KH (2011) Workforce Age and Innovation: A Literature Survey. *Int J Manag Rev* 13(4):414–430. doi: 10.1111/j.1468-2370.2011.00298.x

Gambardella A (2012) Final report of the inventor survey in Europe, the US and Japan. Projekt InnoS&T. [http://bcmntty-gp.unibocconi.it/QuickPlace/innovativest/Main.nsf/\\$defaultview/6D9A810AEBB96DDFC1257989002E1F30/\\$File/Final%20Report_inventors.pdf?OpenElement](http://bcmntty-gp.unibocconi.it/QuickPlace/innovativest/Main.nsf/$defaultview/6D9A810AEBB96DDFC1257989002E1F30/$File/Final%20Report_inventors.pdf?OpenElement). Accessed 06 Mar 2014

Gielnik MM (2013) Kreativität und Entrepreneurship. In: Krause DE (ed) *Kreativität, Innovation, Entrepreneurship*. Springer Gabler, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-02551-9, pp 77–92. doi: 10.1007/978-3-658-02551-9_4

Giuri P, Mariani M, Brusoni S, Crespi G, Francoz D, Gambardella A, Garcia-Fontes W, Geuna A, Gonzales R, Harhoff D, Hoisl K, Le Bas C, Luzzi A, Magazzini L, Nesta L, Nomaler Ö, Palomeras N, Patel P, Romanelli M, Verspagen B (2007) Inventors and invention processes in Europe: Results from the PatVal-EU survey. *Res Pol* 36:1107–1127. doi: 10.1016/j.respol.2007.07.008

Horn JL, Cattell RB (1967) Age differences in fluid and crystallized intelligence. *Acta Psychol* 26:107–129. doi: 10.1016/0001-6918(67)90011-X

Jasper G, Rohwedder A, Schletz A (2001) Innovieren mit alternden Belegschaften. In: Moser J, Nöbauer B, Seidl M (eds) „Vom alten Eisen und anderem Ballast“. Tabus, Schattenseiten und Perspektiven in betrieblichen Veränderungsprozessen. Hampp, München, ISBN: 978-3-87988-598-5, pp 60–86

Jones BF (2005) Age and Great Invention. National Bureau of Economic Research, Cambridge, MA. doi: 10.3386/w11359

Jones BF (2010) Age and Great Invention. *Rev Econ Stat* 92(1):1–14. doi: 10.1162/rest.2009.11724

Kim KH (2011) The Creativity Crisis: The Decrease in Creative Thinking Scores on the Torrance Tests of Creative Thinking. *Creativ Res J* 23(4):285–295. doi: 10.1080/10400419.2011.627805

Kim KH, Pierce RA (2013) Creativity and Age. In: Carayannis EG (ed) *Encyclopedia of Creativity, Invention, Innovation and Entrepreneurship*. Springer, New York, ISBN: 978-1-4614-3857-1, pp 364–368. doi: 10.1007/978-1-4614-3858-8_23

Lehman HC (1953) Age and Achievement. *Memoirs of the American Philosophical Society*, vol 33. Princeton Univ Press, Princeton

Levy BR, Langer EJ (1999) Aging. In: Runco MA, Pritzker SR (eds) *Encyclopedia of Creativity*. Academic Press, San Diego, ISBN: 978-0-12-227075-8, pp 45–52

Müller C, Curth S, Nerdinger FW (2012) Demografischer Wandel, alternde Belegschaften und betriebliche Innovation. *Rostocker Beiträge zur Wirtschafts- und Organisationspsychologie*, vol 8. Universität Rostock, Rostock

Runco MA, Pritzker SR (eds) (2011) *Encyclopedia of Creativity*, 2nd edn. Academic Press, Amsterdam, Boston. ISBN: 978-0-12-375037-2

Salthouse TA (2004) What and When of Cognitive Aging. *Curr Dir Psychol Sci* 13(4):140–144. doi: 10.1111/j.0963-7214.2004.00293.x

Schneider L (2007) Alterung und technologisches Innovationspotential – Eine Linked-Employer-Employee-Analyse. IWH-Diskussionspapiere, vol 2. Institut für Wirtschaftsforschung Halle, Halle (Saale)

Schuler H, Görlich Y (2007) Kreativität. Ursachen, Messung, Förderung und Umsetzung in Innovation. *Praxis der Personalpsychologie*, vol 13. Hogrefe, Göttingen. ISBN: 978-3-8017-2028-5

Simonton DK (1997) Creative productivity: A predictive and explanatory model of career trajectories and landmarks. *Psychol Rev* 104(1):66–89. doi: 10.1037/0033-295X.104.1.66

Simonton DK (2012) Creative productivity and aging: an age decrement – or not? In: Whitbourne SK, Sliwinski MJ (eds) *The Wiley-Blackwell handbook of adulthood and aging*. Wiley-Blackwell, Chichester, West Sussex, ISBN: 978-1-4443-3147-9, pp 477–496

Simonton DK (2013) Age and Creative Productivity. In: Carayannis EG (ed) *Encyclopedia of Creativity, Invention, Innovation and Entrepreneurship*. Springer, New York, ISBN: 978-1-4614-3857-1, pp 40–44. doi: 10.1007/978-1-4614-3858-8_345

Verworn B, Hipp C, Schwarz D (2007) Gefährden alternde Belegschaften die Innovationsfähigkeit deutscher Unternehmen? Ergebnisse einer ersten kritischen Analyse. Chair of Organization, Human Resource & General Management: Working Paper Series, vol 4. Brandenburgische Technische Universität, Cottbus

AUTORIN

Dipl.-Ing. Sandra Klatt
Technische Hochschule Wildau
Forschungsgruppe Innovations- und Regionalforschung
sandra.klatt@th-wildau.de

Publish or Perish? Neue Ansätze in der Evaluation von Wissenschaftlerleistungen

Dana Mietzner*, Frank Hartmann

Zusammenfassung

Wenn es um die Bewertung von wissenschaftlichen Leistungen geht, berücksichtigt die aktuelle Evaluationspraxis nur eine begrenzte Anzahl an Dimensionen von Qualität und Relevanz von Forschung und Lehre und entspricht damit nicht mehr den Anforderungen, die aus der Komplexität des Wissenschaftssystems resultieren. Mit dem im Rahmen dieses Beitrages skizzierten ACUMEN-Portfolio wird ein ganzheitlicher Bewertungsansatz prototypisch vorgestellt, der Differenzierungen im Hinblick auf unterschiedliche Wissenschaftsdisziplinen ermöglicht und die Perspektive des einzelnen Wissenschaftlers in den Mittelpunkt der Evaluation rückt. Das ACUMEN-Portfolio ist ein Ergebnis des im Europäischen 7. Forschungsrahmenprogramm durchgeführten Projektes ACUMEN – Academic Careers Understood through Measurements and Norms. Das Projekt wurde von März 2011 bis Februar 2014 gemeinsam von neun Partnern¹ aus sieben Ländern unter der Leitung der Universität Leiden (NL), Centre for Science and Technology Studies (CWTS) durchgeführt.

Abstract

When researchers are evaluated, current evaluation practices consider only a limited number of aspects in terms of quality and relevance for research and teaching. However, today, the scientific system is characterised by increasing levels of complexity and dimension that are not fully represented by predominant evaluation practices and their methodological shortcomings. In this article, we present the ACUMEN portfolio prototype as a holistic approach, which considers differences between several scientific disciplines and puts the perspective of the single researcher in the focus of evaluation. The ACUMEN portfolio is one result of the European FP 7 research project ACUMEN – Academic Careers Understood through Measurements and Norms. The project took place from March 2011 until February 2014 in joint collaboration with nine partners from seven countries under the lead of the University of Leiden (NL), Centre for Science and Technology Studies (CWTS).

1. AUSGANGSSITUATION

Wenn es um die Bewertung von wissenschaftlichen Leistungen, z. B. im Zusammenhang mit der Bewerbung um eine Professur, eine Position als Forschungsgruppenleiter/in, einen akademischen Preis, die Aufnahme in ein Doktorandenprogramm oder eine individuelle Karrierebewertung geht, ist die Evaluationspraxis heute durch bibliometrische Messkriterien wie den Journal Impact-Faktor (IF) oder die Anzahl der Publikationen in internationalen peer-reviewed Journals geprägt. Die Anzahl der Publikationen in hochrangigen Journals mit einem entsprechenden Impact

Faktor haben – auch in Abhängigkeit von der jeweiligen wissenschaftlichen Disziplin – durchaus ihre Berechtigung. Dennoch weist die ausschließliche Berücksichtigung dieser Faktoren Limitierungen auf wenn es darum geht, Wissenschaftler unter Beachtung unterschiedlicher und vielfältiger Karriere- und Lebenspfade und unter Berücksichtigung des jeweiligen Kontextes und Ziels der Evaluation differenziert zu betrachten (Wildgaard 2014, Tatum & Wouters 2013, Bar Ilan et al. 2014).

Im ACUMEN-Projekt gingen die beteiligten Projektpartner von der grundlegenden Annahme aus, dass sich in den vergangenen Jahren europaweit

Diskrepanzen zwischen den externen Funktionen von Wissenschaft und Forschung und den internen Bewertungskriterien für die Leistungsfähigkeit und Qualität wissenschaftlichen Arbeitens und Forschens herausgebildet haben. Angesichts zunehmender Differenziertheit der Funktionen von Wissenschaft und Forschung, etwa hinsichtlich der ökonomischen Verwertbarkeit, der Anwendungsvielfalt auch in solchen Bereichen wie Soziales und Kultur oder der unterschiedlichsten Beratungsmöglichkeiten von Wissenschaft für Politik, Wirtschaft, Verwaltung oder auch NGOs, zeigen sich die Grenzen interner Bewertungslogiken besonders

¹ Leiden University (Niederlande), Bar Ilan University (Ramat Gan, Israel), Agencia estatal consejo superior de investigaciones científicas (Madrid, Spanien), University of Wolverhampton (Großbritannien), Estonian Research Council (Tartu, Estland), Humboldt-Universität (Berlin, Deutschland), Technische Hochschule Wildau (Wildau, Deutschland), Danmarks Biblioteksskole (Kopenhagen, Dänemark), eHumanities Group – KNAW (Amsterdam, Niederlande).

deutlich. Dies äußert sich beispielsweise:

- in der Berücksichtigung einer nur begrenzten Anzahl an Dimensionen von Qualität und Relevanz von Forschung und Lehre, oft vor dem Hintergrund monodisziplinärer Perspektiven,
- in einem wachsenden Druck auf traditionelle Formen der Evaluation durch die zunehmende Größe und Komplexität des Wissenschaftssystems,
- in neuen Anforderungen an das Evaluationssystem aufgrund der Veränderungen in der Art und Weise der Produktion wissenschaftlichen Wissens und dessen Kommunikation,
- in der Erkenntnis profunder methodologischer Begrenzungen der Aussagefähigkeit von Zitationsmethoden sowie
- im Gender bias bei der Bewertung der Leistungsfähigkeit von Wissenschaftlern.

Für die Lösung dieser Probleme wollte auch das ACUMEN-Projekt einen Beitrag leisten, der im ACUMEN-Portfolio als einem neuen Bewertungsinstrument zum Ausdruck kommt. Bei der Entwicklung eines neuen Bewertungsansatzes waren (1) Differenzierungen bezüglich unterschiedlicher Disziplinen, unterschiedlicher Typen von Forschungseinrichtungen sowie staatlicher Evaluationspraktiken zu berücksichtigen. (2) Die Perspektive des einzelnen Wissenschaftlers sollte in den Mittelpunkt der Evaluation rücken. Diese selbst sollte weniger als Outputbewertung verstanden werden, sondern vielmehr als ein Kommunikationsprozess zwischen Wissenschaftler und Evaluator, in welchem die Wirkungen der Evaluation auf den Wissenschaftler selbst sowie auf den Evaluator eruiert und bewertet werden. (3) Generelle Evaluationskonzepte, die

sich hinter Begriffen wie „Exzellenz“, „Originalität“ oder „Soziale Relevanz“ verbergen, sollten aufgebrochen werden, um die soziale und kulturelle Vielfalt unterschiedlicher Evaluationspraktiken besser verstehen zu können.

2. ENTWICKLUNG DES ACUMEN-PORTFOLIOS ALS NEUER ANSATZ IN DER EVALUATIONSPRAXIS – METHODISCHER ANSATZ

Um geeignete Faktoren auswählen zu können, die im Rahmen des ACUMEN-Portfolios Berücksichtigung finden sollten, wurden in einem ersten Schritt unterschiedliche Typen an neuen und ergänzenden Indikatoren identifiziert und im Hinblick auf ihre Tauglichkeit für die Evaluation von Wissenschaftlerleistungen durch die am Projekt beteiligten Experten bewertet. Es wurden web Impact-metrics-Indikatoren, die auf online verfügbaren Präsentationen, digitalen Büchern, Syllabi, online verfügbaren Videos oder Wissenschaftsblogs basieren, herangezogen und Möglichkeiten der automatisierten Suche dieser Indikatoren untersucht. Auch die in digitalen Bibliotheken, wie z. B. CiteSeer, Google Scholar und Google Books, verfügbaren Informationen wurden vor dem Hintergrund der Suche nach Indikatoren bewertet (Kousha & Thelwall 2014a). Dabei wurde z. B. auch die Anzahl der Downloads als ein Indikator für den Nutzen und die Verbreitung von wissenschaftlichen Erkenntnissen berücksichtigt (Kousha & Thelwall 2014b). Es wurde auch hinterfragt, welche Rolle Google Scholar als Zitationsmaßstab durch die Messung der Anzahl an Zitationen oder die Ermittlung des h-index² spielen kann (Hirsch 2005, Bar Ilan 2008). Im Ergebnis dieser Untersuchung kann festgestellt werden, dass eine Vielzahl an möglichen web-basierten Indikatoren existiert, diese jedoch aufgrund fehlender Qualitätskontrolle sorgfältig ausgewählt und verwendet werden müssen und somit nur eine Ergänzung zu herkömmlichen Indikatoren darstellen können.

Zusätzlich wurden sogenannte Altmetrics-Indikatoren („alternative Metrics“ oder „Article Level Metrics“) als neue Form der Impact-Messung diskutiert, die den Einfluss eines Autors auf der Ebene eines einzelnen Artikels oder Buches auf das jeweilige Forschungsfeld aufzeigen und bewerten helfen. Typische Altmetrics-Indikatoren erfassen die Anzahl von Aufrufen (sogenannte Views), Downloads, Lesern/Abonnenten oder Kommentaren auf Mendeley (Referenz Manager), YouTube (Kousha & Thelwall 2012, Kousha et al. 2012), Academia.edu (vgl. Thelwall & Kousha 2014a) oder researchgate.net (vgl. Thelwall & Kousha 2014b) sowie Blog- oder Tweet-Zitationen. Damit adressieren diese Faktoren eher die Reichweite in einer breiteren Öffentlichkeit als in der jeweiligen Wissenschaftsdisziplin. Diese Form von Indikatoren kann insbesondere dann eine Rolle spielen, wenn herkömmliche Indikatoren nicht verfügbar oder für den spezifischen Evaluationszweck als nicht geeignet angesehen werden (ACUMEN 2014a: 17 f.).

Neben der Betrachtung der web-basierten Indikatoren wurden im Rahmen des ACUMEN-Projektes Internetpräsentationen von 1.500 viel zitierten europäischen Wissenschaftlern ausgewertet, um Rückschlüsse auf den Nutzen von Informationen von Internetpräsentationen für ausgewählte Inhalte des Portfolios ziehen zu können (vgl. Kousha & Thelwall 2013). Insgesamt konnte festgestellt werden, dass zwar immerhin über 70 % Wissenschaftler über eine Internetpräsenz verfügen, das Potenzial aber noch nicht ausgeschöpft ist und somit die Möglichkeiten des Wissensaustauschs und der Wissensverbreitung noch nicht in vollem Umfang genutzt werden (vgl. Más-Bleda & Aguillo 2013).

In einem nächsten Schritt wurde der Portfolio-Ansatz in einem iterativen Vorgehen im Rahmen von zwei Expertenworkshops und mehreren Feedbackrunden schrittweise entwi-

² h-index = Hirsch-Index, gemessen wird die Anzahl der Zitierungen eines Wissenschaftlers verteilt auf alle seine Publikationen, h-index = persönlicher „Impact-Faktor“ im jeweiligen Wissenschaftsgebiet. Zur Berechnung des h-index kann das Web of Science (WoS) genutzt werden (kostenpflichtig). Dabei muss jedoch beachtet werden, dass nur die im WoS erfassten Publikationen berücksichtigt werden. Google bietet inzwischen auf Basis von Google Scholar kostenlose Zitationsanalysen an. Siehe: <http://scholar.google.com/citations>.

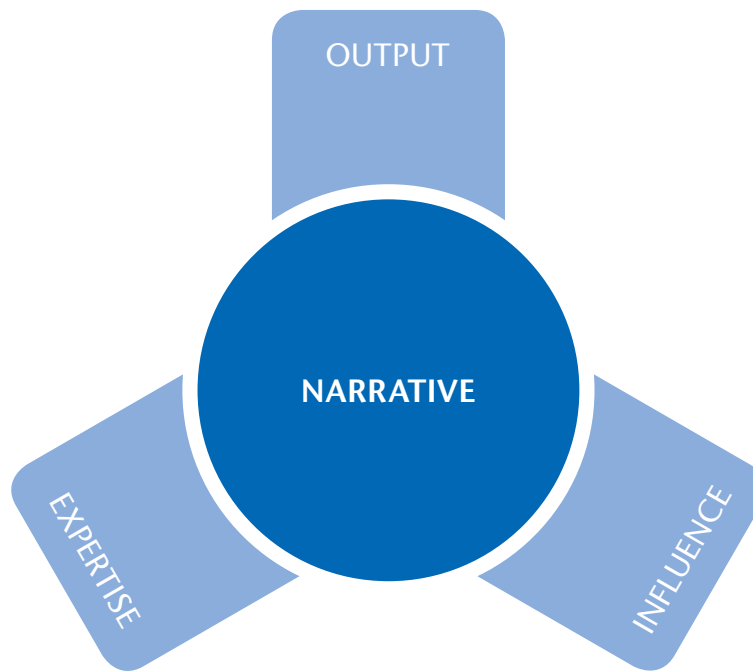


Abb. 1) ACUMEN-Portfolio und assoziierte Sub-Portfolios.

ckelt, getestet, überarbeitet sowie mit der angesprochenen Zielgruppe getestet und potenziellen Evaluatoren diskutiert. In diesen Prozess waren die Autoren intensiv einbezogen. Die im Rahmen der Expertenworkshops (Januar 2013 in Madrid und März 2013 in Kopenhagen) einbezogenen Experten aus sieben Ländern sind ausgewiesen im Bereich Scientometric und verwandten Wissenschaftsbereichen. Somit konnte auf eine breite Expertenbasis zu bibliometrischen Faktoren, web impact metrics/web indicators und Altmetrics-Indikatoren zurückgegriffen werden. Im Rahmen der Expertenworkshops wurden verschiedene Teams gebildet und schrittweise Indikatoren gesammelt, bewertet, überprüft, hinterfragt und konsensorientiert in das ACUMEN-Portfolio überführt. Die vorgeschlagenen Indikatoren wurden mithilfe von Bewertungsmethoden systematisch zusammengefasst und zunehmend fokussiert. Durch das schrittweise Vorgehen und den Wechsel von intensiven Workshop-Phasen, Nachbearbeitungen und virtuellen Abstimmungen und Diskussionen konnten schrittweise Redundanzen reduziert und ein ganzheitlicher Portfolioansatz entwickelt werden.

Das zunächst prototypisch entwickelte Portfolio wurde anhand von typischen Anwendungsfällen weiter erprobt und

im Hinblick auf seine Tauglichkeit in unterschiedlichen Evaluationsszenarien untersucht. In diesem iterativen Prozess wurde deutlich, dass eine ausschließliche Verwendung von outputorientierten Indikatoren nur begrenzt geeignet ist, um die Komplexität im Wissenschaftsumfeld und die Vielfalt der Erfahrungen, Expertise, Einflüsse und individuellen, persönlichen Kompetenzen von Wissenschaftlern in unterschiedlichen Phasen ihrer Karriereentwicklung und Evaluationsszenarien abzubilden.

3. ACUMEN-PORTFOLIO – EIGENSCHAFTEN

Ziel des ACUMEN-Portfolios ist es, einen ganzheitlichen Überblick zu der jeweiligen Expertise, zum generierten Output und dem Einfluss (Influence) des Wissenschaftlers darzustellen. Zudem sollen die Wissenschaftler die Möglichkeit haben, besondere Fähigkeiten, Ergebnisse oder Ereignisse hervorzuheben und den Arbeitskontext deutlich zu machen. Das ACUMEN-Portfolio wird zu diesem Zweck in die drei Bereiche Expertise, Output und Influence aufgegliedert (vgl. Abbildung 1). Die jeweiligen Bereiche des Portfolios werden mit einem Set an qualitativen und quantitativen Indikatoren und Referenzen hinterlegt. Zudem wird das Portfolio mit einem Bericht un-

terlegt, der die drei Portfoliobereiche miteinander verbindet und dem Wissenschaftler die Möglichkeit bietet, auf die jeweilige Evaluationssituation bezogen, qualitative Informationen an den Evaluator zu übermitteln und besonders relevante Aspekte in „erzählerischer Form“ hervorzuheben. Mit diesem Instrument wird das Portfolio dem Anspruch gerecht, die Kommunikation zwischen Wissenschaftlern und Evaluatoren anzuregen.

In den nachfolgenden Darstellungen sind die Indikatoren der jeweiligen Sub-Portfolios im Überblick dargestellt und kurz erläutert (ACUMEN 2014b: 101 ff.). Dabei werden die einzelnen Sub-Portfolios in einzelne Indikatorenkategorien untergliedert, die wiederum durch einzelne Faktoren näher beschrieben werden.

Tab. 1: Acumen-Sub-Portfolio-Expertise

Expertise	Sub-Faktor	Beschreibung und Nachvollziehbarkeit
Wissenschaftliche Expertise	Theorie	<ul style="list-style-type: none"> Fassen Sie Ihre theoretische Expertise in wenigen Sätzen zusammen und belegen Sie diese (z. B. mit einem zitierten Artikel). Diese Expertise kann ein theoretisches Konzept oder ein Paradigma sein, dem Sie folgen. Wenn dies nicht auf Sie zutrifft, z. B. weil sie empirisch arbeiten, schreiben Sie bitte: „Trifft nicht auf mein Forschungsgebiet zu.“
	Gegenstand	<ul style="list-style-type: none"> Fassen Sie Ihre gegenstandsspezifische Expertise in wenigen Sätzen zusammen und belegen Sie diese (z. B. mit einem zitierten Artikel). Das betrifft normalerweise Ihre Hauptforschungsgebiete.
	Methode	<ul style="list-style-type: none"> Fassen Sie Ihre methodologische Expertise in wenigen Sätzen zusammen und belegen diese (z. B. mit einem zitierten Artikel). Dies bezieht sich auf die wichtigsten Methoden, die Sie im Forschungsprozess verwenden.
	Originalität	<ul style="list-style-type: none"> Fassen Sie die Originalität Ihrer Forschungsarbeit in einigen wenigen Sätzen zusammen und belegen Sie diese.
Wissenstransfer-Expertise	Überprüfung/ Reviewing	<ul style="list-style-type: none"> Geben Sie die Anzahl von (a) Konferenzbeiträgen und (b) Zeitschriftenartikeln an, die Sie begutachtet haben, und (c) geben Sie Beispiele für entsprechende Journals oder Konferenzen an (Benennen Sie dabei die Top 3.).
	Entrepreneurship	<ul style="list-style-type: none"> Führen Sie Ihre Entrepreneurship-Aktivitäten auf (z. B. Initiierung oder Beteiligung an Spin-Offs, gemeinsame Projekte mit der Industrie (Benennen Sie dabei die Top 3.).
Ausbildungs-Expertise	Kurse gelehrt/ entwickelt	<ul style="list-style-type: none"> (a) Geben Sie die etwaige Anzahl von Lehrstunden an _____. (b) Beschreiben Sie Ihre Lehrveranstaltungen (ohne online-Lehrveranstaltungen, diese werden unter Output erwähnt). (Benennen Sie dabei die Top 3.).
	Weitere	<ul style="list-style-type: none"> Geben Sie beispielsweise Summer Schools oder Exkursionen an.
Technologische Expertise	Methoden	<ul style="list-style-type: none"> Fassen Sie Ihre Methodenexpertise in wenigen Sätzen zusammen und belegen Sie diese.
	Tools + Laborausstattung	<ul style="list-style-type: none"> Charakterisieren Sie Ihre Laborausstattung und spezielle Methoden, die Sie einsetzen. Belegen Sie dies z. B. mit Projekten oder zitierten Publikationen.
	Software	<ul style="list-style-type: none"> Beschreiben Sie kurz Ihre Software-Expertise und belegen Sie diese.
	Datenmanagement, Daten	<ul style="list-style-type: none"> Beschreiben Sie kurz Ihre Datenmanagement-Expertise. Welche Datenbasen nutzen Sie? Belegen Sie diese Expertise.
Kommunikations-Expertise	Sprachen	<ul style="list-style-type: none"> Listen Sie Ihre Fremdsprachenkenntnisse auf, einschließlich des Sprachniveaus.
	Präsentationen	<ul style="list-style-type: none"> Geben Sie Ihre Keynotes/Invited Talks für Institutionen oder Konferenzen an (Benennen Sie die Top 3.).
	Veröffentlichungen	<ul style="list-style-type: none"> Geben Sie Ihre Auszeichnungen für Publikationen an (Benennen Sie die Top 3.).
	Öffentliches Engagement	<ul style="list-style-type: none"> Geben Sie Beispiele für Interviews in Rundfunk- und Fernsehmedien (Benennen Sie die Top 3.).
	Organisations-Expertise	Management
	Beratung	<ul style="list-style-type: none"> Nennen Sie beratene Institutionen (Benennen Sie die Top 3.).
	Projektleitung	<ul style="list-style-type: none"> Nennen Sie Projekte und geleitete Teams, einschließlich Größe der Teams und ob es sich um internationale Kooperationen handelt (Benennen Sie die Top 3.).
	Kooperation	<ul style="list-style-type: none"> Mitarbeit in Projekten und Teams, einschließlich Größe des Teams und ob es sich um internationale Kooperationen handelt. Beschreiben Sie Ihre Position im Team (Benennen Sie die Top 3.).
	Administration und Ausschüsse	<ul style="list-style-type: none"> Beschreiben Sie Ihre administrativen Funktionen, einschließlich Mitgliedschaften in Ausschüssen, Vorträge oder Sekretärsaufgaben, Arbeiten als Organisator von Konferenzen ... (Benennen Sie die Top 3.).
Weitere Expertise		Nennen Sie weitere Expertisen und belegen Sie diese (Benennen Sie dabei die Top 3.).

Tab. 2: ACUMEN-Sub-Portfolio-Output

Expertise	Sub-Faktor	Beschreibung und Nachvollziehbarkeit
Wissenschaft	Bücher	<ul style="list-style-type: none"> Anzahl von Ihnen publizierter wissenschaftlicher Bücher (ausgenommen Selbstverlag): _____ Liste der von Ihnen publizierten Bücher (Benennen Sie die Top 3.).
	Buchkapitel	<ul style="list-style-type: none"> Anzahl der von Ihnen publizierten Buchkapitel: _____ Liste der von Ihnen publizierten Buchkapitel (Benennen Sie dabei die Top 3.).
	Reviews	<ul style="list-style-type: none"> Anzahl der von Ihnen publizierten Buchreviews: _____
	Leitartikel/ Editorials	<ul style="list-style-type: none"> Anzahl der von Ihnen publizierten Leitartikel/Editorials: _____
	Zeitschriftenartikel	<ul style="list-style-type: none"> Anzahl der von Ihnen begutachteten Zeitschriftenartikel oder Konferenzbeiträge: _____ Liste der begutachteten Zeitschriftenartikel oder Konferenzbeiträge (Benennen Sie die Top 3.).
	Konferenzbeiträge	<ul style="list-style-type: none"> Anzahl der von Ihnen publizierten Tagungsbeiträge (Conference Abstracts), Podiumsdiskussionen oder Poster: _____ (Berücksichtigen Sie nicht-publizierte Konferenzbeiträge nicht.)
Kommunikation mit der Öffentlichkeit	Pressemitteilungen	<ul style="list-style-type: none"> Anzahl der von Ihnen publizierten Zeitungsartikel oder Magazinbeiträge: _____ Liste der von Ihnen publizierten Zeitungsartikel oder Magazinbeiträge (Benennen Sie die Top 3.).
	Enzyklopädie-beiträge	<ul style="list-style-type: none"> Anzahl der von Ihnen publizierten Beiträge (ausgenommen Wikipedia oder vergleichbare Medien): _____ Liste der von Ihnen publizierten Beiträge (Benennen Sie die Top 3.).
	Populärwissenschaftliche Bücher/Artikel	<ul style="list-style-type: none"> Anzahl der von Ihnen publizierten Bücher oder Artikel: _____ Liste der von Ihnen publizierten Bücher oder Artikel (Benennen Sie hierbei die Top 3.).
Lehre	Bücher	<ul style="list-style-type: none"> Anzahl der von Ihnen veröffentlichten Textbücher (ausgenommen Selbstverlag): _____ Liste der von Ihnen publizierten Textbücher (Benennen Sie hier ausschließlich die Top 3.).
	Online-Kurse	<ul style="list-style-type: none"> Liste der von Ihnen entwickelten Kurse (einschließlich MOOCs), wann entwickelt? Art der Unterlagen und Anzahl an Studenten jährlich (Benennen Sie die Top 3.).
	Betreute Studenten	<ul style="list-style-type: none"> Hauptbetreuer von noch nicht graduierten Studenten: _____ Studenten Hauptbetreuer von graduierten Masterstudenten: _____ Studenten Hauptbetreuer von Doktoranden: _____ Doktoranden
Akademische Kommunikation im Internet und in Social Media	Online-Präsenz	<ul style="list-style-type: none"> Liste Ihre Online-Präsenz auf: Accounts in Social Media, genutzt für akademische Zwecke, Academic Network Accounts, Digital Repository Accounts, Websites. Wenn zutreffend, geben Sie an, wie aktiv Sie bezogen auf eine Seite sind (Posts pro Jahr bzw. Monat etc., Twitter, Blogs, ResearchGate, SlideShare) (Benennen Sie die Top 3.).
	Online-Beiträge	<ul style="list-style-type: none"> Geben Sie Beispiele für andere Online-Beiträge in der wissenschaftlichen Diskussion an (Benennen Sie die Top 3.).
Datensätze, Software, Tools, Instrumente	Datensätze	<ul style="list-style-type: none"> Anzahl publizierter Datensätze: _____ Kurze Beschreibung der publizierten Datensätze (Benennen Sie hierbei nur die Top 3.).
	Software, Tools, Instrumente	<p>Anzahl der entwickelten Software, Tools und Instrumente: _____</p> <p>Kurze Beschreibung der entwickelten Software, Tools und Instrumente (Benennen Sie die Top 3.).</p>

Expertise	Sub-Faktor	Beschreibung und Nachvollziehbarkeit
Schutzrechte	Patente	<ul style="list-style-type: none"> Anzahl der von Ihnen publizierten Patente, Standards, Guidelines: _____ Kurze Beschreibung der von Ihnen publizierten Patente, Standards, Guidelines (Benennen Sie die Top 3.).
	Entdeckungen	<ul style="list-style-type: none"> Anzahl Ihrer Entdeckungen (z. B. DNA-Sequenzen, Tierarten...): _____ Kurze Beschreibung Ihrer Entdeckungen (Beschreiben Sie hierbei nur die Top 3):
Finanzierung & Grants	Finanzierung	<ul style="list-style-type: none"> Anzahl finanzierter Projekte: _____ Gesamte Drittmittelfinanzierung: _____ Kurze Beschreibung der Drittmittelprojekte (Benennung der Top 3.).
Andere		<ul style="list-style-type: none"> Beschreiben Sie weitere Arten von Output (Benennung der Top 3.).

Tab. 3: ACUMEN-Sub-Portfolio-Einfluss

Expertise	Sub-Faktor	Beschreibung und Nachvollziehbarkeit
Einfluss auf die Wissenschaft	Publikationen	<ul style="list-style-type: none"> Anzahl Zitationen für alle Publikationen, Google Scholar: _____ und durchschnittliche Zahl Zitationen je Publikation: _____ Anzahl Zitationen für alle Publikationen, Web of Science oder Scopus: _____ und durchschnittliche Zahl Zitationen je Publikation: _____
	Artikel	<p>Anzahl Zitationen für einen Ihrer Top 3 Artikel, Google Scholar: _____ und Scopus oder Web of Science: _____ Titel: _____ Publikationsjahr: _____ Autoren (in Reihenfolge): _____</p> <p>Anzahl Zitationen für einen anderen Ihrer Top 3-Artikel, Google Scholar: _____ und Scopus oder Web of Science: _____ Titel: _____ Publikationsjahr: _____</p> <p>Anzahl Zitationen für einen anderen Ihrer Top 3-Artikel, Google Scholar: _____ und Scopus or Web of Science: _____ Titel: _____ Publikationsjahr: _____ Autoren (in Reihenfolge): _____</p>
	h-index	h-index, wie in Google Scholar angegeben: _____ h-index, wie in Web of Science der Scopus hinterlegt: _____

Expertise	Sub-Faktor	Beschreibung und Nachvollziehbarkeit
	Bücher	<p>Zitationen für eines Ihrer Top 3-Bücher, Google Books: Titel: _____ Erscheinungsjahr: _____ Autoren (in Reihenfolge): _____</p> <p>Zitationen für ein anderes Ihrer Top 3-Bücher, Google Books: Titel: _____ Erscheinungsjahr: _____ Autoren (in Reihenfolge): _____</p> <p>Zitationen für ein anderes Ihrer Top 3-Bücher, Google Books: Titel: _____ Erscheinungsjahr: _____ Autoren (in Reihenfolge): _____</p> <p>[Um Google-Books-Zitationen für ein Buch zu finden, suchen Sie in Google Books nach dem Titel und scannen Sie manuell die Ergebnisse für Zitationen.]</p>
	Alterskorrigierter h-index	<p>m-Quotient für Google Scholar: _____ m-Quotient für Web of Science oder Scopus: _____</p> <p>[In diesem Portfolio ist der m-Quotient der h-index dividiert durch das akademische Alter.]</p>
	Multi-Autorenschaft	<p>Um Multi-Autorenschaft auszugleichen, benutzen Sie entweder (a) oder (b).</p> <p>a) Durchschnittliche Anzahl von Autoren in Ihren Publikationen, gelistet in Google Scholar (einschließlich Ihrer Person): _____ b) Anteil von Publikationen, gelistet in Google Scholar, in denen Sie Erstautor sind: _____</p> <p>Wenn für Sie Web-of-Science-Publikationen oder Scopus-Publikationen wichtiger sind als Google-Scholar-Publikationen, dann können Sie auf diese verweisen. Bitte machen Sie dies explizit deutlich.</p>
	Wissenschaftspreise	Wissenschaftliche Preise und Ehrungen (regional, national und international) (Benennen Sie die Top 3.).
	Herausgeberschaft und Reviewing	Ihre Hauptaufgaben als Gutachter, Herausgeber oder redaktioneller Beirat (Editorial Board Member). (Benennen Sie hierzu die Top 3.).
	Programm-Komiteearbeit	Ihre Mitgliedschaften in Konferenz/Programm-Ausschüssen (Benennen Sie die Top 3.).

Expertise	Sub-Faktor	Beschreibung und Nachvollziehbarkeit
	Online-Diskussionen – Social Web Follower	<p>Anzahl der Anhänger (Follower), sofern erheblich, bezüglich Ihrer Web-Präsenz (e.g., Academia, Blogs, Twitter) (Benennen Sie die Top 3.).</p> <p>Name der Social Website _____ Anzahl der Anhänger (Follower): _____</p> <p>Name der Social Website _____ Anzahl der Anhänger (Follower): _____</p> <p>Name der Social Website _____ Anzahl der Anhänger (Follower): _____</p> <p>Benennen Sie auch drei interessante Online-Erwähnungen Ihrer Arbeit, die bisher noch keine Erwähnung in diesem Portfolio gefunden haben:</p>
	Downloads	<p>Artikelbezeichnung _____ Anzahl der Downloads _____</p> <p>Artikelbezeichnung _____ Anzahl der Downloads _____</p> <p>Artikelbezeichnung _____ Anzahl der Downloads _____</p> <p>(Top 3 der Downloads)</p> <p>[Downloads werden manchmal auf den Verlagswebseiten ausgewiesen. Schreiben Sie N/A in das dafür vorgesehene Feld, wenn keine Informationen zu dieser Abfrage vorliegen. Sie können an dieser Stelle auch Downloads für elektronische Berichte oder andere Quellen angeben.]</p>
	Mendeley Leser	<p>Artikelbezeichnung _____ Anzahl der Mendeley-Leser _____</p> <p>Artikelbezeichnung _____ Anzahl der Mendeley-Leser _____</p> <p>Artikelbezeichnung _____ Anzahl der Mendeley-Leser _____</p> <p>Um die Anzahl der Mendeley-Leser zu bestimmen, besuchen Sie die Seite „Mendeley.com“ und suchen Sie nach jeder Ihrer Publikationen und entnehmen Sie dem Eintrag die entsprechende Leseranzahl. (Benennen Sie hierbei ausschließlich die Top 3.).</p>
	Keynotes-Einladungen	<p>Anzahl Einladungen für Keynote-Talks auf Konferenzen außerhalb Ihres Landes: _____</p> <p>Anzahl Einladungen für Keynote-Talks auf Konferenzen innerhalb Ihres Landes: _____</p> <p>Anzahl Einladungen für Keynote-Talks von Universitäten außerhalb Ihres Landes: _____</p> <p>Anzahl Einladungen für Keynote-Talks von Universitäten innerhalb Ihres Landes: _____</p> <p>Liste der Einladungen für alle Arten [einschließlich Name und Ort] (Benennen Sie die Top 3.).</p>
Einfluss auf Gesellschaft	Allgemeine Öffentlichkeit	<p>Anzahl publizierter Magazin- oder Zeitungsartikel (geschrieben über Ihre Forschung, nicht von Ihnen) _____</p> <p>Beispiele publizierter Magazin- oder Zeitungsartikel (geschrieben über Ihre Forschung, nicht von Ihnen) (Benennen Sie die Top 3):</p> <p>Beispiele für Websites (über Ihre Forschung, nicht von Ihnen) (Listen Sie die Top 3 auf, einschließlich Titel und Autor):</p>

Expertise	Sub-Faktor	Beschreibung und Nachvollziehbarkeit
	Tweets oder Blog-Posts über Publikationen	<p>Artikelbezeichnung _____ Anzahl der Tweets: _____ (bezogen auf einen Artikel) Tweets können lediglich in Echtzeit nachvollzogen werden. Aber sie können auch, sofern sie verzeichnet worden sind, auf der jeweiligen Website nachträglich eingesehen werden. Auch können Sie unter Altmetric Bookmarklet www.altmetric.com/bookmarklet.php kostenfrei abgerufen werden.</p> <p>Artikelbezeichnung _____ Anzahl der Blog-Posts: _____ (bezogen auf einen Artikel) [Blog-Posts können via Google identifiziert werden. Dazu muss nach dem entsprechenden Publikationsnamen unter Google Blog Search (dazu das Google-Hauptmenü auswählen und die Kategorie „Blogs“ auswählen) recherchiert werden. Dabei können zahlreiche falsche Suchergebnisse ausgeworfen werden, was eine Überprüfung der Ergebnisse und erneute Filterung erforderlich macht.]</p>
	Beratung	Anzahl der Anfragen nach Spezialwissen von außerhalb des akademischen, ökonomischen oder ausbildenden Umfeldes, einschließlich Mitgliedschaft in entsprechenden Komitees: _____ Beispiele für solche Anfragen/Mitgliedschaften (Benennen Sie die Top 3.).
	Berufspraxis	Beispiele für Einsatz Ihrer Expertise in der Berufspraxis (z. B. Tätigkeit als Anwalt) (Benennen Sie die Top 3.).
	Gesetze, Regulierung, Richtlinien	Gesetze, Regulierungen, Richtlinien etc., die (zumindest teilweise) basierend auf Ihren Forschungsarbeiten initiiert, entwickelt oder verändert wurden. Bitte kurze Erklärung und Verweise auf Projekte, Publikationen oder andre Belege hierfür (Benennen Sie die Top 3.).
Einfluss auf Wirtschaft	Einnahmen	Gesamtes Drittmiteileinkommen (Finanzmittel aus kommerziellen Aktivitäten): _____
	Beratung	Anzahl Beratungen oder Beratungspositionen für Unternehmen: _____ _____
	Patentzitationen	Anzahl von Patenten, die Ihre Arbeiten zitieren: _____ Namen von Patenten, die Ihre Arbeiten zitieren (Benennen Sie die Top 3): [Zitationen von Patenten, sofern welche in Google Scholar Citations aufgeführt sind.]
	Patentzitationen	Anzahl von Zitationen Ihrer Patente (wenn) aus wissenschaftlichen Dokumenten: _____ [Zitationen von Patenten, sofern welche in Google Scholar Citations aufgeführt sind.]
	Patentzitationen	Anzahl von Zitationen Ihrer Patente (wenn) aus wissenschaftlichen Dokumenten: _____ [Zitationen von Patenten, sofern welche in Google Scholar Citations aufgeführt sind.]
	Spin-Offs	Anzahl von Ihnen realisierter Spin-Off-Unternehmungen: _____

Expertise	Sub-Faktor	Beschreibung und Nachvollziehbarkeit
Einfluss auf Lehre	Preise	Lehrpreise (Benennen Sie die Top 3.).
	Online-Views	<p>Anzahl der Aufrufe/Views Ihrer Top 3 SlideShare oder Youtube-Präsentationen, sofern nennenswert.</p> <p>Präsentations-URL: _____ Aufrufe/Views _____</p> <p>Präsentations-URL: _____ Aufrufe/Views _____</p> <p>Präsentations-URL: _____ Aufrufe/Views _____</p> <p>[Sie können an dieser Stelle auch vergleichbare andere Webseiten, wie bspw. Vimeo oder andere Online-Lernplattformen, und die dazugehörige Anzahl an Aufrufen angeben.]</p>
	Syllabus-Erwähnungen	<p>Anzahl der Online-Lehrmaterialien oder Skripte, welche Ihre akademische Arbeit beinhalten (Benennen Sie die Top 3.).</p> <p>Veröffentlichung: _____ Syllabus Vermerk: _____</p> <p>Veröffentlichung: _____ Syllabus Vermerk: _____</p> <p>Veröffentlichung: _____ Syllabus Vermerk: _____</p> <p>[Hinweis: Syllabi können via Google identifiziert werden. Dazu nach folgenden Begrifflichkeiten suchen: Syllabus „[Titel der Publikation]“ oder „Leseliste“ „[Titel der Publikation]“, in denen [Titel der Publikation] eine Schlüsselpublikation ist. Dazu können Sie auch verschiedene Sprachversionen des Begriffs „reading list“ ausprobieren. Da dies eine sehr zeitintensive Suche ist, benennen Sie an dieser Stelle nur Syllabus-Erwähnungen, die im Rahmen Ihrer Arbeit von sehr großer Bedeutung sind.]</p>
	Lehrbuch	<p>Gesamtverkaufszahlen Ihrer Lehrbuchexemplare: _____</p> <p>[Genutzt werden können Amazon-Verkaufsplatzierungen für ähnliche Bücher, wenn Verkaufszahlen nicht vorhanden sind] (Benennen Sie die Top 3.). Um dies zu tun, suchen Sie nach Ihrem Buchtitel oder der ISBN-Nummer in Amazon.com und finden Sie „Amazon Best Sellers Rank“ in den Produkt- bzw. Artikeldetails</p>
	Gastvorlesungen	Anzahl von Gastvorlesungen an anderen Universitäten: _____
	Datensätze oder Software-Downloads	<p>Anzahl der Downloads von Datensätzen oder Anwendungen (Benennen Sie die Top 3.).</p> <p>Name der Software/Datensatz _____ Anzahl Downloads _____</p> <p>Name der Software/Datensatz _____ Anzahl Downloads _____</p> <p>Name der Software/Datensatz _____ Anzahl Downloads _____</p> <p>[auch Zitationen aus Google Scholar können hierfür genutzt werden]</p>
Andere		Andere Einflussarten (Benennen Sie die Top 3 und erläutern diese.).

4. EINSATZMÖGLICHKEITEN DES ACUMEN-PORTFOLIOS UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Einsatzmöglichkeiten des ACUMEN-Portfolios sind vielfältig. So können das Portfolio oder nur Teilelemente aus dem Portfolio genutzt werden, um die Eignung von Wissenschaftlern für offene Positionen an Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen zu bewerten. Dabei werden systematisch unterschiedliche Aspekte berücksichtigt, die weit über die Publikationsaktivitäten in hochrangigen Zeitschriften oder die Summe eingeworbener Drittmittel hinausgehen. In diesem Zusammenhang kann das Portfolio auch angewandt werden, um zu entscheiden, wann Wissenschaftler in höhere Positionen wechseln sollten. Das Portfolio stellt die Bewertung auf eine transparente Basis und unterstützt eine systematische Karriereplanung und -entwicklung. Auch im Zusammenhang mit der Bewerbung um Drittmittel kann das Portfolio eine geeignete Grundlage darstellen, um die Vergabeentscheidungen von Forschungsmitteln zu unterstützen. Ein besonderer Aspekt liegt in der Möglichkeit der Selbstevaluation und auch im Monitoring der individuellen Entwicklung durch die Wissenschaftler. In diesem Sinne wird das ACUMEN-Portfolio dann nicht in erster Linie für externe Evaluatoren genutzt, sondern ermöglicht die individuelle Reflektion und zeigt Stärken und Schwächen auf als Grundlage für eine weitere, eigene Karriereplanung.

Mit dem Ansatz der im ACUMEN-Portfolio vorgestellten Indikatoren wird der mit dem Begriff „publish or perish“ assoziierte Bewertungsmaßstab „Anzahl der Publikationen in hochrangigen Journals“ zumindest um Indikatoren ergänzt, die eine weitaus differenzierte Bewertung von Wissenschaftlern und ihren Leistungen unter Berücksichtigung des jeweiligen Kontextes erlauben. Im ACUMEN-Portfolio werden auch Aspekte berücksichtigt, die z.B. Aktivitäten der Wissenschaftler im Bereich Technologietransfer oder in der akademischen Lehre erfassen und stärker gewichten als bisher.

LITERATUR

- ACUMEN (2014a) ACUMEN-Periodic Report: Period 2.
- ACUMEN (2014b) Guidelines for Good Evaluation Practice with the ACUMEN Portfolio.
- Bar-Ilan J (2008) Which h-index? – A comparison of WoS, Scopus and Google Scholar. *Scientometrics* 74(2):257–271. doi: 10.1007/s11192-008-0216-y
- Bar-Ilan J, Hartmann F, Havemann F, Larsen B, Mietzer D, Scharnhorst A, Tatum CC (2014) Are You Being Evaluated? Need for New Approaches in Evaluation Practices. In: Kindling M, Greifeneder E (eds) *iConference 2014 Proceedings*. IDEALS, Urbana, IL, ISBN: 978-0-9884900-1-7, pp 1204–1206. doi: 10.9776/14215
- Hirsch JE (2005) An index to quantify an individual's scientific research output. *Proc Natl Acad Sci USA* 102(46):16569–16572. doi: 10.1073/pnas.0507655102
- Kousha K, Thelwall M (2012) Motivations for Citing YouTube Videos in the Academic Publications: A Contextual Analysis. In: 17th International Conference on Science and Technology Indicators (STI), 5–8 Sep 2012, Montréal, Canada
- Kousha K, Thelwall M, Abdoli M (2012) The role of online videos in research communication: A content analysis of YouTube videos cited in academic publications. *J Am Soc Inf Sci Tec* 63(9):1710–1727. doi: 10.1002/asi.22717
- Kousha K, Thelwall M (2013) Evaluating the Web Research Dissemination of EU Academics: A Multi-Discipline Outlink Analysis of Online CVs. In: 14th International Society of Scientometrics and Informetrics Conference, 15–20 Jul 2013, Vienna, Austria
- Kousha K, Thelwall M (2014a) An automatic method for extracting citations from Google Books. *J Assn Inf Sci Tec* (Online Version before inclusion in an issue). doi: 10.1002/asi.23170
- Kousha K, Thelwall M (2014b) Web Impact Metrics for Research Assessment. In: Cronin B, Sugimoto CR (eds) *Beyond Bibliometrics. Harnessing Multidimensional Indicators of Scholarly Impact*. MIT Press, Cambridge MA, ISBN: 978-0-262-02679-6, pp 289–306
- Más-Bleda A, Aguillo IF (2013) Can a personal website be useful as an information source to assess individual scientists? The case of European highly cited researchers. *Scientometrics* 96(1):51–67. doi: 10.1007/s11192-013-0952-5
- Tatum C, Wouters P (2013) Acumen Portfolio: Resources for Evaluation of Individual Researchers. In: euroCRIS Membership Meeting, 14 Nov 2013, Porto, Portugal
- Thelwall M, Kousha K (2014a) Academia.edu: Social network or Academic Network? *J Assn Inf Sci Tec* 65(4):721–731. doi: 10.1002/asi.23038
- Thelwall M, Kousha K (2014b) ResearchGate: Disseminating, communicating, and measuring Scholar-ship? *J Assn Inf Sci Tec* (Online Version before inclusion in an issue). doi: 10.1002/asi.23236
- Wildgaard L (2014) Just Pimping the CV? The Feasibility of Ready-to-use Bibliometric Indicators to Enrich Curriculum Vitae. In: Kindling M, Greifeneder E (eds) *iConference 2014 Proceedings*. IDEALS, Urbana, IL, ISBN: 978-0-9884900-1-7, pp 954–958. doi: 10.9776/14326

AUTOREN

Prof. Dr. rer. pol. Dana Mietzner
Technische Hochschule Wildau
Forschungsgruppe Innovations- und Regionalforschung
dana.mietzner@th-wildau.de

Dr. phil. Frank Hartmann
Technische Hochschule Wildau
Forschungsgruppe Innovations- und Regionalforschung
frank.hartmann@th-wildau.de

**Technische Hochschule
Wildau**

*Technical University
of Applied Sciences*

Hochschulring 1
15745 Wildau
Germany

www.th-wildau.de