



Technische  
Hochschule  
Wildau  
*Technical University  
of Applied Sciences*



**Wissenschaftliche Beiträge  
TH Wildau  
2016**

# IMPRESSUM

## HERAUSGEBER

### **Der Präsident der Technischen Hochschule Wildau**

Prof. Dr. László Ungvári  
Hochschulring 1  
15745 Wildau

[www.th-wildau.de](http://www.th-wildau.de)

## REDAKTIONSKOLLEGIUM DER TH WILDAU

Prof. Dr. sc. hum. Marcus Frohme  
Prof. Dr. rer. pol. Sandra Haas  
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](mailto:markus.vossel@th-wildau.de)

## GESAMTHERSTELLUNG

### **STÜRMER & DRÄNGER – Visuelle Kommunikation**

Richard-Sorge-Straße 24  
10249 Berlin

Telefon (030) 48 62 47 64  
[kontakt@stuermer-draenger.de](mailto:kontakt@stuermer-draenger.de)  
[www.stuermer-draenger.de](http://www.stuermer-draenger.de)

Titelfoto: Shutterstock

### **ISSN 0949-8214**

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



Hier finden Sie die Artikel des  
**20. Jahrgangs** zum kostenlosen Download.  
[www.th-wildau.de/forschung/wissbeitraege.html](http://www.th-wildau.de/forschung/wissbeitraege.html)



# WISSENSCHAFTLICHE BEITRÄGE 2016



# INHALTSVERZEICHNIS

Wissenschaftliche Beiträge 2016

## ANGEWANDTE BIOWISSENSCHAFTEN

- 7 Genomweite Identifizierung von chromosomalen Bruchpunkten bei Tumoren unterschiedlicher Gewebe  
*Birgit Bortz, Stefanie Marczok, Heike Pospisil*
- 15 Elektrogesponnene Polymerfasern als neuartiges Material für die Bioelektrokatalyse des Enzyms *Pyrrrolochinolinchinon-abhängige Glukosedehydrogenase*  
*Johannes Gladisch, David Sarauli, Daniel Schäfer, Birgit Dietzel, Burkhard Schulz, Fred Lisdat*
- 23 ECS-Komplex – ein neuer Biomarker bei Wachstumshormonstörungen?  
*Wilhelm Gossing, Lars Radke, Marcus Frohme, Henrik Biering*

## INFORMATIK/TELEMATIK

- 31 A DFD Based Approach to Model Data Processing Solutions  
*Falko Schmalenberg, Ralf Vandenhouten*
- 37 A Modular Mobile Device for Real-Time 3D Streaming  
*Ralf Vandenhouten, Richard Fiebelkorn, Andrea Funke*

## OPTISCHE TECHNOLOGIEN/PHOTONIK

- 45 Advanced Nanophotonics: Silicon-Organic Hybrid Technology  
*Patrick Steglich, Claus Villringer, Silvio Pulwer, Joachim Bauer, Friedhelm Heinrich, Mauro Casalboni, Sigurd Schrader*

## PRODUKTION UND MATERIAL

- 49 Untersuchung zum Ausfall der Strangführungsrollen in der horizontalen Zone einer Brammenstranggussanlage  
*Jörn Bräske, Steffen Klohs, Thomas Mirre*
- 59 Vergleich von Implementierungsmöglichkeiten industrieller Energiemonitoringsysteme für KMU  
*René von Lipinski, Dirk Buße, Jörg Reiff-Stephan*
- 67 Optimierung von Epoxidharzsystemen für PE-Rohrinnenbeschichtungen als Sauerstoffsperrschicht  
*Eckhart Kornejew, Harald Goering, Michael Herzog*

## VERKEHR UND LOGISTIK

- 75 Objective Function Development Based on the Parameters of a Regional Terminal Network  
*Valery M. Samuylov, Oksana D. Pokrovskaya, Lyudmila V. Gashkova, Herbert Sonntag*

## MANAGEMENT UND RECHT

- 81 Analyse optimaler Bestellmengen für unterschiedliche Preisabsatzfunktionen und Rabattarten  
*Matthias Forster, Victoria Scholl*
- 89 What Drives the Success of Pop-Up Stores?  
*Sandra Haas, Lisa Schmidt*
- 97 Die Abo-Commerce-Landschaft in Deutschland: Eine angebotsbezogene Untersuchung  
*Sandra Haas, Torben Schmolke*
- 103 Szenarien zur Transformation von Energieversorgungssystemen als Voraussetzung für die Ableitung von Anforderungen an zukünftige Kompetenzen  
*Frank Hartmann, Dana Mietzner*



# VORWORT

## PROF. DR. LÁSZLÓ UNGVÁRI

Mit der diesjährigen Ausgabe der Wissenschaftlichen Beiträge der TH Wildau feiern wir den 25. Jahrestag unserer Hochschule und den 20. Jahrgang des Hefts zugleich. Seit 20 Jahren dokumentieren wir in dieser Form wissenschaftliche Ergebnisse in ausgewählten Bereichen. Das ist ein schöner Erfolg, der das Engagement der Kolleginnen und Kollegen zeigt. Auch das Jahr 2015 gehört zu den sehr erfolgreichen für die TH Wildau. Die Zahl der Studierenden lag mit 4.044 (31. Oktober 2015) erneut über 4.000. Damit ist sie unumstritten mit Abstand die größte Fachhochschule im Land Brandenburg. Der Anteil der Bildungsausländer betrug im WS 2015/16 23,4%. Auf der Exmatrikulationsfeier 2015 konnten 925 Absolventinnen und Absolventen ihre Zeugnisse entgegennehmen. Seit ihrer Gründung haben über 11.000 Frauen und Männer an der TH Wildau graduiert.

Für unsere sich sehr dynamisch entwickelnde TH Wildau erhöhte sich – nach einem zweijährigen Moratorium (Einfrierung der Grundfinanzierung auf dem Niveau des Jahres 2012) – durch Wiedereinsetzung des Mittelverteilungsmodells des Landes die Grundfinanzierung für 2015 um 1,8 Millionen Euro (14,5%). Für 2016 rechne ich mit einer weiteren Aufstockung der Grundfinanzierung um etwa 600 bis 700 Tausend Euro, so dass wir dann von dieser Seite aus auf knapp 15 Millionen Euro kommen werden. Einen prozentual noch erheblicheren Anstieg konnte die TH Wildau beim Einwerben von Forschungsmitteln im Jahre 2015 verzeichnen. Diese stiegen gleich um knapp 17% auf mittlerweile über 14 Millionen Euro an, was für die Hochschule einen erneuten Drittmittelekord darstellt. Jährlich werden an unserer Hochschule über 400 Projekte parallel bearbeitet. Durch die eingeworbenen Drittmittel verdoppelt sich der Haushalt der Hochschule gemessen an der Grundfinanzierung durch das Land.

Zwei Professorinnen und vier Professoren haben zusammen das Forschungsinstitut „iMEP – Institut für Material, Entwicklung und Produktion“ gegründet. Das Institut vereint Kompetenzen der Kolleginnen und Kollegen aus den Bereichen Automatisierungstechnik, Hochleistungswerkstoffe, Maschinendynamik, Oberflächentechnik sowie Innovations- und Regionalforschung in ein interdisziplinäres Institut. Es ist nach dem „Institut für Angewandte Biowissenschaften“ (IAB) das zweite Forschungsinstitut der TH Wildau und wird die interdisziplinäre Forschungsarbeit an der Hochschule weiter stärken.

Die Hochschule wird als Kompetenzzentrum für wichtige Wissenschaftsdisziplinen wahrgenommen und als Netzwerkpartner in internationalen, bundesweiten und regionalen Forschungsverbänden für den Wissens- und Technologietransfer geschätzt. Wildauer Know-how und Erfahrung in der angewandten Forschung und Entwicklung sind ebenso nachgefragt von international tätigen Großunternehmen wie auch von innovativen kleinen und mittleren Unternehmen.

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 wichtiges Medium für die Präsentation der wissenschaftlichen Arbeit etabliert.

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



Zum Schluss wünsche ich Ihnen eine anregende Lektüre der Wissenschaftlichen Beiträge 2016. 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





# Genomweite Identifizierung von chromosomalen Bruchpunkten bei Tumoren unterschiedlicher Gewebe

Birgit Bortz, Stefanie Marczok, Heike Pospisil\*

## Zusammenfassung

Aufgrund der jährlich ansteigenden Anzahl an Krebsneuerkrankungen und der tödlichen Verläufe von malignen Tumoren gewinnt die vollständige Aufklärung der Tumorgenese und -progression immer mehr an Bedeutung. Für diese können Untersuchungen zu Bruchpunkten, die eine Kopienzahlvariation (CNV) in Krebsgenomen bewirken, genutzt werden. Es wurde eine Pipeline entwickelt, die in der Lage ist, CNVs, Bruchpunktregionen (BPRs) und Gene genomweit mit Hilfe von SNP-Array-Daten zu detektieren. Dazu wurden 2.820 Tumorproben aus 8 Tumorentitäten untersucht und mit 432 Proben aus gesundem Gewebe verglichen. In den Tumorproben wurden vierfach mehr BPRs detektiert, wobei unter 5 % der Gene in den Normalproben betroffen sind. Wir identifizierten 31 hochspezifische BPRs. Die am häufigsten vorkommende Variation umschließt das Gen *KIAA0513*, welches in Verbindung mit der Apoptose steht. Anhand der hier entwickelten Pipeline können erste Einblicke in CNV- und Bruchpunkt-Muster in Tumorgenomen gewonnen werden, die zu einem verbesserten Verständnis der Tumorgenese und somit zu einer verbesserten Diagnostik und Therapie von Krebserkrankungen führen können.

## Abstract

The number of new cancer cases and the deadly courses of malignant tumors are still rising. An entire clarification of tumorigenesis and progression is required for better diagnostics and therapies. Here, we present an analysis of genomic breakpoint patterns, which might cause copy number variations (CNVs) in cancer genomes. Thus, a pipeline was developed which uses SNP array data for the genome-wide detection of CNVs, breakpoint regions (BPRs) and genes. 2,820 tumor samples from eight tumor entities were analyzed and compared with 432 samples from healthy tissue. Four times more BPRs were detected in the tumor samples and only less than 5 % of the affected genes were found to be involved in healthy tissues. We identified 31 highly specific BPRs. The most commonly occurring variation found in our study encloses the *KIAA0513* gene, which is associated with apoptosis. Based on these results, new insights in tumorigenesis are expected.

## 1. Einleitung

Die Zahl der Krebsneuerkrankungen steigt jedes Jahr weiter an. Der „Welt-Krebs-Bericht 2014“ zeigt auf, dass 2012 die Anzahl an Neuerkrankungen auf 12 Millionen gestiegen ist und 8,2 Millionen Menschen an Krebserkrankungen gestorben sind (Stewart & Wild 2014). Diese Zahlen weisen darauf hin, dass die Ursachen der Karzinogenese weitgehend ungeklärt und somit die Präventions-, Diagnose- und Therapiemöglichkeiten noch unzureichend sind.

Es ist schon lange bekannt, dass aufgrund der steigenden Lebenserwartung die Anzahl an Tumorerkrankungen

zunimmt. Jedoch werden zumeist schlechte Umwelteinflüsse und Verhaltensweisen sowie genetische Vorbelastungen als Hauptursachen für die Tumorentstehung genannt (Vogelstein et al. 2013). Nach einer neuen wissenschaftlichen Studie scheinen diese jedoch bei den meisten Tumorarten keine große Rolle zu spielen; sie wirken eher verstärkend auf die Entstehung ein, sodass sich diese Faktoren potenzieren. Dabei gehen die Autoren davon aus, dass während der Teilung zufällige Mutationen in regulatorischen Bereichen bzw. Genen auftreten, die nicht repariert werden (Tomasetti & Vogelstein 2015). Aufgrund dieser somatischen Mutati-

onen bildet sich die kanzerogene Zelle mit ihren typischen Eigenschaften heraus und weist somit (i) ein Wachstum trotz vorhandener Inhibitoren bzw. abwesender Wachstumsfaktoren, (ii) eine Resistenz gegen Apoptose, (iii) die Fähigkeit zur Angiogenese sowie (iv) Gewebeeinfiltration und (v) Metastasenbildung auf (Hanahan & Weinberg 2000). Diese Fähigkeiten können sich durch genetische Veränderungen, die nicht repariert werden, etablieren. Zu diesen genomischen Veränderungen werden die Kopienzahlvariationen (engl. copy number variations, CNVs) gezählt, bei denen eine vom Referenzgenom abweichende Kopienzahl auftritt. Diese entste-

\* korrespondierende Autorin

hen durch fehlerhafte Reparaturmechanismen von DNA-Brüchen während der Replikation bzw. der Rekombination (Redon et al. 2006).

Zahlreiche Studien konnten ein vermehrtes Auftreten von CNVs (Yang et al. 2014) in humanen malignen Tumoren detektieren und einen funktionellen Zusammenhang zur Tumorentstehung nachweisen (Redon et al. 2006, McCarroll et al. 2008).

In einer unserer früheren Studien konnten wir feststellen, dass mit steigendem Tumorstadium vermehrt Regionen mit veränderten Kopienzahlen detektierbar sind. Aufgrund dessen lag die Vermutung nahe, dass die Entstehung von CNVs mit der Kanzerogenese korreliert. Es wurden bei Brustkrebstumoren von Mäusen bestimmte Bruchpunktbereiche identifiziert, in denen vermehrt CNVs auftreten. Diese Bereiche werden in der Literatur als *fragile sites* bezeichnet. In dieser Arbeit wurde untersucht, ob diese Bereiche für verschiedene Tumorarten spezifisch sind, um einen besseren Einblick in die Tumorentstehung und auf die genomischen Auswirkungen zu erhalten (Standfuß et al. 2012). Allerdings basierte diese Arbeit auf wenigen Proben.

In anderen Publikationen konnten bereits sogenannte tumorartspezifische und allgemeine Bruchpunkt(BP)-Hotspots mit einer Auflösung von 1 Mbp beim Menschen detektiert werden (Li et al. 2012).

Es ist jedoch eine genauere Auflösung nötig, wenn solche Bruchpunkt-Muster neben der Aufklärung der Tumorentstehung und -progression auch als Grundlage für die Entwicklung individueller und nebenwirkungsärmerer Medikamente und für frühzeitige und präzise Präventions- und Diagnoseverfahren genutzt werden sollen.

Um die Veränderung der Kopienzahl und die dazugehörigen Bruchpunkte in Tumorgenomen detektieren zu können, werden verschiedene Technologien genutzt. Die beste Auflösung der Ergebnisse liefern derzeit Hochdurchsatz-Sequenzierungstechnologien. Diese sind jedoch meistens sehr kosten- und zeitintensiv. Um ein schnelleres Screening zu ermöglichen, werden die klassischen Array-Technologien vermehrt verwendet. Bei diesem haben sich in letzter Zeit vor allem die SNP-Arrays als Alternative bewährt, da

sie ein gutes Verhältnis von der physikalischen Abdeckung und Schnelligkeit der Analyse bieten (Zhao et al. 2004). Zudem ist der Vorteil der SNP-Array-Analysen, dass ein großer Datenbestand frei zugänglicher Datensätze vorhanden ist.

Um zu untersuchen, ob spezifische Bruchpunkt-Muster in verschiedenen Tumorgenomen bzw. in spezifischen Tumorarten detektiert werden können, wurde eine Pipeline entwickelt, mit der es ermöglicht wird, eine genomweite Identifizierung und Analyse von chromosomalen Bruchpunktregionen und Segmenten veränderter Kopienzahl anhand von SNP-Array-Daten bei verschiedenen humanen malignen Tumoren zu realisieren (Marczok 2014).

## 2. Material und Methoden

### 2.1 SNP-Array-Daten

**Maligne Tumordaten:** Die verwendeten Tumordaten für die genomweite Identifizierung von Bruchpunktregionen (BPRs) und Segmenten veränderter Kopienzahl wurden der öffentlich zugänglichen GEO-(*Gene Expression Omnibus*)Datenbank vom NCBI (*National Center for Biotechnology Information*) entnommen (National Center for Biotechnology Information 2014). Aus dieser Datenbank wurden nur Daten, die mittels *Genome-Wide Human SNP Array 6.0* analysiert wurden, verwendet. Insgesamt erfolgte die Analyse von 2.820 malignen primären Tumortumoren aus 8 verschiedenen Tumorentitäten (Gehirntumore – 1.187 Proben, Brusttumore – 377 Proben, Kolorektaltumore – 189 Proben, Lungentumore – 291 Proben, Magentumore – 340 Proben, Nierentumore – 109 Proben, Ovarientumore – 207 Proben, Prostata Tumore – 120 Proben).

**Referenzdaten:** Als Referenzdaten wurden Daten des internationalen HapMap-Projekts (Phase 3, Release #3) (International HapMap Project 2009) zu einer Referenz zusammengeführt. Hierbei wurden nur solche Proben verwendet, die mit dem *Genome-Wide Human SNP Array 6.0* analysiert wurden (990 Proben).

**Normalproben:** Zusätzlich zu den malignen Primärtumortumoren wur-

den noch 432 Normalgewebeproben, ebenfalls von der GEO-Datenbank stammend (Ovariengewebe – 57 Proben, Gehirngewebe – 29 Proben, Lungengewebe – 62 Proben, Magengewebe – 148 Proben, Nierengewebe – 69), auf BPRs und Segmente veränderter Kopienzahl untersucht. Diese Analysen dienten zur Verifizierung der Krebspezifität potenzieller genomisch veränderter Regionen der malignen Primärtumortumoren.

### 2.2 Algorithmen

Die Bestimmung von Segmenten veränderter Kopienzahl und tumorentitätsspezifischen, krebspezifischen und allgemeinen BPRs anhand der SNP-Signalintensitäten beinhaltet drei wesentliche Schritte. Als Erstes erfolgte eine Präprozessierung der SNP-Array-Rohdaten, dann die Umrechnung der Signalintensitäten für jeden SNP in einen  $\log_2$ -Ratio in Bezug zur Referenz und abschließend eine Segmentierung (Li & Olivier 2013, Karimpour-Fard et al. 2010). Die Präprozessierung erfolgte mit der Affymetrix Power Tools (APT) Software (Affymetrix 2014). Die weitere Verarbeitung der Daten wurde mit der freien Software R realisiert (R version 3.0.2) (R Core Team 2013). Die Segmentierung und anschließende CNV- und Bruchpunktregions-Bestimmung erfolgte für jede Tumortumore einzeln. Dabei wurde für jedes Segment das entsprechende Chromosom, die Start- und Endposition des Segments, die Anzahl der SNPs, die das jeweilige Segment umfasst, und der Mittelwert des jeweiligen Segments angegeben. Die Start- und Endposition eines Segments sind gekennzeichnet durch die genomischen Positionen des ersten und letzten SNPs eines Segments. Für die Bestimmung der genomischen Positionen der SNPs wurde das humane Referenzgenom hg19/GRCh37 genutzt (Abb. 1).

**Erstellung der Referenz:** Zur Identifizierung potenzieller genomischer Veränderungen wurde eine Referenz aus 990 HapMap-Daten generiert. Hierfür wurden die 990 Rohdaten zunächst mittels APT-Software (1.16.0 Linux-version) präprozessiert. Die weitere Datenanalyse erfolgte mit der R-Software. Die Signalintensitäten für beide

Allele wurden zusammengefasst und für jeden SNP eine durchschnittliche Signalintensität über alle Proben berechnet, welche als Referenz für die Analysen der Tumorproben verwendet wurde.

**Präprozessierung und Bestimmung der Signalintensitäten:** Zur Identifizierung von CNVs und BPRs bei allen 2.820 malignen Tumorproben verschiedener Tumorentitäten erfolgte zunächst die Präprozessierung der Rohdaten mittels APT. Hierbei wurde für die Quantilnormalisierung und Hintergrundkorrektur der Birdsee-v2-Algorithmus, unter der Verwendung der Standardparameter, angewendet. Bei diesem handelt es sich um einen Standardalgorithmus von Affymetrix für das Genome-Wide Human SNP Array 6.0 (Yang et al. 2014, Andrade et al. 2011). Die Präprozessierung der malignen Tumorproben wurde separat von den 432 Normalproben durchgeführt. Bei den malignen Tumorproben erfolgte die Präprozessierung jeweils für alle Proben einer Tumorentität. Im Anschluss an den Präprozessierungsschritt erfolgte die Allel-Summutation, um für jeden SNP eine Gesamtsignalintensität zu erhalten (Neuviel et al. 2011).

**Segmentierung:** Zur Detektion der genomischen Veränderungen bei malignen Tumoren wurde eine Segmentierung jeder Tumorprobe durchgeführt. Hierfür wurde zunächst pro Tumorprobe für jeden SNP der  $\log_2$ -Ratio berechnet. Dabei wurde die jeweilige Gesamtsignalintensität der SNPs ins Verhältnis zu der entsprechenden Referenzintensität des SNPs gesetzt (Li & Olivier 2013, Le Scouarnec & Gribble 2012, Le Scouarnec & Gribble 2011). Basierend auf diesen  $\log_2$ -Ratios erfolgte daraufhin die Segmentierung der 22 Autosomen, um das Genom in zusammenhängende Bereiche (Segmente) konstanter Kopienzahl zu unterteilen. Die Segmentierung erfolgte mittels des von Bioconductor zur Verfügung gestellten R-Pakets DNAcopy (Version 1.32.0), welches den Circular-Binary-Segmentation(CBS)-Algorithmus für die Segmentierung anwendet (Seshan & Olshen 2012). Hierbei wurde das Signifikanzlevel  $\alpha$  auf 0,001, die Standardabweichung

(„undo.sd“) auf 0,5 und die Mindestanzahl der Marker („min.width“), die ein Segment enthalten muss, auf 4 gesetzt. Vor der jeweiligen Segmentierung erfolgt eine Erkennung der Ausreißer mit einer anschließenden Glättung der Daten („smooth.CNA“).

**Bestimmung von genomischen Bereichen veränderter Kopienzahl und Genen innerhalb dieser Regionen:** Für die Identifizierung genomischer Bereiche veränderter Kopienzahl wurden für jede Tumorprobe alle ermittelten Segmente analysiert. Jeder SNP-Position wurde der entsprechende Segmentmittelwert zugeordnet und

über alle Proben einer Tumorentität für jeden SNP ein durchschnittlicher Segmentmittelwert bestimmt. Für diese Werte wurde für jedes Chromosom einer Tumorentität separat der Mittelwert über alle SNPs gebildet, um das Grundsignal zu ermitteln. Anschließend wurde dann die Differenz aus jedem einzelnen SNP-Wert und dem entsprechenden Grundsignal bestimmt. Anhand dieser Werte wurden zusammenhängende Bereiche gesucht, die eine Abweichung von der Kopienzahl zu der Referenz aufweisen. Hierbei liegen amplifizierte Bereiche bei einem Wert  $\geq 0,1$  vor und deletierte Bereiche bei einem Wert von  $\leq -0,1$ .

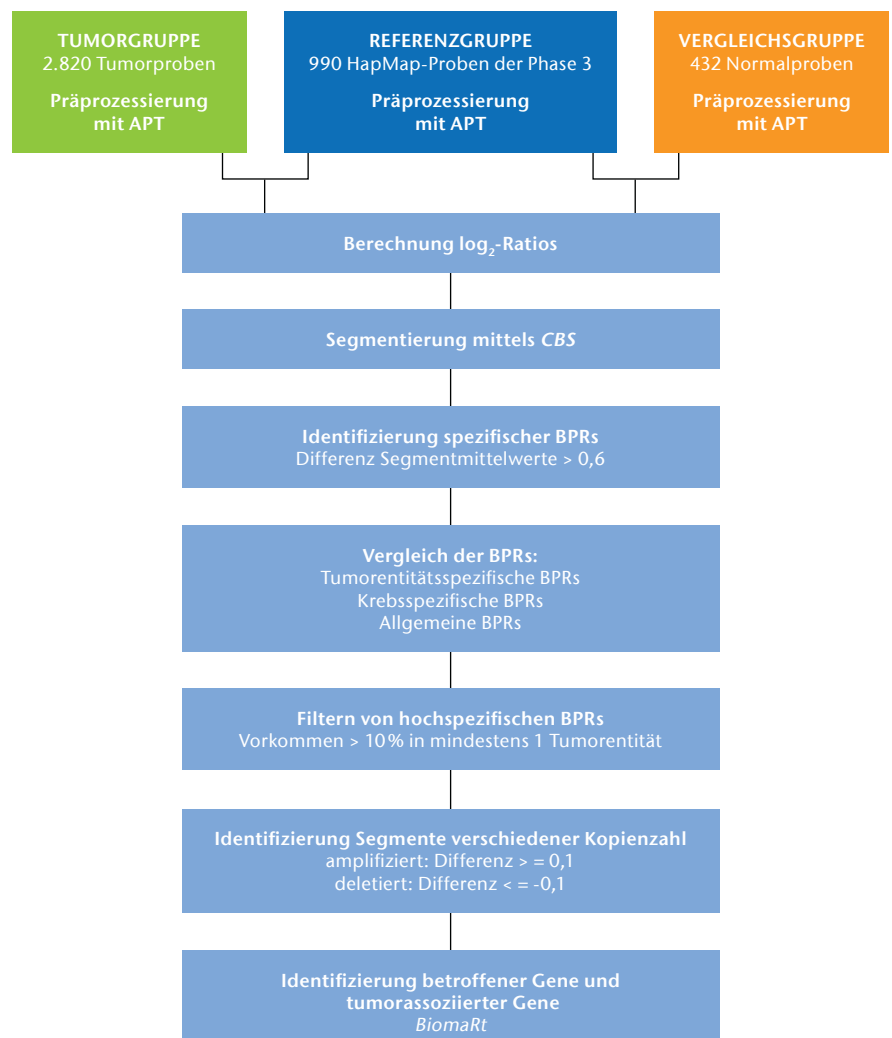


Abb. 1) Schematische Darstellung des Aufbaus der entwickelten Pipeline und der untersuchten Proben. Zunächst wurden 2.820 Tumorproben, 990 HapMap-Proben der Phase 3, die als Referenz dienen, und 432 Normalproben, die als Vergleichsgruppe dienen, mit dem frei zugänglichen Tool APT präprozessiert. Anschließend wurden sowohl die  $\log_2$ -Ratios aus Tumorproben und Referenzdaten als auch aus Normalproben und Referenzdaten gebildet und anschließend mittels CBS das Genom jeder Probe segmentiert. Anhand dieser Segmentierung wurden die spezifischen BPRs identifiziert (Differenz Segmentmittelwerte  $> 0,6$ ). Es wurden die hochspezifischen BPRs (Vorkommen  $> 10\%$  in mindestens einer Tumorentität) und die zusammenhängenden Segmente verschiedener Kopienzahl (amplifiziert: Differenz  $\geq 0,1$ ) und die darin kodierten Gene mittels BiomaRt identifiziert.

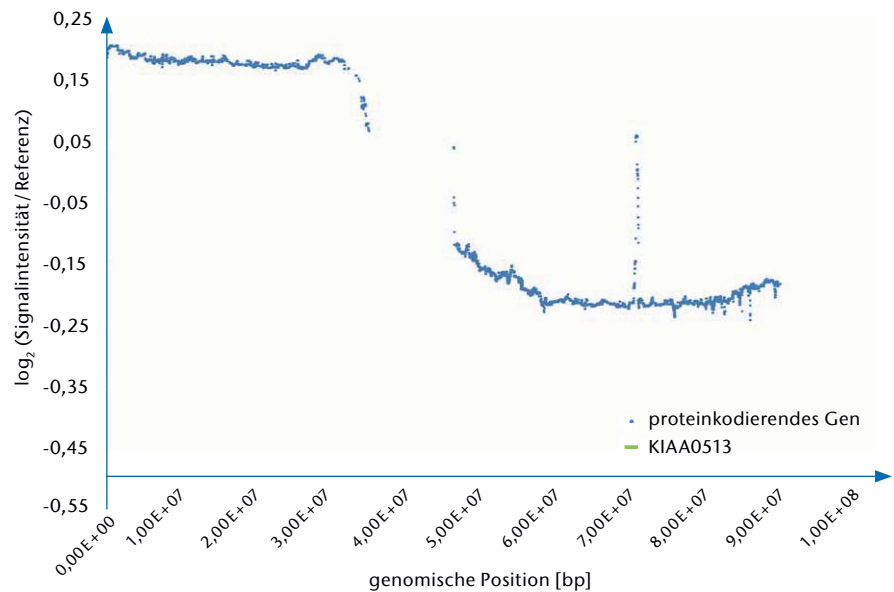
Innerhalb der ermittelten Regionen veränderter Kopienzahl wurde nach Genen gesucht, die durch einen deletierten oder amplifizierten genomischen Bereich beeinflusst werden können. Diese Untersuchung erfolgte mittels BiomaRt (Durinck et al. 2005). BiomaRt ist ein R-Paket, welches den Zugriff auf verschiedene Datenbanken ermöglicht. Hierbei wurde die Gendektion mittels Ensembl realisiert.

**Bestimmung der Bruchpunktregionen:** Zur Bestimmung der chromosomalen BPRs erfolgte für jede Tumorsegmente die Betrachtung aller ermittelten Segmente. Hierbei wurden nacheinander alle benachbarten Segmente des jeweiligen Chromosoms miteinander verglichen und eine potenzielle BPR dann angenommen, wenn die Differenz der Segmentmittelwerte zweier benachbarter Segmente  $> 0,6$  betrug, das heißt, diese Segmente unterscheiden sich um eine Kopienzahl. Eine potenzielle BPR ergibt sich dann aus der genomischen Endposition des einen Segments und der Startposition des nachfolgenden Segments. Zwischen diesen beiden SNPs liegt ein potenzieller Bruchpunkt, der aufgrund des Microarray-Layouts nicht exakt bestimmt werden kann. Daher können wir nur Bruchpunktregionen und keine exakten Bruchpunkte bestimmen. Um abschließend spezifische BPRs bestimmen zu können, erfolgte die Bestimmung der Häufigkeit für das Auftreten jeder ermittelten BPR über alle Tumorsegmente.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Bruchpunkte allgemein

Mit den beschriebenen Methoden wurden insgesamt über alle 2.820 Tumorsegmente der 8 Tumorentitäten 67.076 verschiedene Bruchpunktregionen (BPRs) identifiziert. Davon wurden 13.374 BPRs gefunden, die mindestens in zwei verschiedenen Tumorentitäten vorkommen. Die größte BPR erstreckt sich über 22.757.511 bp, die kürzeste über 10 bp; durchschnittlich umfasst eine BPR 6.804 bp. Es wurden 130 BPRs identifiziert, die in über 1 % aller Proben, 46 BPRs, die in über 2 % der Proben, und 10 BPRs, die in über 5 % der Proben vorkommen. In den



**Abb. 2)** Bestimmung der strukturellen Veränderungen des Chromosoms 16 der Brusttumore. Es sind die Signalintensitäten ( $\log_2$ -Ratios) pro genomischer Position jedes SNPs in Basenpaaren gegeneinander aufgetragen. Das Grundsignal liegt bei  $-0,05$ . Es ist eine deutliche Amplifizierung des p-Arms und Deletierung des q-Arms erkennbar. Zusätzlich ist innerhalb des q-Arms eine spezifische Amplifikation bei 70.854.381 bp bis 71.065.311 bp und eine spezifische Deletion bei 85.091.864 bp bis 85.092.748 bp, welches das Gen KIAA0513 (85.061.374 bp bis 85.127.836 bp) umschließt, erkennbar. Von 85.091.864 bp bis 85.092.892 bp liegen die zwei zugehörigen BPRs. Diese hatten über alle detektierten BPRs die höchste Vorkommenswahrscheinlichkeit aufgezeigt.

untersuchten Normalproben wurden weitere 16.549 BPRs identifiziert, die teilweise zusätzlich in den Tumorentitäten vertreten sind. Davon kommen 8.449 BPRs nur in den Normalproben vor.

#### 3.2 Bruchpunktvergleich zwischen den Tumorentitäten zur Mustererkennung

Um spezifische Muster zu identifizieren, die auf eine Krebspezifität oder Tumorentitätsspezifität hindeuten, wurden für die jeweiligen BPRs die relativen Häufigkeiten pro Tumorentität bestimmt und miteinander verglichen. Es wurden 31 BPRs identifiziert, die in mindestens einer Tumorentität über 10 % vorkommen. Diese BPRs wurden aufgrund ihres häufigen Auftretens als hochspezifische BPRs charakterisiert. Im Folgenden wird eine kleine Auswahl an Ergebnissen dieser Bereiche dargestellt (Marczok et al. 2015).

Es konnten zwei BPRs identifiziert werden, bei denen in 7 der 8 Tumorentitäten (und in den Normalproben) bis zu 27 % (5 %) sowie bis zu 42 % (5 %) ein Bruch der DNA im Chromosom 16 bei ca. 85 Mbp aufgetreten ist.

Zusätzlich wurden BPRs detektiert, die lediglich in einer Tumorentität vermehrt aufgetreten sind. Im Chromosom

17 wurde in Gehirntumorproben zu 14,32 % eine BPR detektiert. In den restlichen Tumorentitäten trat diese jeweils in weniger als 0,6 % der Proben auf.

Acht der hochspezifischen BPRs konnten auch in den Normalproben mit einer Häufigkeit von mehr als 5 % detektiert werden. Die Häufigkeit des Vorkommens in den Normalproben ist aber immer geringer als mindestens eine der Häufigkeiten von den Tumorentitäten.

Aufgrund der Ergebnisse der BPR-Bestimmung klassifizierten wir die BPRs in vier verschiedene Gruppen, abhängig von der Häufigkeit des Auftretens der BPR und ob diese auch in den Normalproben gefunden wurde. Die Einteilung erfolgte in

1. tumorentitätsspezifische BPRs (Häufigkeit  $\geq 1$  % ausschließlich in einer Tumorentität (TE) oder  $\geq 1$  % in einer TE und gesundem Gewebe) (2.278 detektierte BPRs),
2. krebspezifische BPRs (Häufigkeit  $\geq 1$  % in mehr als einer TE und in Normalgewebe  $< 0,5$  %) (231 detektierte BPRs) und
3. die allgemeinen BPRs (Häufigkeit  $\geq 1$  % in mehr als einer TE und  $\geq 0,5$  % Normalgewebe) (207 detektierte BPRs).

Die Gruppe der nicht krebsspezifischen BPRs beinhaltet jene, welche mit einer Häufigkeit von weniger als 1 % in allen Tumorentitäten (72.809 detektierte BPRs) detektiert wurden.

### 3.3 Vergleich der Bereiche verschiedener Kopienzahl über verschiedene Tumorentitäten

Um den eventuellen Einfluss der BPRs auf die Tumorentstehung und -progression zu analysieren, wurden die Genombereiche untersucht, die eine veränderte Kopienzahl aufweisen, um festzustellen, ob in diesen bestimmte Gene lokalisiert sind. Es wurden sowohl genomische Bereiche mit verringerter als auch erhöhter Kopienzahl identifiziert.

Es konnten insgesamt 563 (10 in Normalproben) zusammenhängende Segmente mit einer von der Referenz abweichenden Kopienzahl detektiert werden. Innerhalb dieser Segmente liegen 20.084 (7 in Normalproben) verschiedene Gene (protein kodierend und nicht protein kodierend) von denen bei 169 (keine in Normalproben) bekannt ist, dass sie mit der Tumorentstehung und -progression in Verbindung stehen.

In 7 von 8 Tumorentitäten konnte in Chromosom 16 bei ca. 85 Mbp im Bereich des Genes *KIAA0513* eine niedrigere Kopienzahl als im genomischen

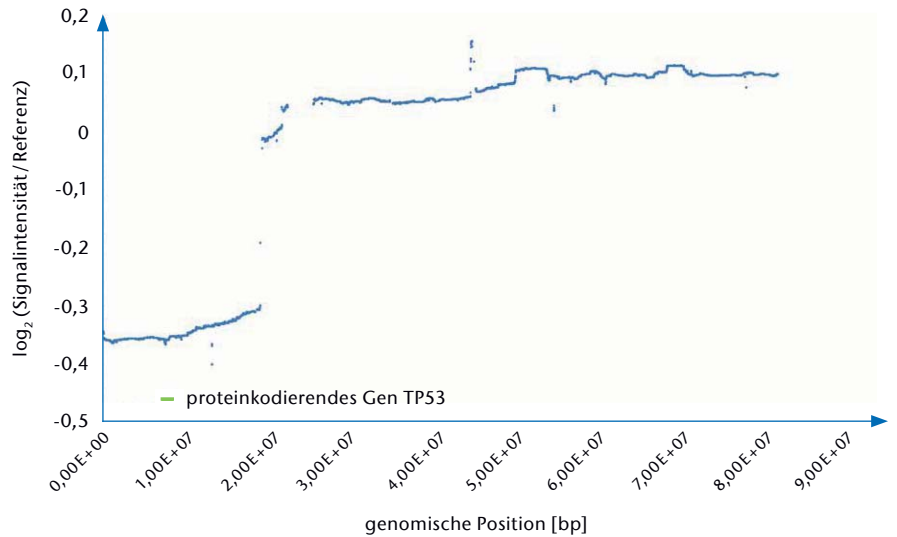


Abb. 3) Bestimmung der strukturellen Veränderungen des Chromosoms 17 der Gehirntumore. Es sind die Signalintensitäten ( $\log_2$ -Ratios) pro genomischer Position jedes SNPs in Basenpaaren gegeneinander aufgetragen. Das Grundsignal liegt bei -0,04. Es ist eine deutliche Deletion des p-Armes und Amplifizierung des q-Armes erkennbar. Innerhalb der deutlichen Amplifizierung zwischen 6.689 bp und 18.917.915 bp des p-Armes liegt der kodierende Bereich des Genes TP53 (7.565.097 bp – 7.590.856 bp). Die zugehörige Bruchpunktregion ist bei 8.917.915 bp bis 19.168.912 bp lokalisiert.

Mittel detektiert werden. Zudem konnte in diesem Chromosom bei ca. 70 Mbp lediglich in Brustkrebs eine prägnante Amplifikation detektiert werden (Erhöhung um bis zu 2,6 vom Grundsignal) (Abb. 2). Zusätzlich ist bei Gehirntumorgeweben im Chromosom 17 der Bereich des p-Arms deletiert (um 0,6 geringer als das Grundsignal) (Abb. 3). Es konnte jedoch auch eine leichte Deletion

in Brust-, Kolorektal- und Ovarientumormproben (ca. 0,1 geringer als das Grundsignal) festgestellt werden. Dieser Bereich umschließt das Gen *TP53*. In Chromosom 8 konnte bei ca. 45 Mbp ein Bereich mit verringerter Kopienzahl in Gehirntumoren (unter 0,3 vom Grundsignal) und eine weniger ausgeprägte bei ca. 6 Mbp identifiziert werden. In diesem Bereich ist das Gen *RP11-115C21.2* kodiert (Abb. 4). Bei den Normalgewebeproben ist die Veränderung der Kopienzahl immer geringer als mindestens eine der Veränderungen einer Tumorentität.

## 4. Diskussion

### 4.1 Vergleich identifizierter BPRs und Segmente veränderter Kopienzahl zwischen Tumormproben und Normalproben

Die von uns durchgeführten genomweiten Analysen zeigen, dass die Anzahl der insgesamt ermittelten Bruchpunktregionen (BPRs) und Bereiche veränderter Kopienzahl in Tumorgenomen höher ist als in gesunden Genomen. Hierbei ist die Anzahl der verschiedenen BPRs über alle Tumormproben um ein Vierfaches höher als bei den Normalproben. Auch der Vergleich der Anzahl der Segmente veränderter Kopienzahl zwischen

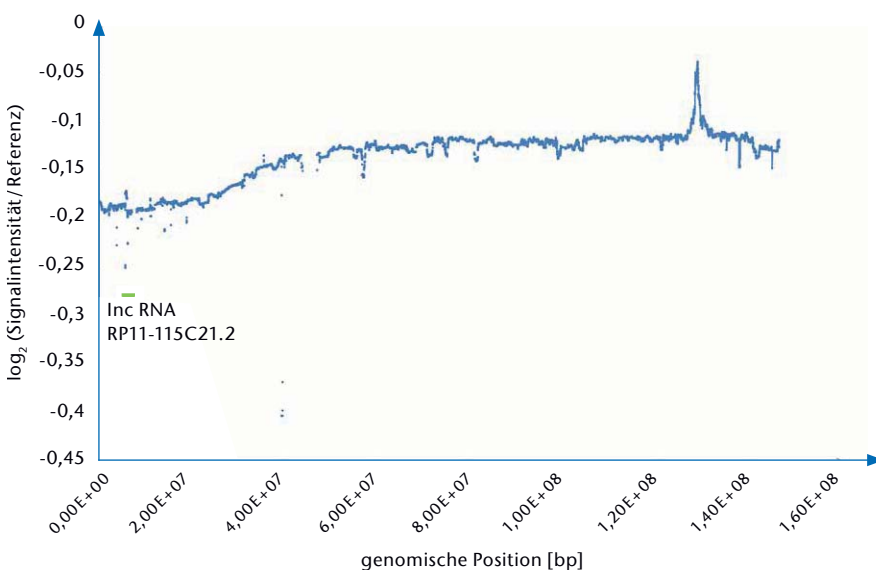


Abb. 4) Bestimmung der strukturellen Veränderungen des Chromosoms 8 der Gehirntumore. Es sind die Signalintensitäten ( $\log_2$ -Ratios) pro genomischer Position jedes SNPs in Basenpaaren gegeneinander aufgetragen. Das Grundsignal liegt bei -0,14. Es ist eine deutliche Deletion bei 43.778.914 bp bis 46.924.211 bp und eine weitere weniger spezifische bei ca. 6 Mbp erkennbar. Letzterer Bereich umschließt den kodierenden Bereich des *RP11-115C21.2* (Chr. 8: 6261.072 bp – 6.264.663 bp).

den einzelnen Tumorentitäten und den Normalproben zeigt, dass diese bei den Tumorproben höher ist. Dies konnte auch durch andere Studien bestätigt werden (Yang et al. 2014, Beroukhi et al. 2010). Durchschnittlich wurden 70 Segmente pro Tumorentität ermittelt und nur 10 bei den Normalproben. Die geringere Anzahl an BPRs und Segmenten veränderter Kopienzahl in Normalproben im Vergleich zu Tumorproben unterstützt die Aussage, dass genomische Veränderungen und vor allem CNVs auch zu 4,8–9,5 % in gesunden Genomen vorkommen. Neben dem geringeren Auftreten der Segmente veränderter Kopienzahl in den Normalproben konnten wir innerhalb dieser eine geringere Anzahl betroffener Gene, die laut Zarrei et al. (2015) keinen Einfluss auf den Phänotyp haben können, detektieren. Dabei ist vom besonderen Interesse, dass keine Gene betroffen waren, die als tumorassoziiert bekannt sind.

#### 4.2 Vergleich identifizierter BPRs und Segmente veränderter Kopienzahl zwischen verschiedenen Tumorentitäten

Anhand unserer Analysen konnten gleiche BPRs und Segmente veränderter Kopienzahl in mehreren Tumorentitäten gefunden werden. Zur Untersuchung, ob es tumorentitätsspezifische, krebspezifische oder allgemeine genomische Veränderungen sind, erfolgte der Vergleich dieser Veränderungen zwischen den 8 verschiedenen Tumorentitäten. Dabei konnten wir feststellen, dass scheinbar Muster bei den genomweit detektierten BPRs und Segmenten veränderter Kopienzahl existieren.

Hierbei kann die Zuordnung der ermittelten BPRs zu einer entsprechenden Gruppe einen möglichen Ansatz bieten, um weitere Erkenntnisse über die komplexen Prozesse der Tumorgenese und -progression zu erhalten.

Beim Vergleich der drei krebsrelevanten Gruppen ist erkennbar, dass die meisten BPRs tumorentitätsspezifisch sind. Jede Tumorentität weist zu einem gewissen Anteil ein individuelles BPR-Muster auf, was ein Indiz dafür sein könnte, dass die Tumorgenese und -progression zumindest teilweise auf individuelle genomische Veränderun-

gen zurückzuführen ist. Ein möglicher Grund hierfür könnten gewebsspezifische Unterschiede sein, denn es ist bekannt, dass jedes Gewebe unterschiedlich differenziert ist, sodass verschiedene genomische Bereiche aktiv sind. Das bewirkt unter anderem eine unterschiedliche Replikationshäufigkeit. Beispielsweise ist die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines malignen Herztumors sehr gering, da die Kardiomyozyten postmitotische Zellen sind (McAllister & Fenoglio 1978). Folglich kann die Differenzierung einer Zelle einen entscheidenden Einfluss auf das individuelle BPR-Muster haben und somit auch auf die Krebsentstehung und -progression.

Die am zweithäufigsten vorkommende Gruppe der ermittelten BPRs ist die krebspezifische. Die BPRs, die dieser Klasse zugeordnet werden, sind nur in Tumorgenomen und nicht in gesunden Genomen detektierbar, sodass diese Hinweise auf die Mechanismen der allgemeinen Tumorgenese und -progression geben können, die die gemeinsamen Eigenschaften von malignen Tumoren (Hallmarks of Cancer) hervorrufen (Hanahan & Weinberg 2000). Diese können bedeutend für die Aufklärung von allgemeinen Krebsrisikofaktoren, die die Krebsentstehung begünstigen, in Bezug auf bestimmte genomische Positionen sein.

Die allgemeinen BPRs stellen die dritte krebsrelevante Gruppe dar. Die identifizierten BPRs und Segmente veränderter Kopienzahl, die in den Tumorproben vorkommen, sind mitunter auch in den untersuchten Normalproben ermittelt worden. Dabei ist erkennbar, dass teilweise die entsprechenden BPRs in den Tumorproben mit einer sehr viel höheren Auftretenswahrscheinlichkeit vorkommen als in den Normalproben. Diese Gruppe unterstützt die Theorie der *fragile sites*. Hierbei wird davon ausgegangen, dass das gesunde Genom an bestimmten genomischen Stellen instabiler ist als an anderen. Die geringere Stabilität macht die DNA in diesen Bereichen anfälliger für Brüche (Gorgoulis et al. 2005). Aufgrund der hohen Teilungsrate der Krebszellen ist die Wahrscheinlichkeit für weitere Brüche in diesen Abschnitten sehr hoch. Dieses Phänomen konnte, wie auch schon bei beispielsweise Thys et al. (2015), durch das erhöhte Vorkommen

der von uns ermittelten allgemeinen BPRs in den einzelnen Tumorentitäten verifiziert werden.

#### 4.3 Vorliegen von Hotspot-Bereichen

Beim Vergleich der strukturellen Veränderungen ist zum einen ein erhöhtes Auftreten mehrerer benachbarter BPRs und zum anderen das Überlappen von Segmenten gleich veränderter Kopienzahl zu erkennen. Dies impliziert das Vorkommen von sogenannten Hotspot-Bereichen, welche entweder auf technische, d. h. durch die Auflösung bzw. das Layout der Detektionsmethode (Affymetrix 2009) oder biologische Gegebenheiten zurückgeführt werden können. Letztere können auf das Vorliegen von *fragile sites* hindeuten, welche Genombereiche darstellen, die aufgrund geringerer Stabilität leichter brechen (Gorgoulis et al. 2005). Unsere Ergebnisse und die von Tomasetti & Vogelstein (2015) (zufälliger Bruch der DNA) lassen vermuten, dass die DNA in bestimmten Bereichen anfälliger ist, zufällig zu brechen.

Zudem ist erwähnenswert, dass es scheinbar zwei verschiedene Ausprägungsformen von CNVs gibt. Neben denen, bei denen lediglich Bereiche mit relativ kleiner Ausdehnung (bis einige Mbp) betroffen sind (Abb. 4), konnten vermehrt Strukturvariationen detektiert werden, bei denen komplette chromosomale Arme einer Kopienzahlveränderung unterlagen (Abb. 2 und 3). Die Bedeutung dieser Ereignisse bedarf jedoch noch weiterer Untersuchungen.

#### 4.4 Identifizierung von 31 hochspezifischen BPRs

Um die Bedeutung der detektierten hochspezifischen BPRs einschätzen zu können, wurden sie mit den identifizierten Segmenten veränderter Kopienzahl und den potenziell betroffenen Genbereichen verglichen. Dabei konnten Zusammenhänge zu sowohl proteinkodierenden als auch nicht kodierenden Genen (z. B. lncRNA) hergestellt werden. Dabei sind 30 % der identifizierten Gene bereits in Zusammenhang mit der Tumorgenese und -progression gestellt worden. Die meisten der 31 hochspezifischen

BPRs können der allgemeinen Gruppe (58 %) zugeordnet werden. Die hierbei mit der höchsten Auftretswahrscheinlichkeit ermittelte BPR ist innerhalb des proteinkodierenden Gens *KIAA0513* lokalisiert (Chr. 16: 85.061.374 bp–85.127.836 bp). Es ist bekannt, dass es eine wichtige Rolle bei immunologischen, synaptischen und apoptotischen Signalwegen spielt. Somit könnte dieses Gen bei einer Deletion in diesem Bereich, wie wir sie in 7 der 8 Tumorentitäten und den Normalproben detektiert haben, zu einer Störung der Expression des Proteins führen, sodass es der Funktion als Signalmolekül in der Apoptose nicht nachkommen (Lauriat et al. 2006) und somit die Tumorgenese begünstigen kann.

25 % der hochspezifischen BPRs können den krebspezifischen BPRs zugeordnet werden. Das Gen *RP11-115C21.2* (Chr. 8: 6.261.072 bp–6.264.663 bp), welches für eine *long non-coding* RNA (lnc RNA) kodiert, liegt unmittelbar in der Nähe einer BPR in über 75 % der TE (> 1 % Vorkommen) und ist in 6 Tumorentitäten innerhalb von verschiedenen deletierten Segmenten lokalisiert. In den letzten Jahren wurde die Bedeutung der lnc RNAs für die Tumor- und Mutagenese aufgedeckt. Diese können entweder als Onkogene oder als Tumorsuppressorgene wirken, indem sie die Chromatinstruktur verändern (Gutschner et al. 2013, Gutschner & Diederichs 2012) und die Transkription von proteinkodierenden Genen beeinflussen können (Huarte et al. 2010). Aufgrund unserer Analysen lässt sich vermuten, dass aufgrund des in diesem Genbereich ermittelten deletierten Segments zellzyklus- oder apoptoseregulierende Eigenschaften (Xue et al. 2012) verloren gehen und somit das Gen *RP11-115C21.2* als Tumorsuppressor wirkt.

Lediglich 16 % der 31 hochspezifischen BPRs können den tumorentitätsspezifischen BPRs zugeordnet werden. Dies lässt vermuten, dass je signifikanter eine BPR ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass diese in mehreren Tumorentitäten vorkommt. Dies wurde schon von einer Studie zu somatischen Kopienalterationen vermutet (Beroukhi et al. 2010), sodass möglicherweise die genomischen Veränderungen, die eine

Krebserkrankung begünstigen, bei den verschiedenen Tumorentitäten sehr ähnlich und nur einige wenige individuelle genomische Veränderungen kennzeichnend für die einzelnen Tumorentitäten sind.

Eine der hochspezifischen BPRs auf Chr. 17 ist nur in den Gehirntumoren mit ausreichender Häufigkeit detektiert worden. In drei weiteren Tumorentitäten ist der komplette Bereich deletiert. Es konnten mehrere tumorassoziierte Gene detektiert werden, die in diesem Bereich potenziell beeinflusst werden. Das bekannteste Gen ist das *TP53* (7.565.097 bp–7.590.856 bp), welches den Tumorsuppressor p53 kodiert. Dieser hat wichtige Funktionen in der Aufrechterhaltung des Zellzyklus, in der Regelung der Apoptose sowie des Alterungsprozesses, bei DNA-Reparaturen und Veränderungen des Metabolismus (Lane 1992, Peifer et al. 2012). Zudem ist an diesem Beispiel erkennbar, dass aufgrund der hohen strikten Bedingungen zur Detektion von spezifischen BPRs lediglich in einer Tumorentität eine BPR detektiert wurde, jedoch noch in weiteren Tumorentitäten Bereiche veränderter Kopienzahl identifiziert wurden. Diese Schwellenwerte wurden jedoch gewählt, um lediglich die hochspezifischen BPRs für eine Mustererkennung nutzen zu können.

Diese Auswahl an Beispielen zeigt, dass die Pipeline geeignet ist, um einen ersten Eindruck über potenzielle Bruchpunkt-Muster in malignen Tumorgenomen bekommen zu können und dass sich die Ergebnisse mit den in der Literatur beschriebenen Erkenntnissen bestätigen lassen. Somit kann die hier beschriebene Methode genutzt werden, um neue Einsichten in die Tumorgenese zu gewinnen.

## 5. Ausblick

Die hier identifizierten Bruchpunktregionen (BPRs) müssen noch weiter analysiert und präzisiert werden, da aufgrund des SNP-Array-Layouts nicht alle Bereiche des Genoms abgedeckt sind, sodass nicht alle genomischen Bereiche auf Bruchpunkt- und CNV-Regionen untersucht werden konnten. Des Weiteren nehmen die ermittelten Bruchpunkt- und CNV-Regionen teilweise sehr weite Bereiche des Genoms ein. Mit Hilfe der Analyse von Whole-

Genome-Sequenzierungs-Daten und Whole-Exome-Sequenzierungs-Daten (z. B. aus dem Projekt The Cancer Genome Atlas (TCGA)) können die Bruchpunkt- und CNV-Regionen basengenau bestimmt werden, womit eine genauere Aussage über den Einfluss solcher genomischer Muster auf die Tumorgenese und -progression möglich ist. Damit können potenziell kritische Gene identifiziert werden, die eine entscheidende Rolle für die Krebsprädisposition spielen. Die ermittelten genomischen Muster können sowohl Hinweise auf eine mögliche familiäre Krebsprädisposition liefern als auch als diagnostische Marker für die Tumorcharakterisierung dienen. Somit wäre eine personalisierte Vorsorge, Behandlung und Nachsorge von Patienten möglich und die Grundlagen für die Entwicklung wesentlich zeiteffizienterer, kostengünstigerer und risikoärmerer Präventions- und Diagnoseverfahren geschaffen, sodass lediglich eine Blutuntersuchung eine patientenspezifische Krebsprävention, -diagnose und -therapie ermöglichen kann. So könnten die Heilungschancen der Betroffenen verbessert werden, da frühzeitig eine Behandlung begonnen und die Überlebensrate gesteigert werden kann, bevor erste sichtbare Symptome erkennbar sind.

Die aus diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse können somit die Grundlage auf dem Weg zur Entwicklung effektiverer präventiver, diagnostischer und therapeutischer Maßnahmen bilden, um so die Zahl der Neuerkrankungen und Todesfälle bei malignen Tumorerkrankungen zu minimieren sowie die Überlebensrate der Betroffenen zu erhöhen.

## LITERATUR

Affymetrix (2009) Genome-Wide Human SNP Array 6.0. Data Sheet, rev 2:1–4

Affymetrix (2014) Affymetrix Power Tools. [http://www.affymetrix.com/estore/partners\\_programs/programs/developer/tools/power\\_tools.affx#1\\_1](http://www.affymetrix.com/estore/partners_programs/programs/developer/tools/power_tools.affx#1_1). Accessed 27 May 2014

Andrade M de, Atkinson EJ, Bamlet WR, Matsumoto ME, Maharjan S, Slager SL, Vachon CM, Cunningham JM, Kardia SLR (2011) Evaluating the Influence of Quality Control Decisions and Software Algorithms on SNP Calling for the Affymetrix 6.0 SNP Array Platform. *Hum Hered* 71(4):221–233. doi: 10.1159/000328843

Beroukhi R, Mermel CH, Porter D, Wei G, Raychaudhuri S, Donovan J, Barretina J, Boehm JS, Dobson J, Urashima M, Mc Henry KT, Pinchback RM, Ligon AH, Cho Y, Haery L, Greulich H, Reich M, Winckler W,



- Lawrence MS, Weir BA, Tanaka KE, Chiang DY, Bass AJ, Loo A, Hoffman C, Prensner J, Liefeld T, Gao Q, Yecies D, Signoretti S, Maher E, Kaye FJ, Sasaki H, Tepper JE, Fletcher JA, Taberero J, Baselga J, Tsao M, Demichelis F, Rubin MA, Janne PA, Daly MJ, Nucera C, Levine RL, Ebert BL, Gabriel S, Rustgi AK, Antonescu CR, Ladanyi M, Letai A, Garraway LA, Loda M, Beer DG, True LD, Okamoto A, Pomeroy SL, Singer S, Golub TR, Lander ES, Getz G, Sellers WR, Meyerson M (2010) The landscape of somatic copy-number alteration across human cancers. *Nature* 463(7283):899–905. doi: 10.1038/nature08822
- Durinck S, Moreau Y, Kasprzyk A, Davis S, Moor B de, Brazma A, Huber W (2005) BioMart and Bioconductor: a powerful link between biological databases and microarray data analysis. *Bioinformatics* 21(16):3439–3440. doi: 10.1093/bioinformatics/bti525
- Gorgoulis VG, Vassiliou LF, Karakaidos P, Zacharatos P, Kotsinas A, Liloglou T, Venere M, Dittulio RA, Kastrinakis NG, Levy B, Kletsas D, Yoneta A, Herlyn M, Kittas C, Halazonetis TD (2005) Activation of the DNA damage checkpoint and genomic instability in human precancerous lesions. *Nature* 434(7035):907–913. doi: 10.1038/nature03485
- Gutschner T, Diederichs S (2012) The hallmarks of cancer. A long non-coding RNA point of view. *RNA Biol* 9(6):703–719. doi: 10.4161/rna.20481
- Gutschner T, Hämmerle M, Eissmann M, Hsu J, Kim Y, Hung G, Revenko A, Arun G, Stentrup M, Gross M, Zörnig M, MacLeod AR, Spector DL, Diederichs S (2013) The Noncoding RNA MALAT1 is a Critical Regulator of the Metastasis Phenotype of Lung Cancer Cells. *Cancer Res* 73(3):1180–1189. doi: 10.1158/0008-5472.CAN-12-2850
- Hanahan D, Weinberg RA (2000) The Hallmarks of Cancer. *Cell* 100(1):57–70. doi: 10.1016/S0092-8674(00)81683-9
- Huarte M, Guttman M, Feldser D, Garber M, Koziol MJ, Kenzelmann-Broz D, Khalil AM, Zuk O, Amit I, Rabani M, Attardi LD, Regev A, Lander ES, Jacks T, Rinn JL (2010) A Large Intergenic Noncoding RNA Induced by p53 Mediates Global Gene Repression in the p53 Response. *Cell* 142(3):409–419. doi: 10.1016/j.cell.2010.06.040
- International HapMap Project (2009) Raw Data Download Affymetrix 6.0. [http://hapmap.ncbi.nlm.nih.gov/downloads/raw\\_data/hapmap3\\_affy6.0](http://hapmap.ncbi.nlm.nih.gov/downloads/raw_data/hapmap3_affy6.0). Accessed 31 Jul 2014
- Karimipour-Fard A, Dumas L, Phang T, Sikela JM, Hunter LE (2010) A survey of analysis software for array-comparative genomic hybridisation studies to detect copy number variation. *Hum Genomics* 4(6):421–427. doi: 10.1186/1479-7364-4-6-421
- Lane DP (1992) Cancer. p53, guardian of the genome. *Nature* 358(6381):15–16. doi: 10.1038/358015a0
- Lauriat TL, Dracheva S, Kremerskothen J, Duning K, Haroutunian V, Buxbaum JD, Hyde TM, Kleinman JE, McInnes LA (2006) Characterization of KIAA0513, a novel signaling molecule that interacts with modulators of neuroplasticity, apoptosis, and the cytoskeleton. *Brain Res* 1121(1):1–11. doi: 10.1016/j.brainres.2006.08.099
- Le Scouarnec S, Gribble SM (2012) Characterising chromosome rearrangements: recent technical advances in molecular cytogenetics. *Heredity* 108:75–85. doi: 10.1038/hdy.2011.100
- Li W, Olivier M (2013) Current analysis platforms and methods for detecting copy number variation. *Physiol Genom* 45(1):1–16. doi: 10.1152/physiolgenomics.00082.2012
- Li Y, Zhang L, Ball RL, Liang X, Li J, Lin Z, Liang H (2012) Comparative analysis of somatic copy-number alterations across different human cancer types reveals two distinct classes of breakpoint hotspots. *Hum Mol Genet* 21(22):4957–4965. doi: 10.1093/hmg/dds340
- Marczok S (2014) Genomweite Identifizierung von Kopienzahlvariationen in humanen malignen Tumoren. Master Thesis, Technische Hochschule Wildau
- Marczok S, Bortz B, Wang C, Pospisil H (2015) Comprehensive Analysis of Genome Rearrangements in Eight Human Malignant Tumor Tissues. *PLoS ONE* (submitted)
- McAllister H, Fenoglio J (1978) Tumors of the Cardiovascular System. In: Hartmann WH, Cowan WR (eds) *Atlas of Tumor Pathology*, 2nd ser, fasc 15. Armed Forces Institute of Pathology, Washington DC, pp 1–20
- McCarroll SA, Kuruville FG, Korn JM, Cawley S, Nemesh J, Wysoker A, Shapero MH, de Bakker, Paul I W, Maller JB, Kirby A, Elliott AL, Parkin M, Hubbell E, Webster T, Mei R, Veitch J, Collins PJ, Handsaker R, Lincoln S, Nizari M, Blume J, Jones KW, Rava R, Daly MJ, Gabriel SB, Altshuler D (2008) Integrated detection and population-genetic analysis of SNPs and copy number variation. *Nat Genet* 40(10):1166–1174. doi: 10.1038/ng.238
- National Center for Biotechnology Information (2014) Gene Expression Omnibus. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/geo>. Accessed 20 Jan 2015
- Neuviel P, Bengtsson H, Speed TP (2011) Statistical Analysis of Single Nucleotide Polymorphism Microarrays in Cancer Studies. In: Lu HH, Schölkopf B, Zhao H (eds) *Handbook of Statistical Bioinformatics*. Springer Handbooks of Computational Statistics. Springer, Berlin/Heidelberg, ISBN: 978-3-642-16344-9, pp 225–255. doi: 10.1007/978-3-642-16345-6\_11
- Peifer M, Fernández-Cuesta L, Sos ML, George J, Seidel D, Kasper LH, Plenker D, Leenders F, Sun R, Zander T, Menon R, Koker M, Dahmen I, Müller C, Di Cerbo V, Schildhaus H, Altmüller J, Baessmann I, Becker C, Wilde B de, Vandesompele J, Böhm D, Ansén S, Gabler F, Wilkening I, Heynck S, Heuckmann JM, Lu X, Carter SL, Cibulskis K, Banerji S, Getz G, Park K, Rauh D, Grütter C, Fischer M, Pasqualucci L, Wright G, Wainer Z, Russell P, Petersen I, Chen Y, Stoelben E, Ludwig C, Schnabel P, Hoffmann H, Muley T, Brockmann M, Engel-Riedel W, Muscarella LA, Fazio VM, Groen H, Timens W, Sietsma H, Thunnissen E, Smit E, Heideman DAM, Snijders PJF, Cappuzzo F, Ligorio C, Damiani S, Field J, Solberg S, Brustugun OT, Lund-Iversen M, Sängler J, Clement JH, Soltermann A, Moch H, Weder W, Solomon B, Soria J, Validire P, Besse B, Brambilla E, Brambilla C, Lantuejoul S, Lorimier P, Schneider PM, Hallek M, Pao W, Meyerson M, Sage J, Shendure J, Schneider R, Büttner R, Wolf J, Nürnberg P, Perner S, Heukamp LC, Brindle PK, Haas S, Thomas RK (2012) Integrative genome analyses identify key somatic driver mutations of small-cell lung cancer. *Nat Genet* 44(10):1104–1110. doi: 10.1038/ng.2396
- R Core Team (2013) R: A Language and Environment for Statistical Computing. <http://www.R-project.org>
- Redon R, Ishikawa S, Fitch KR, Feuk L, Perry GH, Andrews TD, Fiegler H, Shapero MH, Carson AR, Chen W, Cho EK, Dallaire S, Freeman JL, González JR, Gratacós M, Huang J, Kalaitzopoulos D, Komura D, MacDonald JR, Marshall CR, Mei R, Montgomery L, Nishimura K, Okamura K, Shen F, Somerville MJ, Tchinda J, Valsesia A, Woodwark C, Yang F, Zhang J, Zerjal T, Zhang J, Armengol L, Conrad DF, Estivill X, Tyler-Smith C, Carter NP, Aburatani H, Lee C, Jones KW, Scherer SW, Hurler ME (2006) Global variation in copy number in the human genome. *Nature* 444(7118):444–454. doi: 10.1038/nature05329
- Seshan VE, Olshen A (2012) DNACopy: DNA copy number data analysis. R package version 1.32.0
- Standfuß C, Pospisil H, Klein A (2012) SNP Microarray analyses reveal copy number alterations and progressive genome reorganization during tumor development in SVT/t driven mice breast cancer. *BMC Canc* 12:380. doi: 10.1186/1471-2407-12-380
- Stewart BW, Wild CP (eds) (2014) *World Cancer Report 2014*. World Health Organization: International Agency for Research on Cancer, Lyon. ISBN: 978-92-832-0429-9
- Thys RG, Lehman CE, Pierce LCT, Wang Y (2015) DNA Secondary Structure at Chromosomal Fragile Sites in Human Disease. *Curr Genomics* 16(1):60–70. doi: 10.2174/1389202916666150114223205
- Tomasetti C, Vogelstein B (2015) Cancer etiology. Variation in cancer risk among tissues can be explained by the number of stem cell divisions. *Science* 347(6217):78–81. doi: 10.1126/science.1260825
- Vogelstein B, Papadopoulos N, Velculescu VE, Zhou S, Diaz LA, Kinzler KW (2013) Cancer Genome Landscapes. *Science* 339(6127):1546–1558. doi: 10.1126/science.1235122
- Xue W, Kitzing T, Roessler S, Zuber J, Krasnitz A, Schultz N, Revill K, Weissmueller S, Rappaport AR, Simon J, Zhang J, Luo W, Hicks J, Zender L, Wang XW, Powers S, Wigler M, Lowe SW (2012) A cluster of cooperating tumor-suppressor gene candidates in chromosomal deletions. *Proc Natl Acad Sci USA* 109(21):8212–8217. doi: 10.1073/pnas.1206062109
- Yang R, Chen B, Pfüzte K, Buch S, Steinke V, Holinski-Feder E, Stöcker S, Schönfels W von, Becker T, Schackert HK, Royer-Pokora B, Kloor M, Schmiegel WH, Büttner R, Engel C, Laszcz Puertolas J, Försti A, Kunkel N, Bugert P, Schreiber S, Krawczak M, Schafmayer C, Propping P, Hampe J, Hemminki K, Kurwinkel B (2014) Genome-wide analysis associates familial colorectal cancer with increases in copy number variations and a rare structural variation at 12p12.3. *Carcinogenesis* 35(2):315–323. doi: 10.1093/carcin/bgt344
- Zarrei M, MacDonald JR, Merico D, Scherer SW (2015) A copy number variation map of the human genome. *Nat Rev Genet* 16(3):172–183. doi: 10.1038/nrg3871
- Zhao X, Li C, Paez JG, Chin K, Janne PA, Chen T, Girard L, Minna J, Christiani D, Leo C, Gray JW, Sellers WR, Meyerson M (2004) An Integrated View of Copy Number and Allelic Alterations in the Cancer Genome Using Single Nucleotide Polymorphism Arrays. *Cancer Res* 64(9):3060–3071. doi: 10.1158/0008-5472.CAN-03-3308

## AUTOREN

**Birgit Bortz**  
**Stefanie Marczok**  
**Prof. Dr. rer. nat. Heike Pospisil**  
 Technische Hochschule Wildau  
 Forschungsgruppe High Performance  
 Computing in Life Sciences

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

# Elektrogesponnene Polymerfasern als neuartiges Material für die Bioelektrokatalyse des Enzyms *Pyrrolochinolin-chinon-abhängige Glukosedehydrogenase*

Johannes Gladisch, David Sarauli, Daniel Schäfer, Birgit Dietzel, Burkhard Schulz, Fred Lisdat\*

## Zusammenfassung

Es wurde ein dreidimensionales Polymerfasernetzwerk aufgebaut, charakterisiert und anschließend daran das Enzym *Pyrrolochinolinchinon-abhängige Glukosedehydrogenase* (PQQ)GDH gebunden. Das Polymerfasernetzwerk wurde durch Elektrospinnen einer Mischung des Polymers Polyacrylnitril und verschiedener leitfähiger Polymere der Polyanilin-Familie auf Indium-Zinn-Oxid-Elektroden aufgebracht. Die so hergestellten Fasermatten erwiesen sich bei mikroskopischen Untersuchungen gleichförmig präpariert und die Faserdurchmesser bewegten sich im Bereich weniger hundert Nanometer. Das Redoxpaar Kaliumhexacyanoferrat (II/III) zeigte an diesen Polymer-Elektrodenstrukturen eine quasi-reversible Elektrochemie. Bei weitergehenden Untersuchungen an den enzymmodifizierten Fasern ((PQQ)GDH) konnten unter Substratzugabe (Glukose) bioelektrokatalytische Ströme nachgewiesen werden. Das Fasernetzwerk fungiert hier nicht nur als Immobilisierungsmatrix, sondern als auch als Teil des Signalwandlers.

## Abstract

A three-dimensional polymeric electrode structure was developed, characterized and subsequently coupled with the enzyme pyrroloquinoline quinone-dependent Glucosedehydrogenase (PQQ)GDH. The polymeric fiber network is produced by means of electrospinning from mixtures of polyacrylonitrile (PAN) and three different sulfonated polyanilines on top of ITO electrodes. The mats are uniform in their overall appearance; average diameters of the fibers produced are in the range of a few hundred nanometers. These polymeric structures can be shown to allow electrochemical conversions as verified with the ferri-/ferrocyanide redox couple. In addition, application in bioelectrocatalysis can be demonstrated. For two of three selected blends of PAN with sulfonated polyanilines, a well-defined bioelectrochemical response is obtained upon covalent fixation of PQQ-GDH to the fiber network and subsequent addition of substrate glucose. The electrospun matrix does not only act here as an immobilization support, but at the same time as a transducing element.

## 1. Einleitung

Leitfähige Polymere wie Polyaniline, Polypyrrol oder Polythiophen stellen ein gutes Material zur Konstruktion von Elektroden dar, die mit biologischen Systemen interagieren sollen (Wallace & Kane-Maguire 2002). Daher werden sie gern als Material für Biosensoren eingesetzt, wo sie als Matrix zur Fixierung der Biomoleküle dienen können (Sassolas et al. 2012). Darüber hinaus können sie als molekulare Nanodrähte dienen, die die Enzyme mit den Elektroden verbinden (Sassolas et al. 2012). Insbesondere den Polyanilinen wurde verstärkt Aufmerksamkeit gewidmet, weil diese gegenüber anderen leit-

fähigen Polymeren einige Vorteile aufweisen. Sie sind günstig und einfach herzustellen sowie stabil bei erhöhten Temperaturen und ungünstigen Umwelteinflüssen (Jaymand 2013). Ferner können sowohl unterschiedlich dichte, als auch verschieden strukturierte Polyanilinfilmpräparate werden. Sie weisen eine definierte Ladung auf und es können Biomoleküle gebunden oder eingebettet werden (Dhand et al. 2011). Nicht zuletzt können die Eigenschaften der Polyaniline durch das Einbringen funktioneller Gruppen in die Molekularstruktur angepasst und optimiert werden. Durch Sulfonierung kann, im Vergleich zu unmodifiziertem Polyanilin, neben der Leitfähigkeit und der Löslichkeit auch

die Redoxaktivität über einen weiten pH-Bereich verbessert werden (Jaymand 2013). Sulfonierte Polyaniline sind in einer breiten Auswahl von Lösungsmitteln löslich, während für ein vergleichbares Ergebnis bei unmodifizierten Polyanilinen zusätzliche Substanzen zugegeben werden müssen (Jaymand 2013). Darüber hinaus sind die negativen Ladungen der Sulfonsäure-Gruppen sehr wahrscheinlich vorteilhaft für die Interaktion mit Proteinen und Enzymen. Mehrere Studien legen nahe, dass sulfonierte Polyaniline eine geeignete Umgebung zur Immobilisierung von Redoxproteinen wie Cytochrom c (Zhang et al. 2006) und Hämoglobin (Zhou et al. 2005) sowie auch für Redoxenzyme wie Sulfioxidase

\* korrespondierender Autor

(Sarauli et al. 2012), Peroxidase (Tatsuma et al. 2001), Urease (Słoniewska & Pałysz 2014), Glukoseoxidase (Lee et al. 2010), Tyrosinase (Mangombo et al. 2010) oder Fructosedehydrogenase (Sarauli et al. 2015) darstellen können.

Da die Leistungsfähigkeit von Biosensoren von der Größe der Sensorfläche abhängt, ist es erstrebenswert, diese zu maximieren. Diese Flächenvergrößerung kann etwa durch Aufrauen der Elektroden oder durch dreidimensionale Strukturen erfolgen. Derartige Strukturen können z. B. durch chemische Gasphasenabscheidung, Elektropolymerisation oder Immobilisierung von Nanopartikeln hergestellt werden. Eine verhältnismäßig junge Methode in dieser Hinsicht ist das Elektrospinnen. Durch Elektrospinnen können Netzwerke aus Fasern mit Durchmessern von wenigen hundert Nanometern bis einigen Mikrometern hergestellt werden. Die Technik des Elektrospinnens hat bereits zahlreiche Anwendungen gefunden, beispielsweise in der medizinischen Diagnostik, der Gewebezüchtung, als Material für Superkondensatoren oder Luftfilter (Hughes et al. 2015). Auch erste sensorische Anwendungen wurden bereits gezeigt (Bourourou et al. 2015). Für die Biosensorik wurden elektrogesponnene Fasern bis jetzt überwiegend dazu genutzt, größere Molekülmengen zu fixieren. Von diesem Entwicklungsstand ausgehend ist es erstrebenswert, die Technik weiter zu entwickeln und nicht nur große Molekülmengen auf die Oberfläche zu bringen, sondern diese auch elektrochemisch mit den Fasern zu koppeln.

Typische, beim Elektrospinnen eingesetzte Polymere sind Polyacrylnitril (PAN), Polyethylenoxid (PEO) oder Polyvinylalkohol (PVA). Die Eigenschaften der Fasern können nicht nur durch die Auswahl der Polymere verändert werden, sondern auch durch Zugabe von Nanopartikeln oder Kohlenstoffnanoröhren zu der Spinnlösung (Attout et al. 2008).

In dieser Arbeit wird die Herstellung dreidimensionaler leitfähiger Polymerfasernetzwerke durch Elektrospinnen präsentiert. Zur Herstellung der Fasern werden Gemische dreier unterschiedlich sulfonierter Polyaniline mit nicht leitfähigem Polyacrylnitril elektrogesponnen. Das PAN dient dabei als strukturgebendes Stützpolymer. Die Fasernetzwerke wurden auf ITO-Elektroden abgeschieden. Die präparierten

Fasernetzwerke wurden mittels mikroskopischer Techniken sowie elektrochemisch mit dem anorganischen Redoxpaar Kaliumhexacyanoferrat (II/III) charakterisiert. In weitergehenden Analysen wurde das Enzym *Pyrolochinolinchinon-abhängige Glukosedehydrogenase* (PQQ) GDH kovalent an die Fasern gebunden und anschließend voltametrisch unter Substratzugabe (Glukose) untersucht.

## 2. Ergebnisse und Diskussion

Es wurden sulfonierte Polyaniline eingesetzt, weil diese nicht nur leitfähig sind, sondern auch eine direkte Interaktion mit (PQQ)GDH erlauben. Es wurden drei verschiedene Polymere untersucht, PABSA [poly(3-aminobenzonsäure-co-3-aminobenzensulfonsäure)], PAPASA [poly(3-aminobenzolessigsäure-co-3-aminobenzensulfonsäure)] und PANABMSA [poly(3-aminobenzonsäure-co-2-methoxyanilin-5-sulfonsäure-co-anilin)] (Abb. 1). Abgesehen von Sulfonsäuregruppen wiesen die Polymere auch Carbonsäuregruppen als Seitenketten auf. Letztere erlauben eine kovalente Ankopplung des Enzyms (PQQ)GDH. Die Unterschiede der Polymere ergeben sich durch die verschiedenen Substitutionen am Anilinderivat.

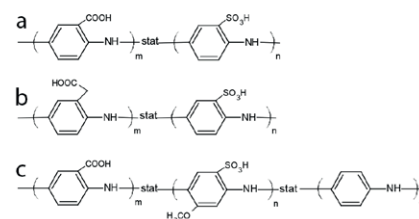


Abb. 1) Chemische Struktur der verschiedenen verwendeten Polyaniline: (a) PABSA, (b) PAPASA, (c) PANABMSA.

### 2.1 Herstellung und Charakterisierung der dreidimensionalen Elektrodenstrukturen

Bei ersten Versuchen mit den reinen Polyanilinen stellte sich heraus, dass diese allein nicht beim Elektrospinnen zu verarbeiten sind. Dies ist wahrscheinlich auf deren geringe Viskosität und geringe Molmasse zurückzuführen. Daher wurden die sulfonierten Polyaniline in Verbindung mit PAN als Stützpolymer verwendet. Hier wurden Fasern erhalten und auf planaren ITO-Elektroden abge-

schieden. Nach der Herstellung wurden sie zunächst mittels Lichtmikroskopie untersucht um die Qualität der Fasernetzwerke zu beurteilen. Anschließend wurden die Polymerfasernetzwerke mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) weitergehend charakterisiert.

Die Abb. 2 und 3 zeigen REM-Aufnahmen von PAN/PAPASA-, PAN/PANABMSA- und PAN/PAPASA-Polymerfasernetzwerken. Bevor die Polymermischungen in DMSO zum Elektrospinnen eingesetzt werden konnten, wurden sie mit Ultraschall behandelt um eine homogene Polymerlösung zu erhalten. Bei einer Pumpgeschwindigkeit von 2  $\mu\text{l}/\text{min}$  wurde nahezu keine Tropfenbildung festgestellt, aber zuverlässig Fäden abgeschieden. In Abhängigkeit des gewählten Polyanilins zeigten die Polymerfasernetzwerke unterschiedliche Farben. So waren PAN/PABSA und PAN/PAPASA bräunlich, während PAN/PANABMSA bläulich war. Die festgestellten Farben stimmen mit den anhand des Redoxzustands zu erwartenden Farben der Polymere nach der Synthese überein. Die Polymerfasernetzwerke unterschieden sich weder bei Verwendung verschiedener Polymergemische noch bei verschiedenen, mit derselben Polymermischung präparierten Elektroden deutlich in der Faserstruktur. Lediglich in einigen Fällen, insbesondere für PAN/PANABMSA, konnten agglomerierte Fasern beobachtet werden. Das kann durch die, verglichen mit den anderen Polymeren, größere Viskosität von PANABMSA-Lösungen erklärt werden.

Das in Abb. 4 dargestellte Polymerfasernetzwerk wurde mit einer Prozessdauer von 15 min hergestellt. Die Dicke des Polymerfasernetzwerks bewegt sich im Bereich einiger Mikrometer. Die durchschnittlichen Faserdurchmesser sind in Tab. 1 zusammengefasst. Im Fall von PAN/PANABMSA sind die Faserdurchmesser und deren Variation im Netzwerk größer als im Fall der anderen Polymere. Darüber hinaus traten bei PAN/PANABMSA deutlich größere Verdickungen auf als bei anderen Polymermischungen. Es gibt eine Vielzahl möglicher Ursachen hierfür; ein entscheidender Faktor könnte aber die verhältnismäßig hohe Prozessspannung von 25 kV sein. Hinsichtlich der Interaktion mit Wasser zeigten alle Polymerfasernetzwerke ein ähnlich hydrophiles und schwammartiges Verhalten. Kontaktwinkelmessungen ergaben bei allen Poly-

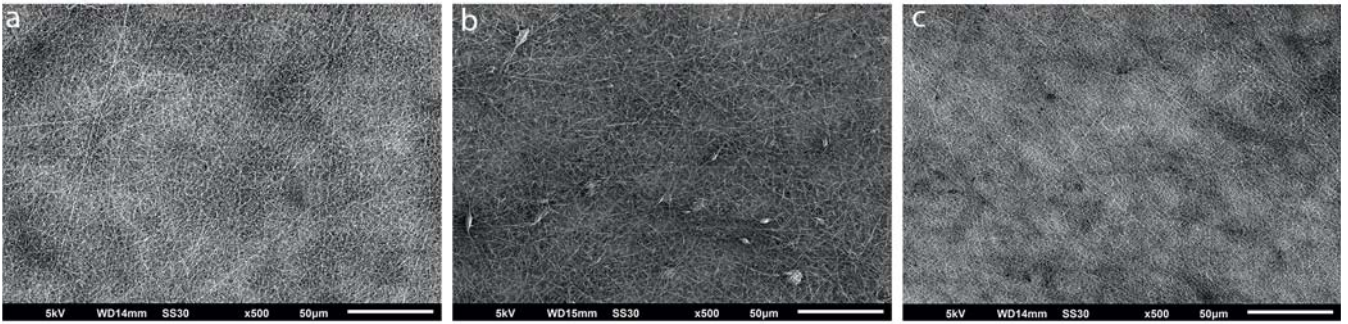


Abb. 2) REM-Aufnahmen der Fasermatten von (a) ITO-PAN/PAPASA, (b) ITO-PAN/PANABMSA, (c) ITO-PAN/PABSA (Legende = 50 µm).

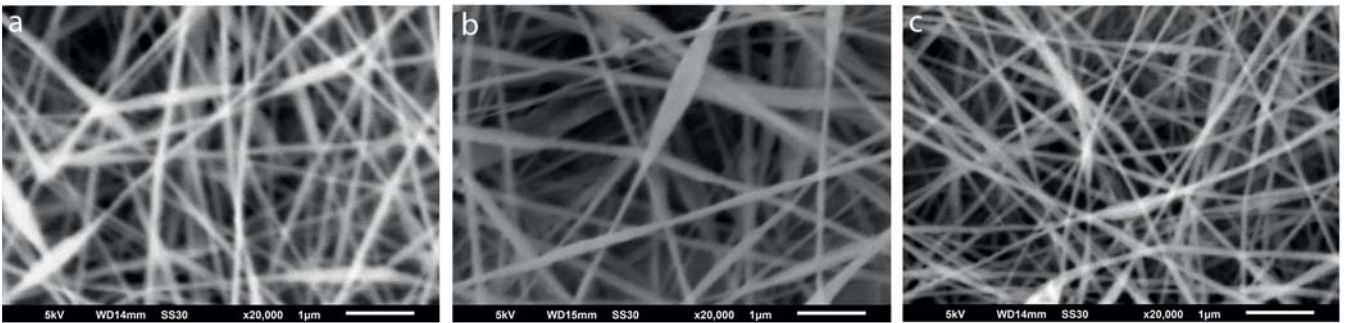


Abb. 3) REM-Aufnahmen der Fasermatten von (a) ITO-PAN/PAPASA, (b) ITO-PAN/PANABMSA, (c) ITO-PAN/PABSA (Legende = 1 µm).

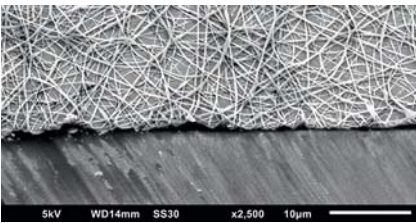


Abb. 4) REM-Aufnahme einer ITO-PAN/PABSA-Matte, hergestellt durch 15 min Elektrospinnen.

Tab. 1: Mittlere Durchmesser der Fasern und Faserverdickungen verschiedener Fasern, ermittelt mittels Elektronenmikroskopie (n=3).

	ITO-PAN/ PAPASA	ITO-PAN/ PANABMSA	ITO-PAN/ PABSA
Durchmesser [µm]	0,13±0,02	0,15±0,04	0,12±0,02
Durchmesser Verdickungen [µm]	0,31±0,08	0,51±0,15	0,30±0,05

meren Werte im Bereich von 30°.

### 2.2 Elektrochemische Charakterisierung der Polymerfasernetzwerke

Mit dem Ziel, die elektrochemischen Eigenschaften der hergestellten Polymerfasernetzwerke zu bestimmen, wurden zykovoltametrische Untersuchungen mit Kaliumhexacyanoferrat (II/III) durchgeführt. Die elektrochemischen Eigenschaften wurden mit denen von ITO-Elektroden verglichen, die die Basis für die Polymerfasernetzwerke darstellten. Im Vergleich zu blanken ITO-Elektroden konnte durch das Aufbringen der Polymerfasernetzwerke ein deutlich verbesserter Umsatz von Kaliumhexacyanoferrat festgestellt werden. Im Vergleich zu den anderen Polymeren zeigte PAN/PABSA die größten Strommaxima (Abb. 5, Tab. 2). PAN/PAPASA und PAN/PABSA weisen niedrigere Abstände

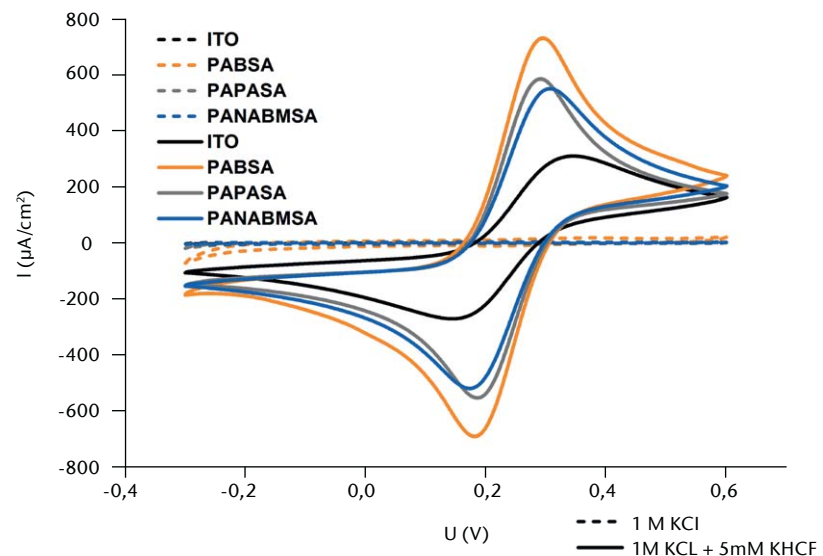


Abb. 5) Zykovoltammogramme der unterschiedlich modifizierten Elektroden, aufgenommen bei einer Scanrate von 100 mV/s, in 1 M KCl und 5 mM  $K_{3/4}[Fe(CN)_6]$ . Die Polymerfasern wurden auf den ITO-Elektroden durch 15 min Elektrospinnen abgeschieden.

**Tab. 2:** Ergebnisse der elektrochemischen Untersuchungen (Peakseparation, formale Potenziale, heterogene Elektronentransfergeschwindigkeitskonstante) der 15 min elektrogenesponnenen Fasermatten an den ITO-Elektroden, durchgeführt bei einer Scanrate von 100 mV/s in 1 M KCl mit 5 mM  $K_{3/4}[Fe(CN)_6]$ .

Elektroden	$\Delta E_p$ [V]	$E_f$ [V]	$k_s \times 10^3$ [cm/s]
PAN/PAPASA	$0,104 \pm 0,007$	$0,239 \pm 0,002$	$9,5 \pm 3,6$
PAN/PANABMSA	$0,139 \pm 0,043$	$0,244 \pm 0,004$	$8,9 \pm 3,6$
PAN/PABSA	$0,113 \pm 0,006$	$0,239 \pm 0,002$	$6,4 \pm 1,1$
ITO	$0,186 \pm 0,052$	$0,244 \pm 0,002$	$5,6 \pm 2,5$

zwischen den Strommaxima auf als PAN/PANABMSA (bei gleicher Spindauer von 15 min). Darüber hinaus ist die Peakseparation auch geringer als für blanke ITO-Elektroden. Das deutet auf eine verbesserte Elektronentransferkinetik hin.

Bei verschiedenen Spindauern von PAN/PABSA, und damit einhergehenden Unterschieden in der Fasermattendicke, waren die Peakseparationen sowohl für die mit 5 min als auch die mit 30 min Spindauer präparierten Elektroden größer als bei Elektroden, die 15 min beschichtet wurden. Hinsichtlich des Redoxpotenzials zeigte sich zwischen den unterschiedlich präparierten Elektroden kein Unterschied. Darüber hinaus wurden die heterogenen Elektronentransfergeschwindigkeitskonstanten nach dem Ansatz von Nicholson & Shain (1964) bestimmt (Tab. 2). Die niedrigsten  $k_s$ -Werte wurden für die blanken ITO-Elektroden ermittelt. Dies deutet darauf hin, dass sich die Oberflächenmodifikationen mit den Polymerfasernetzwerken positiv auf den heterogenen Elektronentransfer des Redoxpaares auswirken. Beim Vergleich der unterschiedlichen

Polymere zeigte PAN/PABSA die geringsten Standardabweichungen, während die  $k_s$ -Werte für PAN/PAPASA und PAN/PANABMSA zwar geringfügig größer sind, aber auch deutlich größeren Schwankungen unterliegen. Aufgrund der erreichten Stromwerte und der Kinetik kann geschlussfolgert werden, dass alle Polymerfasernetzwerke eine geeignete Oberfläche für elektrochemische Sensoren darstellen.

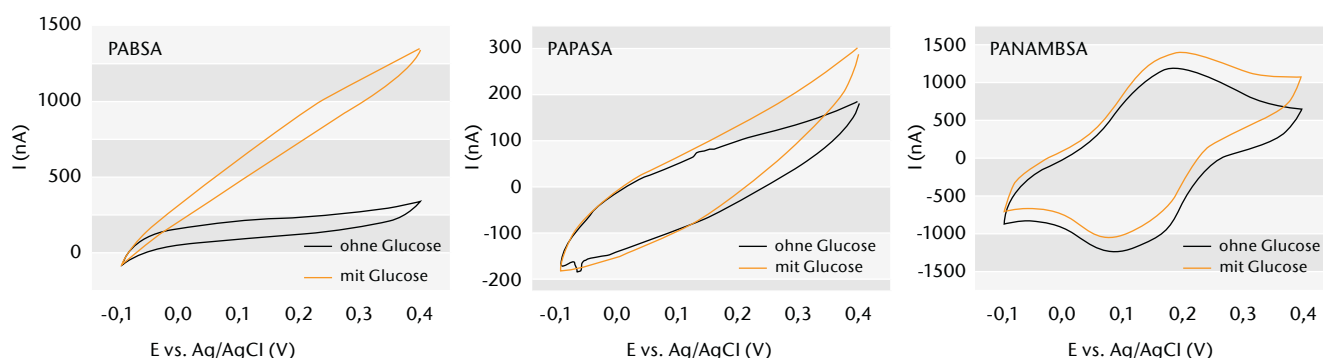
### 2.3 Bioelektrokatalyse von (PQQ)GDH an dem Polymerfasernetzwerk

Um die Eignung der aufgetragenen Polymerfasernetzwerke als Matrix für die Kopplung von Enzymen zu überprüfen, wurde das Enzym (PQQ)GDH an die modifizierten Elektroden gebunden. Dies geschah kovalent über die Carboxylseitengruppen der Polyaniline (Abb. 1), wodurch eine gute Stabilität der Enzymelektroden gewährleistet wird. Der besondere Vorteil der verwendeten sulfonierten Polyaniline besteht darin, dass sie bei neutralen pH-Werten leitfähig sind. Darüber hinaus wurde von der Arbeitsgruppe bereits in der Vergangenheit gezeigt, dass die verwendeten

sulfonierten Polyaniline in der Lage sind, mit (PQQ)GDH Elektronen auszutauschen (Sarauli et al. 2013).

Abb. 6 zeigt die Zyklovoltammogramme der elektrogenesponnenen PAN/PABSA-, PAN/PAPASA- und PAN/PANABMSA-Elektroden ohne das Substrat Glukose. Liegt keine Glukose vor, können für PABSA und PAPASA keine aus Redoxreaktionen resultierenden Ströme beobachtet werden. Für PANABMSA dagegen können eindeutige Redoxreaktionen mit einem formalen Potenzial von  $E = +0,14$  V vs Ag/AgCl festgestellt werden. Ursache für das unterschiedliche elektrochemische Verhalten sind Konformationsunterschiede der verschiedenen Copolymere nach der Synthese. Diese fanden sich auch in vorhergehenden Studien (Sarauli et al. 2013). Nach der Zugabe von Glukose als Substrat konnten jedoch für alle Polymere katalytische Ströme festgestellt werden, welche wiederum ohne Polymerbeschichtung ausbleiben. Dies unterstreicht die Rolle der elektrogenesponnenen Polymerfasermatten für die Enzymreaktion.

Sulfonierte Polyaniline sind redoxaktiv, auch wenn die Ströme wie im Fall von PABSA und PAPASA teilweise sehr schwach sind (Abb. 6). Wenn nach der Zugabe von Substrat ein bioelektrokatalytisches Signal am Redoxpotenzial des Polymers beobachtet wird, dann kann auf einen Mediatorprozess geschlossen werden. Im Fall der ITO-PAN/PANABMSA-Elektroden ist ein derartiger Prozess naheliegend, denn die bioelektrokatalytischen Ströme treten bei  $E = +0,1$  V vs Ag/AgCl auf (Tab. 3). Im Fall von PAN/PABSA und PAN/PAPASA konnte die Bioelektrokatalyse jedoch bereits bei deutlich geringeren Potenzialen festgestellt werden, was darauf hindeutet, dass ein direkter Elektronen-



**Abb. 6)** Zyklovoltammogramme von ITO-PAN/PABSA, ITO-PAN/PAPASA und ITO-PAN/PANABMSA mit kovalent fixierter (PQQ)GDH in Abwesenheit (schwarze Linien) und Anwesenheit von 5 mM Glukose (orange Linien). Die Messungen wurden bei einer Scanrate von 5 mV/s in 30 mM MES Puffer pH 6 bei 25 °C durchgeführt.

transfer zwischen dem Enzym und den Polymeren vorliegt. Diese Beobachtung deckt sich mit zuvor berichteten Startpotenzialen der (PQQ)GDH-Katalyse an polymermodifizierten Elektroden (Sarauli et al. 2013).

Die in Tab. 3 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass in Abhängigkeit der verwendeten Polymere signifikante Unterschiede hinsichtlich der Größe der katalytischen Ströme auftreten. ITO-PAN/PAPASA-Elektroden weisen die geringste bioelektrokatalytische Aktivität auf ( $I_{cat} = 98 \text{ nA}$ ). Im Vergleich dazu sind die Glukose-induzierten Ströme bei PAN/PABSA 10fach so hoch wie bei PAN/PAPASA ( $I_{cat} = 980 \text{ nA}$ ). Somit ist ITO-PAN/PABSA im Hinblick biosensorischer Anwendungen der aussichtsreichste Kandidat für eine effiziente Verbindung von Enzym und Elektrode. Mit dem Ziel, die Leistung der (PQQ)GDH-modifizierten Polymerfasermatten zu optimieren, wurde die Spindauer zwischen 15, 30 und 60 min variiert. Die bioelektrochemischen Ergebnisse der Elektroden nach der Enzymkopplung sind in Tab. 4 zusammengefasst. Durch verlängerte Spinnzeiten und daraus resultierende Fasermattendicken nehmen die bioelektrokatalytischen Ströme ab. Demnach sind nicht zu dicke Polymerfasermatten für die Herstellung elektroaktiver Elektroden vorteilhaft. Auch wenn dickere Polymerfasermatten eine größere Oberfläche zur Bindung von Enzymen bereitstellen, scheinen hier Transportprobleme den Stromfluss zu limitieren (Glukose durch das Netzwerk, Elektronen im Netzwerk). Dabei ist insbesondere auch zu berücksichtigen, dass ein großer Anteil der Fasern aus nicht leitfähigem PAN besteht. Vor diesem Hintergrund, kann die mit den hergestellten Polymerfasermatten ermittelte effektive Bioelektrokatalyse als voller Erfolg gewertet werden.

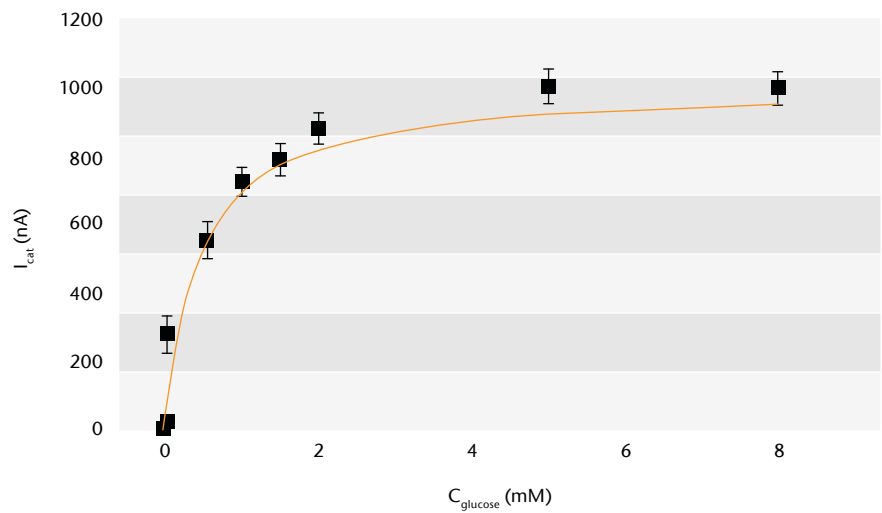
Abb. 7 zeigt eine an ITO-PAN/PABSA-Elektroden ermittelte Kalibrationsgerade ( $n = 3$ ) für die Oxidationsströme bei verschiedenen Glukosekonzentrationen. Entsprechend der Michaelis-Menten-Kinetik kann ein  $K_m$ -Wert von 0,45 mM Glukose ermittelt werden. Die Konzentrationsabhängigkeit des Systems erlaubt im dargestellten Bereich einen eindeutigen Nachweis von Glukose. Es zeigt sich aber auch, dass diese Abhängigkeit bei einer

**Tab. 3:** Startpotenziale der Bioelektrokatalyse und Ströme an ITO-PAN/PAPASA, ITO-PAN/PANABMSA und ITO-PAN/PABSA, jeweils elektrogesponnen für 15 min, nach Zugabe von 5 mM Glukose bei 0,35 V vs Ag/AgCl.

Elektroden	Startpotenzial, E vs. Ag/AgCl, V	Strom, I, nA
ITO-PAN/PABSA	-0.1	984 ± 50
ITO-PAN/PAPASA	-0.05	98 ± 30
ITO-PAN/PANABMSA	+0.1	360 ± 40

**Tab. 4:** Für verschiedene Spinnzeiten gemessene katalytische Ströme der ITO-PAN/PABSA-, ITO-PAN/PAPASA- und ITO-PAN/PANABMSA-Elektroden bestimmt bei +0,35 V vs Ag/AgCl in Gegenwart von 5 mM Glukose ( $n = 3$ ).

Elektroden	Elektrospinnzeit [min]	Stromstärke [nA]
ITO-PAN/PABSA	30	807 ± 30
	60	630 ± 40
ITO-PAN/PAPASA	30	74 ± 20
	60	51 ± 10
ITO-PAN/PANABMSA	30	293 ± 50
	60	226 ± 30



**Abb. 7)** Katalytische Ströme mit ITO-PAN/PABSA-Elektroden (15 min Spindauer) bei verschiedenen Glukosekonzentrationen. Die bioelektrokatalytischen Ströme wurden mit Hilfe von Zyklovoltammetrie bei 0,35 V vs Ag/AgCl ermittelt. Die Messungen wurden in 20 mM MES Puffer pH 6 bei einer Scanrate von 5 mV/s durchgeführt.

Glukosekonzentration > 8 mM nicht mehr besteht. Hier wird zunehmend der Elektronenabtransport vom reduzierten Enzym zum reaktionsbestimmenden Faktor. Nichtsdestotrotz ist der ermittelte Messbereich vergleichbar mit anderen Ergebnissen von (PQQ)GDH an modifizierten Elektroden. Besonders

hervorzuheben ist, dass die Glukosemessung bei sehr niedrigen Potenzialen stattfinden kann, weil die Bioelektrokatalyse bereits bei Potenzialen von -0,1 V vs Ag/AgCl beginnt. Dies ist insbesondere in komplexen Medien von Vorteil, bei denen andere redoxaktive Stoffe vorliegen.

### 3. Fazit

Die Herstellung leitfähiger dreidimensionaler Polymerfasernetzwerke durch Elektrospinnen von drei unterschiedlichen sulfonierten Polyanilinen in Verbindung mit nicht leitendem Polyacrylnitril wurde gezeigt. Bei mikroskopischen Untersuchungen zeigen die PAN/PABSA-, PAN/PAPASA- und PAN/PANABMSA-Polymerfasernetzwerke eine gleichmäßige Faserverteilung auf der ITO-Oberfläche. Die Charakterisierung der Elektroden in Gegenwart des Redoxsystems Kaliumhexacyanoferrat (II/III) deutet darauf hin, dass die Polymerfasernetzwerke einen elektrochemischen Umsatz erlauben. Verglichen mit unmodifizierten ITO-Elektroden weisen die mit dem Polymerfasernetzwerk modifizierten Elektroden größere Faradaysche Ströme und einen verbesserten Elektronentransfer auf. Nach Optimierung der Prozessparameter erfolgt die Herstellung reproduzierbar. Darüber hinaus eignen sich die Polymerfasernetzwerke als Oberfläche für die Kopplung von Enzymen, wie am Beispiel (PQQ)GDH gezeigt. Nach Zugabe des Substrates Glukose können eindeutige katalytische Ströme nachgewiesen werden. In Abhängigkeit von der ausgewählten Polymermischung erfolgt der Ladungstransfer bei der Bioelektrokatalyse ohne zusätzliche Shuttlemoleküle bei niedrigen Potenzialen. Eine eindeutige konzentrationsabhängige Signalantwort wurde mit PAN/PABSA-Elektroden gefunden. Darüber hinaus spielt der Polymerfilm eine aktive Rolle beim Elektronentransport vom Enzym (PQQ)GDH zur Elektrode. Daher stellen die präparierten elektrogenen Polymerfasernetzwerke mit sulfonierten Polyanilinen in Verbindung mit (PQQ)GDH ein aussichtsreiches System für biosensorische Anwendungen dar.

### 4. Material-/Methodenteil

**Chemikalien:** Alle Reagenzien sowie Lösungsmittel wurden ohne weitere Aufreinigung eingesetzt. Dimethylsulfoxid (DMSO),  $\text{CaCl}_2$ , 2-(N-morpholino)ethansulfonsäure (MES), Polyacrylonitril und Kaliumhexacyanoferrat II wurden von Sigma Aldrich bezogen. Aceton, Ethanol und Kaliumhexacyanoferrat III wurden von Roth (CARL

ROTH GmbH und CO. KG, Germany) erhalten. 3-Aminobenzoesäure (3-AB) (Sigma-Aldrich Chemicals Co., Germany) and 3-Aminobenzolsulfonsäure (3-ABS) (Sigma-Aldrich Chemicals Co., Fluka, Germany) wurden aus wässrigem Medium rekristallisiert (3-AB: m.p. 176-177 °C; 3-ABS: m.p. 288 °C). 3-Aminobenzoesäure (3-ABA), 3-Amino-4-Methoxybenzolsulfonsäure (MAS), Ammoniumpersulfat (APS), HCl, DMF und Natriumhydroxid wurden ebenfalls von Sigma-Aldrich Chemicals Co., Fluka, Germany bezogen.

**Copolymerisations:** PAPASA wurde durch chemisch-oxidative Polymerisation synthetisiert: 1 g (0,006 mol) 3-Aminobenzoesäure und 1,14 g (0,006 mol) 3-Aminobenzolsulfonsäure wurden zunächst in 27 ml 0,5 M NaOH gelöst. 2,97 g (0,013 mol) Ammoniumpersulfat (gelöst im Wasser) wurde kontinuierlich unter ständiger Rührung für mehr als 30 Minuten bei Raumtemperatur zugegeben. Die Reaktionsmischung wurde für weitere 24 Stunden bei Raumtemperatur gerührt, um die Reaktion ablaufen zu lassen. Das ausgefallene Produkt wurde abfiltriert, mit der Mischung von 1.2 M HCl und Wasser gewaschen und unter Vakuum bei 80 °C für 24 Stunden getrocknet. PANABMSA wurde auf folgende Weise synthetisiert: Die 1:1-Mischung von 80 ml 0,5 M NaOH mit 8,1 g (0,04 mol) 3-Amino-4-Methoxybenzolsulfonsäure, 10 ml 0,5 M NaOH mit 0,55 g (0,004 mol) 3-Aminobenzoesäure und 3,72 g (0,04 mol) Anilin wurde bei Raumtemperatur gerührt, anschließend 12,3 g (0,054 mol) Ammoniumpersulfat (gelöst in 30 ml Wasser) langsam für mehr als 30 Minuten zugegeben. Die Reaktionsmischung wurde dann weitere 24 Stunden bei Raumtemperatur gerührt, um die Reaktion ablaufen zu lassen. Das ausgefallene Produkt wurde abfiltriert, mit 1,2 M HCl und Wasser gewaschen und unter Vakuum bei 80 °C für 24 Stunden getrocknet. PABSA wurde nach einer bereits publizierten Prozedur synthetisiert (Sarauli et al. 2013).

**Charakterisierung der Polymere:** Die Molekulargewichte wurden mit GPC mit bestimmt. Die Messungen erfolgten in DMF. IR-Spektren wurden mit Bio-Rad FTX 3000MX Spektrometer aufgenommen.  $^1\text{H-NMR}$  Messungen erfolgten

mittels Bruker Instrument.

**Polymerlösung:** Vor Benutzung wurden 50 mg/ml Polyacrylonitril und 10 mg/ml Polyanilin in DMSO aufgelöst, gemischt und für 11 Stunden ins Ultraschallbad gegeben.

**Elektrospinning:** Zunächst wurden die ITO-Elektroden gesäubert. Dafür wurden sie abwechselnd mit DMSO, Aceton und Ethanol gewaschen und anschließend für 15 Minuten ins Ultraschallbad platziert. Die Polymerlösung wurde mit der Geschwindigkeit von 2  $\mu\text{l}/\text{min}$ , mit einem Elektrodenabstand von 35 cm bei der Spannung von 25 kV in der Elektrospinnkabine (IME Technologies, Niederlande) gesponnen. Die Temperatur wurde auf 25 °C eingestellt und die Luftfeuchtigkeit auf 40 % gesetzt. Beide Parameter wurden während des Spinnprozesses kontrolliert. Dabei wurden die Spinnzeiten von 5 bis 60 Minuten variiert.

**Charakterisierung von Polymerfilmen:** Die beschichteten Elektroden wurden mikroskopisch (Olympus DSX500, Olympus Deutschland GmbH, Germany und JEOL JSM-6510 SEM, JEOL Germany GmbH, Germany) untersucht. Kontaktwinkelmessungen erfolgten mittels DataPhysics OCA15EC Gerät (DataPhysics GmbH, Germany).

**Enzymlösung:** Die Glukosedehydrogenase (apoGDH, Roche GmbH) wurde in 5 mM MES Puffer+1 mM  $\text{CaCl}_2$  aufgelöst und der pH-Wert auf 5 eingestellt. Danach wurde apoGDH mit PQQ rekonstituiert. Dafür wurden apoGDH und PQQ gemischt und 1 Stunde im Dunkeln bei Raumtemperatur inkubiert. Nach der Rekonstitution wurden die Enzymlösungen bei -20 °C gelagert. Vor jeder Messung wurde die spezifische Aktivität des Enzyms bestimmt. Der Wert der spezifischen Aktivität betrug dabei  $2200 \pm 30 \text{ U mg}^{-1}$ . 2,6-Dichlorophenolindophenol wurde als Elektronenakzeptor verwendet.

**Enzymbindung:** Die mit Polymerfilmen beschichteten viereckigen Indium-Zinn-Oxid (ITO)-Elektroden (bezogen von Sigma-Aldrich, Taufkirchen, Germany) wurden als Material für die kovalente Bindung des Enzyms verwendet. Dafür wurden die Elektroden in eine Lösung

von EDC/NHS (100 mM/25 mM) in 5 mM MES + 1 mM CaCl<sub>2</sub> Puffer (pH 6.5) für 15 Minuten platziert, danach dreimal mit dem gleichen Puffer gewaschen. Anschließend wurden die Elektroden in der Enzymlösung 1 Stunde lang inkubiert, danach mit Puffer gewaschen.

**Elektrochemie:** Die Elektroden wurden zykovoltametrisch mit Hilfe des CH-Instruments 1230b in einer 1 ml Messzelle mit einer Ag/AgCl/1 M KCl Referenzelektrode (Biomtra, Germany) und einer Pt-Draht-Gegenelektrode charakterisiert. Die ersten Untersuchungen wurden mit einer Mischung von K<sub>4</sub>[Fe(CN)<sub>6</sub>]/K<sub>3</sub>[Fe(CN)<sub>6</sub>] (5 mM) in 1 M KCl durchgeführt. Die bioelektrochemischen Studien erfolgten in derselben Messzelle in 20 mM MES Puffer bei pH 6. Das katalytische Verhalten des Systems wurde bei unterschiedlichen Glukosekonzentrationen untersucht. Zykovoltametrische Messungen wurden mit Hilfe des µAutolab Type-II-Gerätes (Metrohm) bei einer Scanrate von 5 mV s<sup>-1</sup> durchgeführt. Das Potenzialfenster wurde zwischen -0,4 und +0,4 V vs. Ag/AgCl ausgewählt. Die Datenanalyse erfolgte mit der GPES-Software (General Purpose for Electrochemical System, Eco Chemie, Niederlande).

## LITERATUR

- Attout A, Yunus S, Bertrand P (2008) Electrospinning and alignment of polyaniline-based nanowires and nanotubes. *Polym Eng Sci* 48(9):1661–1666. doi: 10.1002/polb.20969
- Bourourou M, Holzinger M, Bossard F, Hugenell F, Maaref A, Cosnier S (2015) Chemically reduced electrospun polyacrylonitrile–carbon nanotube nanofibers hydrogels as electrode material for bioelectrochemical applications. *Carbon* 87:233–238. doi: 10.1016/j.carbon.2015.02.026
- Dhand C, Das M, Datta M, Malhotra BD (2011) Recent advances in polyaniline based biosensors. *Biosens Bioelectron* 26(6):2811–2821. doi: 10.1016/j.bios.2010.10.017
- Hughes LA, Gaston J, McAlindon K, Woodhouse KA, Thibeault SL (2015) Electrospun fiber constructs for vocal fold tissue engineering: Effects of alignment and elastomeric polypeptide coating. *Acta Biomater* 13:111–120. doi: 10.1016/j.actbio.2014.10.039
- Jaymand M (2013) Recent progress in chemical modification of polyaniline. *Prog Polym Sci* 38(9):1287–1306. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2013.05.015
- Lee KP, Komathi S, Nam NJ, Gopalan AI (2010) Sulfonated polyaniline network grafted multi-wall carbon nanotubes for enzyme immobilization, direct electrochemistry and biosensing of glucose. *Microchem J* 95(1):74–79. doi: 10.1016/j.microc.2009.10.008
- Mangombo ZA, Baker P, Iwuoha E, Key D (2010) Tyrosinase biosensor based on a boron-doped diamond electrode modified with a polyaniline-poly(vinyl sulfonate) composite film. *Microchim Acta* 170(3–4):267–273. doi: 10.1007/s00604-010-0378-1
- Nicholson RS, Shain I (1964) Theory of Stationary Electrode Polarography. Single Scan and Cyclic Methods Applied to Reversible, Irreversible, and Kinetic Systems.

*Anal Chem* 36(4):706–723. doi: 10.1021/ac60210a007

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

Sarauli D, Xu C, Dietzel B, Schulz B, Lisdat F (2013) Differently substituted sulfonated polyanilines: The role of polymer compositions in electron transfer with pyrroloquinoline quinone-dependent glucose dehydrogenase. *Acta Biomater* 9(9):8290–8298. doi: 10.1016/j.actbio.2013.06.008

Sarauli D, Xu C, Dietzel B, Siba K, Leimkühler S, Schulz B, Lisdat F (2012) Thin films of substituted polyanilines: interactions with biomolecular systems. *Soft Matter* 8(14):3848–3855. doi: 10.1039/c2sm07261k

Sassolas A, Blum LJ, Leca-Bouvier BD (2012) Immobilization strategies to develop enzymatic biosensors. *Biotechnol Adv* 30(3):489–511. doi: 10.1016/j.biotechadv.2011.09.003

Słoniewska A, Patys B (2014) Supramolecular polyaniline hydrogel as a support for urease. *Electrochim Acta* 126:90–97. doi: 10.1016/j.electacta.2013.10.164

Tatsuma T, Ogawa T, Sato R, Oyama N (2001) Peroxidase-incorporated sulfonated polyaniline–polycation complexes for electrochemical sensing of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. *J Electroanal Chem* 501(1–2):180–185. doi: 10.1016/S0022-0728(00)00525-8

Wallace GG, Kane-Maguire L (2002) Manipulating and Monitoring Biomolecular Interactions with Conducting Electroactive Polymers. *Adv Mater* 14(13–14):953–960. doi: 10.1002/1521-4095(20020705)14:13/14<953::AID-ADMA953>3.0.CO;2-T

Zhang L, Jiang X, Niu L, Dong S (2006) Syntheses of fully sulfonated polyaniline nano-networks and its application to the direct electrochemistry of cytochrome c. *Biosens Bioelectron* 21(7):1107–1115. doi: 10.1016/j.bios.2005.04.004

Zhou B, Sun R, Hu X, Wang L, Wu H, Song S, Fan C (2005) Facile Interfacial Electron Transfer of Hemoglobin. *Int J Mol Sci* 6(12):303–310. doi: 10.3390/i6120303

## AUTOREN

**Johannes Gladisch**  
**David Sarauli**  
**Daniel Schäfer**  
**Fred Lisdat**  
 Technische Hochschule Wildau  
 Institut für Angewandte Biowissenschaften  
 Forschungsgruppe Biosystemtechnik

**Birgit Dietzel**  
 Technische Hochschule Wildau  
 Forschungsgruppe Photonik,  
 Laser- und Plasmatechnologien

**Burkhard Schulz**  
 Institut für Dünnschichttechnologie  
 und Mikrosensorik Teltow

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





# ECS-Komplex – ein neuer Biomarker bei Wachstumshormonstörungen?

Wilhelm Gossing\*, Lars Radke, Marcus Frohme, Henrik Biering

## Zusammenfassung

Störungen im Metabolismus des Wachstumshormons können sich als Wachstumshormonmangel oder -überschuss (Akromegalie) äußern. In beiden Fällen handelt es sich um seltene Krankheiten, die aufwendig behandelt werden müssen, da jeder Patient anders auf seine jeweilige Medikation anspricht. Zur Bestimmung des individuellen Ansprechverhaltens auf die medikamentöse Behandlung wird *Insulin-like Growth Factor 1* verwendet, das jedoch als unzuverlässig für die Therapiekontrolle gilt. Um die Diagnostik und Therapie von Wachstumshormonstörungen zu verbessern, wurde in dieser Pilotstudie der Nutzen des neuen potenziellen Biomarkers Elongin B/C-Cullin5-Socs-box Komplex (ECS-Komplex) überprüft. Die fünf Proteine des Komplexes üben zusammen einen negativen Feedback-Mechanismus auf den Wachstumshormonrezeptor aus und regulieren ihn in Abhängigkeit vom Wachstumshormonspiegel im Blut. Für diese Pilotstudie wurden vier Patienten mit Wachstumshormondefizienz und 15 Patienten mit Akromegalie rekrutiert. Die Messung von Unterschieden in der Expression der Gene auf RNA-Ebene in Blutproben der Patienten erlaubt erste Aussagen über deren Eignung als therapeutische Marker für diese Krankheiten.

## Abstract

Growth hormone (GH) dysfunctions can occur as a GH-deficiency (GHD) or an overproduction of GH, leading to acromegaly. Both are rare diseases, which have to be treated for many years before the correct individual dosage is found and a mitigation of symptoms can be achieved. Current medical therapy is determined by the levels of the insulin-like growth factor-1, which is considered to be an unreliable theranostic tool. In order to improve the diagnosis and therapy of patients with GH-dysfunctions, we investigated the benefits of the novel potential biomarker Elongin B/C-Cullin5-Socs-box complex (ECS-complex). Together, these proteins regulate the growth hormone receptor levels according to the blood GH concentration through a negative feedback loop. For this study, we were able to recruit four patients with a GHD and 15 patients with acromegaly.

The detected differential expression of the ECS-complex in patients with growth hormone dysfunctions allows for first conclusions about the potential of those proteins as predictive biomarker molecules for individualized therapies.

## 1. Einleitung

Das Wachstumshormon (GH) wird als Peptidhorm von der Hypophyse ausgeschüttet und ist hauptsächlich für das Zell- und Knochenwachstum zuständig (Ahmed & Farquharson 2010). Darüber hinaus reguliert GH den Energie- und Fettstoffwechsel, die Muskelmasse, die Sexual- und weitere Funktionen (Grumbach et al. 1998).

Diese Arbeit beschäftigt sich mit zwei Stoffwechselkrankheiten, die durch Störungen des Wachstumshormonmetabolismus verursacht werden: Die Wachstumshormondefizienz (GHD)

äußert sich u. a. durch eine verringerte GH-Produktion in der Hypophyse, während die Akromegalie durch eine Überproduktion entsteht. Beide Krankheiten führen zu kardiovaskulären Beeinträchtigungen und dadurch zu einer erhöhten Mortalität. Zudem haben die Stoffwechselstörungen erhebliche Auswirkungen auf körperliche Leistungsfähigkeit und äußeres Erscheinungsbild, wodurch die Lebensqualität der Patienten verringert wird (Reed et al. 2013).

Häufigster Auslöser der GHD sind genetische Prädispositionen, wobei die genaue Ursache oftmals unklar bleibt.

Krankheitsauslösende Mutationen können beispielsweise die GH-sezierenden Zellen der Hypophyse, die für das GH codierenden Gene oder etwa andere Proteine der GH-Signalkaskade betreffen (Mullis 2010). Akromegalie wird hingegen hauptsächlich durch gutartige Hypophysenadenome induziert, die am häufigsten um das 40. Lebensjahr herum auftreten. Die GHD hat eine jährliche Inzidenz von 33 Personen pro eine Million Einwohner (Stochholm et al. 2006), wohingegen Akromegalie nur bei 3–4 Personen pro eine Million Einwohner im Jahr auftritt (Holdaway & Raja-

\* korrespondierender Autor

soorya 1999). Die geringe Stabilität des GH im Blut erlaubt üblicherweise nicht dessen direkte Messung zum Nachweis einer GHD; stattdessen wird meist ein Provokativtest in der Form eines Insulin-Toleranz-Tests durchgeführt (Aimaretti et al. 1998).

Hauptsächlich wird die Bestimmung des *insulinähnlichen Wachstumsfaktors 1* (IGF-1) im Patientenblut unterstützend zusammen mit alters- und geschlechtsabhängigen Referenzwerten für die Diagnose von GHD und Akromegalie herangezogen.

Zur Behandlung einer GHD muss das im Körper fehlende Wachstumshormon täglich durch die Gabe von rekombinant hergestelltem GH ausgeglichen werden.

Bei der Akromegalie sind Hirntumore die Hauptursache, sodass das schädigende Gewebe operativ entfernt bzw. durch Bestrahlung behandelt wird, um eine Tumoregression zu erreichen.

Dennoch wird häufig auch nach dem operativen Eingriff eine erhöhte GH-Sekretion bei den Patienten festgestellt, sodass eine weiterführende Behandlung mit Medikamenten erforderlich wird. Derzeit werden zur Behandlung der Akromegalie hauptsächlich synthetische Analoga des Somatostatins verwendet, die die Ausschüttung des

GH bereits in der Hypophyse unterbinden. Momentan sind Lanreotid von Ipsen und Octreotid von Novartis die einzigen zugelassenen Medikamente für diese Form der Behandlung. Nur bei einer Unverträglichkeit oder Resistenz gegenüber den Somatostatin-Analoga wird das Pegvisomant, welches von Pfizer produziert wird, eingesetzt. Dies ist eine mutierte und pegylierte Form des nativen GH und wirkt am Wachstumshormonrezeptor (GHR) als kompetitiver Inhibitor (Fuh et al. 1992).

Die Messung des IGF-1-Serumspiegels wird zur Bestimmung des individuellen Ansprechverhaltens gegenüber den Medikamenten zwar häufig eingesetzt (Mukherjee & Shalet 2009), dennoch gilt IGF-1 als sehr variabel und demnach unzuverlässig für die Diagnostik von Wachstumshormonstörungen (Carel & Butler 2010, Kelnar 2010). Außerdem gibt es eine im Alter zunehmende erhebliche Überschneidung der gemessenen IGF-1-Konzentrationen bei Kranken und Gesunden (Hilding et al. 1999).

Aus diesen Gründen haben wir nach einem alternativen Biomarker gesucht und schließlich das Protein *Suppressor of Cytokine Signaling 2* (SOCS2) identifiziert. Es wird bei einem Wachstumshormonstimulus zusammen mit IGF-1

koexprimiert und reguliert den GHR in der Form eines negativen Feedback-Loops (Yang et al. 2013). Auf diese Weise fängt das SOCS2 im Körper eines gesunden Menschen exzessive GH-Stimuli ab.

Experimente mit Knock-out-Mäusen konnten zeigen, dass SOCS2 eine tragende Rolle beim Wachstum hat (Metcalf et al. 2000). So wurden SOCS2-defiziente Mäuse bis zu 40 % größer als die Kontrollen, während sie diesen veränderten Phänotyp nicht zeigten, wenn sie gleichzeitig unter einer GHD litten (Metcalf et al. 2000).

Zudem wurde kürzlich entdeckt, dass kleinwüchsige Patienten eine höhere Expression des SOCS2-Gens haben (Ocaranza et al. 2012), wodurch letztendlich der Minderwuchs ausgelöst worden sein könnte.

Die Sensitivität der Zelle gegenüber dem GH wird hauptsächlich durch die Menge der GH-Rezeptoren in der Zellmembran reguliert. Nach der Bindung des GH wird der Rezeptor phosphoryliert und infolge einer intrazellulären Signalkaskade ubiquitinyliert, sodass dieser vom Proteasom erkannt und abgebaut wird (Leung et al. 1987) (Abb. 1). Genauer betrachtet ist ein E3-Ubiquitin-Ligase-Komplex in Verbindung mit dem SOCS2-Protein für diese Markierung mit Ubiquitin-Molekülen verantwortlich (Kamura et al. 2004).

Eine wichtige Domäne des SOCS2-Proteins ist die SOCS-Box, die mit den Proteinen Elongin B, Elongin C, Cullin 5 und Ring-Box Protein 2 (Rbx2) interagiert. Zusammen bilden diese fünf Proteine den ElonginB/C-Cullin5-Socs-box Complex (ECS-Komplex). Dieser Komplex ist für die Funktion von SOCS2 essenziell, da er dieses stabilisiert und ebenso seinen Abbau unterbindet (Vesterlund et al. 2011). Des Weiteren sind die Elongine B und C in die Regulation der Genexpression des SOCS2 involviert und beeinflussen dessen korrekte Faltung (Babon et al. 2008).

Die Inhibierung des GH-Signalwegs wird durch die Assoziation der SH2-Bindedomäne des SOCS2 an die phosphorylierten Tyrosine Y487 und Y595 des GHR erreicht (Uyttendaele et al. 2007). Demnach ist SOCS2 nicht in der Lage, an inaktivierte Rezeptoren zu binden, wodurch die Zelle sensitiv gegenüber geringeren GH-Spiegeln

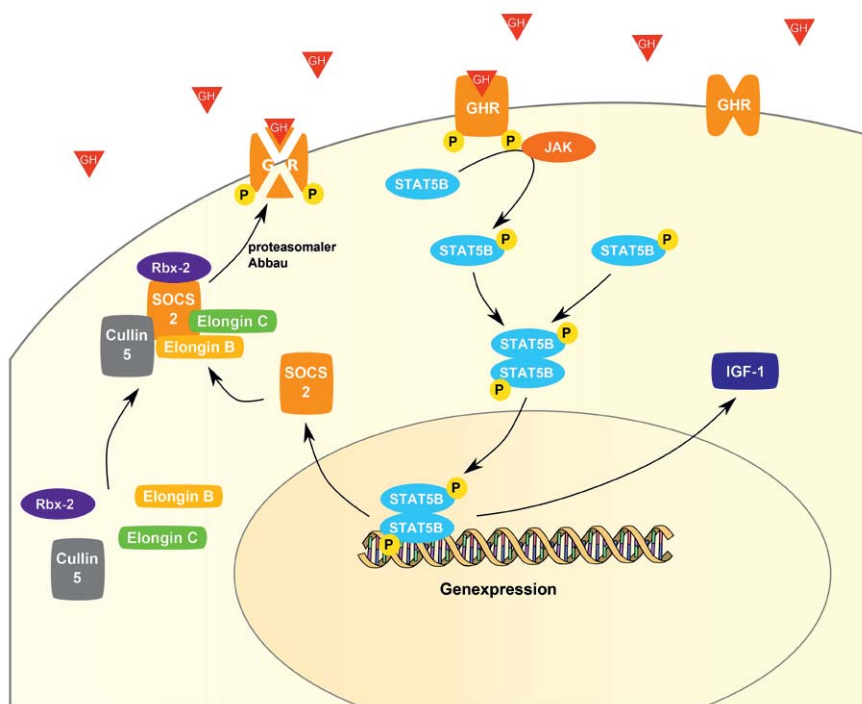


Abb. 1) Der Stoffwechselweg des Wachstumshormons induziert die Bildung des ECS-Komplexes. GH induziert die Signalkaskade am GHR, an dessen Ende STAT5B die Expression von SOCS2 induziert. Dieses tritt im Cytoplasma mit den Proteinen Elongin B/C, Cullin 5 und Rbx-2 zusammen und nimmt als Komplex seine regulatorische Funktion ein.

im Blut bleiben kann (Vesterlund et al. 2011). Mutationen an diesen Aminosäuren führten zu einem Funktionsverlust des *SOCS2* am GHR (Greenhalgh et al. 2002). Nach der Bindung des *SOCS2* an den GHR wird das Rbx2 – eine andere Komponente des ECS-Komplexes – aktiv, welches nun Ubiquitin-Moleküle an den GHR anlagert, sodass dieser vom Proteasom erkannt und folglich abgebaut wird (Kamura et al. 2004). Cullin 5 ist als fünftes Protein des ECS-Komplexes dafür zuständig, die Substraterkennungseinheit (*SOCS2*) und den enzymatischen Teil des Komplexes (Rbx2) in räumliche Nähe zueinander zu bringen (Thomas et al. 2013). Diese Regulierung der GHR-Spiegel in der Zellmembran durch den ECS-Komplex bewirkt einen negativen Feedback-Mechanismus, der die GH-Sensitivität der Zelle und damit das Wachstum des gesamten Organismus beeinflusst.

Demnach sind diese Proteine vielversprechende Kandidaten, um das Ansprechverhalten gegenüber zugelassenen Medikamenten bei Wachstumshormonstörungen vorauszusagen. Bei dieser Studie wurde eine Messung der Expression der fünf Gene des ECS-Komplexes in Patienten mit Wachstumshormonstörungen und gesunden Kontrollen durchgeführt, um Informationen über den potenziellen Nutzen dieses Komplexes für die individualisierte Medizin zu erlangen. Hier stellen wir die ersten Einblicke in das transkriptionelle Verhalten des ECS-Komplexes bei Wachstumshormonstörungen vor.

## 2. Material und Methoden

### 2.1. Ethikvotum und Patienten

Neben der routinemäßigen Blutabnahme wurde eine weitere Probe für diagnostische Zwecke genommen, weswegen nach § 24 Medizinproduktegesetz ein vorheriger Ethikantrag erforderlich war. Alle Teilnehmer gaben ihr Einverständnis zur Verwendung ihres Blutes für diese Studie und zur anonymen Datenspeicherung. Ein zustimmendes Ethikvotum wurde am 04.03.2013 von der Landesärztekammer Berlin erteilt.

Vier Patienten mit einer GHD (Altersdurchschnitt 56,25 Jahre) und 15 Pa-

tienten mit Akromegalie (Altersdurchschnitt 53,6 Jahre) wurden zwischen Juli und Dezember 2014 rekrutiert (Tab. 1). Einziges Einschlusskriterium war eine diagnostizierte GHD oder Akromegalie – mit oder ohne bereits bestehender Behandlung. Die Patienten mit einer GHD wurden unterteilt in neu diagnostizierte Patienten (ohne Behandlung) und Patienten mit Behandlung, die gemäß anerkannten Referenzwerten des IGF-1 außerhalb des Normalbereichs lagen. Die Akromegaliepatienten wurden unabhängig von ihrem Therapiestatus, jedoch abhängig vom angewandten Medikament in die vier Gruppen *Lanreotid*, *Octreotid*, *Pegvisomant* und *Zustand nach erfolgreicher Hypophysenoperation* unterteilt. Da das medikamentös verabreichte GH identisch mit dem nativen GH des Körpers ist, wurden vier Patienten (Durchschnittsalter 44,5 Jahre) mit IGF-1-Werten im Normalbereich (Durchschnitt IGF-1 146,5) als Kontrollgruppe in dieser Studie verwendet.

Geschlecht, Alter und Body-Mass-Index (BMI) jedes Patienten wurden eingeholt, da Zusammenhänge zum Wachstumshormonhaushalt bestehen, die auf ihren Einfluss für diese Studie untersucht werden sollen. Die vorwiegend bei Frauen vorkommenden Östrogene inhibieren die intrazellulären Effekte des GH und haben somit auch einen möglichen Einfluss auf die *SOCS2*-Expression (Leung et al. 2003). Die Sekretion des GH verringert sich mit fortschreitendem Alter sehr stark, da die somatotrophen Zellen in der Hypophyse stetig absterben. Für die korrekte Beurteilung des Krankheitsstatus der Patienten anhand der IGF-1-Werte – und später eventuell auch anhand der Genexpression – ist daher das Alter der Patienten enorm wichtig. Darüber hinaus besteht bei Patienten mit einer Akromegalie die Gefahr einer Diabetes-Erkrankung, da das Wachstumshormon den Blutzuckerspiegel anhebt und gleichzeitig die Insulinresistenz erhöht (Colao et al. 2004). Deshalb wird der BMI für eine etwaige Korrelation mit der Genexpression benötigt.

### 2.2. Probenvorbereitung

Die Blutproben wurden bei den regulären vierteljährlichen Arztbesuchen der Patienten gesammelt und unver-

züglich weiter bearbeitet. Durch einen Aufschluss der roten Blutkörperchen mit 0,17 M Ammoniumchloridlösung und zweifache Zentrifugation für jeweils fünf Minuten bei 453 x g wurden zunächst die mononukleären Zellen des peripheren Blutes (PBMCs) aus je 1,5 ml frischen Vollblutes isoliert. Die gesamte RNA der Zellen wurde mithilfe des InviTrap Spin Universal RNA mini Kit (Stratagene Molecular) extrahiert und Ertrag und Reinheit mit dem NanoDrop ND1000 (Nanodrop Instruments) gemessen. Der Quotient aus 260/280 nm betrug in allen Proben >2,0. Folgend wurde mit dem 2100 Bioanalyzer (Agilent) die Qualität kontrolliert. 300 ng RNA wurden mit Oligo(dt)-Primern und Maxima Reverse Transkriptase (Thermo Scientific) in cDNA umgeschrieben. Abschließend wurden die Proben 1:8 mit Reinstwasser (Roche Applied Science) verdünnt.

### 2.3. Real-Time RT-PCR

Die Real-Time-PCR-Ansätze enthielten 1,5 ng cDNA, 10 µl SYBR Green 1 Master (Roche Applied Science) und 5 µM Forward und Reverse Primer. Jeder Ansatz wurde als Triplikat auf dem LightCycler LC480 System (Roche) wie folgt durchgeführt: 5 min Präinkubation bei 94°C gefolgt von 45 Amplifikationszyklen bei 94°C für 10 sec, 61°C für 7 sec und 72°C für 10 sec. Schmelzkurven wurden zwischen 61°C und 94°C bei einer Ramp Rate von 0,11°C/sec erstellt. Jede 96-Well-Platte enthielt zusätzlich drei No Template Controls für jedes Primerpaar. Die Cq-Werte wurden durch die Second Derivative Maximum Method der LightCycler 480 Software 1.5.0 (Roche) berechnet. Die Experimentaldaten wurden als .txt-File exportiert und die Effizienzen der PCR mithilfe von LinRegPCR v2012.3 berechnet.

### 2.4. Normalisierung und statistische Datenanalyse

Zur Normalisierung der Genexpressionsdaten wurden die sieben Referenzgene *ACTB*, *B2M*, *HPRT*, *GAPDH*, *SDHA*, *PPIA*, *YWHAZ* zusätzlich in allen Proben gemessen. Die besten vier Referenzgenkandidaten konnten mithilfe der Programme geNorm, Normfinder und Bestkeeper identifi-

**Tab.1:** Überblick über die Patientendaten und Einordnung in Gruppen

Bezeichnung	Therapie-dauer	Geschlecht	Alter	BMI	IFG-1
A1 GHD unbehandelt	/	w	57	35,4	34,6
A2 GHD unbehandelt	/	w	68	23,0	17,4
A2 GHD unbehandelt	/	w	65	28,7	30,3
C2 GHD behandelt mit IGF-1 außerhalb NB*	6 Monate	w	35	28,5	412,4
E1 Akromegalie - Lanreotid	3 Jahre	m	30	42,5	1189
E2 Akromegalie - Lanreotid	3 Jahre	m	60	38,1	380,4
E5 Akromegalie - Lanreotid	3 Jahre	m	69	29,7	152,0
F1 Akromegalie - Octreotid	5 Jahre	w	43	28,5	267,3
F3 Akromegalie - Octreotid	2 Jahre	w	46	37,0	350,5
G1 Akromegalie - Pegvisomant	5 Jahre	w	62	26,6	186,8
G2 Akromegalie - Pegvisomant	7 Jahre	w	70	38,1	207,9
G4 Akromegalie - Pegvisomant	6 Jahre	m	82	39,8	223,7
G5 Akromegalie - Pegvisomant	4 Jahre	w	31	22,0	168,6
H1 Akromegalie mit Z.n. Hypophysen-OP**	2 Jahre	m	49	31,8	91,8
H2 Akromegalie mit Z.n. Hypophysen-OP**	5 Monate	m	51	48,3	201,6
H3 Akromegalie mit Z.n. Hypophysen-OP**	2 Jahre	w	54	22,9	206,6
H4 Akromegalie mit Z.n. Hypophysen-OP**	1 Jahr	w	51	27,8	170,8
H5 Akromegalie mit Z.n. Hypophysen-OP**	13 Jahre	w	51	32,4	377,4
H7 Akromegalie mit Z.n. Hypophysen-OP**	15 Jahre	w	55	26,0	163,0
GHD behandelt mit IGF-1 im NB (Kontrolle)	6 Jahre	w	43	30,2	156,9
GHD behandelt mit IGF-1 im NB (Kontrolle)	2 Jahre	w	40	41,9	147,2
GHD behandelt mit IGF-1 im NB (Kontrolle)	3 Jahre	w	59	20,7	125,6
GHD behandelt mit IGF-1 im NB (Kontrolle)	7 Jahre	m	36	21,2	156,2

\* NB = Normalbereich, \*\* Zustand nach erfolgreicher Entfernung des Hypophysenadenoms

ziert werden. Als Ergebnis schlugen diese drei Programme übereinstimmend die Gene *YWHAZ*, *B2M*, *GAPDH* und *PPIA* als stabilste Referenzgene vor, welche daraufhin durch geometrisches Mitteln zu einem Referenzgenindex vereint wurden. Die Genexpressionswerte wurden mit der effizienzkorrigierten  $\Delta\Delta C_q$ -Methode aus dem Median eines jeden Triplikats berechnet. Das statistische Signifikanzniveau wird bei dieser Studie ab einem p-Wert von kleiner 0,05 erreicht.

### 3. Ergebnisse

Der Quotient aus 260/280 nm der RNA im Spektrometer ergab eine Reinheit von > 2,0 für alle Proben. Der mittlere RIN-Wert der RNA-Qualitätsbestimmung lag bei 9,0. Die Effizienzen der qPCR reichten von 70 % bis 83 % bei den Referenzgenen und von 72 % bis 76 % bei den Zielgenen. Des Weiteren wurde nach jedem qPCR-Lauf eine Schmelzkurvenanalyse durchgeführt, um sicherzustellen, dass ausschließlich die korrekte cDNA amplifiziert worden ist. In jeder qPCR-Reaktion

entstand ein einzelner Peak an der entsprechenden Schmelztemperatur des gewünschten Produktes.

Wir hatten erwartet, in dieser Studie signifikante Genexpressionsunterschiede zwischen gesunden Menschen und Menschen mit einer diagnostizierten Wachstumshormonstörung zu finden, die mit dem IGF-1-Status korrelieren. Die Genexpression der 19 involvierten Probanden zeigte Muster, die sich mit unseren Erwartungen deckten. Während bei den Patienten mit einer GHD vier von fünf Genen des untersuchten Biomarkers signifikant reguliert wa-

ren, zeigten sich bei den Patienten mit einer Akromegalie geringere Unterschiede. Dies steht offenbar im Zusammenhang mit den laufenden medikamentösen Behandlungen, und je nach eingesetztem Medikament ergab sich ein anderes Expressionsprofil. Bei den unbehandelten GHD-Patienten waren die drei Gene *SOCS2* (0,54,  $p=0,044$ ), *TCEB2* (0,7,  $p=0,05$ ) und *CUL5* (0,22,  $p=0,002$ ) signifikant herunterreguliert, während das Gen *TCEB1*, welches für das Elongin C codiert, im Schnitt 6,4-fach höher als in den Kontrollen exprimiert wurde, jedoch eine hohe Standardabweichung von 3,7 aufwies ( $p=0,012$ ) (Abb. 2). Da die IGF-1-Werte der untersuchten Akromegalie-Patienten durch die bereits begonnene Titration der Medikamente nahe am bzw. innerhalb des gültigen Referenzbereichs lagen, zeigten sich hier etwas geringere Unterschiede, die sich jedoch in Bezug auf die Behandlungsgruppe teilweise deutlich unterschieden (Abb. 3). Während *TCEB1* und *TCEB2* in der mit Lanreotid behandelten Gruppe keine ver-

änderte Genexpression zeigten, waren die anderen drei Gene leicht herunterreguliert (*SOCS2*: 0,66, *CUL5*: 0,7, *RNF7*: 0,68), stellten jedoch keine signifikante Veränderung dar. Die mit Octreotid behandelten Patienten zeigten eine deutlich reduzierte Expression des *CUL5*-Gens (0,54,  $p=0,05$ ), während *TCEB1* und *TCEB2* erneut unverändert waren. Die mRNA-Expression von *SOCS2* (0,78) und *RNF7* (0,81) war um ca. 20 % reduziert. Der GHR-Rezeptorantagonist Pegvisomant führte zu einer Zunahme der *SOCS2*-Transkriptmenge auf das 2,7-Fache ( $p<0,01$ ) und zu mehr als einer Verdopplung des *TCEB1*-mRNA-Niveaus (2,27,  $p<0,001$ ). Widersprüchlich ist, dass die Expression des *RNF7* an dieser Stelle signifikant auf 0,5 reduziert wurde ( $p=0,01$ ). Die Patienten mit Zustand nach erfolgreicher Hypophysen-Operation zeigten geringe Hochregulierungen in vier der fünf Zielgene. *SOCS2* (1,32), *TCEB2* (1,28) und *RNF7* (1,29) waren relativ homogen erhöht, während *TCEB1* als einziges Gen signifikant erhöht vorlag ( $p<0,01$ ).

#### 4. Diskussion

In dieser Pilotstudie wurden die Genexpressionsprofile von fünf Genen untersucht, die eine Schlüsselfunktion in der Regulation des GHR spielen. Es zeigte sich, dass die Gene *SOCS2*, *TCEB2*, *CUL5* und *RNF7* in erwachsenen Patienten mit einer unbehandelten GHD herunterreguliert waren. Es wird angenommen, dass die geringe GH-Konzentration im Blut dieser Patienten die Aktivität des JAK-STAT-assoziierten GH-Signalwegs reduziert, weshalb die Expression der Gene des ECS-Komplexes verringert sein sollte. Außerdem ermöglichen die geringen *SOCS2*-Spiegel in den GHD-Patienten den Zellen, sensibler gegenüber den ohnehin schon geringen GH-Konzentrationen zu sein. Die größte Abnahme der Transkriptmenge wurde im *CUL5*-Gen beobachtet, welches für das Cullin-5-Adapterprotein codiert, das wiederum für das Zusammenführen von Substraterkennungseinheit und Enzymteil des Komplexes verantwortlich ist.

Dasselbe Regulationsmuster wurde in dem einen GHD-Patienten beobachtet, der bereits seit sechs Monaten unter medikamentöser Behandlung stand. Dessen IGF-1-Wert von 412,4 ng/ml deutet auf eine erhöhte GH-Konzentration hin, jedoch zeigt die Genexpression einen verringerten Bedarf des ECS-Komplexes an. Da der IGF-1-Werte generell mehrere Wochen im Blut stabil ist, könnte dieser dem eigentlichen Status des Körpers hinterherhängen, sodass sich die eventuell niedrige GH-Dosis nicht im IGF-1-Wert widerspiegeln würde. Dementsprechend gibt es Belege dafür, dass der GH-Status und die gemessenen IGF-1-Wert nicht immer korrelieren und sogar gegensätzliche Konzentrationen anzeigen können (Carmichael et al. 2009). Des Weiteren ist *TCEB1* das einzige Gen, welches unabhängig von der Art der Wachstumshormonerkrankung bei den Patienten immer hochreguliert zu sein scheint, sodass hier eine Wechselwirkung mit einem anderen Hormon oder Regulator vermutet wird. Für die Auswertung dieser Studie muss berücksichtigt werden, dass die Akromegalie-Patienten entsprechend ihrer Medikation in Gruppen eingeteilt wurden und nicht wie bei der GHD –

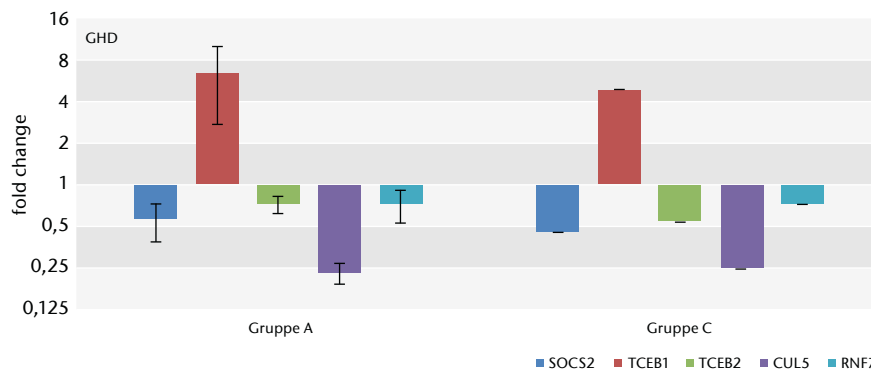


Abb. 2) Relative mRNA-Expression der fünf Gene des ECS-Komplexes der GHD-Patienten im Vergleich mit der Kontrollgruppe. Die Gruppe A umfasst drei Patienten, während in C nur ein Patient enthalten ist. Die Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung.

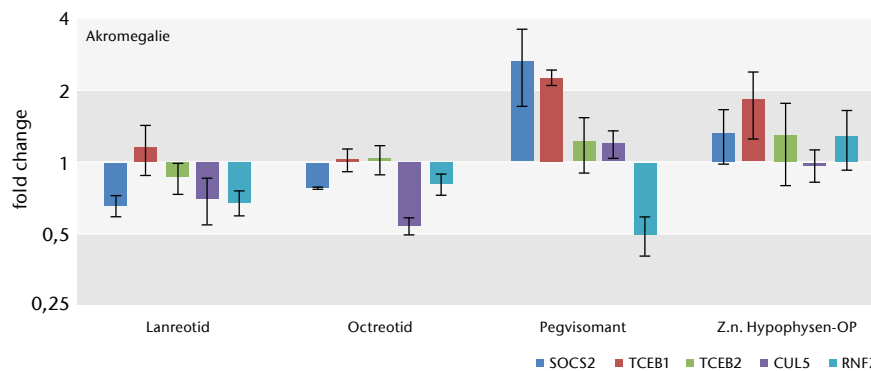


Abb. 3) Relative mRNA-Expression des ECS-Komplexes in den vier Behandlungsgruppen der Akromegaliepatienten. Die Gruppen umfassen 3, 2, 4 und 6 Patienten (von links nach rechts).

nach Therapiestatus. Somit gibt es Patienten innerhalb und außerhalb des IGF-1-Normalbereichs in der gleichen Experimentalgruppe, wodurch die individuelle Genexpression stark vom Behandlungsstatus abhängt und die zusammengefasste Auswertung einen erhöhten Variationskoeffizienten bedingt.

Die Patienten unter Therapie mit Lanreotid zeigten eine einheitlich verringerte Genexpression in drei der fünf Gene, die auf eine übermäßige Reduktion des GH-Spiegels durch eine geringfügige Überdosis des Somatostatin-Analogons zurückzuführen sein könnte. Obwohl diese Gruppe mit drei Proben nur eine begrenzte Aussagekraft vermittelt, deuten diese bereits eine Möglichkeit zur besseren Dosierung des Lanreotids an. Die Behandlung mit Octreotid führte wie beim Lanreotid zu keiner Veränderung von *TCEB1* und *TCEB2*, wohingegen wiederum verringerte Transkriptspiegel der anderen drei Gene zu beobachten waren, die ebenfalls auf Effekte einer Überdosis hindeuten könnten. Zusammen betrachtet resultieren beide Somatostatin-Analoga in ähnlichen Expressionsmustern und scheinen somit denselben Einfluss auf den Metabolismus des Körpers zu haben. Die Patienten, die mit dem GHR-Antagonisten Pegvisomant behandelt wurden, zeigten mehr als zweifach hochregulierte *SOCS2*- und *TCEB1*-Spiegel, während *RNF7* um die Hälfte reduziert vorlag. Das Pegvisomant senkt nicht die Menge an GH im Körper, sondern reduziert die GH-induzierte Aktivierung des GHR durch Inhibierung seiner Dimerisation. Interessanterweise beinhaltet diese gegensätzliche Regulation die beiden enzymatischen Komponenten des Proteinkomplexes: *SOCS2* und *RNF7*. Dies suggeriert eine Änderung des Verhältnisses der fünf Komponenten des ECS-Komplexes zueinander, was für dessen Selbstregulation eine Rolle spielen könnte. Allerdings bleibt unklar, inwiefern dieses Regulationsmuster einem bestimmten biochemischen Prozess zugeordnet werden kann, zweifellos deutet es jedoch auf einen bislang unbekanntem Effekt des Pegvisomant hin.

Die Gruppe der Patienten mit Zustand nach erfolgreicher Hypophysen-Operation wies geringfügig erhöhte

*SOCS2*-, *TCEB2*- und *RNF7*-Spiegel, um 83 % erhöhte *TCEB1*-Spiegel und *CUL5*-Werte im Bereich der Kontrollgruppe auf. Trotz des erfolgreich entfernten schädlichen Adenoms und nahezu normalen IGF-1-Werten bestand dennoch eine erhöhte Genaktivität, die auf eventuell remanente Tumoraktivität oder Beeinträchtigungen des verbliebenen Gewebes zurückzuführen sein könnte. Diese Erkenntnisse eröffnen die Möglichkeit, solche Überbleibsel unvollständig entfernten Tumorgewebes zukünftig durch Analyse des ECS-Komplexes besser detektieren zu können, jedoch würde dies weitere Daten durch ein größeres Patientenkollektiv erfordern.

Um den Nutzen des ECS-Komplexes für die Diagnose einer GHD einschätzen zu können, wurden neudiagnostizierte, unbehandelte GHD-Patienten rekrutiert. Diese drei Patienten zeigten in vier der fünf Gene signifikante Genexpressionsunterschiede. Insbesondere waren die Transkriptionslevel des *CUL5* deutlich reduziert, weshalb dieses Gen zu einer Unterscheidung zwischen Gesund und GHD-Erkrankung nützlich sein könnte. Gerade bei älteren Menschen wäre dies von großer Bedeutung, da sich deren IGF-1-Werten oftmals mit denen von gesunden Personen überschneiden (Hilding et al. 1999). Allerdings sollte beachtet werden, dass die Werte von drei Patienten nicht für eine gesicherte Aussage ausreichen und mehr Patienten benötigt werden, um die mögliche physiologische Standardabweichung dieser Werte zu untersuchen. Aufgrund der sehr geringen Inzidenz der Akromegalie konnten keine neudiagnostizierten Akromegaliepatienten in der Zeitspanne der Patientenrekrutierung für diese Studie angeworben werden. Deshalb bleibt das diagnostische Potenzial des ECS-Komplexes für die Akromegalie undeutlich.

Überdies lassen sich Auffälligkeiten zwischen den verschiedenen Gruppen feststellen, die möglicherweise mit den verschiedenen Wirkprinzipien der Medikamente zusammenhängen. So war das *SOCS2* bei den Akromegaliepatienten nur in den mit Somatostatin-Analoga behandelten Gruppen verringert, wohingegen es in der Pegvisomant-Gruppe stark erhöht vorlag. Dazu war das *TCEB1* in allen Gruppen unabhän-

gig von Mangel- oder Überschusserkrankung deutlich erhöht. Nur die Somatostatin-Analoga vermochten es, die Expression des *TCEB1* auf das Normalniveau zu bringen. Ebenso war die Gruppe mit Zustand nach erfolgreicher Tumorentfernung die einzige, in der die Expression des *RNF7*-Gens über dem Normalniveau lag. Diese Expressionsmuster sind bei allen Patienten der jeweiligen Behandlungsgruppen zu beobachten. Dementsprechend kann anhand der vorliegenden Daten bereits vermutet werden, dass die einzelnen Medikamente verschiedenartige Effekte im Körper hervorrufen, die sich zumindest in der Genexpression des ECS-Komplexes widerspiegeln.

Ein Abgleich der individuellen Genexpression mit dem Body-Mass-Index des Patienten ergab keinen augenscheinlichen Zusammenhang. Allerdings könnte solch ein Effekt nur bei unbehandelten Akromegalie-Patienten diskutiert werden, da durch die medikamentöse Therapie bereits auf die individuellen Unterschiede eingegangen wurde.

Des Weiteren kann bei einem Vergleich der individuellen Genexpression mit den IGF-1-Werten der Patienten (Daten nicht gezeigt) nur vereinzelt eine Korrelation festgestellt werden. Der Patient E1 aus der Lanreotid-Gruppe war der jüngste Patient, hatte den zweithöchsten BMI und besaß mit 1190 ng/ml bei Weitem den höchsten IGF-1-Wert. Dennoch zeigten nur die Werte des *TCEB2* und *CUL5* die höchsten Werte in dieser Probe. Insgesamt zeigten jedoch die Genexpression und die zugehörigen IGF-1-Werten keine direkte Proportionalität zueinander. Einerseits könnten die zuvor beschriebenen wirkstoffabhängigen Effekte dabei eine Rolle spielen, andererseits wurde bereits gezeigt, dass das IGF-1 ohnehin nicht immer korrekt den GH-Status anzugeben vermag (Carmichael et al. 2009). Aus diesem Grund besitzt der ECS-Komplex auch ohne die Korrelation zum IGF-1 das Potenzial, das individuelle Ansprechverhalten gegenüber der Behandlung von Wachstumshormonstörungen aus einer neuen Perspektive zu beleuchten. Eine Verlaufsstudie mit einer höheren Patientenzahl und einer zusätzlichen Analyse der Proteinkonzentrationen

der fünf ECS-Komplex-Komponenten könnte für weitere Untersuchungen zu diesem Biomarker von großem Nutzen sein.

## 5. Schlussfolgerung

Neunzehn Patienten mit Wachstumshormonstörungen wurden mit der Real-Time PCR auf Genexpressionsunterschiede im ECS-Komplex untersucht. Die drei Patienten mit einer schweren Wachstumshormondefizienz zeigten signifikant reduzierte mRNA-Konzentrationen in drei der fünf Zielgene, wodurch eine Unterscheidung zwischen normalem und abnormalem Wachstumshormonhaushalt möglich ist. Die Expression des *CUL5*-Gens stellte sich als sehr deutlich herunterreguliert heraus und hat somit Potenzial für die Diagnostik der GHD. Die Daten der behandelten Akromegaliepatienten zeigten einige signifikante Expressionsunterschiede, aufgrund der geringen Studienteilnehmerzahl ist jedoch keine sichere Interpretation möglich. Da IGF-1 in der Diagnostik von Wachstumshormonstörungen als Goldstandard gilt, müssen neue Erkenntnisse stets mit diesem Marker verglichen werden. Weil aber die beobachteten Genexpressionen nur teilweise mit den IGF-1-Werten korrelieren, können die gemessenen Unterschiede noch nicht zu Verbesserungen der individuellen Therapien genutzt werden. Entscheidende Aspekte zukünftiger Untersuchungen des ECS-Komplexes im Kontext der Wachstumshormonstörungen sind ein größeres Patientenkollektiv, insbesondere mit neudiagnostizierten und unbehandelten Fällen von Akromegalie, die Messung des Komplexes auf Proteinebene und eine Langzeitstudie, in der Genexpression und Proteinkonzentration nach festgelegten Intervallen gemessen und mit dem jeweiligen Therapieverlauf abgeglichen werden. Auf diese Weise könnten Korrelationen zwischen dem Ansprechverhalten auf eine bestimmte Therapie und den gewonnenen Daten aufschlussreicher analysiert und zeitgleich die Sensitivitäten von IGF-1 und ECS-Komplex verglichen werden.

## LITERATUR

- Ahmed SF, Farquharson C (2010) The effect of GH and IGF1 on linear growth and skeletal development and their modulation by SOCS proteins. *J Endocrinol* 206(3):249–259. doi: 10.1677/JOE-10-0045
- Aimaretti G, Corneli G, Razzore P, Bellone S, Baffoni C, Arvat E, Camanni F, Ghigo E (1998) Comparison between Insulin-Induced Hypoglycemia and Growth Hormone (GH)-Releasing Hormone + Arginine as Provocative Tests for the Diagnosis of GH Deficiency in Adults. *J Clin Endocrinol Metab* 83(5):1615–1618. doi: 10.1210/jcem.83.5.4837
- Babon JJ, Sabo JK, Soetopo A, Yao S, Bailey MF, Zhang J, Nicola NA, Norton RS (2008) The SOCS Box Domain of SOCS3: Structure and Interaction with the ElonginBC-Cullin5 Ubiquitin Ligase. *J Mol Biol* 381(4):928–940. doi: 10.1016/j.jmb.2008.06.038
- Carel J, Butler G (2010) Safety of Recombinant Human Growth Hormone. *Endocr Dev* 18:40–54. doi: 10.1159/000316126
- Carmichael JD, Bonert VS, Mirocha JM, Melmed S (2009) The Utility of Oral Glucose Tolerance Testing for Diagnosis and Assessment of Treatment Outcomes in 166 Patients with Acromegaly. *J Clin Endocrinol Metab* 94(2):523–527. doi: 10.1210/jc.2008-1371
- Colao A, Ferone D, Marzullo P, Lombardi G (2004) Systemic Complications of Acromegaly: Epidemiology, Pathogenesis, and Management. *Endocr Rev* 25(1):102–152. doi: 10.1210/er.2002-0022
- Fuh G, Cunningham BC, Fukunaga R, Nagata S, Goeddel DV, Wells JA (1992) Rational Design of Potent Antagonists to the Human Growth Hormone Receptor. *Science* 256:1677–1680. doi: 10.1126/science.256.5064.1677
- Greenhalgh CJ, Metcalf D, Thaus AL, Corbin JE, Uren R, Morgan PO, Fabri LJ, Zhang J, Martin HM, Willson TA, Billestrup N, Nicola NA, Baca M, Alexander WS, Hilton DJ (2002) Biological Evidence That SOCS-2 Can Act Either as an Enhancer or Suppressor of Growth Hormone Signaling. *J Biol Chem* 277(43):40181–40184. doi: 10.1074/jbc.C200450200
- Grumbach MM, Bin-Abbas BS, Kaplan SL (1998) The Growth Hormone Cascade: Progress and Long-Term Results of Growth Hormone Treatment in Growth Hormone Deficiency. *Horm Res* 49(Suppl 2):41–57. doi: 10.1159/000053087
- Hilding A, Hall K, Wivall-Helleryd IL, Säff M, Melin AL, Thorén M (1999) Serum Levels of Insulin-Like Growth Factor I in 152 Patients with Growth Hormone Deficiency, Aged 19–82 Years, in Relation to Those in Healthy Subjects. *J Clin Endocrinol Metab* 84(6):2013–2019. doi: 10.1210/jcem.84.6.5793
- Holdaway IM, Rajasoorya C (1999) Epidemiology of Acromegaly. *Pituitary* 2(1):29–41. doi: 10.1023/A:1009965803750
- Kamura T, Maenaka K, Kotoshiba S, Matsumoto M, Kohda D, Conaway RC, Conaway JW, Nakayama KI (2004) VHL-box and SOCS-box domains determine binding specificity for Cul2-Rbx1 and Cul5-Rbx2 modules of ubiquitin ligases. *Genes Dev* 18(24):3055–3065. doi: 10.1101/gad.1252404
- Kelnar CJH (2010) The Evidence Base for Growth Hormone Effectiveness in Children. *Endocr Dev* 18:23–39. doi: 10.1159/000316125
- Leung DW, Spencer SA, Cachianes G, Hammonds RG, Collins C, Henzel WJ, Barnard R, Waters MJ, Wood WI (1987) Growth hormone receptor and serum binding protein: purification, cloning and expression. *Nature* 330:537–543. doi: 10.1038/330537a0
- Leung KC, Doyle N, Ballesteros M, Sjogren K, Watts CKW, Low TH, Leong GM, Ross RJM, Ho KKY (2003) Estrogen inhibits GH signaling by suppressing GH-induced JAK2 phosphorylation, an effect mediated by SOCS-2. *Proc Natl Acad Sci USA* 100(3):1016–1021. doi: 10.1073/pnas.0337600100
- Metcalf D, Greenhalgh CJ, Viney E, Willson TA, Starr R, Nicola NA, Hilton DJ, Alexander WS (2000) Gigantism in mice lacking suppressor of cytokine signalling-2. *Nature* 405:1069–1073. doi: 10.1038/35016611
- Mukherjee A, Shalet SM (2009) The value of IGF1 estimation in adults with GH deficiency. *Eur J Endocrinol* 161(Suppl 1):S33–S39. doi: 10.1530/EJE-09-0247
- Mullis PE (2010) Genetics of Isolated Growth Hormone Deficiency. *J Clin Res Pediatr Endocrinol* 2(2):52–62. doi: 10.4274/jcrpe.v2i2.52
- Ocaranza P, Morales F, Román R, Iñiguez G, Cassorola F (2012) Expression of SOCS1, SOCS2, and SOCS3 in growth hormone-stimulated skin fibroblasts from children with idiopathic short stature. *J Pediatr Endocr Met* 25(3–4). doi: 10.1515/jpem-2011-0491
- Reed ML, Merriam GR, Kargi AY (2013) Adult Growth Hormone Deficiency – Benefits, Side Effects, and Risks of Growth Hormone Replacement. *Front Endocrinol* 4:64. doi: 10.3389/fendo.2013.00064
- Stochholm K, Gravholt CH, Laursen T, Jørgensen JO, Laurberg P, Andersen M, Kristensen LØ, Feldt-Rasmussen U, Christiansen JS, Frydenberg M, Green A (2006) Incidence of GH deficiency – a nationwide study. *Eur J Endocrinol* 155(1):61–71. doi: 10.1530/eje.1.02191
- Thomas JC, Matak-Vinkovic D, van Molle I, Ciulli A (2013) Multimeric Complexes among Ankyrin-Repeat and SOCS-box Protein 9 (ASB9), ElonginBC, and Cullin 5: Insights into the Structure and Assembly of ECS-type Cullin-RING E3 Ubiquitin Ligases. *Biochemistry* 52(31):5236–5246. doi: 10.1021/bi400758h
- Uyttendaele I, Lemmens I, Verhee A, Smet A de, Vandekerckhove J, Lavens D, Peelman F, Tavernier J (2007) Mammalian Protein-Protein Interaction Trap (MAP-PIT) Analysis of STAT5, CIS, and SOCS2 Interactions with the Growth Hormone Receptor. *Mol Endocrinol* 21(11):2821–2831. doi: 10.1210/me.2006-0541
- Vesterlund M, Zadjali F, Persson T, Nielsen ML, Kessler BM, Norstedt G, Flores-Morales A (2011) The SOCS2 Ubiquitin Ligase Complex Regulates Growth Hormone Receptor Levels. *PLoS ONE* 6(9):e25358. doi: 10.1371/journal.pone.0025358
- Yang HL, Feng M, Tan X, Yan GY, Sun C (2013) The role of SOCS2 in recombinant human growth hormone (rhGH) regulating lipid metabolism in high-fat-diet-induced obesity mice. *Mol Biol Rep* 40(3):2319–2326. doi: 10.1007/s11033-012-2313-5

### Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: GH-induzierter negativer Feedback-Mechanismus des S-Komplexes  
Abb. 2: Relative Genexpression des S-Komplexes bei Patienten mit GHD  
Abb. 3: Relative Genexpression des S-Komplexes bei Patienten mit Akromegalie

## AUTOREN

**Wilhelm Gossing, M. Sc.**  
**Lars Radke, M. Sc.**  
**Marcus Frohme, Prof. Dr. sc. hum.**  
Technische Hochschule Wildau  
Forschungsgruppe Molekulare Biotechnologie und funktionelle Genomik

**Henrik Biering, Dr. med.**  
Internist, Endokrinologie/Diabetologie  
Praxis an der Kaiserliche, Berlin

E-Mail für Korrespondenz:  
wilhelm.gossing@th-wildau.de





# A DFD Based Approach to Model Data Processing Solutions

Falko Schmalenberg\*, Ralf Vandenhousten

## Abstract

This paper introduces procedures, which facilitate the development of as well as the linking between modular data processing processes into different and versatile system solutions. Based on the concept of data flow diagrams (Yourdon 1989), processes and data flows are used. With the ability of a process to harness any amount of in- and outputs with different sources and destinations, it is possible to model any conceivable data processing problem. By aggregating a diagram as a new process, it becomes possible to outsource partial process chains to different abstraction levels. As a result, even very complex solutions can be modeled and explained in a clear way. The introduced uniform termination flow while traversing the graph creates a good readability, which also makes it possible to quickly detect weaknesses. Moreover, this solution is comprehensive and advances the cooperation in teams and development.

## Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird ein Verfahren vorgestellt, welches die Entwicklung und Verknüpfung modularer Datenverarbeitungsprozesse zu beliebigen, unterschiedlichen Gesamtlösungen ermöglicht. Aufbauend auf dem Konzept der Datenflussdiagramme (Yourdon 1989) kommen Prozesse und Datenströme zum Einsatz. Dabei kann ein Prozess beliebig viele Inputs und Outputs mit unterschiedlichen Quellen und Senken haben und jedes denkbare Datenverarbeitungsproblem modelliert werden. Durch das verschachtelte Modellieren dieser Diagramme und deren Aggregation zu neuen Prozessen können Teilprozessketten auf unterschiedlichen Abstraktionsebenen ausgelagert werden. So lassen sich auch äußerst komplexe Lösungen übersichtlich modellieren, darstellen und erklären. Eine einheitliche Ablaufregel bei der Traversierung macht dieses Verfahren gut lesbar und lässt gegebenenfalls vorhandene Schwachstellen schnell erkennen. Zudem ist es verständlich und fördert die Zusammenarbeit sowie die gemeinsame Entwicklung.

## 1. Introduction

Nowadays, software is being developed in almost every area. It is intensively used in our private, our social and our business life. Since the early stages, architects, programmers and other engineers have invented rules, methods and tools to improve the development process with regard to different aspects like:

- speeding up the creation time
- reducing the effort
- reusing program elements
- maintaining order and structure, even in gigantic systems

Design patterns can be seen as the major rulebook for software development. This very popular collection of templates has become indispensable. It

was first introduced by the, so-called, gang of four in their book: *Design Patterns. Elements of Reusable Object-Oriented Software* (Gamma et al. 1994). Apart from providing uniform solutions for certain contexts, the major benefit, besides reusability, is the improvement of readability. Developers, who have not yet been involved, can better understand existing software and start to contribute. This improves teamwork and allows for the creation of powerful software systems.

Model-driven software development (MDS) is another section of mechanisms to improve the development process. It provides techniques to automatically generate software from previously created models (Stahl & Völter 2006). There are many MDD tools and frameworks available. The

eclipse-based solutions, for instance, are as powerful as they are popular (Eclipse Foundation 2015).

Unified Modeling Language (UML) is a graphic based modeling language for software development (International Organization for Standardization 2012). It is an ISO Standard, famous and often used to specify, construct and document software parts. It covers many, not to say almost every, possible programming facet. It became essential for software engineering.

Besides the development, maintaining the software is the most expensive and time-consuming factor. In general, more than 70 % of the total costs represent maintenance (Polo et al. 2003). This underlines once more how important it is to keep and improve code readability. Therefore, methods of structured analysis can be helpful.

\* corresponding author

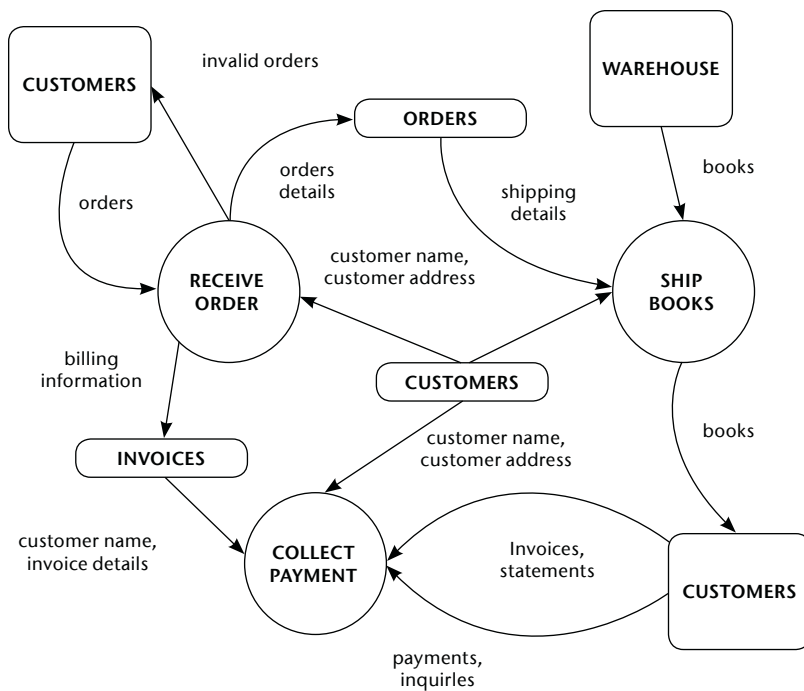


Fig. 1) A typical DFD (Yourdon 1989)

One of them is the Data Flow Diagram (DFD). A DFD visualizes the flow of data through an information system and its functional processes. It clarifies, where data is created and consumed. There are different terms like: Bubble Chart, Process Model or Functional Model, which can be used synonymously, as well as different notations. Figure 1 illustrates a simple DFD example.

The DFD is an important and powerful tool used in the field of systems analysis. The modeling technique presented in this paper is based on the DFD model. The following DFD elements and notations are used:

### 1.1 The Process

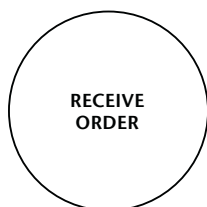


Fig. 2) Example of a process notation

Figure 2 shows an example of a process. The notation used in this paper is a circle containing the name of the process. A process is a part of the system that consumes input data and creates output data.

### 1.2 The Flow

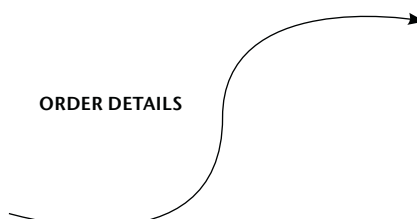


Fig. 3) Example of a flow notation

Figure 3 shows an example of a flow. A flow describes the movement of data from one part of the system to another. It represents data in motion. For representing data at rest, the store (see 1.3) is used.

### 1.3 The Store



Fig. 4) Example of a store notation

Figure 4 shows an example of a store. An oval shape is the notation used in this paper. The store is used to model (a collection of) data at rest.

### 1.4 Problems

Data flow diagrams do not address all aspects of data processing. In particular, procedural features are missing.

Referring to figure 1, it is not determined (by help of a symbol or sign notation), which process will act first, and which process or even processes will act subsequently, and so on. There is no implicit or explicit order. Moreover, according to process *RECEIVE ORDER*, it is uncertain if the flow *orders* of the *CUSTOMERS* take place before the flow *invalid orders*. Data flow diagrams require intelligent reading, and are, therefore, suitable for humans, but not for machines. Thanks to our knowledge, we are able to integrate additional information from the meaning of the words (of processes, stores and flows), and extract possible procedures and preconditions. It has been one important motivation of this work to enable computers to execute previously modeled graphs (without the need of further explanation). In order to achieve this, we enhanced the DFD and added new elements like a distinct sequence policy (section 2.3).

Another limitation of the current model is the fact that flow arrows only indicate the direction of data motion. It is not apparent, however, if data is pushed from a source or requested by a sink. Section 2.2 shows our solution to remove this deficit.

This is not the first attempt to extend Yourdon's design methodology. Decomposing DFD and state transition logic diagrams (STLs) was a different approach to design and implement a software system (Molla 1989).

## 2. Solution

This solution of a data processing model (we will use the acronym DPM in this paper) addresses issues in regard to modeling software data processing by taking the DFD-concept and adding new elements. To make the notation more compact, some DFD-elements are summarized. For instance, a process, which creates and stores data, can be represented in DFD-notations as follows:

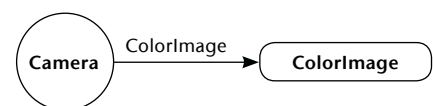


Fig. 5) Example of a data producer in DFD

This will be compacted as follows:

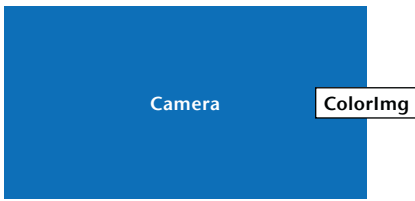


Fig. 6) Example of a data producer in DPM

### 2.1 Nodes and Slots

The place in which data is read, modified, and/or created, is called node (e.g. Camera). A result is placed in a store, which will be called slot. A node is able to handle any number and any kind of data. Thereby, each input is read from a corresponding *input slot*, and each output is written into a corresponding *output slot*. Figure 7 shows how a node with several in- and output slots is derived from a DFD.

The DPM representation, in contrast to the DFD notation, combines stores and their using process into one unit. As a consequence, the representation of constellations with many processes and data becomes more obvious. This is possible, as in DPM there never is a direct flow from one process to another. The data transfer always takes place over stored data (slots).

Figure 8 pictures a process named Stereo Processor consuming the data from two webcam processes and creating two kinds of data output, two images used for creating a depth image and a point cloud.

However, the DFD notation does not tell us how, when and under which circumstances the *Stereo Processor* is obtaining the input data and creating its outputs. Due to the determination of input and output slots the direction of a flow is now able to illustrate whether inputs are being pulled or pushed from outputs of other previously acting processes. Using DPM the system pictured in DFD-Fig. 8 can be transformed in several different but more explicit models (see Fig. 9).

### 2.2 Push and pull connections

The data flow from an input slot to an output slot is called *pull connection*. Vice versa, the data flow from an output slot to an input slot is called *push connection*. An input slot can have a

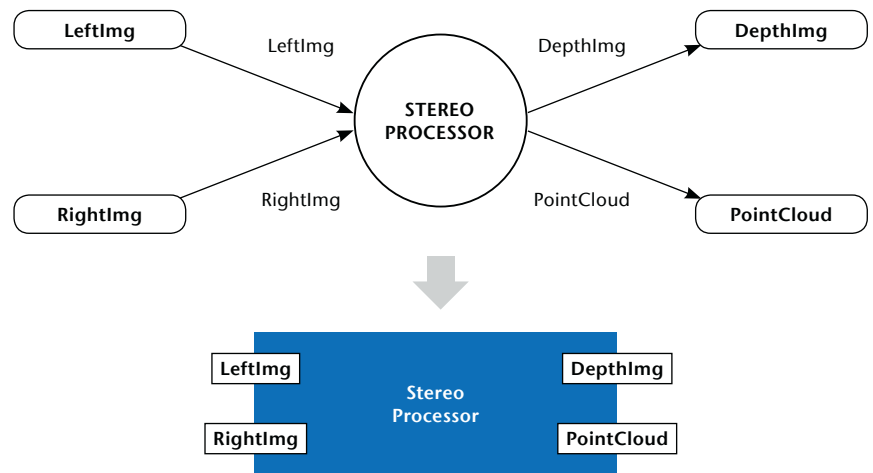


Fig. 7) Example of a processor transferred from DFD to DPM notation

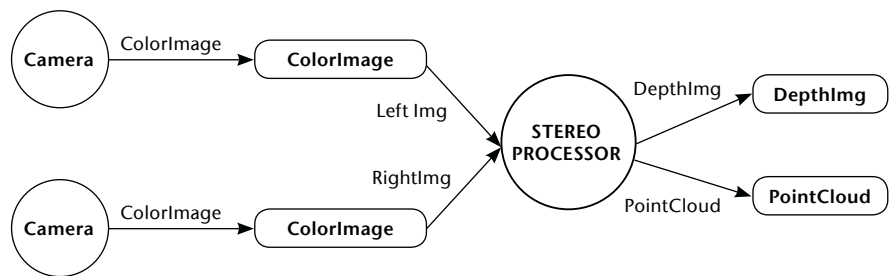


Fig. 8) A DFD with three processes

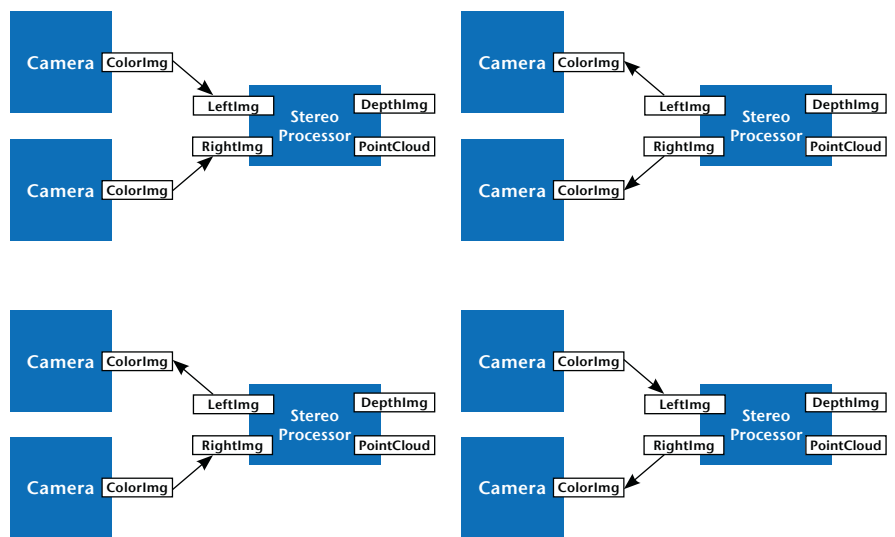


Fig. 9) Push-and-Pull Connections in DPM

zero or a one-pull connection. An output slot can have zero up to any number of push connections. A node contains an algorithm, which can be executed. Dependent on connections via slots, other nodes (prede-

cessors and/or successors) will be executed as well. This solution introduces a consistent execution rule. Figure 10 explains the process for a node, which is about to be executed.

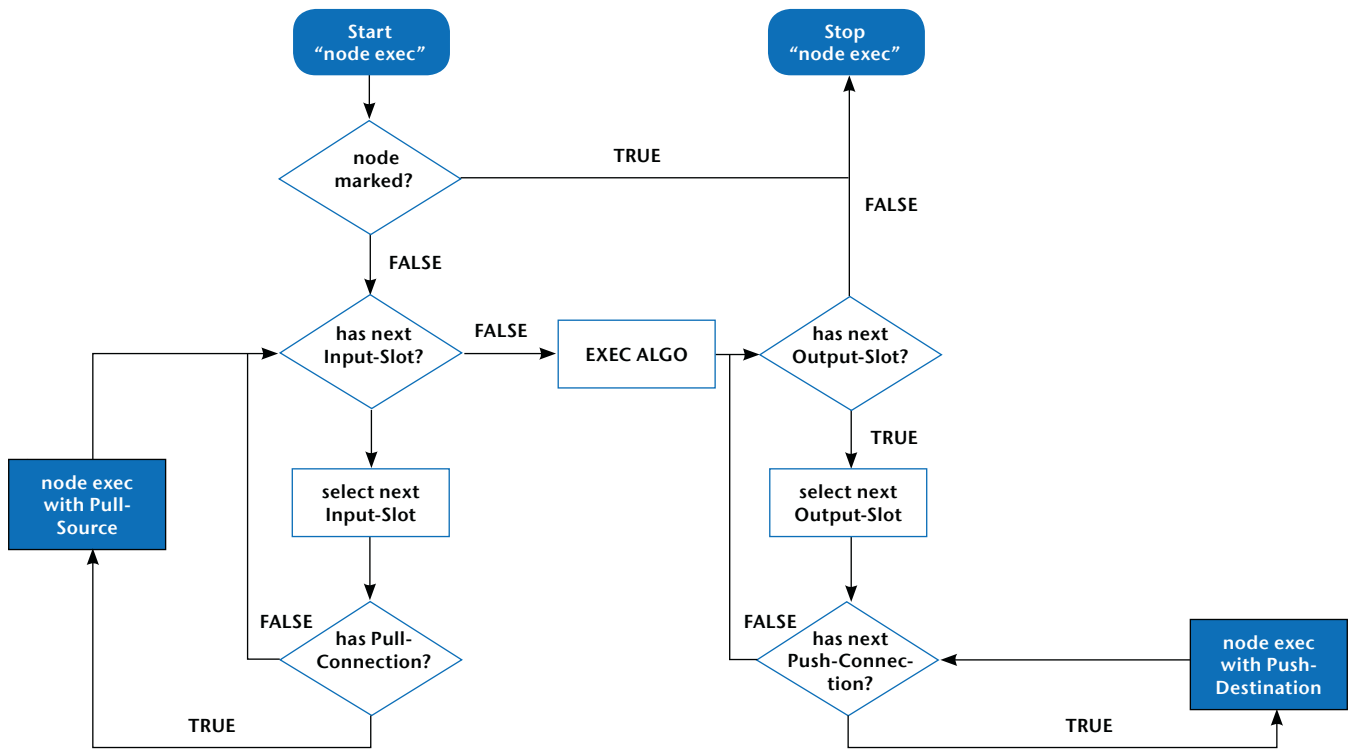


Fig. 10) Execution Process

### 2.3 Execution process

First, it is checked whether the current node was executed during the current execution process chain. If it was not, the node will be marked and be prepared for execution. Therefore, the availability of input data has to be ensured. This is done by following all pull connections, from the input slots of the current node to predecessor nodes. These predecessor nodes will be executed according to the same rule. This means that in terms of graph theory a depth-first search takes place to procure the inputs. After that, the program or algorithm of the current node will be executed.

Side note: It is not sure whether the execution will be successful because not all inputs might be available by pull-connections. Some may be pushed by other nodes, which have not been executed yet.

In case of execution results, output slots of the current node are containing new data. This data will be written into input slots of successor nodes according to the push connections. Each successor will then be executed with the

pushed data by the same schema. This means a depth-first search is also used for committing the outputs by following the push edges to successor nodes. In conclusion, it might be possible that by executing one node all other nodes in the graph will be executed as well, depending on the constellation of push-and-pull connections.

### 2.4 Executors

Finally, in order to enable the modeling of procedural aspects, a new notation is added. A cycle attached to a node indicates the availability of an executor. Such an *executor* declares where the execution process (introduced in section 2.3) is initiated. It always belongs to a concrete node, and can be triggered from the outside to start or stop its execution run. When executed, it traverses the nodes and executes its containing programs, as explained before. During one execution run, a node can only be executed once. Upon completion, it depends on the executor type if, for instance, the executor terminates or sleeps for a certain period of time, and afterwards runs again. Figure 11 com-

plements figure 9 by adding the minimal amount of executors for making each of the four constellations work (although it is possible and occasionally useful to use more executors).

The example mentions two types of executors. 'L25' means that after being started, this executor loops until stopped from the outside. It sleeps a computed time between each period to ensure that it executes 25 times within a minute. 'S' stands for single execution and means that it immediately runs for one time after being started.

Figure 11b only uses one executor. After starting, it first executes both Camera-nodes because both inputs of a *Stereo Processor* have pull connections. The executor in figure 11c starts at the right *Camera* and pushes the color image to the *Stereo Processor*. In order to then execute the *Stereo Processor*, the other input is needed. As this input is connected via pull connection to the other *Camera*, the second *Camera* is executed, and afterwards, finally, the *Stereo Processor*. Figure 11d works similar to figure 11c by starting at the left instead of the right *Camera*. All three (figures 11b-d) have in common that

their constellation ensures that all nodes are only executed in order to create the results of *Stereo Processor*. In contrast, figure 11a shows executors creating results that are not only necessary to procure the results of *Stereo Processor*. The left and the right Camera are executed 25 times each within one second. However, *Stereo Processor* is executed only on demand. This constellation makes sense if there is, for instance, a live view that demands the results of the webcams in order to achieve a fluent display. But if the L25-executors do not run, the *Stereo Processor* does not create results when executed because its input slots do not contain data (because of the lack of pull connections).

### 2.5 From node description to node instances

Reusable modular program elements (algorithms) are kept in *node descriptions*. A node description describes to the outside, which inputs it uses and what outputs it creates. For each input and each output, there is a data description defining:

- the type of data,
- the presence of a default value,
- a range (in case of numeric and if appropriate),
- or an enumeration of valid values (if appropriate).

Each input and each output have a unique naming within such a node description. During the execution, the algorithm only works with these synonyms. The standardized execution environment ensures the linking between each synonym and an actual data value at runtime. The algorithm does not have to perform other tasks like locating and obtaining input data from distributed sources. As a consequence, each algorithm also is decoupled and independent from other algorithms or acquisition tasks.

Each node description is the basic model for related node instances. For instance, the two *Camera* nodes of figure 11 are related to the same node description, holding the algorithm for acquiring data from an USB video device.

The solution provides a clean separation between the declaration and the usage

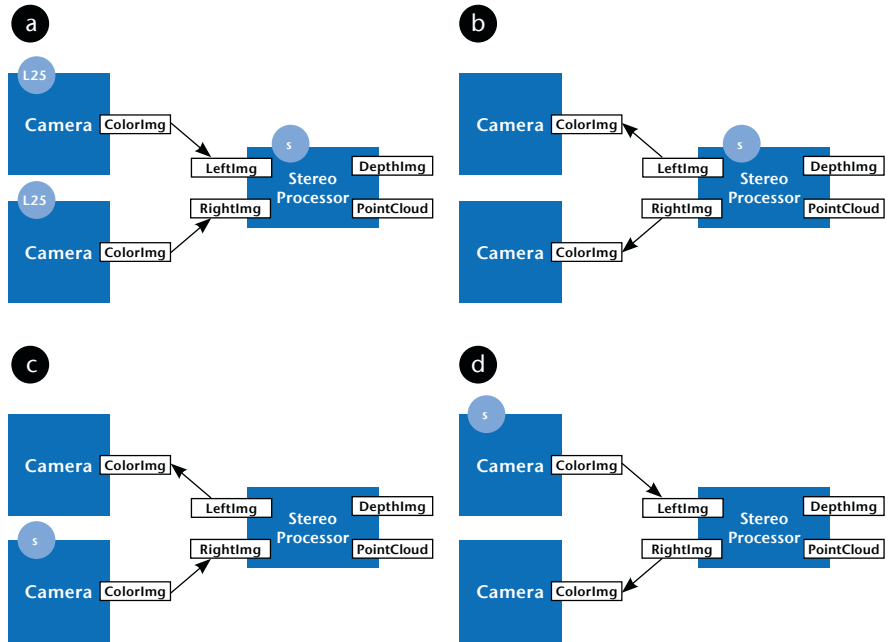


Fig. 9) Push-and-Pull Connections in DPM

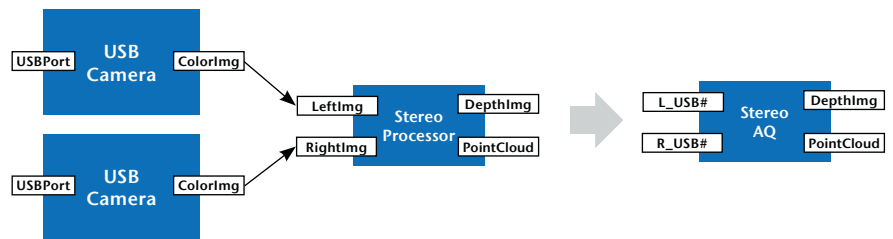


Fig. 12) Aggregation example

of modular program components. Developers of algorithms are able to create solutions independent of the progress of others by declaring self-explaining input synonyms. Users without development skills are also able to create (complex) processing solutions by reusing and linking together existing sub solutions.

### 2.6 Metadata

All data handled (read, processed, created or manipulated) in DPM are encapsulated in a metadata container. The metadata holds additional information about the encapsulated data. There are two kinds of information:

- a) Information, which is related to the individual data type, for instance in case of an image: color format, height, width etc.
- b) The other group consists of common information, available in each metadata independent of the kind of encapsulated data:

- a timeframe explaining the time interval, when the data is valid (when it occurred in reality)
- a timeframe explaining the time interval, when the data was handled by a node
- the name of the node
- the (IP) address of the node
- the output slot name in the node

Data and metadata are detached from slots and nodes and can be distributed independently. The metadata allows for merging information in time as well as in content at any location and from different sources. This makes distributed processing and load balancing possible.

### 2.7 Aggregation and compositum feature

Another feature of DPM is the possibility to aggregate an existing graph with a certain number and constellation of

nodes and connections to a compositum node. Figure 12 shows an example. By default, all slots involved in push or pull connections disappear. Only the slots without connections are available for use outside the new compositum node. This characterizes a graph as a new node, which can be part of another graph as well. This makes it possible to outsource partial components and work on a higher abstraction level. Thus, even very complex systems can be modeled without a loss of structure or overview.

Similarly, the idea and inner structure of a solution can be hidden as a black box while keeping its functionality.

## 2.8 Export feature

Referring to section 2.7, it is also possible to easily export solutions as a compositum node. As not only the processing flows, but also the access to originated outputs is standardized, it is easy to integrate DPM solutions into external programs.

## 3. Conclusion

The concept presented forces developers to create standardized solutions. As each node, its slots and the data-flow can be visualized in a self-explaining overview, it encourages the user to split a big and complex processing solution with many sub-steps into several modules. As a result, it is more likely that existing solutions are being reused and the degree of redundancy is minimized. Because of the uniform program flow and the abstraction feature (see section 2.7), the visualization also supports the understanding and speeds up the development process. Therefore, new developers can be integrated faster.

Compared to visualization tools like DFD or UML, DPM provides a bijective relation between the visualization and the realization of the program. In UML class or object diagrams, for instance, it is possible to generate POJOs from the visualization model. It is, however, not possible to derive procedures and sequences. On the contrary, and again because of the uniform processing model (see section 2.3), DPM can do this. At any time, there is a distinct visual representation of the current

data processing system. As a consequence, there are advantages and savings in costs and time – not only in terms of development, but in maintenance as well.

As the nodes are decoupled and all handled data come with additional metadata (see section 2.6), the solution can be used for the computation of hard problems. The approach is also suitable for distributed systems and load balancing. In order to implement this, DPM has to be enhanced further. The concept and realization of push-and-pull connections over the network will be one of the future tasks.

## REFERENCES

- Eclipse Foundation (2015) Eclipse Modeling Framework (EMF). <http://www.eclipse.org/modeling/emf>. Accessed 31 Aug 2015
- Gamma E, Helm R, Johnson R, Vlissides J (1994) Design Patterns. Elements of Reusable Object-Oriented Software. Prentice Hall, Upper Saddle River. ISBN: 978-0-201-63361-0
- International Organization for Standardization (2012) Object Management Group Unified Modeling Language (OMG UML). ISO/IEC 19505-1:2012
- Molla SR (1989) A Yourdon-based State Transition Logic Approach to Software Design and Implementation. In: IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON), 22–26 May 1989, Dayton, vol 2. IEEE, pp 528–532. doi: 10.1109/NAECON.1989.40259
- Polo M, Piattini M, Ruiz F (2003) Advances in Software Maintenance Management: Technologies and Solutions. Idea Group, Hershey. ISBN: 978-1-59140-085-1
- Stahl T, Völter M (2006) Model-Driven Software Development. Technology, Engineering, Management. Wiley, Chichester. ISBN: 978-0-470-02570-3
- Yourdon E (1989) Modern Structured Analysis. Yourdon Press, Englewood Cliffs. ISBN: 978-0-13-598624-0

## AUTHORS

**Falko Schmalenberg, M. Eng.**  
**Prof. Dr. rer. nat. Ralf Vandenhousten**  
Technische Hochschule Wildau  
Forschungsgruppe Telematik

E-mail for correspondence:  
[falko.schmalenberg@th-wildau.de](mailto:falko.schmalenberg@th-wildau.de)

# A Modular Mobile Device for Real-Time 3D-Streaming

Ralf Vandenhouten\*, Richard Fiebelkorn, Andrea Funke

## Abstract

In recent years, 3D movies and streaming films have become increasingly popular. Even mobile devices, such as mobile phones and tablet computers, are becoming more popular, more powerful and have better multimedia capabilities. Nevertheless, compact mobile devices to broadcast live 3D videos in real time are barely available. In this article, we provide a modular and mobile solution that allows 3D video streaming in real time at 25 frames per second and with a resolution of  $1280 \times 720$  pixels (720p). As operating system, we use standard hardware components combined with Android. Furthermore, we will describe the restraints of the development, and how they were solved.

## Zusammenfassung

In den letzten Jahren sind 3D-Filme und das Streamen von Filmen immer populärer geworden. Auch mobile Endgeräte, wie Smartphones oder Tablet Computer, nehmen an Verbreitung zu, werden leistungsstärker und verfügen über verbesserte Multimediafähigkeiten. Trotzdem gibt es kaum kompakte mobile Geräte, um live 3D-Videos in Echtzeit zu übertragen. In diesem Artikel stellen wir eine modulare und mobile Lösung vor, die es ermöglicht, 3D-Videos in Echtzeit, bei 25 Bildern pro Sekunde und mit einer Auflösung von  $1280 \times 720$  Pixeln (720p) zu senden. Dabei verwenden wir Standard-Hardware-Komponenten und nutzen Android als Betriebssystem. Des Weiteren beschreiben wir, welche Schwierigkeiten bei der Entwicklung auftraten und wie diese gelöst wurden.

## 1. Introduction

In recent years, video and live streaming have become a key consumer scenario, and mobile devices have undergone a significant development. Also, 3D-movies became more popular, and, nowadays, many mainstream TVs are able to display 3D-content, and, thus, make this technology accessible to a wider range of consumers.

In this article, we present the creation of a small, wearable mobile device for real-time 3D-video streaming applications. The aim of this project was to develop a device, which can stream 3D-videos in real-time with at least 25 frames per second (fps), and with a high definition resolution of 720p ( $1280 \times 720$  pixels). Another aim of this project was to create the device with easily available inexpensive standard hardware. A bidirectional audio streaming option is also implemented on the device for communication purposes. The said de-

vice is powered by a battery and uses wireless technology for sending the data through WiFi. The idea behind the device is to build an inexpensive system using standard components to keep it small, to make it wearable, and to make it modular for an easy adaption to new situations and tasks. For instance, two cameras are built into a frame worn on the head, having the same field of view like the person wearing it, and carrying the other parts in a small bag while sending the stream via WiFi. The person watching the stream now sees what the carrier of the device is seeing, and, because of the audio capability, both are able to communicate. One scenario for this could be a guided tour through a museum showing exhibitions. Having a 3D-able display – a 3D-ready TV or PC monitor for example – enables the receiver of the stream to watch it in 3D. It is also conceivable to use a head mounted (virtual reality) display to watch the stream.

Streaming is becoming a common technology, and with such a streaming device a lot of fields of applications are conceivable. Moreover, the availability of a high mobile bandwidth will open up even more opportunities to use streaming, where neither WiFi nor other networks are available. Streaming a video could be done with a standard mobile phone, tablet computer, or any other mobile device (Mantoro et al. 2012). Most of them either do not have the capability to generate a 3D video, cannot stream in real time with 25 fps at a resolution of 720p, or are very expensive. Google's Tango project, for example, has begun to include depth and stereo cameras into mobile devices, but mostly to reconstruct the real world into a 3D-scene and not for 3D video streaming.

Streaming a live 3D-video feed is more complex and computationally more intensive than just sending a 2D-stream or a video file. One of the problems to be solved is to stream

\* corresponding author



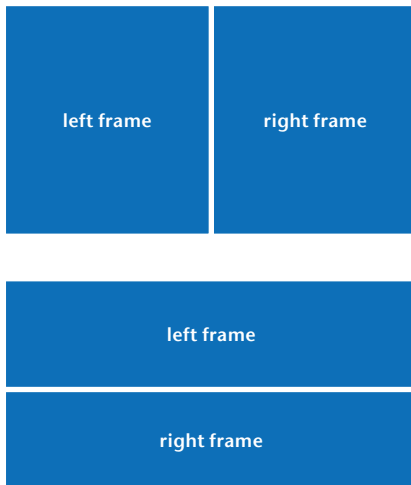


Fig. 1) 3D formats: top: side-by-side; bottom: top-bottom

live 3D at 720p with a low latency at 25 fps. It takes a lot of computing capacity for the hardware to convert and encode a live video. The computer must be able to control two cameras and to process their video data. It also converts the data to create a 3D-video, encodes the result into a 3D-stream, and sends it wirelessly to the receiver.

In the next section, we give some information about 3D-videos related to our work. In section 3, we present our solution in detail, particularly the used hardware and software components. Section 4 describes restraints we encountered during the development. Finally, section 5 concludes this paper and outlines future work.

## 2. 3D-Video

Existing 3D-video systems are based on stereoscopic technology, which means they use two cameras with a small distance between them – similar to the eyes of a human. To create a 3D-video, both video cameras capture images synchronously, and, depending on the format and video codec used, both streams are combined into a 3D-video. There are different formats for 3D-videos. The difference between them is how they use and store two synchronous video frames to build the 3D-frame while displaying. They can be separated into two types, which give different results in the final resolution. With the first type, both frames are put into one 3D-frame with the same resolution as the source frames.

This means the two frames are reduced in a resolution to fit into one frame. This can be done in different manners, and the most common are called *side-by-side* and *top-bottom* (figure 1). With the *side-by-side* method, the horizontal resolution of both frames is reduced to half in order to store the frames for the left and the right sides next to each other horizontally in the final 3D-frame. This means that the two sub-frames, one for each eye, are stored side by side (giving the method its name). This method will lead to a half horizontal resolution for both sub-frames while displaying them. Just like the *side-by-side* format, the *top-bottom* format also does not have the full resolution in the final 3D-video, but instead of reducing the horizontal resolution, the vertical resolution is reduced, and the frames are stored at the top and the bottom of the 3D-frame.

While displaying these formats, the receiver has to recreate full frames from the sub-frames and display them separately for each eye, respectively. Therefore, the player has to extract the frames from the 3D-frame and rescale them, for example by filling the missing columns or rows by using algorithms that interpolate the missing pixels. The advantage of these formats is that they use standard video resolutions (provided the source does, too), and have the same size as one 2D-frame. The required bandwidth is the same as with a normal 2D-video. The disadvantage is the leakage of resolution for each sub-frame. The other format type includes sub-frames with full resolution for each frame. Such formats use both sub-frames with their original

resolution to generate a 3D-frame. The result is a frame that has a double height if using the *top-bottom* method or double width if using *side-by-side* method. Also other formats exist, as well as an extension for the H.264/MPEG-4 AVC video compression, or the so-called multi-view video coding (MVC). The MVC format also includes depth of information, and allows for generating new views from the data. After the reconstruction of the two frames, different display technologies are used to display the frames to the eyes separately. The most common ones are:

- **Active Shutter:** In an active shutter system, the frames for the left and for the right eye are displayed in an alternate sequence, i.e. a system – glasses with LCD shutters – blocks the left eye while the frame for the right one is presented and vice versa. This is repeated at high speed in order to make the interruptions invisible for the viewer.
- **Polarization:** This system uses polarization to ensure that the frame for the left eye is only seen by the left eye. This is done by using display technology with different polarizations for the left and the right frame, and glasses using polarizing filters fitting to the corresponding frame.
- **Anaglyph 3D:** With this method, the frames for each eye are encoded by using filters of different colors. Typically red and cyan are used. With glasses using the right filters, it is ensured that each frame only reaches the appropriate eye. An example is shown in figure 2.



Fig. 2) Example of an anaglyph 3D frame (Movie: Big Buck Bunny, 3D version)

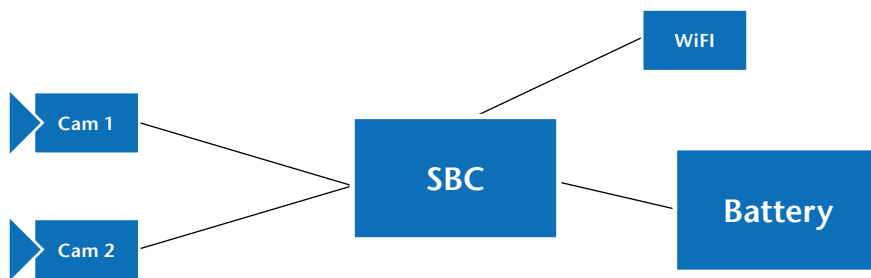


Fig. 3) Sketch of the streaming device

These three methods all use glasses to create the stereoscopic 3D-effect, but there are also some other technologies available, for example head-mounted displays – having a separate display for each eye, or auto-stereoscopic displays. Other important aspects for generating 3D-videos are the position and the orientation of the cameras used. As mentioned before, we use two cameras running synchronously, and in order to obtain a good result for a 3D-video, the position and orientation of the two cameras in relation to one another is important. To create a good 3D-effect for the user, the distance between the cameras is crucial. If the two cameras are too close to each other, there will be no 3D-effect, and if the distance is too long, the impression will not be realistic. A bad camera setup will cause headaches and dizziness because the brain cannot interpret the two views and will get confused while watching the video. In addition to the distance, the orientation is important as well. Both image planes have to be in the same plane and the optical axes have to be parallel, which means the view direction needs to be more or less the same. Moreover, any rotation of the optical axes should be avoided. In addition to the mechanical parameters, also the transmission and the video quality of a 3D-video and displaying it can influence the 3D-user experience (Hewage & Martini 2013).

### 3. A Modular Wireless Mobile Streaming Device

For the main component of the system, we chose a small computing device – a single board computer (SBC), normally used technology made for mobile applications like mobile phones

or tablet computers. For the past few years, the technology has been subject to a high pace of development that results in powerful systems on a chip (SoC) with multicore processors and specialized sub-processors for different tasks like GPU for graphic tasks, or encoder/decoder for different audio and video codecs. We have decided to use a SBC for our project, based on a SoC with a multicore processor and with two USB 2.0 cameras for video capturing. Therefore, the chosen SBC should support at least two independent USB 2.0 hosts. For the WiFi interface, we use a USB-WiFi-Adapter. To run the device wirelessly, we use a Lithium-polymer-battery combined with a step-down-converter as a mobile power-supply. All these components are replaceable, making our device modular and adaptable. A sketch of the device is depicted in figure 3. As the operating system of the device, we opted for Android. The manufacturer of the single board computer delivers an image file with *Android KitKat* in version 4.4.4. This allows us to use the Android application-programming interface (API) at level 19 of the Android software development kit (SDK) (Android Developers 2015b). This Android image file comes with a kernel that is configured to support V4L2, which makes it possible to access USB cameras through this API, as long as the connected cameras have UVC support. With this setup, we programmed an Android application using the native development kit (NDK) for Android (Android Developers 2015a). We access the two cameras using the native-code languages C and C++. We used the Java Native Interface (JNI) to build a c-library file to use the native code with Java (Oracle 2014). The library file encapsu-

lates the code for controlling the two cameras and for pulling the frames by using the V4L2 API. The cameras deliver MJPEG encoded frames, which is a basic requirement for 25 fps because of bandwidth limitations of USB 2.0. Thus, the frames have to be decoded. Decoding is done in our application by using the free JPEG library distributed by the Independent JPEG Group. All of these software components are encapsulated into a native library that is loaded by our Android application. In the Java part of the application, the frames are pulled simultaneously by using methods offered by the native library and stored on the Java side. In the next step, two corresponding frames, one of each camera, are combined to a 3D-frame. This is done by using the *side-by-side* format, by reducing the horizontal resolution of each frame, and by copying both into a new frame side by side. Using the *side-by-side* format keeps the bandwidth requirements low. Now that the 3D-frame is created, it will be encoded to H.264. Modern SoC for mobile applications come with a myriad of smaller co-processors, usually including one for encoding videos. In general, video streaming is associated with a high-energy consumption (Trestian et al. 2012). Using a more efficient co-processor for encoding the video can reduce the power demand and the CPU load. The Android SDK offers the *MediaCodec* API, which is included in the Android SDK of level 16. This API encapsulates all the low-level media codecs of such a co-processor. This functionality is an advantage of the Android operating system because under Linux, there is often no proper driver support available for using the hardware encoder. We stream the encoded video using the *Real-time Transport Protocol* (RTP) (Schulzrinne et al. 2003) and the *User Datagram Protocol* (UDP) (Eggert & Fairhurst 2008). In the Android SDK, there is no known implementation for streaming video data with these protocols. Accordingly, we implemented our own solution based on an open source library for RTP and UDP streaming. However, since this library did not completely fit our needs, we had to implement additional features and changes. The flowchart in figure 4 gives an overview

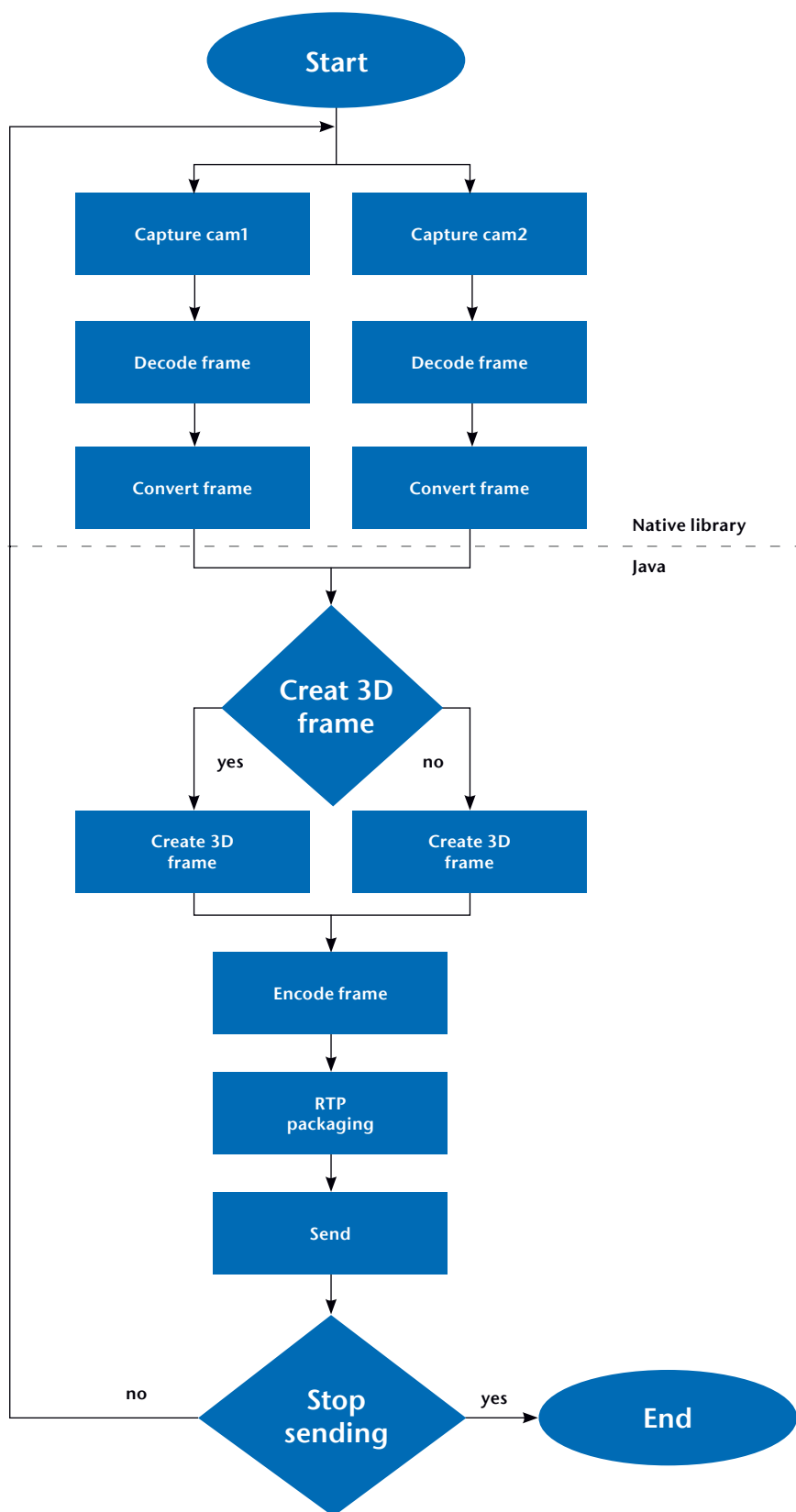


Fig. 4) Creating and sending 3D video

of how the 3D-frame is generated and handled. Figure 5 shows the application and the Android layers. For the audio capability of our device, we use a connected microphone for

recording and a connected speaker for playing sound. To record the audio stream with a microphone and to play the incoming audio-stream, we use the Android SDK. For encoding and

decoding audio, we used the Audio Stream package, which is included in the RTP package of the Android SDK. This package supports streaming audio via RTP using different audio codecs.

One important part of streaming is the exchange of ports and addresses used by the sender and by the receiver of the streams. We use the session description protocol (SDP) for this task (Handley et al. 2006). Port assignment for receiving is often done randomly, so we have to make sure that the incoming and outgoing streams are addressed to the right ports. For this reason, it is necessary to tell the sender of the audio stream on which port our device is listening for the audio stream. We also need to know to which port we have to send the video and the outgoing audio stream. This problem is solved by creating an SDP file (figure 6), which includes all the necessary information about the streams, including the ports for sending video data and the used format, receiving and sending audio ports and formats and codecs for all included streams. This file can be used for exchange with a server to build up all the connections, or it can be used by a media player client software, for instance the VLC media player.

Because we aim at existing standards for the 3D video streams, a high compatibility can be guaranteed, and many different displays are supported. A 3D-able display, for example a 3D-ready TV or PC monitor, makes it possible to watch the video in 3D. If no 3D-display is available, the VLC media player can be used to generate an anaglyph 3D-video from the stream.

We configure the device to run automatically as soon as it gets powered up, and after booting Android, our application starts automatically and begins streaming the live 3D-video and audio. It is also possible to switch between the 3D- and the 2D-mode, when only one camera is selected. For the 2D-mode, there is an option to choose the camera to be used. When running the device without any input device or monitor connected, one camera is selected by default. To signal the start of the streaming, the device gives a sound notification.

#### 4. Restraints During Development

To find the right computing device for our task, we had to determine the required specifications first. We wanted to create 3D-video; therefore it was essential that the single board computer had sufficient interfaces to control at least two cameras with the desired resolution and frame rate. To send the data wirelessly, a WiFi interface was also necessary. To have enough computing resources, and to be able to handle all the different tasks simultaneously, a multicore CPU with at least four cores seemed to be appropriate. To connect the cameras to the SBC, different types of interfaces came into consideration. A common type of interface for mobile application is the CSI (camera serial interface) of the MiPi Alliance. There are common devices, like *Raspberry-Pi*, *PandaBoard*, and *HummingBoard*, which support this interface. Many different boards are available, but the majority of them offer only one or no CSI interface. Another possibility would be to use FPGAs to combine the two camera frames before sending the data to the computing device using only one interface. Lattice Semiconductor offers a solution, which combines the frames of two camera sensors into one and sends the data as if it is only one camera (Lattice Semiconductor 2015). Even though this would be a powerful solution, it does not fit our project's aim to build the device from low-cost standard hardware. Normally, FPGAs are expensive, and using them would increase the development time for programming the FPGA and for designing the electronic parts to use the FPGA.

Due to lack of other options among all the single board computers and camera interfaces, we decided to use USB 2.0 as the camera interface. With USB 2.0, we can use almost any camera available, as long as it supports the required resolution and frame rate – even inexpensive webcams. The camera also had to support UVC for using it with the V4L2 API. Because of the afore-mentioned facts, we selected a single board computer with at least two independent USB hosts. The advantage of the chosen one is that it has at least three independent

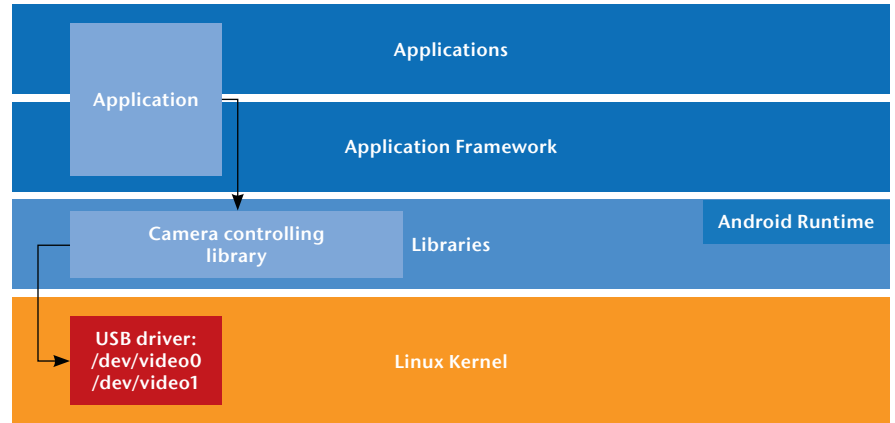


Fig. 5) The application and the Android layers

USB hosts, two USB 3.0 hosts and one USB 2.0. We use two USB hosts for the two cameras, and the third USB host for other peripherals, like the required WiFi receiver or input devices. As mentioned before, the device should run wirelessly; therefore, it also needs a wireless power-supply. The selected computing device needs a high current, so the power-supply delivered with it has an output of 5.0 V and 4.0 A. Thus, we decided to use rechargeable Lithium-polymer batteries. They can supply and sustain high currents, and the handling is uncomplicated. In addition to that, we use a step-down-converter to convert the output voltage of the battery from 7.9 V to 5.4 V.

As we started developing, we used Linux as an operating system, an Ubuntu 14.04.01 Linux image. For our first tests on implementing all the features for streaming, we used the *GStreamer* framework, a useful tool for multime-

dia tasks in Linux. With *GStreamer* we built different pipelines to test different ways for generating and encoding the 3D-video. We also tested different ways for streaming with *GStreamer* and checked the synchronicity of the two USB cameras with respect to generating a 3D-video stream. Since we used cameras without any hardware trigger that could be used for hardware synchronization, we developed software techniques to synchronize them. The results were positive. The two cameras worked without any issues and were synchronized sufficiently by the software. Only the targeted frame rate and latency could not be reached. While encoding the video using a software encoder included in the *GStreamer* framework, the CPU load was nearly 100 %, and we had a big latency in the video stream (several seconds). The SoC of our single board computer has a co-processor for hardware encod-

```
V=0
O=- 1188340656180883 1 IN IP4 10.220.1.161
S=STREAMINGDEVICE
I=N/A
C=IN IP4 10.220.1.161
T=0 0
A=RECVONLY
M=AUDIO 40004 RTP/AVP 0
A=RTPMAP:0 PCMU/8000
A=CONTROL:TRACKID=0
M=VIDEO 50002 RTP/AVP 96
A=RTPMAP:96 H264/90000
A=FMTP:96 PACKETIZATION-MODE=1;PROFILE-LEVEL-
ID=42801F;SPROP-PARAMETER-SETS=Z0KAH+KBKCB8QA==,AM4G8G==;
A=CONTROL:TRACKID=1
```

Fig. 6) SDP file

ing H.264, but is not supported by the *GStreamer* framework. Trying to implement a proprietary solution or plug-in for *GStreamer* failed as a consequence of lack of documentation and driver support. We were able to use the co-processor to encode frames, but the result did not meet our needs. We could only achieve a latency of about four seconds, and the solution could not be configured. All these facts led us to the decision to use Android as the operating system. However, while using Android, one issue needed to be solved: accessing the two USB cameras simultaneously. At the beginning we had some problems using the two USB cameras with standard Android camera applications. Then we did some tests with the Android SDK – the Android Camera API. Through this API, only one of the cameras could be accessed because from the design, Android is made for reading only one camera at the time. Hence, we decided to write a native low-level code for accessing and controlling the cameras. Therefore, we implemented a proprietary solution by using the V4L2 API to get both cameras working at the same time, and making them employable for multi-threading applications. In addition, however, a few more adjustments were necessary to control the cameras under Android. To use the cameras with V4L2, we had to change the permissions for the device files corresponding to the cameras. Due to the security features in Android, we needed root access to change any permission of these files. The Android image we use comes with root rights already enabled. Therefore we only had to remount the file system of our Android device to get write access to a system file. To remount the file system, we used the USB-debugging functionality of Android and connected through the Android Debug Bridge (ADB). After establishing the connection with a host computer via USB cable, we could run the ADB from a terminal and used the command:

- `adb shell mount -o remount,rw /system`

to remount the file system. Now that we had write access to the file system, we could edit the system file

`ueventd.devicename.rc`, where we had to change two lines – one for each device file. For the first one, we changed the line,

- `/dev/video0 0660 system camera` to `/dev/video0 0666 system camera`

and accordingly, for the second one:

- `/dev/video1 0660 system camera` to `/dev/video1 0666 system camera`

Changing the permission from 660 to 666 gives read and write access not only to the owner and group, but also to all other users. The names of the device files can differ on other devices, depending on the operating system and the SoC used. Some SoCs assign a different amount of V4L2 devices.

In some use cases it could be important to secure or encrypt the video stream. Instead of encrypting the video data, as tested in Massandy & Munir (2012), we investigated a VPN connection to secure the video stream. The problem with using VPN connections in Android 4.4 is that the user has to confirm the connection to the VPN through a pop-up dialog. For using our device without a connected display or any input device, we use the application *OpenVPN für Android* by Arne Schwabe to establish the VPN connection (Schwabe 2015). To confirm the VPN connection and the pop-up dialog without user interaction, we use the *Xposed* framework for Android, which includes a feature to automatically confirm a pop-up dialog (Xposed Module Repository 2014). This allowed us to run the device without any connected display or input device while using a secure VPN connection for streaming.

## 5. Conclusions and Future Work

During this project, we created a modular mobile device based on a single board computer with the capability to stream 3D-HD-videos (1280 × 720 pixels) in real-time with 25 frames per second. Our device consists of two USB cameras, a SBC, a WiFi module, and a mobile power supply. All parts can be included in one small case, or the two cameras can be separated from the rest, connected to the computing device by their USB cables. Since we

use standard hardware components, all parts are easily replaceable and adaptations for new requirements and tasks can be done easily.

While our application is running and streaming video and audio data, the CPU load is still less than 50 %. With some more optimization, this value could be decreased to an even lower value. Thus, there are still enough resources left on the computing device for other tasks. In the future, we plan to implement a solution to access the cameras without root rights. In this regard, we investigate a library for accessing USB cameras under Android called *UVCCamera*, which does not need root rights (GitHub 2015). However, during testing we could not reach the target frame rate so far. We are also thinking about implementing a camera calibration to remove any distortion of the camera lens. The aim would be to stream undistorted frames with the full frame rate. A possible extension for our device would be augmented reality to give additional context information to the viewer of the stream.

## REFERENCES

- Android Developers (2015a) Android NDK. <https://developer.android.com/ndk/index.html>. Accessed 07 Sep 2015
- Android Developers (2015b) Android SDK Reference. Package Index. <https://developer.android.com/reference/packages.html>. Accessed 08 Sep 2015
- Eggert L, Fairhurst G (2008) Unicast UDP Usage Guidelines for Application Designers. IETF RFC 5405. <https://tools.ietf.org/html/rfc5405>. Accessed 04 Sep 2015
- GitHub (2015) UVCCamera. <https://github.com/sak-i4510t/UVCCamera/tree/master>. Accessed 11 Sep 2015
- Handley M, Jacobson V, Perkins C (2006) SDP: Session Description Protocol. IETF RFC 4566. <https://tools.ietf.org/html/rfc4566>. Accessed 09 Sep 2015
- Hewage CTER, Martini MG (2013) Quality of experience for 3D video streaming. *IEEE Comm Mag* 51(5):101–107. doi: 10.1109/MCOM.2013.6515053
- Lattice Semiconductor (2015) MachXO2 Dual Sensor Interface Board. <http://www.latticesemi.com/en/Products/DevelopmentBoardsAndKits/MachXO2DualSensorInterfaceBoard.aspx>. Accessed 03 Sep 2015
- Mantoro T, Ayu MA, Jatikusumo D (2012) Live video streaming for mobile devices: An application on android platform. In: Proc 2nd Int Conf Uncertainty Reasoning and Knowledge Engineering (URKE), 14–15 Aug 2012, Jalarta, ISBN: 978-1-4673-1459-6, pp 119–122. doi: 10.1109/URKE.2012.6319523
- Massandy DT, Munir IR (2012) Secured video streaming development on smartphones with Android platform. In: Proc 7th Int Conf Telecomm Systems Services Applications (TSSA), 30–31 Oct 2012, Denpasar-Bali, ISBN: 978-1-4673-4549-1, pp 339–344. doi: 10.1109/TSSA.2012.6366079
- Oracle (2014) Java Native Interface Specification. <http://docs.oracle.com/javase/7/docs/technote/guides/jni/spec/jniTOC.html>. Accessed 08 Sep 2015

Schimek MH, Dirks B, Verkuil H, Rubli M, Walls A, Carvalho Chehab M (2009) Video for Linux Two API Specification. Revision 2.6.32. [http://www.linuxtv.org/downloads/legacy/video4linux/API/V4L2\\_API/spec-single/v4l2.html](http://www.linuxtv.org/downloads/legacy/video4linux/API/V4L2_API/spec-single/v4l2.html). Accessed 05 Sep 2015

Schulzrinne H, Casner S, Frederick R, Jacobson V (2003) RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications. IETF RFC 3550. <https://tools.ietf.org/html/rfc3550>. Accessed 03 Sep 2015

Schwabe A (2015) OpenVPN für Android 0.6.43. <https://play.google.com/store/apps/details?id=de.blinkt.openvpn&hl=de>. Accessed 11 Sep 2015

Trestian R, Moldovan AN, Ormond O, Muntean G (2012) Energy consumption analysis of video streaming to Android mobile devices. In: Proc IEEE/IFIP Network Operations Management Symp (NOMS), 16–20 Apr 2012, Maui, ISBN: 978-1-4673-0267-8, pp 444–452. doi: 10.1109/NOMS.2012.6211929

Xposed Module Repository (2014) Xposed Installer. <http://repo.xposed.info/module/de.robv.android.xposed.installer>. Accessed 11 Sep 2015

## AUTHORS

**Prof. Dr. rer. nat. Ralf Vandenhouten**  
Dipl.-Ing. (FH) Richard Fiebelkorn  
Technische Hochschule Wildau  
Forschungsgruppe Telematik

**Andrea Funke**  
eayse GmbH

E-mail for correspondence:  
[ralf.vandenhouten@th-wildau.de](mailto:ralf.vandenhouten@th-wildau.de)



# Advanced Nanophotonics: Silicon-Organic Hybrid Technology

Patrick Steglich\*, Claus Villringer, Silvio Pulwer, Joachim Bauer, Friedhelm Heinrich, Mauro Casalboni, Sigurd Schrader

## Abstract

Integrated photonic devices have gained increasing research interests. Especially silicon photonics have become very attractive for various optical applications. Using silicon-on-insulator as a material platform provides the ability to fabricate photonic devices with electronic devices on a single chip. Driven by substantial research investments, the integration of photonic devices on silicon-on-insulator substrates has reached a degree of maturity that already permits industrial adoption. However, silicon has the disadvantage of linear electro-optical effects, and, therefore, advanced modulation formats are difficult to realize when using silicon-based high-speed modulators. Hence, a new approach was proposed: the silicon-organic hybrid technology. This technology is a viable extension of the silicon-on-insulator material system for efficient high-speed modulation. We herewith present our theoretical and experimental investigations of the silicon-organic hybrid slot-waveguide ring resonator. The advanced device design is described in detail, which allows using both, the efficient silicon-on-insulator strip-waveguides and the silicon-organic hybrid slot-waveguides in single ring resonator. For the first time, we report the transmission spectra of such a resonator covered with an electro-optical polymer.

## Zusammenfassung

Integrierte photonische Bauelemente werden in der Forschung immer bedeutender. Besonders die Silizium-photonik ist für verschiedene optische Anwendungen sehr attraktiv. Die Verwendung von Silizium-auf-Isolator-Materialsystemen bietet die Möglichkeit, photonische Bauelemente mit elektronischen Geräten auf einem einzelnen Chip zu entwickeln. Durch erhebliche Forschungsinvestitionen hat die photonische Integration auf Silizium-auf-Isolator-Substraten einen Reifegrad, der bereits Industriemaßstäben genügt. Jedoch hat Silizium keinen linearen elektrooptischen Effekt und damit sind moderne Modulationsformate nur schwierig zu realisieren. Daher wird seit einigen Jahren ein neuer Ansatz, die Silizium-Organik Hybridtechnologie, verfolgt. Diese Technologie ist eine tragfähige Ausdehnung des Silizium-auf-Isolator-Materialsystems für eine effiziente Hochgeschwindigkeitsmodulation und optische Signalverarbeitung. In diesem Artikel präsentieren wir unsere theoretischen und experimentellen Untersuchungen zu einem Silizium-Organik Hybrid Ringresonator. Das Design und die Herstellung des neuartigen nanophotonischen Bauelements werden im Detail beschrieben. Der demonstrierte Ringresonator kombiniert die Vorteile zweier verschiedener Wellenleiterarten in einem einzelnen Ring, dem verlustarmen Kanal-Wellenleiter und dem Silizium-organischen Hybrid-schlitzwellenleiter. Wir demonstrieren erstmals ein Transmissionsspektrum eines solchen Ringresonators, der mit einem elektro-optischen Polymer beschichtet ist.

## 1. Introduction

Silicon photonics allows a strong optical confinement of light, due to its high index contrast with most materials, which permits the integration of complex systems with compact footprints. In addition, its compatibility with a complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) process

makes this technology attractive from the commercial point of view.

Current electro-optic (EO) modulators are based on semiconductors like silicon or indium phosphide and the fundamental speed limitations are related to carrier injection and removal. Therefore, parametric processes are impaired by non-parametric processes like two-photon absorption and

become the main speed-limiting factor. Additionally, silicon has a lack of linear EO coefficients.

During the last decade, a different approach, based on silicon slot-waveguides, has been proposed and experimentally demonstrated to be suitable as optical phase shifter using the linear EO effect (Almeida et al. 2004). Slot-waveguides enable a high field



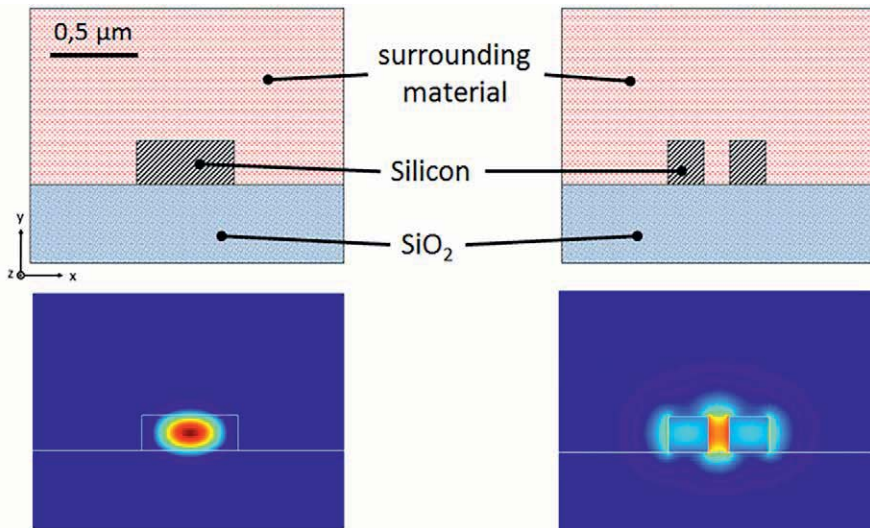


Fig. 1) Guided optical field in a SOI strip-waveguide (left) and in a slot-waveguide (right). The pictures below are showing the confined optical field (Steglich et al. 2015b).

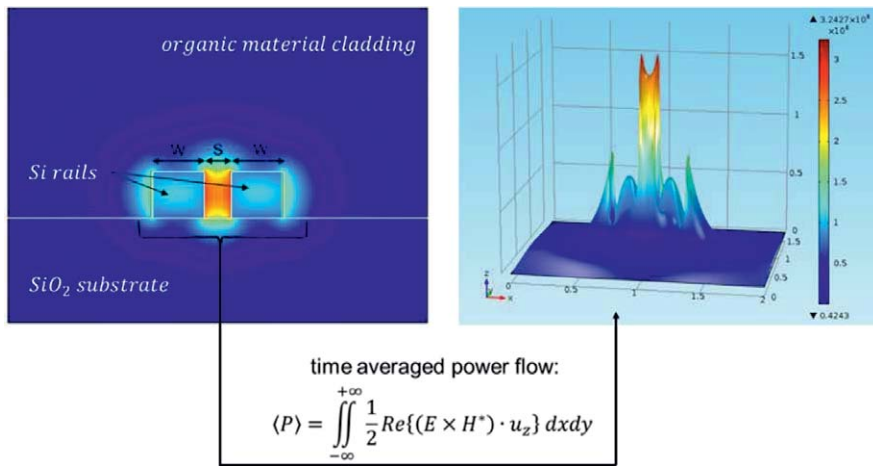


Fig. 2) Cross-sectional view of the quasi-TE mode and the corresponding time averaged power flow profile (Steglich et al. 2015c).

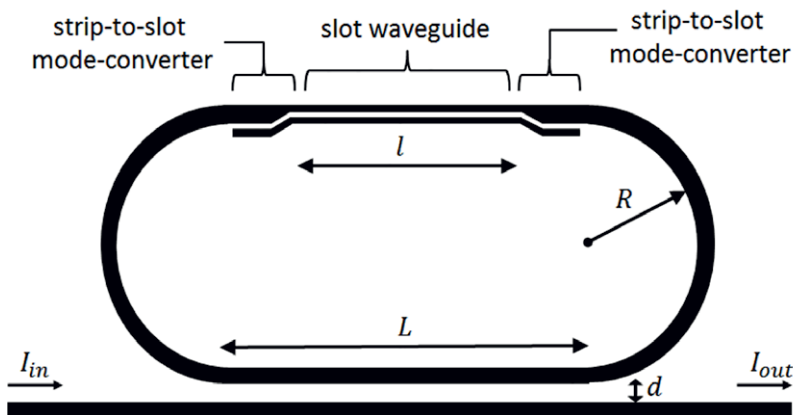


Fig. 3) Schematic of a partially slotted ring resonator (Steglich et al. 2015a)

confinement in a narrow region and a high overlap between the optical and the electrical field. Infiltration of the interior of the slot waveguide with an EO organic material allows the use of the Pockels effect. As a consequence, various devices like Mach-Zehnder interferometers and micro-ring resonators have been developed using a slot-waveguide phase shifter (Korn et al. 2014).

The major advantage of slot-waveguides is the fact that the guided light is confined in between two silicon rails. For this reason, the light is forced to interact directly with the surrounding material. The reason for this high confinement in between the silicon rails is the large index contrast of the high index silicon and the low index surrounding material. At the interface, the normal electric field undergoes a large discontinuity, which results in a field enhancement in the low index region with a ratio of the dielectric constant of the surrounding material to that of silicon. A detailed cross-sectional view is depicted in figure 1 and in more detail in figure 2.

The so-called silicon-organic hybrid (SOH) technology is using organic materials, which have exceptional high linear EO coefficients as surrounding material. Slot-waveguides are the key element in order to integrate organic materials in silicon photonics. Because the organic materials offer high linear EO coefficients, one can generate advanced modulation formats (Alloatti et al. 2014). The reason for this is that organic materials have a less free-carrier dispersion, which normally leads to an intrinsic coupling of amplitude and phase.

In the following sections, we describe the design, fabrication and optical characterization of a SOH ring resonator, which is a promising candidate for future EO modulators using the linear EO effect.

## 2. Device Fabrication

In this section, we describe the design and the fabrication of an integrated ring resonator based on our work published in Steglich et al. (2015a). The device was designed at the University of Applied Sciences, Wildau, and realized in IHP on 200 nm sili-

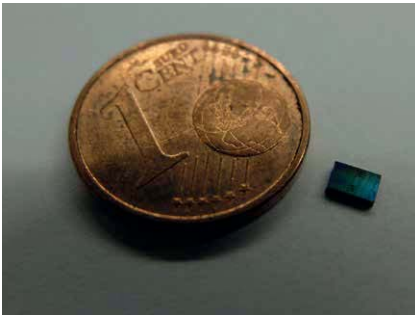


Fig. 4) Photonic chip with over 100 nanophotonic components on an area of 6 mm<sup>2</sup>.

con-on-insulator wafers using 248 nm DUV lithography. Because of the potential of the ring resonator getting integrated into IHP's BiCMOS Technology, and, hence, to fabricating it together with driver electronics and Trans Impedance Amplifiers (TIA), the ongoing developments regarding the presented ring resonator are following the IHP's integration concept.

A scheme, the partially slotted ring resonator, is depicted in figure 3. The hybrid concept of the partially slotted ring resonator takes advantage of a strongly guiding strip waveguide at the bent part of the ring, and of an efficient slot-waveguide at the straight part of the ring. To exploit the advantages of each waveguide type, an efficient strip-to-slot waveguide transition is needed. The length of our strip-loaded slot-waveguide is  $l = 12 \mu\text{m}$ , and the length of the strip-to-slot mode-converter is  $8 \mu\text{m}$ . With the ring radius  $R = 20 \mu\text{m}$ , and the coupling length  $L = 28 \mu\text{m}$ , the total circumference results in  $C = 182 \mu\text{m}$ .

In contrast to our previous work presented in Steglich et al. (2015a), we here use a slot-waveguide without silicon strip-loads. The slot width is  $s = 60 \text{ nm}$ , and the silicon rail width is  $w = 220 \text{ nm}$ . Both silicon rails are located on top of a  $2 \mu\text{m}$  buried oxide substrate.

A silicon dioxide top cladding is deposited, and a trench etched to open the slot-waveguide structure. This allows for the functionalization of the slot with an organic EO material. Using EO polymers or organic crystals as cladding material, the EO effect, and, therefore, the device tunability is expected to be significantly higher compared to free-carrier plasma dispersion-based phase shifters. Further, the slot-waveguide structure provides

a high optical and high electrical confinement, which increases EO effects even more (Steglich et al. 2015c). As cladding material, we spin-coated a side-chain polymer system. The polymer system consists of PMMA and the optical non-linear chromophore Disperse Red 1 (DR1) (IUPAC Name: Poly[(methyl methacrylate)-co-(Disperse Red 1 acrylate)]). After spin-coating, the photonic chip was heated to  $60^\circ\text{C}$  in an oven for 5h in order to remove the solvent. Figure 4 shows the fabricated photonic chip.

### 3. Device Characterization

The transmission spectra of the fabricated device were obtained by a testing platform using a super-luminescent diode as light source. The light was coupled into the silicon waveguides through a fiber grating coupler and out with another fiber grating coupler. Figure 5 shows the

photonic chip layout and magnifications of the fiber coupler gratings and ring resonators. We used only TE-polarized light. Figure 6 shows the observed transmission spectrum of the ring resonator.

The achieved Q-factor, which describes the sharpness of the transmission peaks, is about 5000. This is more than three times smaller compared to the ring resonator without polymer cladding, which was published in (Steglich et al. 2015a). This can be explained by the absorption of the polymer, but also by fabrication imperfections. The full width at half maximum is  $\text{FWHM} = 0.3146 \text{ nm}$ , and the free spectrum range is  $\text{FSR} = 6.7 \text{ nm}$ .

### 4. Conclusion

In all, we described the design and fabrication of a novel ring resonator based on slot-waveguide structures combined with strip-waveguide

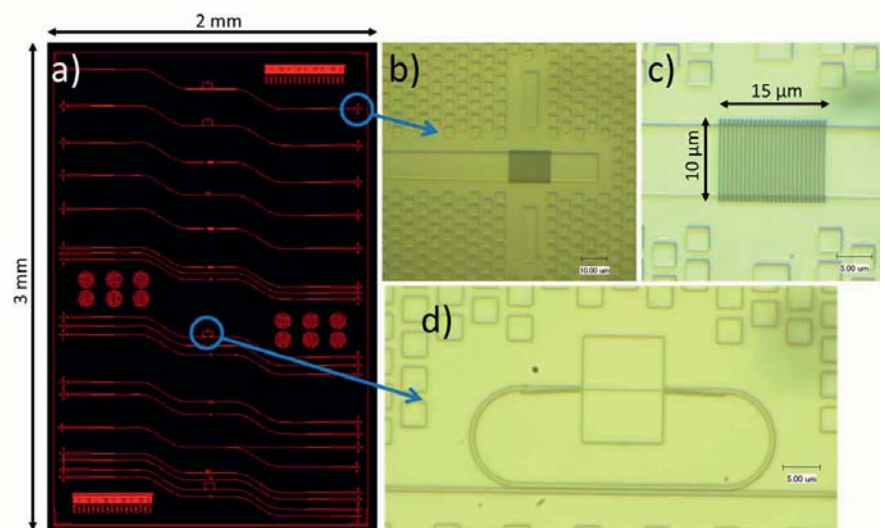


Fig. 5) a) Layout of the photonic chip. b) Fibre grating coupler with marker to align the optical fibre. c) Magnification of the fibre grating coupler. d) Ring resonator structure.

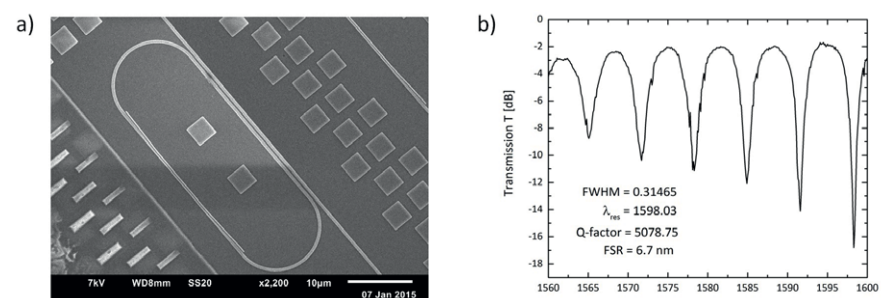


Fig. 6) a) Scanning-electron microscopic image of the top view of the fabricated ring resonator. b) Transmission spectra of a partially slotted ring resonator with EO polymer cladding.

structures, and demonstrated, for the first time, the transmission spectrum of this ring resonator after deposition of an electro-optical polymer as cladding material. We obtained narrow transmission peaks with a full width at half maximum of about  $\text{FWHM} = 0.3146 \text{ nm}$  for a ring resonator fabricated on 200 nm silicon-on-insulator wafers using 248 nm DUV lithography. This value can be improved using advanced strip-to-slot mode-converter design with logarithmic tapers instead of linearly tapered mode-converters. Another more challenging issue of the proposed concept is the implementation of EO polymers because of their thermal stability. This circumstance has to be investigated in more detail to find appropriate EO polymers for temperatures  $> 150^\circ\text{C}$ . However, our results are promising to build up future nano-photonic devices with silicon-organic hybrid technology. Future work should focus on optical loss reduction of the slot-waveguide to improve the Q-factor of the ring resonator.

### Acknowledgements

The authors would like to thank the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) for the financial support under contract no. 03FH-086PX2, the University of Applied Sciences Wildau (THWi), Germany, and the Ministry of Science, Technology and Culture of the federal state Brandenburg, Germany, for financial support. The authors would also like to thank Gero Göbel from the University of Applied Sciences Wildau (THWi), Germany, P. Proposito, F. De Matteis, and R. De Angelis from the University of Rome "Tor Vergata", Italy, St. Meister and A. Al-Saadi from the Technical University Berlin, Germany, and L. Zimmermann, D. Knoll, D. Stolarek, J. Katzer, St. Lischke, H. Silz, B. Tillack, A. Mai, and W. Mehr from the Institute of High-Performance Microelectronics (IHP), Germany, for their encouragement and support in the framework of the Joint-Lab IHP-THWi.

### REFERENCES

- Alloatti L, Palmer R, Diebold S, Pahl KP, Chen B, Dinu R, Fournier M, Fedeli J, Zwick T, Freude W, Koos C, Leuthold J (2014) 100 GHz silicon-organic hybrid modulator. *Light Sci Appl* 3(5):e173. doi: 10.1038/lsa.2014.54
- Almeida VR, Xu Q, Barrios CA, Lipson M (2004) Guiding and confining light in void nanostructure. *Opt Lett* 29(11):1209–1211. doi: 10.1364/OL.29.001209
- Korn D, Jazbinsek M, Palmer R, Baier M, Alloatti L, Yu H, Bogaerts W, Lepage G, Verheyen P, Absil P, Guenter P, Koos C, Freude W, Leuthold J (2014) Electro-Optic Organic Crystal Silicon High-Speed Modulator. *IEEE Photonics J* 6(2):1–9. doi: 10.1109/JPHOT.2014.2314113
- Steglich P, Mai C, Stolarek D, Lischke S, Kupijai S, Villringer C, Pulwer S, Heinrich F, Bauer J, Meister S, Knoll D, Casalboni M, Schrader S (2015a) Novel Ring Resonator Combining Strong Field Confinement With High Optical Quality Factor. *IEEE Photon Technol Lett* 27(20):2197–2200. doi: 10.1109/LPT.2015.2456133
- Steglich P, Padilla Michel Y, Villringer C, Dümecke S, Bauer JM, Heinrich F, Casalboni M, Schrader S (2015b) Design Optimization of Slot-Waveguides Covered with Organic Cladding Materials for Integrated Photonic Devices. In: Knaut M (ed) 16. Nachwuchswissenschaftlerkonferenz. Tagungsband, 16 Apr 2015. Berliner Wissenschaftsverlag, Berlin, ISBN: 978-3-8305-2044-3, pp 192–198
- Steglich P, Villringer C, Dümecke S, Padilla Michel Y, Casalboni M, Schrader S (2015c) Silicon-on-Insulator Slot-waveguide Design Trade-offs. In: Proc PHOTONICS – 3rd Int Conf Photonics, Optics and Laser Technology, 12–14 Mar 2015, Berlin, ISBN: 978-989-758-093-2, pp 47–52. doi: 10.5220/0005336200470052

### AUTHORS

**Patrick Steglich, M. Eng.**  
**Claus Villringer, M. Eng.**  
**Silvio Pulwer, M. Eng.**  
**Dr. Joachim Bauer**  
**Dr. Friedhelm Heinrich**  
**Prof. Dr. Sigurd Schrader**  
 Technische Hochschule Wildau  
 Research Group Photonics

**Prof. Dr. Mauro Casalboni**  
 University of Rome "Tor Vergata"  
 Department of Industrial Engineering

E-mail for correspondence:  
 patrick.steglich@th-wildau.de

# Untersuchung zum Ausfall der Strangführungsrollen in der horizontalen Zone einer Brammenstranggussanlage

Jörn Bräske\*, Steffen Klohs, Thomas Mirre

## Zusammenfassung

Es besteht ein Problem durch den häufigen Ausfall der Strangführungsrollen und die resultierenden erheblichen Verluste durch den Produktionsausfall, welcher beim Ersetzen der Rolleneinheiten entsteht.

Um die Ursachen zu ergründen wurden, zunächst die Randbedingungen und das Schadensbild analysiert. Daraus entstand die Hypothese, dass allgemein eine zu hohe Temperaturbelastung für die Schädigung der Lagerkomponenten verantwortlich ist und dies die grundlegende Ursache für die weitere Zerstörung darstellt.

Folglich musste eine Messeinrichtung installiert werden, um genauere Erkenntnisse über den Überhitzungsvorgang zu erlangen. Zu diesem Zweck wurden mehrere Verfahren zur Temperaturmessung miteinander verglichen, woraufhin eine Auswahl anhand einer Nutzwertanalyse erfolgte.

Die Auswertung der gewonnenen Messdaten zeigte, dass die Charakteristik der aufgezeichneten Überhitzungen sehr variabel ist. Weiterhin konnte keine Abhängigkeit von einem Prozessparameter ermittelt werden. Die genauer betrachteten Vorgänge konnten nicht oder nur eingeschränkt als Ursache für die Überhitzung nachgewiesen werden.

Wenngleich somit weitere Untersuchungen erforderlich sind, wurden mögliche Maßnahmen zur Lösung des Problems vorgeschlagen.

## Abstract

The problem deals with the frequent malfunction of the guide rolls and the following serious loss through the lost output, which develops because of the replacement of the rolls.

First of all, the boundary conditions and the failure mode were analyzed to fathom the possible causes. Hence, the assumption arose that the general reason for the damage of the bearing components is that the temperature stress is too high, which is the reason for the further destruction. Consequently, a system of measurements has to be installed to get detailed insights about overheating. For this purpose, different methods of temperature detections were compared, whereupon a choice occurred on the basis of a utility analysis.

The evaluation of the achieved measurement data showed that the characteristic of the recorded overheating is very different. Furthermore, a dependence on a process parameter cannot be proved. It was not possible, or just restricted, to verify the eyed instances as a cause of the high temperature.

Although more researches are necessary, possible actions to solve the problem were proposed.

## 1. Einführung in die Problemstellung

Im Konverterstahlwerk der *Arcelor-Mittal Eisenhüttenstadt GmbH* wird aus flüssigem Roheisen zunächst die Stahlschmelze hergestellt, um aus ihr anschließend feste Halbzeuge zu fertigen. Letzteres geschieht in der Brammenstranggussanlage (Abb. 1), in deren Kokille, welche aus wassergekühlten Kupferplatten besteht, zunächst eine feste Strangschale entsteht. Der Strang verlässt die Kokille

und wird durch die Kreisbogenanlage geführt, bevor er in der horizontalen Zone vollständig erstarrt. Daraufhin wird er per Querschnitt durch eine Brennschneidmaschine in Brammen geteilt, welche später im Warmwalzwerk weiterverarbeitet werden.

In der jüngeren Vergangenheit traten häufig Defekte an den Rolleneinheiten (Abb. 2) der horizontalen Strangführung auf. Diese bestehen aus drei einzeln auf einer fest stehenden Welle gelagerten Rollenkörpern. Zur Lage-

rung dienen je ein Pendelrollen- und ein Torroidalrollenlager (CARB-Lager), welche durch eine Verbrauchschmierung mit Schmierstoff versorgt werden. Zur Abdichtung der Lager dienen je ein Wellendichtring sowie ein Satz Doppellamellendichtringe. Zwischen den Rolleneinheiten sind seitlich Weitwurfdüsen angebracht, welche axial entlang der Rollenkörper Wasser spritzen, um diese zu kühlen. Die Drehbewegung der Rollenkörper wird, abgesehen von den Treiberroll-

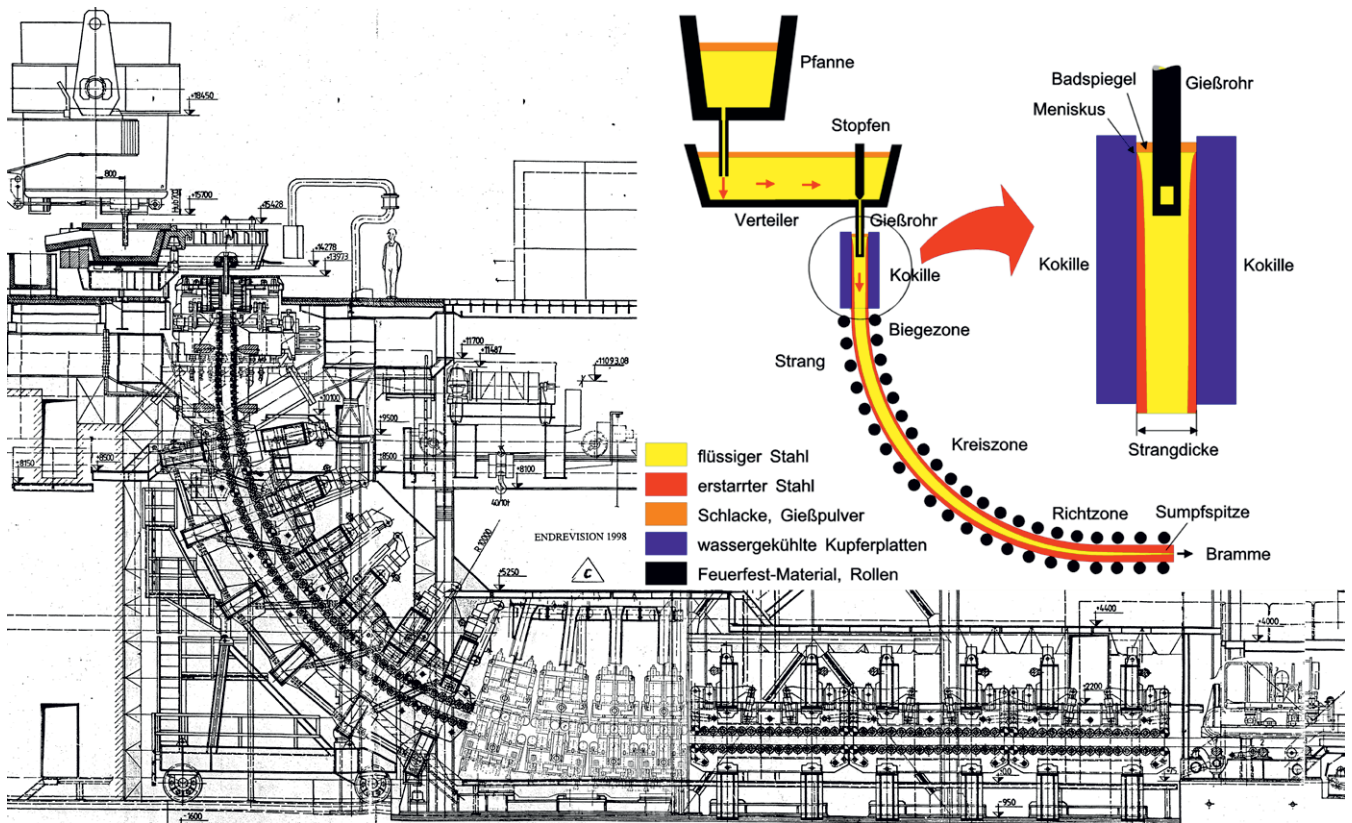


Abb. 1) Übersichtszeichnung und schematische Darstellung der Stranggussanlage

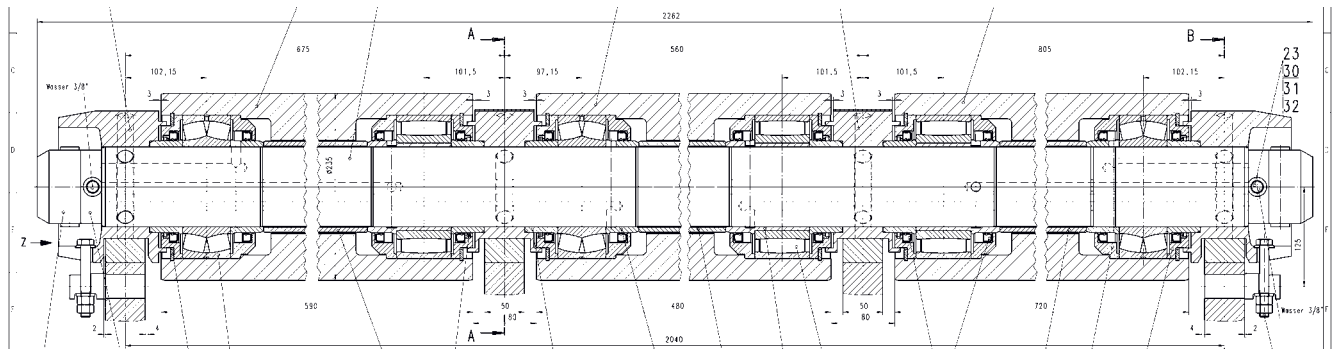


Abb. 2) Zeichnung Rolleneinheit

len, ausschließlich durch die Reibung am Strang hervorgerufen.

Die Defekte der Rolleneinheiten äußern sich auf unterschiedliche Art und Weise.

Wenn der Rollenkörper trotz Kontakt zum Strang nicht mehr rotiert, so entstehen Schleifspuren auf dem Rollenmantel sowie Riefen im Strang. Letztere stellen einen Qualitätsmangel dar, der sich meist auch auf die darauffolgenden Verarbeitungsprozesse auswirkt und diese negativ beeinflusst.

Ein weiteres Problem ist die Aufweitung des Gießspaltes, welcher durch den Abstand der gegenüberliegenden Rollenkörper definiert wird. Wenn dieser sich erweitert, so kommt es am

Strang, sofern dessen Kern noch flüssig ist, zu Ausbauchungen infolge des ferrostatischen Drucks.

Bei legiertem Stahl:

$$\begin{aligned}
 \textcircled{1} \quad & \rho = 7900 \text{ kg/m}^3; \\
 & h \approx 13 \text{ m (ArcelorMittal n/a)} \\
 & p_f = \rho \cdot g \cdot h; \\
 & p_f = 7900 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,807 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 13 \text{ m} \\
 & = 1007178,9 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \\
 & = 1007178,9 \text{ Pa}
 \end{aligned}$$

wobei:  $p_f$ : ferrostatischer Druck [Pa],  
 $\rho$ : Dichte [kg/m<sup>3</sup>],  $h$ : Höhendifferenz [m]

Die Folge dieser Querschnittserweiterung des Stranges können Mittenseigerungen sein, welche eine erhebliche Beeinträchtigung der Innenqualität darstellen (Schwerdtfeger 1992: 185). Weiterhin wiesen vereinzelte Wassersteinablagerungen auf dem Mantel der Rollen darauf hin, dass diese übermäßig erhitzt wurden. Diese Schlussfolgerung basiert auf der Tatsache, dass steinbildende Salze einen negativen Löslichkeitsindex haben und sich somit bei höheren Temperaturen stärker abscheiden. Auf eine lokale Überhitzung weisen auch die Anlassfarben auf der Manteloberfläche im Bereich der Lager hin. Weiterhin wurde beobachtet, dass der Schmierstoff nicht wie

erwartet braun und pastös, sondern schwarz und dünnflüssig aus den Lagern austrat, was darauf hindeutet, dass zumindest dessen Tropfpunkt überschritten wurde.

Daraufhin wurden einzelne Rolleneinheiten untersucht. Vom Wellendichtring war meist nur noch der Federring aus Edelstahl vorhanden, an dem lediglich Rückstände des Fluorelastomers hafteten. Letzteres beginnt, laut Herstellerangaben, beim Überschreiten von 300°C sich dauerhaft chemisch zu zersetzen, wodurch keine Dichtwirkung mehr gegeben ist. Infolge dessen tritt Wasser in das Lager ein, was offensichtlich der Fall ist, wie an der Korrosion der Lagerbauteile zu erkennen ist. Der abrasive Verschleiß des Lagers wird dadurch enorm erhöht und es droht zu blockieren. Bei der Härteprüfung der Lager wurde dann auch die Wirkung der erhöhten Betriebstemperatur sichtbar. Die Lagerbauteile, insbesondere der Außenring, wiesen einen erheblichen Härteverlust von bis zu 35 % auf. Dies ist auf die temperaturbedingten Gefügeveränderungen zurückzuführen, wodurch sich der Lagerverschleiß erhöht. Spätestens wenn durch eine defekte Rolleneinheit Qualitätsprobleme am Produkt auftreten, muss diese ausgetauscht werden. Dies ist nur bei einem Stillstand der Anlage möglich und dauert je nach Position der Rolle mehrere Stunden. Da die reguläre Rüstzeit zwischen den Sequenzen lediglich 35 Minuten beträgt, entstehen durch jeden Rollenwechsel hohe Produktionsausfälle, welche Verluste nach sich ziehen.

Die Variabilität der Schäden ließ auf verschiedene Schadensursachen oder zumindest unterschiedliche Abläufe des Schädigungsprozesses schließen. Allgemein wies das Schadensbild auf eine zu hohe Temperaturbelastung hin, wobei jedoch nur vage Vermutungen über deren Höhe und Einwirkdauer möglich waren.

Somit war ein Austausch einzelner Komponenten wenig sinnvoll, da die notwendige Temperaturbelastbarkeit, z. B. einer anderen Dichtung, nicht definiert werden konnte.

Dennoch wurde nach Produkten recherchiert, wobei jedoch keine zufriedenstellende Lösung gefunden wurde. Beispielsweise würde ein Schmierstoff

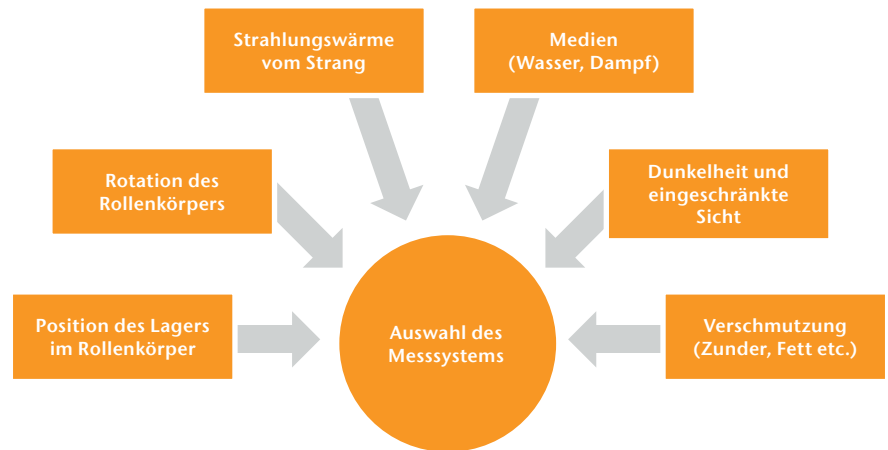


Abb. 3) Herausforderungen bei der Auswahl des Messsystems

mit einer Temperaturbelastbarkeit von bis zu 260 °C das 57-Fache vom derzeit verwendeten kosten. Somit wäre diese Lösung, insbesondere bei der vorhandenen Verbrauchsschmierung, nicht wirtschaftlich.

Weiterhin wäre auch die Wirkung anderer kurzfristiger Maßnahmen, z. B. Erhöhung der Kühlung, nicht nachvollziehbar gewesen. Darüber hinaus sind bei der Veränderung der Kühlung stets die metallurgischen Einflüsse auf den Strang zu berücksichtigen.

Um die Ausfallursache genauer zu untersuchen und die Wirkung von Maßnahmen nachvollziehen zu können, war also die Einrichtung einer Temperaturmessung erforderlich.

## 2. Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Untersuchungen

### 2.1 Auswahl und Einrichtung des Messsystems

Die Anforderungen bei der Auswahl des Messsystems sind, wie Abb. 3 zeigt, ebenso hoch wie vielfältig. Nach der Recherche von vielfältigen Messverfahren wurden vier von ihnen genauer betrachtet und hinsichtlich ihrer Eignung untersucht. Zwei davon waren berührungslose, optische Messmethoden, welche anhand der elektromagnetischen Strahlung eines Körpers dessen Oberflächentemperatur bestimmen können: zum einen ein Pyrometer, welches die Temperatur an einem Punkt misst, und zum anderen eine Wärmebildkamera, mit der

ein größerer Raum betrachtet werden kann. Die Temperatur des Lagerraums im Inneren des Rollenkörpers kann bei diesen beiden Verfahren also lediglich anhand der Temperatur des Rollermantels abgeschätzt werden. Dennoch wäre somit eine Dauerüberwachung der Temperatur während der gesamten Sequenz möglich. Dagegen stellt eine andere Messmethode lediglich einen Maximalwertspeicher dar. Es handelt sich dabei um irreversible Temperaturindikatoren, die bei der Überschreitung einer bestimmten Temperatur einen Farbumschlag vollziehen. Sie sind sehr klein und können deshalb auch an schwer zugänglichen und sogar an bewegten Teilen angebracht werden. Somit ist die Anbringung direkt an den Lagerkomponenten möglich. Ihr Messbereich reicht jedoch, anders als bei Pyrometer und Thermovisionkamera, lediglich bis 224 °C.

Weiterhin wäre zum Ablesen die Demontage der Rolleneinheit notwendig. Dies bedeutet, dass der Informationsgewinn erst nach dem Ausfall der Rolle erfolgen würde. Ein vorzeitiger Wechsel würde das Ziel, die Stillstandszeit zu minimieren, verfehlen. Eine der häufigsten Methoden zur Temperaturmessung, insbesondere im Hochtemperaturbereich, ist ein Thermoelement. Dieses elektrische Messverfahren nutzt den Seebeck-Effekt bei Temperaturdifferenzen, um die dabei entstehende Potenzialdifferenz zu messen (Bernhard 2014: 832). Diese wird von der Auswertungseinheit auf die Temperaturskala abgebildet, sodass die Temperatur des Messkop-

Tab. 1: Bewertung der ausgewählten Messverfahren

	Variante 1	Pyrometer
<b>Kriterium</b>	<i>Punkte</i>	<i>Begründung</i>
Erkenntnisgewinn	2	Dauermessung; nur punktuell
Robustheit	4	wassergekühltes Schutzgehäuse; Gefahr durch Kondensation
Aufwand	4	einfache Installation und Aufzeichnung
Kosten	3	hohe Investition insb. bei Anschaffung mehrerer Geräte; Betriebskosten
Genauigkeit	3	geringer system. Fehler; Messung nur am Rollenmantel
Summe	16	
	Variante 2	Thermografie
<b>Kriterium</b>	<i>Punkte</i>	<i>Begründung</i>
Erkenntnisgewinn	3	Dauermessung; Betrachtung peripherer Bauteile
Robustheit	3	luftgekühltes Schutzgehäuse, Gefahr durch Kondensation
Aufwand	4	einfache Installation und Aufzeichnung
Kosten	3	hohe Investition insb. bei Anschaffung mehrerer Geräte; Betriebskosten
Genauigkeit	2	geringer systemat. Fehler bei guter Sicht; Messung nur am Rollenmantel
Summe	15	
	Variante 3	Temperaturindikator
<b>Kriterium</b>	<i>Punkte</i>	<i>Begründung</i>
Erkenntnisgewinn	3	lediglich Maximalwertspeicher; keine Abschätzung nötig, da direkte Messung
Robustheit	3	abgedichtet gegen Medien; mechanische Belastbarkeit und Überhitzungsverhalten ungewiss
Aufwand	2	hoher Montageaufwand insbesondere bei Demontage zur Auswertung
Kosten	5	sehr geringe Investitionskosten, keine Folgekosten während des Betriebs
Genauigkeit	3	sehr geringer Temperaturbereich; Messung direkt am Lager
Summe	16	
	Variante 4	Thermoelement
<b>Kriterium</b>	<i>Punkte</i>	<i>Begründung</i>
Erkenntnisgewinn	4	Daueraufzeichnung; sehr gute Abschätzung der Lagertemperatur möglich
Robustheit	4	im biegsamen Mantel in feuerfestes Material eingebettet
Aufwand	3	einfache Installation und Aufzeichnung; Anpassung einzelner Bauteile notwendig
Kosten	4	geringe Investitionskosten; sehr geringe Betriebskosten
Genauigkeit	4	sehr großer Temperaturbereich; geringer systemat. Fehler; Messung sehr nah am Lager
Summe	19	

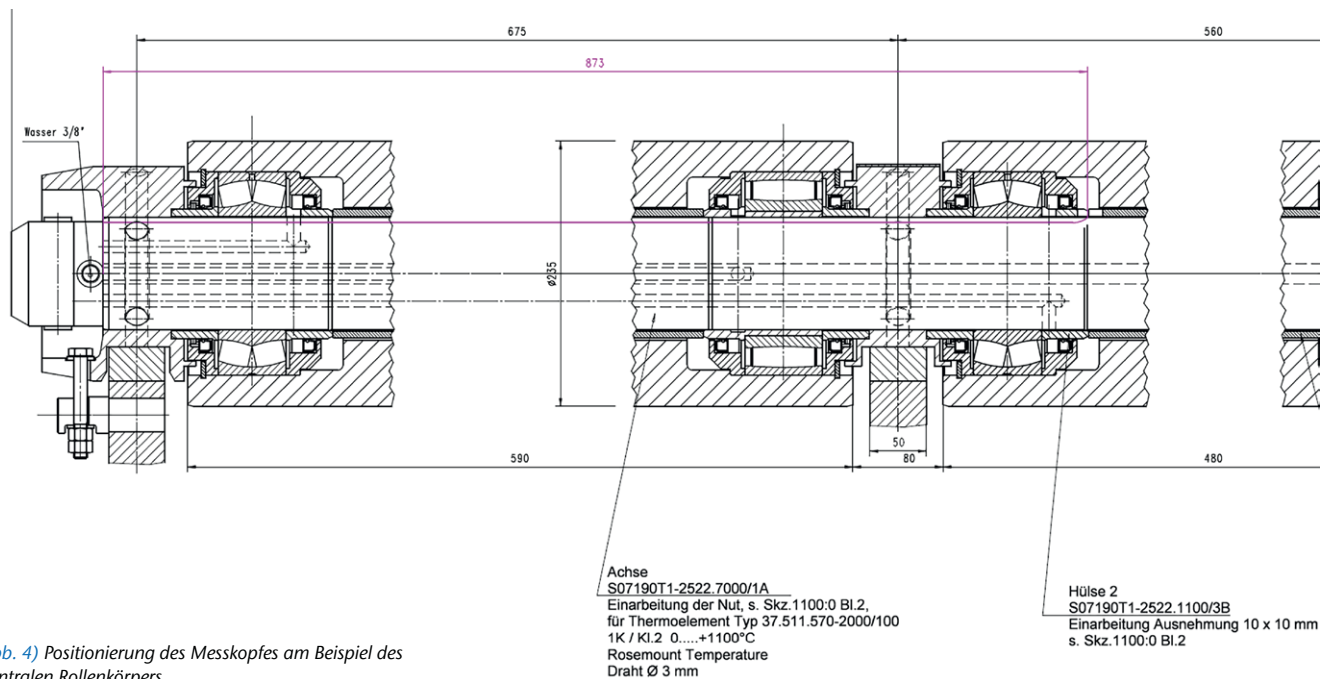


Abb. 4) Positionierung des Messkopfes am Beispiel des zentralen Rollenkörpers

fes, an dem die beiden Thermodrähte miteinander verbunden sind, wiedergegeben wird. Für die vorliegende Aufgabe eignet sich die Bauform des Mantelthermoelementes, da diese zum einen biegsam und somit flexibel ist und zum anderen einen guten Wärmeübergang aufweist. Der Messkopf kann somit zumindest in der näheren Umgebung des Lagers positioniert werden, um eine möglichst repräsentative Dauermessung zu gewährleisten.

Für eine möglichst objektive Entscheidungsfindung wurden die verschiedenen Messmethoden in einer Nutzwertanalyse miteinander verglichen. Dazu wurden Kriterien definiert und entsprechend ihrer Priorität gewichtet. Anschließend erfolgte die Punktevergabe durch ein Bewertungssystem, welches sich an der VDI 2225 orientiert (Tab. 1). Das Ergebnis der Nutzwertanalyse wies das Mantelthermoelement als am besten geeignete Lösung aus (Tab. 2), sodass das Hauptaugenmerk bei der Untersuchung im Folgenden diesem Verfahren galt.

Der Messkopf des Thermoelementes sollte möglichst nah an das Lager geführt werden, die konkrete Ausführung geht aus Abb. 4 hervor. Da dieser Raum die gleiche radiale Position wie das Lager hat und ebenso von Rollenkörper, Abdrückring und Hülse begrenzt wird, kann von einem äquivalenten Wärmeübergang ausgegangen werden. Die Temperaturüberwachung erfolgte jeweils am Pendelrollenlager des zentralen Rollenkörpers und am CARB-Lager des langen Rollenkörpers. Somit erfolgte die Messung bei verschiedenen Lagertypen und in verschiedenen Rollenkörpern, wodurch möglichst viele Erkenntnisse gewonnen werden sollten. In der Mitte der Rolleneinheit ist, aufgrund der höheren Temperatur des Strangzentrums und weil auch bei schmalen Gießbreiten Strangkontakt vorliegt, die höchste Temperaturbelastung zu erwarten. Deshalb wurde neben dem zentralen Rollenkörper der lange Rollenkörper gewählt, da dessen CARB-Lager zentraler positioniert ist als beim kürzeren, außen liegenden Rollenkörper.

Der Einbau der zur Temperaturmessung ausgestatteten Rollen sollte im Zuge der notwendigen Wechsel erfolgen, um zusätzliche Stillstandszeit zu vermeiden. Dennoch sollten die Positionen auch möglichst viele Erkenntnisse für die Untersuchungen liefern. Folglich wurden die ersten 4 Rolleneinheiten je in den Innen- und Außenbogen der Rollen 4 und 8 im 3. Segment der horizontalen Strangführung eingebaut. Somit konnte zum einen untersucht werden, in welchem Maß die Temperaturbelastung zwischen den unten und oben liegenden Rollen differiert, und zum anderen sowohl Rollen unter den Querträgern als auch dazwischen kontrolliert werden. Die Rollenwechselstatistik wies nämlich, neben einem überwiegenden Ausfall im Innenbogen auch einen Schwerpunkt unter den Querträgern aus.

Einige Woche nach Beginn der Messung wurde außerdem die Rolle 5 im Innenbogen des 1. Segments durch eine Temperaturmessrolle ersetzt, sodass auch die Betrachtung unterschiedlicher Segmente möglich war. Wenngleich die ausgewählte Messmethode als am besten geeignet erschien, musste im Vorfeld betrachtet werden, in welchem Maß Abweichungen zwischen dem angezeigten Ergebnis und dem wahren Wert zu erwarten sind. Dabei mussten neben dem systematischen Fehler der Messeinrichtung auch zufällige Fehler, z. B. durch wechselnde Umwelteinflüsse sowie grobe Messfehler, z. B. durch falsche Montage, mit einbezogen werden. Für die Auswertung und Interpretation der Messergebnisse ist, bei grundlegend funktionierendem Messaufbau, insbesondere die Angabe der Grenzabweichung von Bedeutung. Sie wird vom Hersteller angegeben und beträgt bei Klasse 2:

$$\pm 2,5 \text{ °C oder } \pm 0,0075 \cdot T \text{ (°C)}$$

T: Temperatur  
(Rössel-Messtechnik 2012: 3)

Dabei ist zu beachten, dass jeweils der größere Wert gilt.

Zur Visualisierung der Messdaten dient das Programm *ibaAnalyzer*, mit dem ausgewählte Prozessdaten vom Server abgerufen werden können. Somit konnten neben den Temperaturwerten auch zur Auswertung relevante



Tab. 2: Ergebnis der Nutzwertanalyse

Kriterium	Wichtung	Variante 1: Pyrometer		Variante 2: Thermografie	
		Punkte	Wertung gewichtet	Punkte	Wertung gewichtet
Erkenntnisgewinn	40 %	2	0,8	3	1,2
Robustheit	30 %	4	1,2	3	0,9
Aufwand	10 %	4	0,4	4	0,4
Kosten	10 %	3	0,3	3	0,3
Genauigkeit	10 %	3	0,3	2	0,2
<b>Summe</b>	<b>100 %</b>	<b>16</b>	<b>3</b>	<b>15</b>	<b>3</b>
<b>Nutzwert</b>		<b>60%</b>		<b>60%</b>	

Daten, wie z. B. die Gießgeschwindigkeit, abgerufen werden.

## 2.2 Analyse der Messdaten und weiterführende Betrachtungen

Nach Betrachtung des Temperaturverlaufs über mehrere Sequenzen war es möglich, den regulären Betriebszustand zu beschreiben. So wurde festgestellt, dass sich die Betriebs-

temperatur während der Sequenz, bei geringfügigen Schwankungen, in folgendem Bereich befindet:

$$3 \quad T_{\text{Betrieb}} \approx 80 \text{ °C} \pm 2,5 \text{ °C bis } 100 \text{ °C} \pm 2,5 \text{ °C}$$

Um festzulegen, wann von einer Überhitzung gesprochen werden kann, erfolgte die Orientierung an der Temperaturbelastbarkeit der Bauteile. Die Schwachstelle stellte dabei

der Wellendichtring dar, welcher bei Temperaturen über 200°C weich wird, wodurch sich seine Anpresskraft und langfristig auch die Verschleißfestigkeit verringern. Der Überhitzungszustand wurde somit durch Temperaturen über 200 °C definiert.

Die erste Auffälligkeit war jedoch keine Überhitzung, sondern die Tatsache, dass der Temperaturbereich bei Stahlmarken für Elektroanwendun-

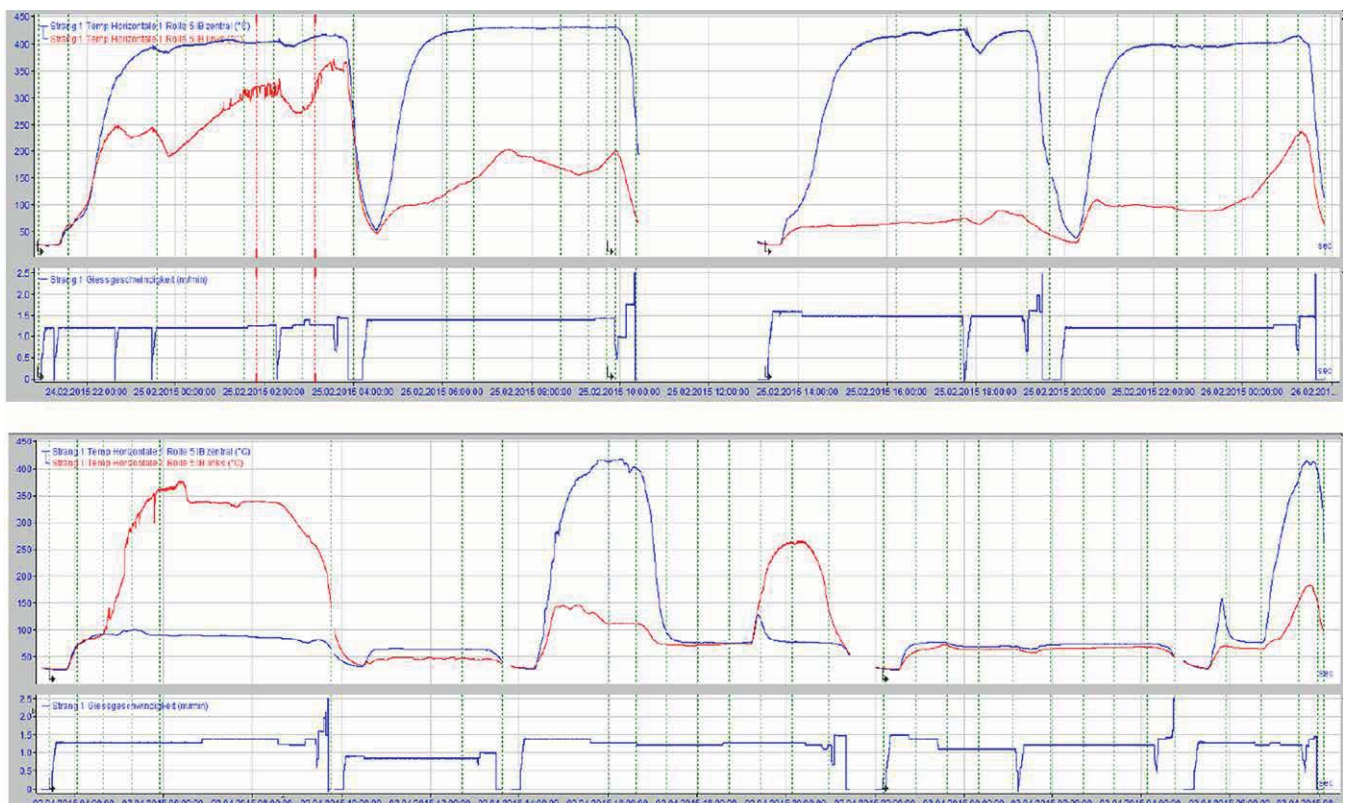


Abb. 5) Ausschnitt der Temperaturmessungen in einer Rolleneinheit

Variante 3: Temperaturindikator		Variante 4: Thermoelement		Optimum	
Punkte	Wertung gewichtet	Punkte	Wertung gewichtet	Punkte	Wertung gewichtet
3	1,2	4	1,6	5	2
3	0,9	4	1,2	5	1,5
2	0,2	3	0,3	5	0,5
5	0,5	4	0,4	5	0,5
3	0,3	4	0,4	5	0,5
<b>16</b>	<b>3,1</b>	<b>19</b>	<b>3,9</b>	<b>25</b>	<b>5</b>
62%		78%		100%	

gen deutlich geringer ist als bei allen anderen Güten:

4  $T_{\text{Elektrostahl}} \approx 60^{\circ}\text{C} \pm 2,5^{\circ}\text{C}$  bis  $80^{\circ}\text{C} \pm 2,5^{\circ}\text{C}$

Als Ursache ist vorrangig die stärkere Wärmeabfuhr aus der Strangschale durch erhöhte Kühlwassermengen und geringere Gießgeschwindigkeit anzuführen. Notwendig ist dies, um die Durcherstarrung des Stranges trotz einer geringeren Wärmeleitfähigkeit, aufgrund des erhöhten Siliziumgehalts, zu gewährleisten.

Die Charakteristik der detektierten Überhitzungen war sehr variabel, wie Abb. 5 beispielhaft veranschaulichen soll. Zunächst erkennt man hierbei den voneinander unabhängigen Temperaturverlauf der beiden benachbarten Rollenkörper. So weist der zentrale Rollenkörper (blauer Graph) in den oben dargestellten Sequenzen jeweils eine starke Überhitzung über die gesamte Dauer der Sequenz auf, während der linke Rollenkörper (roter Graph) nur zwischenzeitlich oder nicht überhitzt. Weiterhin ist die Intensität der Überhitzungsereignisse hinsichtlich Höchsttemperatur und Einwirkdauer sehr unterschiedlich.

5 zentraler Rollenkörper:  
 $T_{\text{max}} \approx 425^{\circ}\text{C} \pm 3,2^{\circ}\text{C}$

6 linker Rollenkörper:  
 $T_{\text{max}} \approx 365^{\circ}\text{C} \pm 2,7^{\circ}\text{C}$

Somit kann auch davon ausgegangen werden, dass der Schädigungsverlauf der Lagerkomponenten variabel ist. Die Temperaturschwankungen konnten nicht auf ein Gießereignis (z. B. Stranghalt) zurückgeführt werden. Deshalb wurden die Überhitzungsereignisse dokumentiert und hinsichtlich ihrer Abhängigkeit von verschiedenen Prozessparametern ausgewertet. In dieser tabellarischen Dokumentation wurden u. a. die während der Überhitzungen vergossenen Stahlmarken notiert, da diese Unterschiede bezüglich der chemischen Zusammensetzung aufweisen. Damit verbunden sind auch variable Eigenschaften z. B. bezüglich des Erstarrungsverhaltens. Weiterhin wurde die Gießgeschwindigkeit vermerkt, da auch diese die Erstarrung und die damit verbundenen Ausbauchungen des Stranges beeinflusst. Außerdem wurde dokumentiert, in welchem Rahmen sich die Gießbreite bewegte. Diese hat aufgrund der von ihr bestimmten Kontaktfläche zwischen dem Strang und den äußeren Rollen Einfluss auf deren Wärmeeintrag und Antrieb. Darüber hinaus wurde auch die angewandte Kühlgruppe vermerkt, da diese großen Einfluss auf die Wärmeabfuhr vom Strang und von den Baugruppen hat. Um zu untersuchen, ob die Überhitzung von der vergossenen Stahlmarke abhängig ist, wurden die notierten Stahlmarken entsprechend ihrer Häufigkeit in einem Säulendiagramm dargestellt (Abb. 6a). Die Abhängigkeit der Ereignisse von einer Stahlmarke

konnte dabei jedoch nicht festgestellt werden. Selbst die Stahlmarke, welche am häufigsten in Sequenzen mit Überhitzungen vergossen wurde, stellt lediglich einen Anteil von 22,8 % an den Gesamt ereignissen dar.

Weiterhin wurde die Intensität der Kühlung betrachtet, wobei zu beachten ist, dass die Stärke der Kühlwirkung von Gruppe 1 zu Gruppe 5 hin ansteigt (Abb. 6b).

Kühlgruppe 6 ist ein Sonderfall, da die Kühlung hier wiederum relativ weich erfolgt.

Da jedoch kein Trend erkennbar war, kann weder eine starke noch eine schwache Kühlung als Ursache für die Überhitzungen festgemacht werden. Weiterhin wurde der Mittelwert von Gießgeschwindigkeit und -breite während der Sequenzen, in denen es zu Überhitzungen kam, gruppiert und ausgewertet (Abb. 7).

Auch bei diesen Parametern ließ sich kein Trend zu einem der Randbereiche nachweisen. Vielmehr deuten die Diagramme auf eine Normalverteilung der Ereignisse hin, wobei für solche statistischen Bewertungen eine mengenneutrale Auswertung notwendig wäre.

Parallel zur Temperaturmessung wurden weitere Untersuchungen durchgeführt, um Erkenntnisse zur Ausfallursache der Strangführungsrollen zu erlangen. So sollte, als die Überhitzungen häufiger festgestellt wurden, der Zusammenhang zwischen Rotation und Überhitzung überprüft werden. Die Grundlage hierfür war, dass die Weitwurfdüsen nicht den kompletten

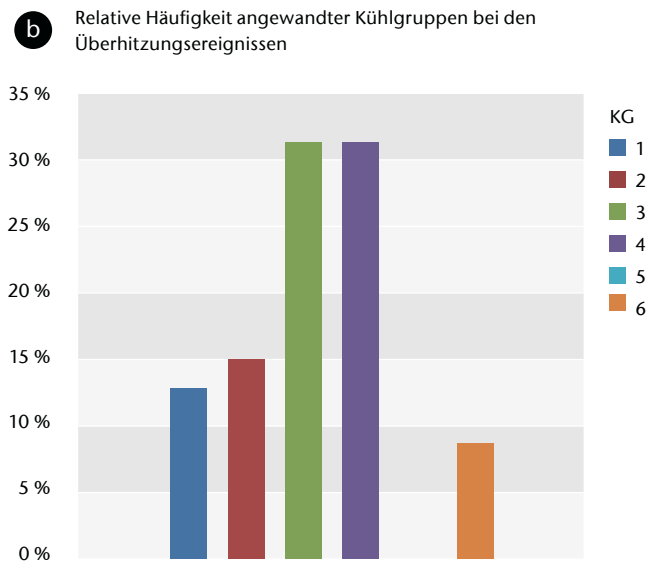
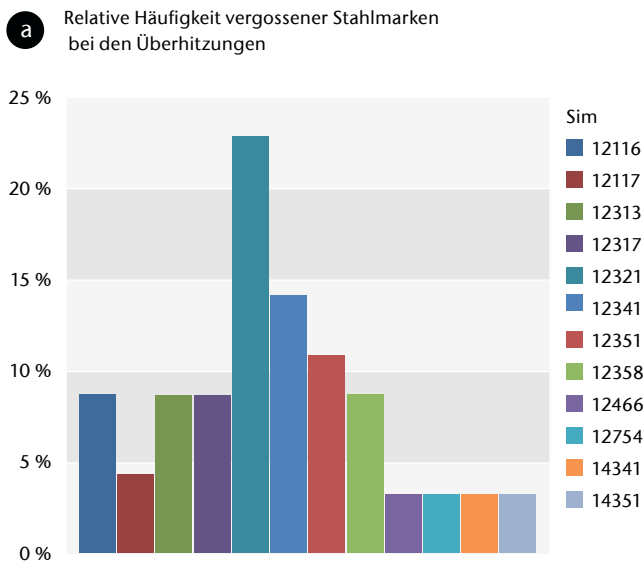


Abb. 6) Abhängigkeit der Überhitzungen von der Stahlmarke (a) und Kühlgruppe (b)

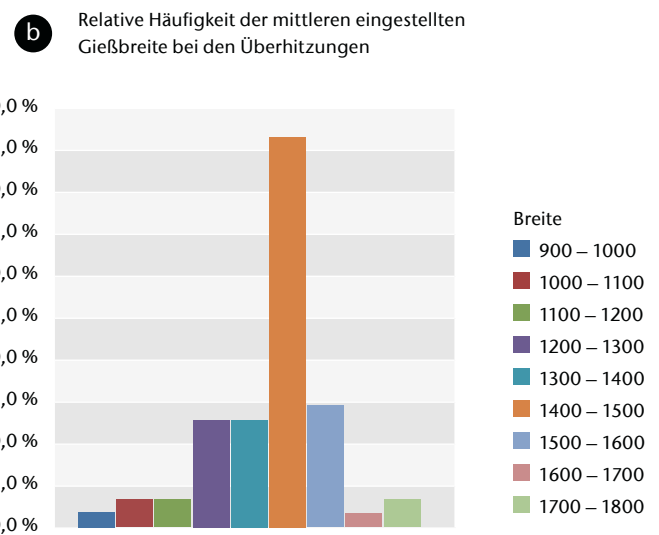
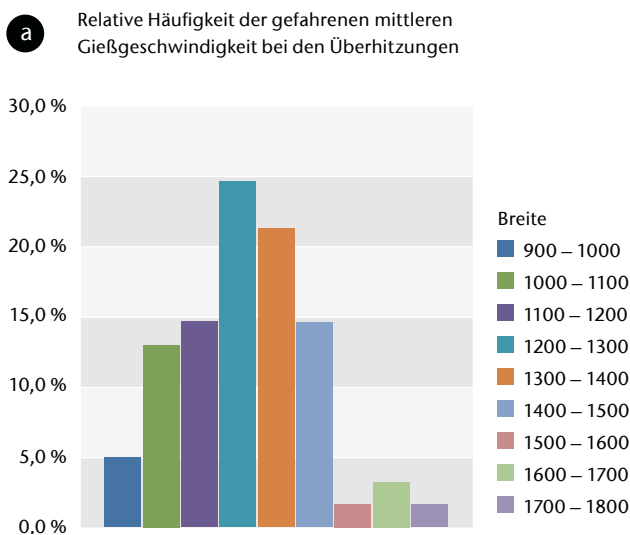


Abb. 7) Abhängigkeit der Überhitzungen von der Gießgeschwindigkeit (a) und -breite (b)

Umfang des Rollenmantels kühlen, wenn dieser nicht mehr rotiert. Zu diesem Zweck wurde ein Rollenkörper, der mit einem Thermoelement ausgestattet war, per Videokamera überwacht. Diese wurde durch ein Kühlgehäuse wassergekühlt und ein Luftblasvorsatz sollte eine gute Sicht auf die Rollenoberfläche gewährleisten. Der einzigen Überhitzung der überwachten Rolle während der Kameraaufzeichnung ging deren Stillstand voraus. Da die Uhr-Anzeige der Software defekt war, konnte der Zeitpunkt nicht genau zugeordnet, sondern nur anhand der Aufzeichnungsdauer abgeschätzt werden. Der Nachweis des Zusammenhanges war somit nur eingeschränkt und nicht wie

gewünscht repräsentativ möglich. Weiterhin sollte untersucht werden, ob innerhalb des Rollenteppichs der horizontalen Strangführung lokale Schwerpunkte der Überhitzung festgestellt werden können. Zu diesem Zweck ist die installierte Messmethode nicht geeignet, da es mit einem sehr großen Aufwand verbunden wäre, alle Rollen mit Thermoelementen auszustatten. Deshalb wurden die Rollen, unmittelbar nachdem der Strang zum Sequenzende die Kühlkammer verlassen hat, mit Hilfe einer Thermografiekamera begutachtet. Die erste Erkenntnis war, dass die lokale Temperaturverteilung nicht nur innerhalb des Rollenteppichs, sondern auch bei der Betrachtung eines überhitzten Rol-

lenkörpers sehr unterschiedlich sein kann (Abb. 8). Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs konnte keine repräsentative statistische Auswertung erfolgen. Dennoch ist die Information, dass bei 82% der Überhitzungen an allen 3 Segmenten die Rollen 12–15 betroffen waren, eine interessante Grundlage für weitere Untersuchungen und mögliche Maßnahmen. Die Tatsache, dass im Außenbogen keine Überhitzung festgestellt wurde, bestätigt die bisherige Annahme aus der Temperaturmessung durch die Thermoelemente, dass von der Temperaturproblematik nur der Innenbogen betroffen ist. Auch das Schadensbild der defekten Rolleneinheiten wurde bei deren De-

montage begutachtet. Dabei wurden zunächst Riefen am Verschlussring (Abb. 9a) sowie am Innenlagerbock (Abb. 9b) festgestellt, was auf starke Reibung zwischen diesen beiden Komponenten schließen lässt. Außerdem war der Sicherungsring gebrochen, sodass eine Sicherung der axialen Position nicht mehr gegeben war. Auch der einseitig starke Verschleiß des CARB-Wälzkörpers, insbesondere an dessen Stirnseite, lässt auf falsche axiale Positionierung schließen (Abb. 9d). Die axiale Verschiebung des Loslagers wird zuerst durch den 3-mm-Spalt zwischen Rollenkörper und Lagerbock begrenzt, wobei dieser oft durch feste Ablagerungen vermindert wird (Abb. 9c).

Darüber hinaus wurde bei ausgebauten, aber noch montierten Rolleneinheiten eine Unwucht festgestellt, die auf eine übermäßige Biegung der Achse schließen lässt.

Daraufhin wurde untersucht, ob die radiale Lagerluft des CARB-Lagers durch Schiefstellung infolge der Biegung und durch axiale Verschiebung so stark gemindert werden kann, dass das Lager blockiert. Die Berechnungen ergaben jedoch, dass ein Blockieren des Lagers theoretisch nicht als Ursache für eine Überhitzung in Frage kommt, auch dann nicht, wenn sich das ursprüngliche Lagerspiel an der unteren Grenze des Toleranzfeldes (185  $\mu\text{m}$ ) befand. Andersherum kann es im Überhitzungsfall durchaus zum Blockieren des Lagers kommen, da die radiale Lagerluft sich dann verringert und nur noch eine axiale Verschiebung von 2,32 mm zulässt.

### 3. Zusammenfassung und Ausblick

Kernpunkt der Untersuchungen war die Temperaturmessung mittels Thermoelementen im Inneren der Rolleneinheiten. Diese lieferte eine Vielzahl von Informationen, insbesondere bezüglich des zeitlichen Verlaufs. So konnten neben dem regulären Betriebszustand auch Effekte infolge von Gießereignissen festgestellt werden. Weiterhin wurde das Maß der lokalen Temperaturdifferenzen zwischen benachbarten und gegenüberliegenden Rollenköpern ermittelt. Das Hauptaugenmerk lag jedoch auf der Analyse der Überhitzungsereignisse. Diese

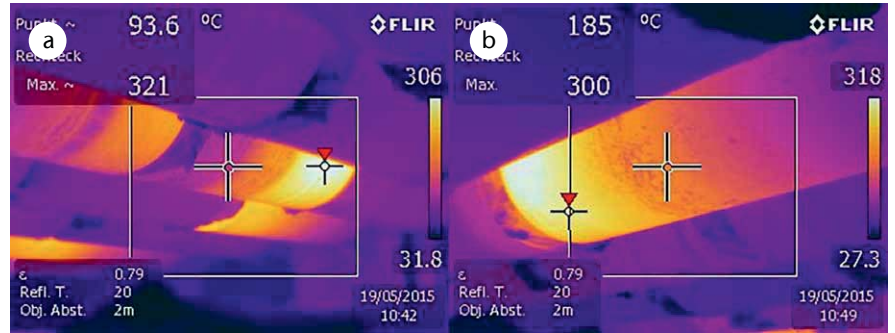


Abb. 8) Lokale Temperaturverteilung an den Strangführungsrollen (Thermografiekamera)



Abb. 9) Zusammengefasste Schadensbilder bei der Demontage der Rolleneinheit

wiesen eine große Variabilität hinsichtlich der gemessenen Temperatur, des Zeitpunktes und der Dauer des Auftretens sowie ihres zeitlichen Verlaufs auf. Auch deshalb konnte bei Betrachtung der Prozessdaten kein Gießereignis als Ursache für die Überhitzungen festgestellt werden. Bei der Auswertung der dokumentierten Ereignisse hinsichtlich ihrer Abhängigkeit von der vergossenen Stahlmarke, der angewandten Kühlgruppe sowie der gefahrenen Gießgeschwindigkeit und -breite war kein Trend erkennbar. Der Zusammenhang zwischen der Rotation eines Rollenkörpers und dessen Überhitzung konnte nur eingeschränkt nachgewiesen werden. Die Untersuchung des Rollenteppichs in der horizontalen Strangführung mit Hilfe einer Thermografiekamera bestätigte, dass sich die Überhitzungen auf den Innenbogen beschränken.

Eine erneute Begutachtung des Schadensbildes der Rolleneinheit wies auf ein Problem hinsichtlich der axialen Verschiebung hin. Als Engpass wurde der 3-mm-Spalt zwischen Rollenkörper und Mittenlagerbock erkannt.

Obwohl das CARB-Lager deutlich größeren axialen Versatz ermöglicht, waren dessen Wälzkörper einseitig stark verschlissen. Außerdem hatte das Pendelrollenlager seine axiale Position verändert, wobei dies bei einem Festlager nicht vorgesehen ist. Darüber hinaus wurde eine Exzentrizität der Welle festgestellt, wobei das Maß der Biegung bisher nur sporadisch ermittelt wurde. Das Ausmaß der durch Biegung und Längenausdehnung hervorgerufenen Verformung und die Auswirkungen auf die Lagerung konnten lediglich theoretisch untersucht werden, da diesbezüglich keine Messwerte vorliegen.

Die Ursachenbetrachtung wird durch die Variabilität des Schadensbildes, mögliche Montagefehler und den unbekanntem zeitlichen Ablauf der Beschädigungen erschwert.

Da das Spektrum der Ursachen für die Überhitzung ebenso vielfältig ist wie deren Auftreten, gestaltet sich auch die Lösungsfindung kompliziert. Dennoch werden im Folgenden einige Maßnahmen, die zur Verbesserung der Situation beitragen können, beschrieben.

Allgemein kommt bei Problemen durch zu hohe Temperatur eine Optimierung der Kühlung als Lösung in Frage, wengleich die Temperaturmessung gezeigt hat, dass die Betriebstemperatur in der Regel in Ordnung ist. Dennoch kann den Überhitzungen durch eine erhöhte Wärmeabfuhr begegnet werden, wobei jedoch die metallurgischen Auswirkungen auf den Strang berücksichtigt werden müssen. Darüber hinaus muss geprüft werden, ob sich durch die Maßnahme der Wasserbedarf erhöht und ob dieser ggf. von den bestehenden Anlagen zur Wasserversorgung und -aufbereitung gedeckt werden kann.

Eine Möglichkeit besteht in der Anpassung der externen, also außerhalb der Rolleneinheit wirkenden Kühlanlage z. B. durch die Änderung von Art oder Anordnung der Düsen. Dies ist in Form des Nebeldüsenumbaus bereits geschehen, wobei der Effekt auf die Überhitzungen nur bedingt nachweisbar war. Bei der Optimierung der externen Kühlung sollte die Konzentration auf lokale Schwerpunkte erfolgen, um den Aufwand und die Auswirkungen auf den Strang möglichst gering zu halten.

Eine andere Möglichkeit ist die Verbesserung der internen Kühlung, also jener, die innerhalb der Rolleneinheit erfolgt. Diese Maßnahme wurde bereits in der Richtzone von Strang 1 durch die Verwendung mechanisch gekoppelter Rollenkörper mit integrierter Lagerkühlung umgesetzt.

Da das Klemmen der Rolle nach derzeitigem Stand nicht als Ursache für die Überhitzung in Frage kommt, wäre der Stillstand des Rollenkörpers durch mangelnden Kontakt zum Strang zu erklären. Um diesen zu gewährleisten, muss der Gießspalt an die sich ändernde Geometrie des Strangs angepasst werden. Damit ist insbesondere gemeint, dass sich die Maulweite mit steigender Stranglänge verringert, um auf die Schrumpfung infolge der Abkühlung des Stranges (*soft reduction*) zu reagieren. Die Maßnahme, den Gießspalt mit der vorhandenen Anlagentechnik zu korrigieren, war nicht erfolgreich, da weiterhin Überhitzungen auftraten. Es sollte also die Neusegmentierung der Anlage geprüft werden, wobei bereits ein Entwurf vorliegt, der jedoch überarbeitet und aktualisiert werden muss.

Da der konkrete Schadensverlauf und die auftretenden Wechselwirkungen noch nicht genau ermittelt werden konnten, sind weitere Untersuchungen notwendig, um die Ursache bzw. Ursachen der Überhitzungen sicher zu bestimmen. Dazu gehört auch die Vertiefung begonnener Analysen, wie der Dokumentation von Überhitzungsereignissen. Außerdem sollte der Zusammenhang zwischen Rotation und Überhitzung erneut und über einen längeren Zeitraum betrachtet werden. Dabei sind auch die Treiberrollen einzubeziehen, da auch hier per Thermovisionkamera Überhitzungen festgestellt wurden, obwohl diese jederzeit rotieren sollten.

Weiterhin sollten die Verformungen der Rolleneinheit sowie ihrer Komponenten, und auch des Segmentes genauer betrachtet werden. Dies gilt sowohl für die Deformation durch thermische als auch durch mechanische Belastung. Aufgrund der durchgeführten Temperaturmessung lagen zur Berechnung der Längenausdehnung relativ genaue und umfangreiche Daten vor. Dies ist in anderen Fällen, z. B. bei der Biegung der Achse, nicht der Fall, weshalb hier weitere Informationen als Grundlage für die Berechnungen notwendig sind. Zu diesem Zweck sollte die Verformung der relevanten Bauteile möglichst während des Gießprozesses ermittelt werden. Die Ergebnisse dieser Messungen müssen dann hinsichtlich der Ursachenfindung für die Überhitzung, z. B. durch fehlenden Kontakt zwischen Strang und Rollenkörper, ausgewertet werden. Auch die axiale Verschiebung des Rollenkörpers durch den Strang sollte untersucht werden. Wo die Durchführung solcher Messungen nicht unter vertretbarem Aufwand möglich ist, muss die Verformung auf andere Art bestimmt werden. Im Fall der Rollenkörper bietet bspw. Schwerdtfeger (1992: 402) eine gute Grundlage für die theoretische Betrachtung und Berechnung.

Außerdem muss, nachdem die Konzentration in dieser Arbeit auf das CARB-Lager gerichtet war, das Pendelrollenlager hinsichtlich seines Ausfalls genauer untersucht werden.

Weiterhin sollte der Anstieg der Rollenbelastung an der Sumpfspitze sowie in der Mitte des zweiten Segments der horizontalen Strangführung, welcher

in Jänisch (2010) ermittelt wurde, als Ursache in Betracht gezogen werden. Hohe Aufmerksamkeit sollte zukünftig auch dem Zusammenbau der Rolleneinheiten gelten. Insbesondere wenn durch Montagefehler keine systematischen, sondern zufällige Abweichungen entstehen, ist deren Nachweis im späteren Verlauf kompliziert.

## LITERATUR

ArcelorMittal (n/a) Zeichnungsarchiv ArcelorMittal Eisenhüttenstadt GmbH.

Bernhard F (ed) (2014) Handbuch der Technischen Temperaturmessung, 2nd edn. VDI-Buch. Springer Vieweg, Berlin. ISBN: 978-3-642-24505-3. doi: 10.1007/978-3-642-24506-0

Jänisch M (2010) Untersuchung der Belastungen von Strangführungsrollen im stationären Gießprozess. Master Thesis, Hochschule Lausitz

Rössel-Messtechnik (2012) Produktinformation 071: Mantel-Thermoelemente. Zur Temperaturmessung in Industrie, Labor und Forschung. [http://www.roessel-messtechnik.de/webro-wAssets/docs/product-information/german/pi-071-metal-sheathed\\_de.pdf](http://www.roessel-messtechnik.de/webro-wAssets/docs/product-information/german/pi-071-metal-sheathed_de.pdf). Accessed 17 Aug 2015

Schwerdtfeger K (ed) (1992) Metallurgie des Stranggießens. Gießen und Erstarren von Stahl. Verlag Stahleisen, Düsseldorf. ISBN: 978-3-514-00350-7

## AUTOREN

**Jörn Bräseke B. Eng.**  
**Prof. Dipl.-Ing. Thomas Mirre**  
Technische Hochschule Wildau  
Maschinenbau

**Dipl.-Ing. Steffen Klohs**  
ArcelorMittal Eisenhüttenstadt  
Technologie Stahlwerk

E-Mail für Korrespondenz:  
joern.braeske@th-wildau.de

# Vergleich von Implementierungsmöglichkeiten industrieller Energiemonitoringsysteme für KMU

René von Lipinski\*, Dirk Buße, Jörg Reiff-Stephan

## Zusammenfassung

Um den Herausforderungen zukünftiger Wertschöpfungsnetzwerke gewachsen zu sein, sind produzierende Unternehmen im verstärkten Maße auf die Erfassung energetischer Daten angewiesen. Somit gewinnen industrielle Energiemonitoringsysteme zunehmend an Bedeutung. Bei der Erweiterung bestehender Strukturen um die Funktionalität des Energiemonitorings können verschiedene konzeptionelle Ansätze verfolgt werden. Diese werden in der vorliegenden Arbeit aufgezeigt und anhand exemplarischer Versuchsaufbauten nutzwertanalytisch verglichen. Es ist festzustellen, dass die Auswahl eines geeigneten Systems für jeden Anwendungsfall individuell zu betrachten ist. Nur unter Berücksichtigung der technischen sowie menschlichen Entitäten innerhalb eines Unternehmens und genauer Definition der Spezifikationen kann aus der breiten Auswahl marktverfügbarer Systeme die jeweils geeignetste Lösung ausgewählt werden.

## Abstract

To meet the challenges of future value-added networks, production companies are dependent on a large-scale capture of energy data. Therefore, industrial energy monitoring systems are becoming increasingly important. For the expansion of existing structures to the functionality of the energy monitoring, different conceptual approaches can be pursued. These are shown in the present research publication, and compared analytically by utility-based exemplary experimental setups. As a result of this investigation, it can be stated that the selection of a suitable system for each application must be considered individually. The selection of an appropriate implementation of an energy monitoring system is dependent on certain factors. These are the technical and human entities within a company, as well as the exact definition of the specifications.

## 1. Einleitung

Die informationstechnische Vernetzung industrieller Produktionsprozesse schreitet weiter voran, wobei die Zukunftsinitiative Industrie 4.0 als Katalysator fungiert (Krüger et al. 2015). Die Vorzüge, welche aus derartigen Umstrukturierungen resultieren, sind vielschichtig und sollen dabei helfen, Unternehmen wie auch den Wirtschaftsstandort Deutschland langfristig zu sichern (Bauer et al. 2013). Ein wichtiger Aspekt hierbei ist der effiziente Umgang mit begrenzten Ressourcen (Dorst et al. 2015). Infolgedessen gewinnt auch das intelligente Management energetischer Ressourcen innerhalb der neuen Wertschöpfungsnetzwerke zunehmend an Bedeutung. Dementsprechend bietet der Markt aktuell eine Vielzahl von Produkten für

die Realisierung eines Energiemonitoringsystems. Doch gerade kleine und mittlere Unternehmen (KMU) Unternehmen stehen häufig vor der Herausforderung, dass für die Investition in neue Technologien nur ein begrenzter Finanzierungsrahmen zur Verfügung steht. Somit ist es erforderlich, dass sich derartige Systeme möglichst in die bestehende Infrastruktur der Unternehmen integrieren lassen. Oft genügt jedoch die gezielte Erweiterung bestehender Entitäten, um die Funktionalität einer Produktionsanlage an die Bedürfnisse zukünftiger Wertschöpfungsnetzwerke anzupassen (Reiff-Stephan et al. 2015). Im Folgenden sollen verschiedene Lösungen zur Implementierung von industriellen Systemen für die maschinennahe Erfassung energetischer Daten aufgezeigt, verglichen und bewertet werden.

## 2. Implementierungskonzepte

### 2.1 Anwendungshintergrund

Der Bedarf an industriellen Energiemonitoringsystemen soll im Folgenden durch einige Beispiele verdeutlicht werden. Prozessabläufe in den Unternehmen müssen unter betriebswirtschaftlichen Anforderungen in einem zunehmend hohen Maße material- und energieeffizient ausgeführt werden. So kann beispielsweise das energetische Profil eines Prozessschrittes als Entscheidungsfaktor in Produktionsplanungsvorgängen einfließen, wodurch Lastspitzen im fabrikinternen Energienetz vermieden werden (Weinert 2010). Lastspitzen sind hierbei mitunter auf Einschaltprozesse von Maschinen und Anlagen zurückzuführen. Oftmals wird das durch-

\* korrespondierender Autor

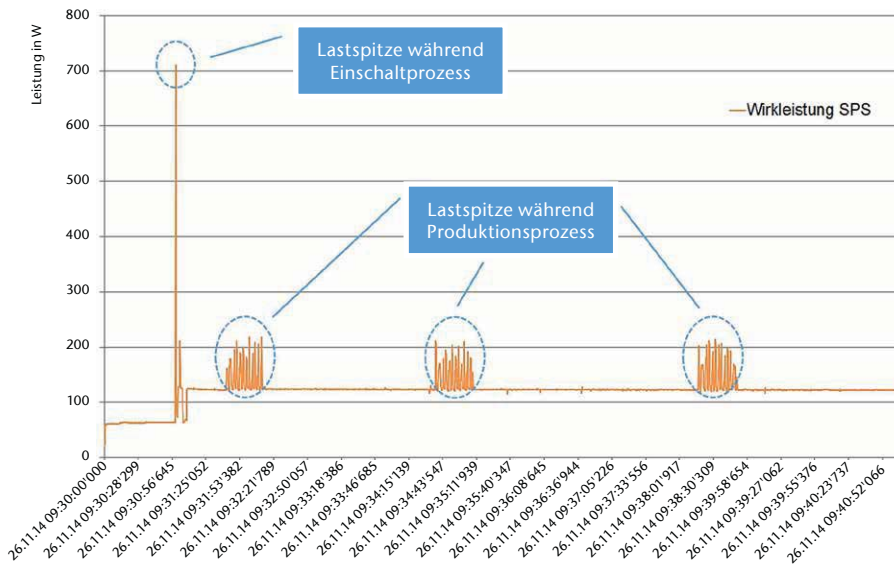


Abb. 1) Lastspitzen während des Einschaltvorgangs einer Werkzeugmaschine

schnittliche Lastprofil des eigentlichen Produktionsprozesses um ein Vielfaches überschritten (Abb. 1). Da die Maximalwerte im Lastprofil die energetischen Bereitstellungskosten direkt beeinflussen, bietet ein intelligentes Lastmanagement hohes Potenzial zur Kostenreduktion (Tönsing 1996).

Des Weiteren kann die genaue Kenntnis über den aktuellen Energiebedarf von Produktionsanlagen, Maschinen und einzelnen Baugruppen Wartungs- und Instandhaltungsprozesse unterstützen (Niggemann et al. 2014). So ist zum Beispiel der erhöhte Energiebedarf einer Maschine mitunter ein Indiz für den fortgeschrittenen Verschleiß eines Lagers oder eines Führungselementes. Um diesen Mehrbedarf an Energie zu detektieren, sind jedoch die entsprechenden technischen Entitäten innerhalb der betrieblichen Infrastruktur unabdingbar. In Abb. 2 ist die praktische Anwendung eines derartigen Aufbaus dargestellt.

Ein weiterer Aspekt für den vermehrten Bedarf an technologischen Lösungen für die Erfassung und Verwaltung energetischer Daten ist die zunehmende Nachfrage nach einer Zertifizierung gemäß DIN EN ISO 50001 bzw. DIN EN 16247-1, um beispielsweise an steuerlichen Entlastungen zu partizipieren (Kahlenborn et al. 2012).

## 2.2 Anforderungen

Unter den aufgezeigten Gesichtspunkten besteht ein wesentliches Ziel des Forschungsprojektes MetamoFAB in

der Identifizierung von Anforderungen für eine erfolgreiche Implementierung neuer Industrie-4.0-Technologien in den Produktionsprozess (BMBF 2015, Weinert 2015). Ein wesentliches Teilsystem, insbesondere unter dem Blickwinkel der hier diskutierten Anwendung, stellt das Sensor- wie auch das übergeordnete Monitoringsystem dar. Primär ist es erforderlich, dass das betrachtete Teilsystem die spezifischen technischen Anforderungen der Messaufgabe erfüllt. Anhand der Messaufgabe werden weiterhin der Messumfang sowie die Mindestanforderungen für Messbereich, Messgenauigkeit, Abtastrate sowie Datenspeicherrate definiert (Müller et al. 2009).

Eine wesentliche Herausforderung bei der Implementierung ist die Integration innerhalb bestehender Automatisierungsstrukturen. Entsprechend muss die Kompatibilität zur informationstechnischen Infrastruktur des Unternehmens zum Beispiel durch passende Schnittstellen gewährleistet sein. Des Weiteren ist es erforderlich, dass das System den Anforderungen zukünftiger, durch Industrie 4.0 geprägter, horizontaler wie auch vertikaler Wertschöpfungsnetzwerke gerecht wird (Lipinski et al. 2014). Dies erfordert unter anderem die Unterstützung entsprechender Kommunikationsstandards wie etwa OPC UA oder auch die Sicherstellung der Beherrschbarkeit komplexer Systeme (Niggemann et al. 2014). Neben den geschilderten Anforderungen ist es unabdingbar, dass das technische System den wirtschaftlichen Spezifikationen der geplanten Implementierungsmaßnahmen entspricht. Somit können die Hauptanforderungen an ein Energiemonitoringsystem folgendermaßen klassifiziert werden:

- Sicherstellung der Beherrschbarkeit komplexer Systeme,
- Gewährleistung der Veränderbarkeit,
- Berücksichtigung der Industrie 4.0-Architekturmerkmale,
- Wirtschaftlichkeit sowie
- Erfüllung spezifisch messtechnischer Kriterien.



Abb. 2) Erfassung energetischer Daten zur Unterstützung der Wartung einer Werkzeugmaschine

Tab. 1: Übersicht der untersuchten Implementierungsvarianten

Benennung	Beschreibung	Abbildung
<b>Variante 1</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erweiterung einer B&amp;R SPS (X20) durch X20 AP 3131 Energiemessmodul</li> <li>Datenverwaltung und Visualisierung über B&amp;R Automation Studio</li> <li>Visualisierung der Daten über portables Endgerät</li> </ul>	
<b>Variante 2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Energiemessgerät Siemens SENTRON PAC 3200 für Schalttafeleinbau</li> <li>Kommunikation über Modbus/TCP oder Ethernet</li> <li>Datenauswertung mittels Siemens Powermanager</li> </ul>	
<b>Variante 3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Portabler Messaufbau unter Verwendung eines Janitza UMG 604 Moduls</li> <li>Kommunikation über Modbus TCP oder Ethernet</li> <li>Datenauswertung mittels GridVis-5.0.4</li> </ul>	
<b>Variante 4</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Messkoffer mit Embedded PC Beckhoff CX5020-1120 und Messkarte-Beckhoff KL3403</li> <li>Visualisierung der Daten über portable oder integrierte Endgeräte</li> </ul>	

Die daraus abgeleiteten Kriterien (wie beispielsweise Erweiterbarkeit, Interoperabilität oder auch Echtzeitfähigkeit) dienen als Bewertungsmaßstab und werden im Folgenden noch näher erörtert.

### 2.3 Lösungsoptionen

Je nach Ausgangssituation eines Unternehmens kann die bestehende technologische Infrastruktur auf verschiedene Weise zum Energiemonitoringsystem erweitert werden. Marktüblich sind integrative Bestandteile für speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) und Industrierechner (IPC) wie auch Standalone-Lösungen und Mischformen.

Eine kostengünstige Implementierungsvariante ist die Ergänzung einer vorhandenen SPS oder eines IPC um eine separate Energiemesskarte(-modul). Das Abrufen der energetischen Daten kann dann beispielsweise über die Entwicklungsumgebung für SPS-Programme des Steuerungsanbieters

realisiert werden und mittels geeigneter Schnittstellen (wie beispielsweise MODBUS/TCP) übergeordneten Steuerungen oder SCADA-Systemen zur Verfügung gestellt werden (Maier et al. 2012).

Des Weiteren besteht aber auch die Option zur Nutzung eigenständiger Energiemessgeräte als Standalone-Lösung. Für die Erstellung von Messprojekten werden dann vom Messgerätehersteller mitunter spezifische Anwenderprogramme zur Verwaltung energetischer Daten angeboten. Als Beispiele seien hier Gridvis (Janitza electronics GmbH), Powermanager (Siemens AG) oder EMWISE (PHOENIX CONTACT GmbH & Co. KG) erwähnt. Ebenso kann die Datenverwaltung über grafische Programmiersysteme wie LabVIEW (National Instruments Corporation) umgesetzt werden.

Je nach Komplexität der Messaufgabe und Vernetzungsstruktur kann für die Erfassung energetischer Daten auch auf eine Mischform der zuvor genannten Optionen zurückgegriffen werden.

### 3. Exemplarischer Vergleich anhand marktverfügbarer Komponenten

In Tab. 1 sind vier Implementierungsvarianten aufgeführt, die an der Technischen Hochschule Wildau als Versuchsaufbauten realisiert wurden und einen Auszug der am Markt verfügbaren Lösungen aufzeigen.

Für einen Vergleich der verschiedenen Implementierungsvarianten kommen, abgeleitet aus den zuvor genannten Anforderungen an Energiemonitoringsysteme (siehe 2.2), die in Tab. 2 aufgeführten Bewertungskriterien zur Anwendung. Die für die Versuchsaufbauten verwendeten Systeme wurden auf den Erfüllungsgrad der Bewertungskriterien hin untersucht und nutzwertanalytisch gegenübergestellt. Aufgrund der hohen Anzahl an Bewertungskriterien erfolgt die Gewichtung mit Hilfe von Kriteriengruppen (Kühnapfel 2014). Hierbei werden zunächst die Hauptanforderungsgruppen untereinander gewichtet. Anschließend erfolgt die Gewichtung



Tab. 2: Übersicht der Bewertungskriterien

Hauptanforderungsgruppe		Bewertungskriterium	
1	Sicherstellung der Beherrschbarkeit komplexer Systeme	1.1	Supportfaktor
		1.2	Kompetenzfaktor
2	Veränderungsfähigkeit	2.1	Abwärtskompatibilität
		2.2	Erweiterbarkeit
		2.3	Adapterorientierte Funktionalität
3	Architekturmerkmale Industrie 4.0	3.1	Durchgängigkeit der Daten entlang der Prozesskette
		3.2	Einsatz von Standards in der Kommunikation
		3.3	Gleichzeitige Unterstützung von zentraler und dezentraler Intelligenz
		3.4	Interoperabilität
4	Wirtschaftliche Bewertungskriterien	4.1	Anschaffungskosten Gesamtsystem
		4.2	Anschaffungskosten Ergänzungssystem
		4.3	Zeitaufwand für Implementierung
5	Technische Kriterien (ohne direkte Industrie-4.0-Relevanz)	5.1	Messgenauigkeit
		5.2	Mean Time Between Failures (MTBF)
		5.3	Benötigter Bauraum
		5.4	Updatezeit (Messwert)
		5.5	Auflösung
			Energieeffizienz (Scheinleistungsaufnahme)

der Kriterien innerhalb der einzelnen Hauptanforderungsgruppen. Auf die Bewertungskriterien der Hauptanforderungsgruppe 1 soll im Folgenden exemplarisch noch näher eingegangen werden. Für die Bewer-

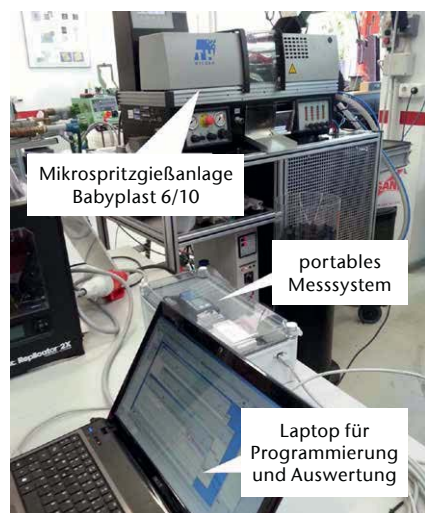


Abb. 3) Versuchsaufbau zur Erfassung energetischer Daten eines Spritzgussprozesses

tung der Beherrschbarkeit komplexer Systeme sind insbesondere Nutzungsfaktoren von ausschlaggebender Bedeutung.

So dient etwa der „Supportfaktor“ (1.1) als Bewertungsgröße für die Beurteilung, inwieweit der Anwender durch den Hersteller bei Implementierung und Betrieb des Systems Unterstützung erfährt. In die Bewertung fließen hierbei die Qualität sowie die Verfügbarkeit von Dokumenten wie Bedienungsanleitungen oder Hilfedateien ein. Des Weiteren wird die Kundenbetreuung bewertet.

Hingegen dient der „Kompetenzfaktor“ (1.2) zur Beurteilung, ob vom Anwender/Bediener spezielle Fähigkeiten bzw. Kompetenzen zur Benutzung des Systems verlangt werden. Dies wurde durch die Erstellung eines Referenzprojekts zur Messung mehrerer definierter energetischer Daten am Beispiel eines Spritzgussprozesses untersucht.

Neben den zuvor erwähnten Nutzungsfaktoren ist die eigentliche Funk-

tionserfüllung, also die Aufnahme der Energie- und Verbrauchsdaten, ein wesentlicher Aspekt bei der Bewertung der Energiemonitoringsysteme. Diese wurde durch die praktischen Versuche geprüft. In Abb. 3 ist einer der exemplarischen Versuchsaufbauten an einer Mikrospritzgießanlage Babyplast 6/10 dargestellt.

In Abb. 4 ist das aufgenommene Lastprofil der Wirkleistung für einen Spritzgussprozess von hundert Zyklen ersichtlich. Hierbei handelt es sich um eine mit der Reportfunktion von Janitza GridVis erstellte Grafik. Die Zeit für das Einspritzen des Kunststoffes beträgt während des Versuchs eine Sekunde je Schuss. Pro Schuss erfolgt die Fertigung von zwei Einzelstücken. Über den Versuchszeitraum wurde die Kühlzeit von 15 Sekunden über 7,5 Sekunden bis auf 3,5 Sekunden schrittweise reduziert. Anhand der Grafik ist ersichtlich, dass es über den gesamten Aufzeichnungszeitraum aufgrund der gesteuerten Prozessführung zu deutlichen

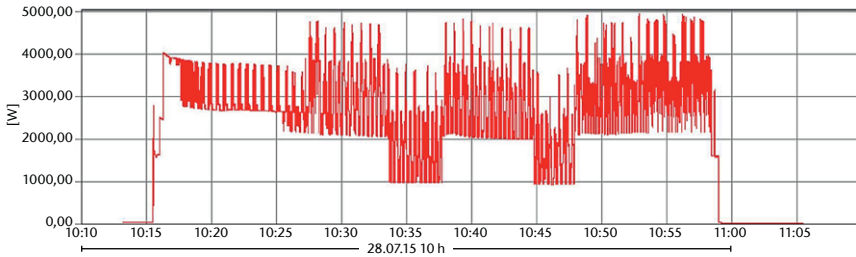


Abb. 4) Wirkleistungsprofil der Leiter L1 bis L3 für einen Spritzgussprozess als Auszug eines Janitza GridVis Reports. Untersucht wurden in der Aufschaltung der Anlage die drei Stromleiter der Spritzgießanlage. Diese dienen jeweils der separaten Energieversorgung der Hauptaggregate Heizung (L1), Hydraulik (L2) und Kühlung (L3). Durch Betrachtung der leitungsbezogenen Effektivstromkurven (Abb. 5) kann den jeweiligen Aggregaten der entsprechende Anteil am Lastprofil zugeordnet werden.

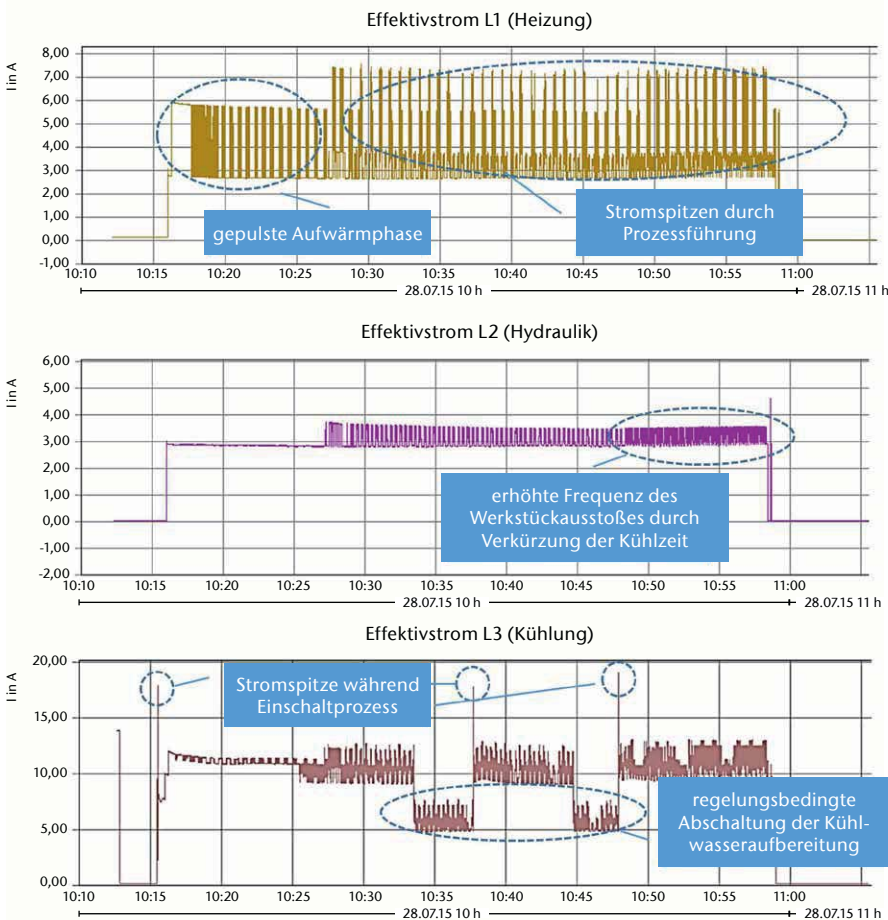


Abb. 5) Effektivströme der Leiter L1 bis L3 für einen Spritzgussprozess als Auszug eines Janitza GridVis Reports

Schwankungen im Lastprofil kommt. Es ist zu erkennen, dass für die Abführung der Prozesswärme ein Großteil elektrische Energie zur Verfügung zu stellen ist. Die Stromspitzen im Leiter L3 erreichen in den verschiedenen Einschaltphasen einen Wert von bis zu 19 A. Ebenso liegt das Stromgrundniveau mit 11 A deutlich oberhalb dessen der anderen Stromleitungen. Ebenfalls ist das Absinken der Grundlast durch die regelungsbedingte zeitweilige Abschaltung der

Kühlwasseraufbereitung eindeutig identifizierbar. Im Vergleich dazu liegt das Stromgrundniveau für die energetische Versorgung der hydraulischen Aktuatoren bei nur etwa 3 A und wird durch die Prozessführung nur um etwa 20 % erhöht.

#### 4. Auswertung

Es kann festgestellt werden, dass alle vorgestellten Varianten die Messgenauigkeiten zur Erfassung der Ener-

giedaten bereitstellen. Die Leistungsprofile können entsprechend exakt aufgenommen und die Daten in die Datenerfassungssysteme überführt werden. Der dafür erforderliche Aufwand findet Berücksichtigung in der gesamtheitlichen, nutzwertanalytischen Bewertung. Je nach Anforderungsprofil des Unternehmens variiert die Relevanz der hinzugezogenen Kriterien und es bedarf einer Gewichtung. Für die Untersuchung im Rahmen der Studie erfolgte die Gewichtung der Kriterien für ein Unternehmen mit KMU-Struktur. Es wurde hierzu insbesondere ein hoher Stellenwert auf den Support- und Kompetenzfaktor gelegt. Dies ist damit zu begründen, dass KMUs oft sehr spezifisch geschulte Experten in ihren Reihen aufweisen und nicht im gleichen Maße auf ein so breit gefächertes Portfolio an Kompetenzträgern zurückgreifen können wie Großunternehmen.

Die Ergebnisse der nutzwertanalytischen Gegenüberstellung der verschiedenen Implementierungsvarianten sind in Abb. 6 dargestellt. Es ist festzustellen, dass die Implementierungsvariante 2 mit einem Nutzwert von 78 % die größte Übereinstimmung mit dem Anforderungsprofil des exemplarischen Nutzers aufweist. Auf einzelne Ergebnisse der Untersuchung soll im Folgenden näher eingegangen werden.

Innerhalb der Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Erstellung des Referenzprojekts und die anschließenden Messungen mit allen Systemen mit hinreichender Genauigkeit durchführbar waren. Es ist jedoch festzustellen, dass gerade für die integrativen Lösungen für SPS und IPCs ein Grundmaß an Praxiserfahrung im Umgang mit der jeweiligen Programmierumgebung den Zeitaufwand für die Programmerstellung deutlich verringert. Es ist davon auszugehen, dass Unternehmen mit entsprechenden technischen Entitäten und Erfahrungsträgern derartige Lösungen schnell implementieren können. Im Vergleich hierzu hat sich gezeigt, dass Standalone-Lösungen in Kombination mit den spezifischen Anwenderprogrammen geringere Anforderungen an das Kompetenzprofil des Anwenders stellen. Die Programmierung bzw. die Konfiguration war hier auch bei wenig Pra-

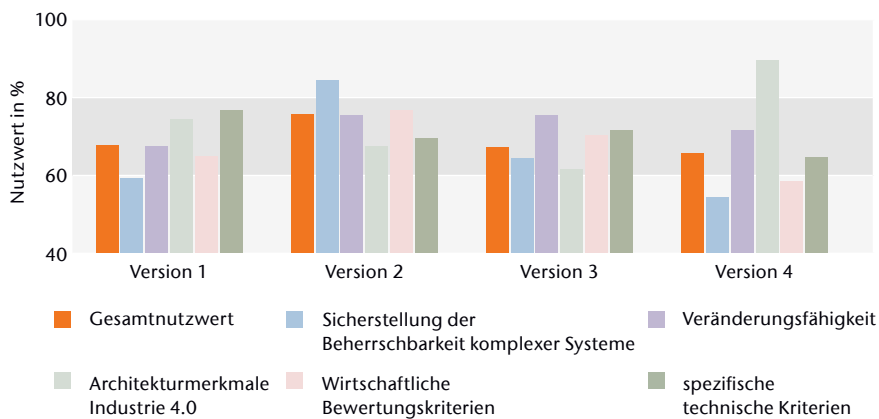


Abb. 6) Gegenüberstellung der Nutzwerte

xisierung mit einem vertretbaren Zeitaufwand zu realisieren. Bei einer Entscheidung für eine bestimmte Implementierungsvariante müssen demnach, je nach Ausgangssituation, die spezifischen Fähigkeiten der menschlichen Entitäten eines Unternehmens beachtet werden, um die Beherrschbarkeit komplexer Systeme positiv zu beeinflussen.

Ein weiterer Aspekt der aus der Untersuchung der verschiedenen Varianten hervorgeht, ist die differenzierte Betrachtungsweise der Implementierungskosten. Ohne vorhergehende Analyse der bestehenden Infrastruktur und genaue Definition der technischen Anforderungen können die Kosten für ein Energiemonitoringsystem unverhältnismäßig hoch ausfallen. Sind zum Beispiel die technischen Spezifikationen einer integrativen Lösung für eine bestimmte Messaufgabe ausreichend, belaufen sich die Implementierungskosten im Wesentlichen auf die Anschaffungskosten der Messkarte. Dies setzt natürlich voraus, dass die technische Infrastruktur des Unternehmens über entsprechende IPCs bzw. SPS und die passende Softwareumgebung verfügt. In diesem Fall ist mit den im Test untersuchten Messkarten ein Energiemonitoringsystem mit Hardwareinvestitionskosten von 200 € bis 300 € zu realisieren. Kann hingegen nicht auf integrative Lösungen angeknüpft werden, verschiebt sich der Kostenvorteil in Richtung der Standalone-Systeme. Es ist festzustellen, dass die Auswahl einer geeigneten Implementierungsvariante für ein Energiemonitoringsystem stark von den Ausgangsbedingungen des jeweiligen Unternehmens

abhängig ist. Somit kann keine allgemeingültige Aussage über den Grad der Eignung einer Variante für einen breiten Kreis von Unternehmen getroffen werden. Hieraus leitet sich der Bedarf nach Modellen zur individuellen Bewertung und Auswahl von Implementierungsstrategien ab. Im Rahmen des Forschungsprojektes MetamoFAB (BMBF 2015) erarbeitet die iMEP-Forschungsgruppe „Automatisierungstechnik“ der Technischen Hochschule Wildau als assoziierter Partner ein derartiges Modell. Diese soll den Unternehmen dabei helfen, Zielgrößen für technische Entitäten zu definieren und über Analyse- und Bewertungsprozesse eine geeignete Implementierungsstrategie abzuleiten.

## 5. Fazit

Bezogen auf die untersuchten Systemvarianten kann aufgrund der Vielfalt der Lösungsansätze keine abschließende Aussage getroffen werden, ob beispielsweise System A gegenüber System B zu bevorzugen ist. Vielmehr zeigt der Vergleich auf, dass für den jeweiligen Anwendungsfall das geeignetste System zu identifizieren ist. Mit den gefundenen Lösungen wird es möglich, Managementsysteme zu entwickeln und zu betreiben, um den Energiebedarf von Anlagen und Maschinen entsprechend der Lastbereitstellung effizient zu nutzen. Es müssen hierfür jedoch kundenindividuelle Lösungen gefunden werden, da eine Standardisierung in Produkten und Dienstleistung noch nicht allgemein bereitgestellt wird. Im Rahmen der Forschungsarbeiten an der Hochschule wird an einem Implementierungs-

modell zum Einsatz informationstechnischer Unterstützungswerkzeuge für schnelle Produktionsprozesse gearbeitet. Die hier vorgestellten Ansätze gehen als Lösungsmöglichkeiten in die ganzheitliche Betrachtung mit ein.

## Förderhinweis

Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt „Metamorphose zur intelligenten und vernetzten Fabrik“ (MetamoFAB) wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ (Förderkennzeichen 02PJ4040 ff) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



## LITERATUR

- Bauer K, Diegner B, Diemer J, Dorst W, Ferber S, Glatz R, Hellinger A, Herfs W, Horstmann M, Kaufmann T, Kurz C, Löwen U, Stumpf V (2013) Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern. Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0: Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Frankfurt/Main
- BMBF (2015) Industrie 4.0. Innovation für die Produktion von morgen. [https://www.bmbf.de/pub/Industrie\\_4.0.pdf](https://www.bmbf.de/pub/Industrie_4.0.pdf). Accessed 14 Sep 2015
- Dorst W, Glohr C, Hahn T, Knafl F, Loewen U, Rosen R, Schiemann T, Vollmar F, Winterhalter C (2015) Umsetzungsstrategie Industrie 4.0: Ergebnisbericht der Plattform Industrie 4.0. BITKOM e. V., VDMA e. V., ZWEI e. V., Frankfurt/Main
- Kahlenborn W, Kabisch S, Klein J, Richter I, Schürman S (2012) Energiemanagementsysteme in der Praxis. ISO 50001: Leitfaden für Unternehmen und Organisationen. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Umweltbundesamt, Berlin/Dessau
- Krüger J, Parthey H, Wink R (eds) (2015) Wissenschaft und Innovation. Wissenschaftsforschung Jahrbuch 2014. Wissenschaftlicher Verlag Berlin WVB, Berlin. ISBN: 978-3-86573-841-7
- Kühnapfel JB (2014) Nutzwertanalysen in Marketing und Vertrieb. Springer Gabler, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-05508-0. doi: 10.1007/978-3-658-05509-7
- Lipinski R von, Richter M, Reiff-Stephan J (2014) Intelligent sensor systems for self-optimizing production chains. In: Proc 1st Int Conf Exhib Future RFID Technol (FutureRFID 2014), 6–7 Nov 2014, Eger. Eszterházy Károly University of Applied Sciences, ISBN: 978-615-5509-23-0, pp 115–125. doi: 10.17048/FutureRFID.1.2014.115

Maier A, Pethig F, Vodencarevic A, Schetinin N, Niggemann O, Kleine Büning H (2012) Analyse und Visualisierung des Energieverbrauchs in Produktionsanlagen. In: Adolphs P (ed) Automation 2012. VDI-Verlag, Düsseldorf, ISBN: 978-3-18-092171-6

Müller E, Engelmann J, Löffler T, Strauch J (2009) Energieeffiziente Fabriken planen und betreiben. Springer, Berlin/Heidelberg. ISBN: 978-3-642-31945-7. doi: 10.1007/978-3-540-89644-9

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

Reiff-Stephan J, Richter M, Lipinski R von (2015) Intelligente Sensorsysteme für selbstoptimierende Produktionsketten. In: Tagungsband zur 12. AALE-Fachkonferenz. Deutscher Industrieverlag, München, ISBN: 978-3-8356-7270-3, pp 245–354

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

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

Weinert N (2015) Verbundprojekt MetamoFAB – Metamorphose zur intelligenten und vernetzten Fabrik. 3. Klausurtagung Automatisierungstechnik: Automatisierte Produktionsprozesse der Zukunft, Technische Hochschule Wildau, 23 Apr 2015. [http://www.th-wildau.de/fileadmin/dokumente/studiengaenge/automatisierungstechnik/dokumente/04\\_2015-04-23\\_Weinert\\_MetamoFAB\\_Gesamt%C3%BCberblick\\_-\\_final.pdf](http://www.th-wildau.de/fileadmin/dokumente/studiengaenge/automatisierungstechnik/dokumente/04_2015-04-23_Weinert_MetamoFAB_Gesamt%C3%BCberblick_-_final.pdf). Accessed 27 Oct 2015

## AUTOREN

**René von Lipinski, M. Eng.**  
**Prof. Dr.-Ing. Jörg Reiff-Stephan**  
Technische Hochschule Wildau  
Institut für Entwicklung, Material und Produktion (iMEP)  
Forschungsgruppe: Automatisierungstechnik

**Dipl.-Ing. Dirk Buße**  
Geschäftsführer Budatec GmbH, Berlin

E-Mail für Korrespondenz:  
[rene.von\\_lipinski@th-wildau.de](mailto:rene.von_lipinski@th-wildau.de)



# Optimierung von Epoxidharzsystemen für PE-Rohrinnenbeschichtungen als Sauerstoffsperrschicht

Eckhart Kornejew, Harald Goering, Michael Herzog\*

## Zusammenfassung

Gegenwärtig haben bei Fußbodenheizungen Kunststoffrohre aus Polyethylen (PE) oder Polypropylen (PP) Stahl- und Kupferrohre fast vollständig ersetzt. Trotz der überragenden Gebrauchseigenschaften dieser Kunststoffrohre stellen die relativ hohe Sauerstoffpermeabilität und die geringere Langzeitstabilität ein Problem dar. Sauerstoff reagiert mit den Metallwerkstoffen in den Systemkomponenten, was zu einer beschleunigten Korrosion führt, und schädigt das PE durch eine Radikal-initiierte autokatalytische Kettenreaktion. Diese Reaktion führt zu einer Versprödung des PE bis hin zur Rissbildung. Dadurch wird die Sauerstoffpermeabilität des PE zusätzlich drastisch erhöht. Das kann eine nachträglich eingebrachte Sauerstoffbarrierschicht auf Epoxidharzbasis unterbinden. Mit Hilfe der Differential Scanning Calorimetry (DSC) werden Untersuchungen zur Struktur-Eigenschaftskorrelation durchgeführt, um das Eigenschaftsprofil des Epoxidharzes zu optimieren. Variiert werden das Harz-Härter-Verhältnis, die Zusammensetzung des Harz- und Härter-Systems, einschließlich eines reaktiven Verdünners, sowie der eingesetzte Katalysator. Als Charakteristika werden die Glasübergangstemperatur  $T_g$  des härtenden Systems und die bei der Härtung auftretende Reaktionsenthalpie  $\Delta H$  diskutiert.

## Abstract

Presently, metal tubes in underfloor heating systems are nearly completely substituted by plastic tubes made of polyethylene (PE) or polypropylene (PP). In spite of the extraordinary properties of these plastic tubes in use, issues that remain are the relatively high oxygen permeability and the lower longtime durability compared to metal tubes. Oxygen tends to react with the metal components of the systems leading to an accelerated corrosion. The PE is affected by a radically initiated auto-catalytic chain reaction. This leads to an embrittlement of the PE, and finally to the formation of micro-cracks and visual cracks. Thus, the oxygen permeability is additionally increased by a high rate. This mechanism may be prevented through an oxygen barrier layer applied into running systems. Investigations by differential scanning calorimetry (DSC) were performed aiming at the elucidation of structure property relationships to optimize the application properties of the epoxy resins used in barrier layer production. Here, variations were made in the equivalent ratio of resin and hardener, the composition of the resin hardener system including a reactive diluent and a catalyst. Characteristic parameters, such as the glass transition temperature of the curing system and the reaction enthalpy liberated during the curing process, are discussed.

## 1. Einführung

Für Fußbodenheizungen werden seit den 60er Jahren Rohre aus Polyethylen (PE) eingesetzt. Inzwischen haben in diesem Bereich Kunststoffrohre fast vollständig Stahlrohre und auch Kupferrohre ersetzt. PE nimmt dabei wegen seines besonderen Eigenschaftsspektrums einen herausragenden Platz ein. Rohre aus diesem Material sind vergleichsweise sehr leicht und lassen eine vorteilhafte Rohrverbindung durch Schweißen und mit Hilfe von Steckmuffen oder Klemmfittings zu. Die Nachteile einer geringeren Tempe-

raturbeständigkeit und Steifigkeit von PE gegenüber Metallen fallen beim Einsatz in Fußbodenheizungen kaum ins Gewicht.

Probleme bei der Anwendung von PE als Rohrmaterial für Fußbodenheizungen stellen dagegen die relativ hohe Sauerstoffpermeabilität und das „langsame Risswachstum“ (Langer et al. 2012) dar. Obwohl die Permeabilität für Gase im Allgemeinen gegenüber anderen Kunststoffen bei PE relativ gering ist, kann Sauerstoff PE recht gut durchdringen und so in den Heizwasserkreislauf gelangen. Das wiederum kann zu Korrosionsschäden an den Metallbau-

teilen der Heizungsanlage führen sowie die Rohre selbst schädigen. Neben der gezielten Herstellung von speziellen (wegen der enorm gewachsenen Möglichkeiten durch die rasante Katalyse-Entwicklung) oder vernetzten PE-Typen können in der letzten Zeit Lackierungen, Schutzfolien oder Sperrschichten sauerstoffdichte Rohre nach DIN 4726 gewährleisten. Allerdings stellen sämtliche Verbindungselemente für die einzelnen Anlagenkomponenten und insbesondere das Ausgleichsgefäß Schwachstellen für eine Gaspermeation dar. Fußbodenheizungen gelten dabei als besonders gasdurchlässige Anla-

\* korrespondierender Autor

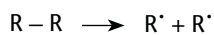
gen, auch bei Berücksichtigung der die PE-Rohrschlinge umhüllenden Estrich-Schicht (Sittiho 2011). Das hauptsächliche Problem sind die Korrosion und Korrosionsprodukte durch Reaktion des Sauerstoffs mit den Eisenwerkstoffen in den Systemkomponenten. Weiterführende Literatur hat Sittiho (2011) zusammengestellt.

Der im System enthaltene und von außen eindringende Sauerstoff hat aber auch schädigenden Einfluss auf die PE-Rohrwandungen. Sauerstoff bildet im PE Sauerstoffradikale, die zur Reaktion mit den Methyl- bzw. Methylengruppen führen und dabei Sauerstoffverbindungen bilden, z. B. Aldehyd-, Carboxyl-, Keto- oder Hydroxylgruppen. Durch die Bildung dieser Gruppen wird die Fähigkeit des so geschädigten PE zur Aufnahme und zur Permeation von Sauerstoff wesentlich erhöht. Diese chemischen Reaktionen wirken sich wiederum dramatisch auf die physikalische Struktur und damit auf die mechanischen Eigenschaften aus.

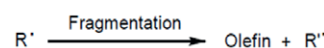
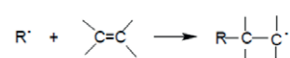
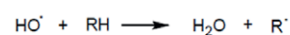
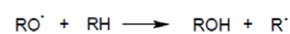
## 2. Chemie der Alterung von PE

Der thermo-oxidative Abbau von PE ist eine Radikal-initiierte autokatalytische Kettenreaktion (Gugumus 1996a, 1996b, 1996c). Diese Reaktion ist zwar zu Beginn vergleichsweise langsam, beschleunigt sich jedoch mit zunehmender Konzentration der entstehenden Hydroperoxide. Die Reaktion verläuft in drei Schritten: Ketteninitiierung, Kettenfortschritt und Kettenabbruch (Kriston 2010):

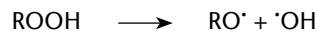
### Ketteninitiierung:



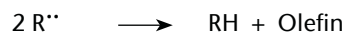
### Kettenfortschritt:



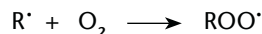
### Kettenverzweigung:



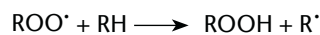
### Kettenabbruch:



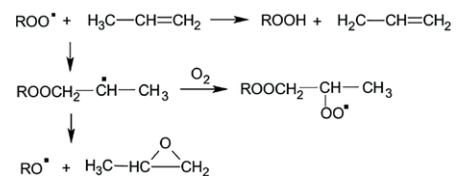
Das primäre Alkylradikal  $R^{\cdot}$  kann durch Radikalinitiatoren (aus der Herstellung des PE), durch Katalysatorreste, durch Wärme, mechanische Kräfte (Scherung), Verunreinigungen, energiereiche Strahlung oder Additive gebildet werden. Die Alkylradikale reagieren mit molekularem Sauerstoff praktisch ohne Aktivierungsenergie und bilden Peroxyradikale:



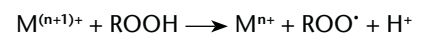
Die Peroxyradikale bilden ihrerseits Hydroperoxide durch Abspaltung eines Wasserstoffatoms von der Polymerkette, wodurch eine C-H-Bindung gespalten werden muss:



Diese Reaktion ist der geschwindigkeitsbestimmende Schritt bei der thermisch-oxidativen Alterung der Polyolefine (Autoxidation), da diese Reaktion Aktivierungsenergie erfordert. Die Peroxyradikale können die Polyolefine weiter oxidieren, wobei dann Carbonsäuregruppen, Carbonsäureester oder Epoxide entstehen.



Die Geschwindigkeit der Kettenspaltung steigt mit der Temperatur. Weitere Reaktionen werden durch Metallionen initiiert bzw. katalysiert:



Die Oxy- und Hydroxylradikale, die bei der Zersetzung der Hydroperoxide gebildet werden, sind wesentlich reaktiver als die Peroxyradikale und führen zu einer Verzweigung der Kettenreaktion, d. h. zu einer automatischen Beschleunigung der Reaktion und damit des Abbauprozesses. Die  $\beta$ -Spaltung der Oxy-Makroradikale führt zu Carbonylgruppen und weiteren freien Radikalen.

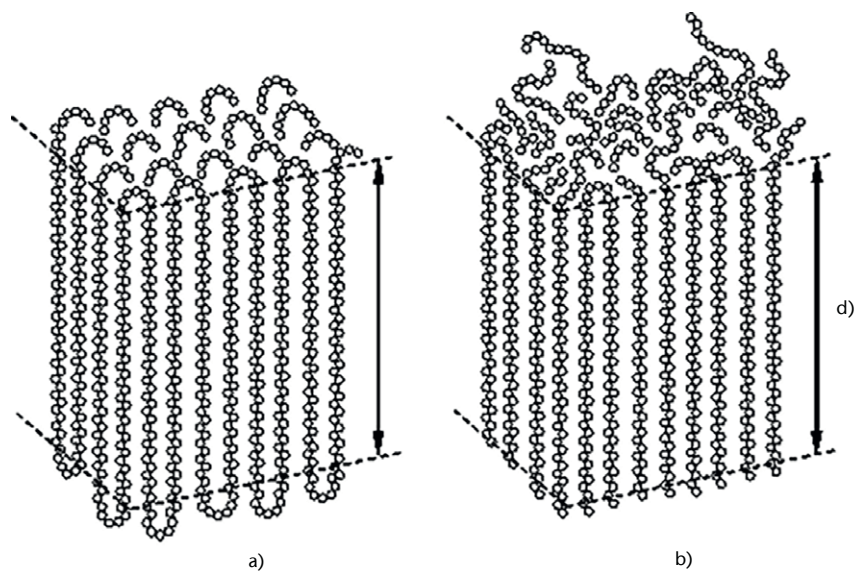


Abb. 1) a) Gefaltete Anordnung der Ketten mit benachbartem Wiedereintritt. b) Lockere Schleifen und lose Kettenenden. (d – Lamellendicke).

Zur Verhinderung oder zur Reduzierung der Alterungsprozesse werden den Polyolefinen Alterungsschutzmittel (auch Stabilisatoren oder Korrosionsschutzmittel) zugesetzt. Bei diesen handelt es sich um chemische Verbindungen, die in der Lage sind, freie Radikale oder instabile Zwischenprodukte „einzufangen“ und sie in stabile Produkte umzuwandeln, siehe Literaturangaben bei Kriston (2010). Das Abfangen der primären Makroradikale würde die Autoxidation unterbinden. Da die Reaktionsgeschwindigkeit des molekularen Sauerstoffs sehr hoch ist, kann die Radikalbildung nur sehr schwer unterbunden werden. Es gibt jedoch einige Verbindungen, die die Radikalbildung zumindest für eine gewisse Zeit wirksam verhindern, indem sie stabile Verbindungen bilden. Zu diesen geeigneten Verbindungen zählen insbesondere phenolische Antioxidantien, d. h. Phenole mit Substituenten in der 2,4,6-Position, wobei die Substituenten in der Regel verzweigte Alkylgruppen sind, z. B. tert-Butyl- oder Isopropylgruppen. Weitere Gruppen sind sterisch gehinderte aromatische Amine, sterisch gehinderte sekundäre Amine oder phosphororganische Verbindungen, in selteneren Fällen auch organische Schwefelverbindungen. Alle Stabilisatoren haben jedoch den Nachteil, dass sie aus dem PE an die Oberfläche migrieren und dann ausgewaschen werden können (Ojeda et al. 2011, Viebke & Gedde 1997).

### 3. Morphologie von PE

Neben dem molekularen Aufbau der Ketten hat die gegenseitige Anordnung der Ketten im Polymermaterial, d. h. die Morphologie, entscheidenden Einfluss auf das Verhalten des Polymers. Diese ist sowohl vom molekularen Aufbau der Makromoleküle als auch von deren Molmasse (Kettenlänge) abhängig. Bei den Faltkristallen treten neben der regulär gefalteten Anordnung mit benachbartem Wiedereintritt der Ketten auch lockere Schleifen mit statistischem Wiedereintritt der Ketten (Switchboard-Modell) und lose hervorstehende Kettenenden auf.

Für die Beschreibung der entstehenden Ordnungsstruktur werden in der

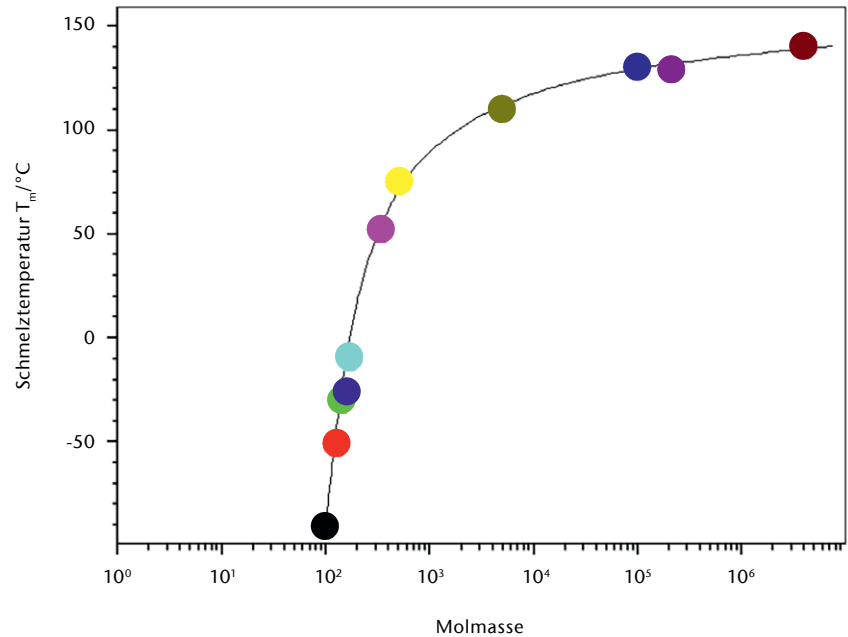


Abb. 2) Schmelztemperatur  $T_m$  in Abhängigkeit von der Molmasse.

Literatur verschiedene Modelle gemäß Abb. 1 diskutiert. Die Abb. 1a zeigt das Modell einer regulär gefalteten Anordnung mit benachbartem Wiedereintritt der Ketten (Bildung bevorzugt aus einer Lösung) und Abb. 1b das Switchboard-Modell mit statistischem Wiedereintritt der Ketten (bevorzugt aus der Schmelze gebildet). Diese spezielle morphologische Struktur bestimmt das jeweilige Eigenschaftsspektrum des PE, d. h. es gibt nicht das eine Eigenschaftsprofil für PE, sondern eine Vielfalt von Varianten.

Neben den Parametern des Herstellungsverfahrens, die sowohl die Verzweigungsstruktur als auch die Molmasse und ihre Verteilung festlegen, hat auch die thermische Geschichte des PE-Materials entscheidenden Einfluss auf die Morphologie und damit auf die Eigenschaften. Dabei spielt die Kettenlänge, d. h. die Molmasse des

PE, eine maßgebliche Rolle für die ausgebildete Morphologie. So korreliert die Schmelztemperatur  $T_m$  über die Lamellendicke der Faltkristalle mit der Molmasse, d. h., durch die Kettenspaltung beim thermo-oxidativen Abbau werden die Eigenschaften des PE maßgeblich verändert.

In Abb. 2 werden Beispiele von Literaturwerten für  $T_m$  in Abhängigkeit von der Molmasse (Kettenlänge bzw. Zahl der  $\text{CH}_2$ -Sequenzen einer Molekülkette) gezeigt (Franck & Biederbick 1990). Die gespaltenen und damit immer kürzer werdenden Ketten können sich besser umlagern und somit eine weitere Kristallisation des PE verursachen. Das bedeutet aber auch, dass mit kürzer werdenden Ketten die Kristallite kleiner werden (siehe  $T_m$ ).

Hauptsächlich findet die Kettenspaltung in den zwischenkristallinen Be-

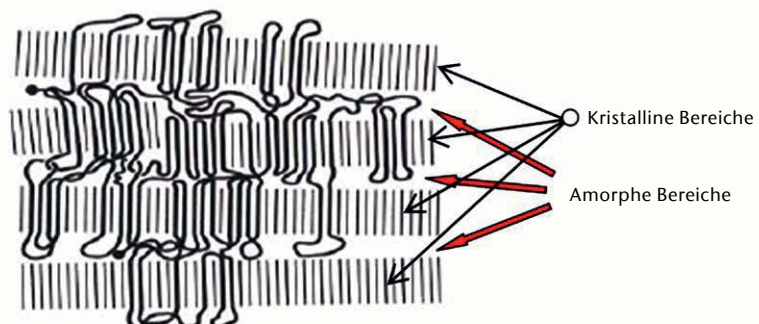


Abb. 3) Faltungsböcke mit durchlaufenden Ketten in den amorphen Zwischenschichten



reichen statt (wegen der größeren molekularen Beweglichkeit und der weniger kooperativen zwischenmolekularen Wechselwirkungen sowie der leicht „verspannten“ Valenzwinkel). Damit führt eine Kettenspaltung sowohl zu einer drastischen Verringerung der mechanischen Eigenschaften des PE als auch zur Veränderung von Transporteigenschaften, z. B. der Gaspermeabilität.

Das Strukturmodell des partiell kristallinen PE (Weltschew 2010) in Abb. 3 soll veranschaulichen, dass durch oxidative Kettenspaltung in den amorphen Bereichen der mechanische Zusammenhalt, der vor allem von durchlaufenden Ketten und Verschlaufungen gegeben wird, schnell verloren geht (begleitet von einer Nachkristallisation und damit einer Versprödung und schließlich Rissbildung).

Für Alterungsprozesse im PE spielen neben dem Vorhandensein von Sauerstoff auch Verbindungen eine wichtige Rolle, die im PE durch die Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse oder durch Wechselwirkung mit der Umgebung während des Gebrauchs eingebracht wurden. So wurde z. B. von Mitroka et al. (2013) der Einfluss von chloriertem Wasser auf das Langzeitverhalten von PE-Rohren untersucht.

#### 4. Problemstellung

Auch wenn in den letzten Jahren Rohrsysteme auf eine Lebensdauer von 50 a ausgelegt werden, diskutiert man gegenwärtig über eine angestrebte Lebensdauer von 100 a (Vogt et al. 2008). Eine kritische Einschätzung geben neben einer Fülle von Literaturhinweisen Whelton & Dietrich (2009). Die bisher vorgestellten Methoden der



Abb. 4) PE-Rohr nach 34 Jahren Gebrauch in einer Fußbodenheizung. (Durchmesser 17 mm, Wandstärke 2 mm)

Tab.1: Untersuchte Proben

Bezeichnung	Es	Et	DA <sub>1</sub> oder DA <sub>1+2</sub>	Index
DA <sub>1</sub> 100	100	0	DA <sub>1</sub> 100	100
DA <sub>1+2</sub> 100	100	0	DA <sub>1+2</sub> 100	100
DA <sub>1+2</sub> 85	100	0	DA <sub>1+2</sub> 85	85
DA <sub>1+2</sub> 85 70G	100	0	DA <sub>1+2</sub> 85	85
DA <sub>1+2</sub> 95	100	0	DA <sub>1+2</sub> 95	95
DA <sub>1+2</sub> 90	100	0	DA <sub>1+2</sub> 90	90
DA <sub>1+2</sub> 80	100	0	DA <sub>1+2</sub> 80	80
DA <sub>1</sub> 95	100	0	DA <sub>1</sub> 95	95
DA <sub>1</sub> 90	100	0	DA <sub>1</sub> 90	90
DA <sub>1</sub> 80	100	0	DA <sub>1</sub> 80	80
DA <sub>1</sub> 95	100	0	DA <sub>1</sub> 95	95
DA <sub>1</sub> 90-90/10	90	10	DA <sub>1</sub> 90-90/10	90
DA <sub>1</sub> 90-80/20	80	20	DA <sub>1</sub> 90-80/20	90
DA <sub>1</sub> 80-90/10	90	10	DA <sub>1</sub> 80-90/10	80
DA <sub>1</sub> 90-95/5	95	5	DA <sub>1</sub> 90-95/5	90
DA <sub>1</sub> 90+10	100	0	DA <sub>1</sub> 90+10	100
DA <sub>1</sub> 100/90-10	90	10	DA <sub>1</sub> 100/90-10	100

beschleunigten Bestimmung der Lebensdauer von PE in der industriellen Anwendung bedürfen weiterhin der kritischen Diskussion (Schröder et al. 2008, Robertson 2013).

Wie dramatisch die Schädigung eines PE-Rohres nach einem 34-jährigen Gebrauch in einer Fußbodenheizung sein kann, zeigt das Foto der Fa. TGA Rohrrinnensanierung AG, Fürth, in Abb. 4.

Auf dem Foto ist zu erkennen, dass neben dem Verlust der mechanischen Festigkeit auch solche Eigenschaften wie die Permeabilität für Sauerstoff sehr stark verändert werden. Das Rohr verliert seine Barriereigenschaften total, bis hin zur Wasserdurchlässigkeit. Eine in der Praxis bewährte Methode zur Beseitigung der Folgen solcher Schädigung ist die Rohrrinnensanierung, bei der in das geschädigte Rohr eine Kunststoff-Barrierschicht eingebracht wird. Sie verhindert nach einer Entwicklung der Fa. TGA Rohrrinnensa-

nierung AG, Fürth, weitestgehend das Eindringen von Sauerstoff durch das Rohr in den Heizkreislauf sowie eine Migration der im PE enthaltenen Stabilisatoren und die Diffusion von Sauerstoff aus dem Heizwasser in die Rohrwandung, d. h., die Folgen der vor allem oxidativen Schädigung des PE werden kompensiert und eine weitere Schädigung durch Ausschluss von Sauerstoff erheblich reduziert. Auch kann mit dieser Rohrrinnenbeschichtung ein erhöhter Korrosionsschutz für die metallischen Komponenten der bestehenden Heizanlage erreicht werden. Das Sanierungsverfahren lässt sich direkt auf Fußbodenheizungen mit anderen Kunststoffrohrmaterialien wie Polypropylen oder Polyisobutylene übertragen.

Neben der Wirkung als Sauerstoffbarriere muss das von innen eingebrachte Material eine Reihe von Eigenschaften aufweisen, die dem praktischen Verfahren geschuldet sind, wie Topfzeit,

Gelzeit, Härtingszeit, Viskosität u. a. Dazu wurde in einem F+E-Vorhaben der TH Wildau mit der Fa. TGA Rohrinnsanierung AG, Fürth, ein Epoxidharzsystem mit kommerziellen Komponenten entwickelt, das die in der DIN 4726 geforderte Sauerstoffdichtheit um mehr als eine Zehnerpotenz übertrifft (Prüfbericht 2014). Die Optimierung des Eigenschaftsspektrums dieses Epoxidharzsystems kann nur bei detaillierter Kenntnis der Struktur-Eigenschaftskorrelation erfolgreich vorgenommen werden. Im Folgenden wird beschrieben, wie allein mit Hilfe von thermo-analytischen Methoden ein umfangreiches Bild einer solchen Korrelation gewonnen werden kann.

### 5. Experimentelle Untersuchungen

Zur Charakterisierung von Kunststoffen gibt es eine Reihe von Analysemethoden, die üblicherweise eine physikalische Messgröße in Abhängigkeit von der Temperatur registrieren. Eine sehr häufig eingesetzte Methode ist die dynamische Differenzkalorimetrie (Differential Scanning Calorimetry, DSC). Sie erlaubt Aussagen über die Glasumwandlungstemperatur  $T_g$ , das Schmelz- und Kristallisationsverhalten und den Reaktionszustand (z.B. den Vernetzungsgrad) eines polymerbasierten Systems.

In einer DSC-Apparatur wird mit einem kleinen Ofen Wärme zur Probe und zu einer inerten Referenz übertragen. In unmittelbarem Kontakt zur Probe und Referenz sind Temperatursensoren (Thermoelemente) angebracht. Sie ermöglichen die Registrierung der Temperaturdifferenz zwischen Probe und Referenz während des zeitlinearen Aufheizens. Dieses Signal dient als Maß für den Wärmefluss zwischen Probe und Referenz. Ein exothermer Prozess zeigt ein positives Signal, während endotherme Prozesse negative Peaks hervorrufen. Aus solchen Kurven kann die Enthalpie, d. h. die „Wärmetönung“ einer Umwandlung, berechnet werden. Sie entspricht der integrierten Fläche des zur Umwandlung gehörigen Peaks. Die Glasumwandlung erscheint als Stufe in der Basislinie des registrierten DSC-Signals, da die Probe im Bereich der Glasumwandlung ihre Wärmekapazität ändert. Die Ver-

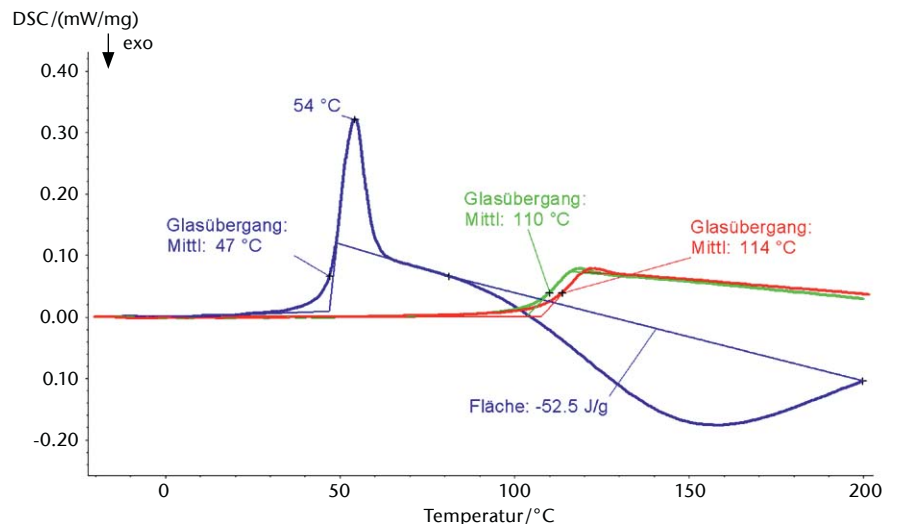


Abb. 5) DSC-Messkurve der Probe DA<sub>1+2</sub>95. Blau: 1. Heizen, grün: 2. Heizen, rot: 3. Heizen.

netzung von Kettenmolekülen während des Härtingsprozesses erzeugt als exothermer Vorgang einen Peak in der DSC-Kurve.

Im Folgenden werden Untersuchungen an Epoxidharz-Systemen beschrieben, die eine Struktur-Eigenschaftskorrelation zum Ziel haben. Variiert werden das Harz-Härter-Äquivalentverhältnis, die Zusammensetzung des Harz- und Härter-Systems einschließlich eines reaktiven Verdüners sowie der eingesetzte Katalysator gemäß Tab. 1. Als Eigenschaftskennwerte werden  $T_g$  des härtenden Systems und die bei der Härtung auftretende Reaktionsenthalpie diskutiert.

Die Bezeichnung in Tab. 1 benennt die bei Raumtemperatur (RT) in Petrischalen gegossenen und gehärteten Proben von ca. 120 mm Durchmesser und 2 mm Dicke. Dabei bedeuten:

<b>Es</b>	Ester-Epoxid
<b>Et</b>	Ether-Epoxid
<b>DA<sub>1</sub></b>	Diamin-Härter 1
<b>DA<sub>2</sub></b>	Diamin-Härter 2
<b>DA<sub>1+2</sub></b>	Diamingemisch als Härter
<b>Index</b>	Äquivalentverhältnis

Die DSC-Messungen wurden mit einer DSC 204 Phoenix der Fa. Netzsch Gerätebau GmbH, Selb, mit einer Heizgeschwindigkeit von 10 K/min durchgeführt. Die Messproben wurden aus den gehärteten Platten ausgeschnitten und gespalten, sodass jeweils eine konstante Einwaage von ca. 20 mg und eine Dicke von ca. 1 mm gewährleistet waren.

### 6. Ergebnisse und Diskussion

Aus den gemessenen DSC-Kurven konnten folgende charakteristische Werte für die Epoxidharz-Systeme abgeleitet werden: Glasübergangstemperatur, Temperaturlage des Relaxationspeaks und die Restenthalpie. Beispielhaft sind in Abb. 5 die DSC-Messdaten für die Probe DA<sub>1+2</sub>95 grafisch dargestellt.

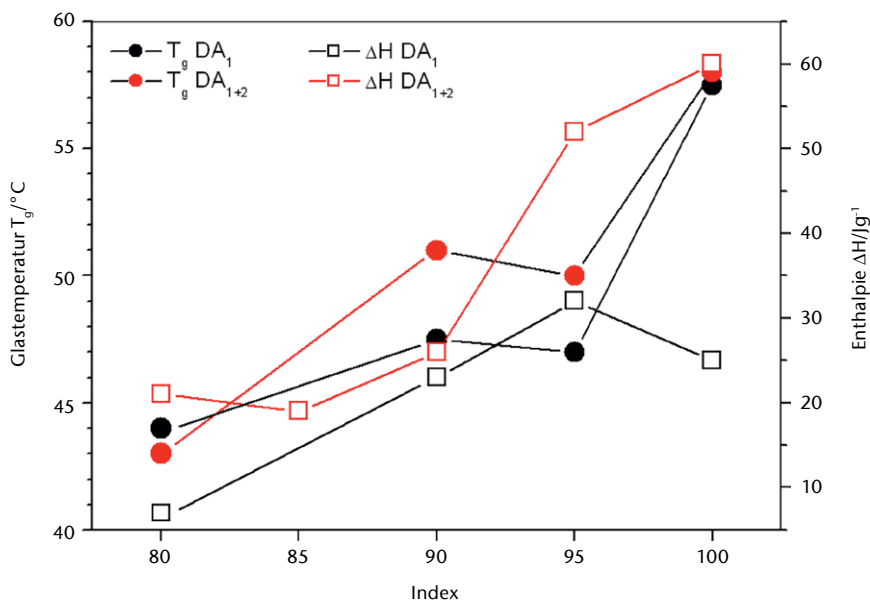
Besonders auffällig ist der intensive endotherme Peak kurz oberhalb der Reaktionstemperatur im ersten Heizlauf. Die Niedertemperatur-Flanke des Peaks wird anfänglich durch die stufenförmige Erhöhung des DSC-Signals bei Erreichen der Glasübergangstemperatur  $T_g$  erzeugt. Der endotherme Peak hat seine Ursache in der Struktur-Relaxation bei Einsetzen der Segmentbeweglichkeit oberhalb von  $T_g$ . Beim erstmaligen Erreichen von etwa 80 °C (nach dem Härten der Probe bei RT) setzt eine weitere Reaktion ein. Bei der Probenherstellung wurde die Reaktion bei RT durch die mangelnde Moleküldynamik abgebrochen, obwohl noch funktionelle Gruppen zur Verfügung standen. Dieser Zustand wird durch ein  $T_g = 47$  °C charakterisiert. Durch Einsetzen der Segmentbeweglichkeit oberhalb dieses  $T_g$  kann ein weiterer Umsatz erfolgen. Ein Maß für die nun noch ablaufende Reaktion ist die Restenthalpie, wie sie durch die Fläche unter dem DSC-Signal angezeigt wird. Nach Ablauf dieser Reaktion wird ein um mehr als 60 K höheres  $T_g$  erreicht, wie dem 2. Heizlauf in Abb. 5 zu entnehmen ist. Bei einem 3. Heizen wird schließlich  $T_g$  nur

**Tab.1:** Glasübergangstemperatur  $T_g$  der drei Heizläufe, Restenthalpie  $\Delta H$  und Maximumlage des endothermen Peaks  $T_{max}$

Bezeichnung	$T_g/^\circ\text{C}$			$T_g(2) - T_g(1), T_g(3) - T_g(1)/\text{K}$		$\Delta H/\text{J}\cdot\text{g}^{-1}$	$T_{max}/^\circ\text{C}$
	1	2	3	1,2	2,3		
DA <sub>1</sub> 100	58	106	109	48	51	25	63
DA <sub>1+2</sub> 100	58	107	113	49	55	60	63
DA <sub>1+2</sub> 85	54 <sup>1)</sup>	101	108	47	54	19	62
DA <sub>1+2</sub> 85 70G	63/77	104	108	41/27	45/31	4	82
	63/77	102	109	39/25	46/32	2	83
DA <sub>1+2</sub> 95	47 <sub>50</sub>	110 <sub>109</sub>	114 <sub>103</sub>	63 <sub>59</sub>	67 <sub>63</sub>	52 <sub>40</sub>	54 <sub>56</sub>
DA <sub>1+2</sub> 90	51 <sub>51</sub>	102 <sub>102</sub>	108 <sub>108</sub>	51 <sub>51</sub>	57 <sub>57</sub>	26 <sub>26</sub>	57 <sub>57</sub>
DA <sub>1+2</sub> 80	43	89	97	46	54	21	51
DA <sub>1</sub> 95	47	107	111	60	64	42	54
DA <sub>1</sub> 90	47	99	105	52	58	23	54
DA <sub>1</sub> 80	44	84	92	40	48	7	51
DA <sub>1</sub> 95	50	105	111	55	61	29	56
DA <sub>1</sub> 90-90/10	57	110	112	53	55	32	62
DA <sub>1</sub> 90-80/20	44	75	81	31	37	1	51
DA <sub>1</sub> 80-90/10	39	70	78	31	39	2	48
DA <sub>1</sub> 90-95/5	50	97	102	47	52	16	56
DA <sub>1</sub> 90+10	49 <sub>54</sub>	99 <sub>103</sub>	100 <sub>103</sub>	50 <sub>49</sub>	51 <sub>49</sub>	84 <sub>83</sub>	56 <sub>60</sub>
DA <sub>1</sub> 100/90-10	49	86	88	37	39	11	56

<sup>1)</sup> abweichende Dicke des Probekörpers

Tiefgestellte Werte bezeichnen Wiederholungsmessungen mit neuen Probekörpern



noch um 4 K erhöht. Der Umsatz hat nun unter den Messbedingungen sein Maximum erreicht. Die den Messkurven entnommenen Werte sind in Tab. 2 zusammengestellt.

Bei der ersten Betrachtung der Ergebnisse nach Tab. 2 fällt auf, dass durch die Rezepturvariation die größten Unterschiede bei  $\Delta H$  erzielt werden.

In der Abb. 6 sind die Werte für  $T_g$  und  $\Delta H$  in Abhängigkeit vom Index für die beiden Härter DA<sub>1</sub> und DA<sub>1+2</sub> aufgetragen. In der Tendenz sinkt wie erwartet  $T_g$  mit dem geringeren Einsatz von Härter, da die erzielte Vernetzungsdichte mit geringerem Anteil an Härter ebenfalls sinkt (es sind weniger Verknüpfungsmöglichkeiten vorhanden). Die Abhängigkeit ist in erster Näherung etwa gleichlaufend. Bei der ermittelten Restenthalpie dagegen treten bei höheren Indices deutliche Abweichungen im Verhalten der Systeme mit Härter DA<sub>1</sub>

Abb. 6) Glasübergangstemperatur  $T_g$  und Enthalpie  $\Delta H$  in Abhängigkeit vom Härteranteil.

und  $DA_{1+2}$  auf. Mit  $DA_1$  lässt sich unter den gegebenen Reaktionsbedingungen ein höherer Umsatz erzielen. Die Restenthalpie ist beim  $DA_1$  etwa 3-fach niedriger als beim  $DA_{1+2}$  (bei einem Index von 100).  $T_g$  dagegen ist bei beiden Systemen etwa gleich, und die Differenz zwischen den Werten bei einem Index von 80 bzw. 100 beträgt lediglich 10 K. Diese Unterschiede lassen sich mit der chemischen Struktur korrelieren. Beim Einsatz einer Mischung von  $DA_1$  und  $DA_{1+2}$  bei Probe  $DA_{1+2}90+10$  wird die Reaktivität ganz besonders stark beeinflusst. Hier erreicht  $\Delta H$  einen Wert von über 80 J/g; der Wert für  $T_g$  dagegen ordnet sich mit ca. 50 °C auf einem durchschnittlichen Niveau ein.

Bei einem Gemisch aus Ester und Ether wie bei den Proben  $DA_{1+2}90-80/20$  und  $DA_{1+2}80-90/10$  (Index 90 bzw. 80) wird ein fast vollständiger Umsatz erreicht, während  $T_g$  besonders niedrig bleibt. Für eine ausführliche Diskussion müssen noch zusätzliche strukturelle Parameter herangezogen werden (das gilt auch für die Ergebnisse an den restlichen Proben).

Am Beispiel der Probe  $DA_{1+2}85\ 70G$  kann der Einfluss der Reaktionstemperatur demonstriert werden.

Die Messkurve gemäß Abb. 7 zeigt beim 1. Heizen zwei Glasübergangsstufen. Die erste ist wie erwartet gegenüber den anderen bei Raumtemperatur gehärteten Proben um etwa 10 K erhöht. Die Reaktion ist aber unter den gegebenen Bedingungen noch nicht abgeschlossen. Bei Überschreiten des erreichten  $T_g$  beginnt die Nachreaktion, die dann mit Erreichen des neuen  $T_g$  bei annähernd der Reaktionstemperatur wieder „einfriert“.

Mit weiterer Temperaturerhöhung erfolgt der maximal mögliche Umsatz – die Restenthalpie geht gegen null. Nach einer Temperaturbeanspruchung bis 200 °C (während der Messung) wird eine  $T_g$  von 102 °C erreicht. Bei einem weiteren Lauf bis 200 °C wird  $T_g$  schließlich noch einmal um 7 K erhöht. Auch diese Messung zeigt, dass der erzielbare Wert für  $T_g$  nicht wesentlich höher als die Härtungstemperatur werden kann.

### 7. Schlussfolgerungen

Es wird bestätigt, dass die DSC gut geeignet ist, ein umfangreiches Bild von reagierenden Polymersystemen

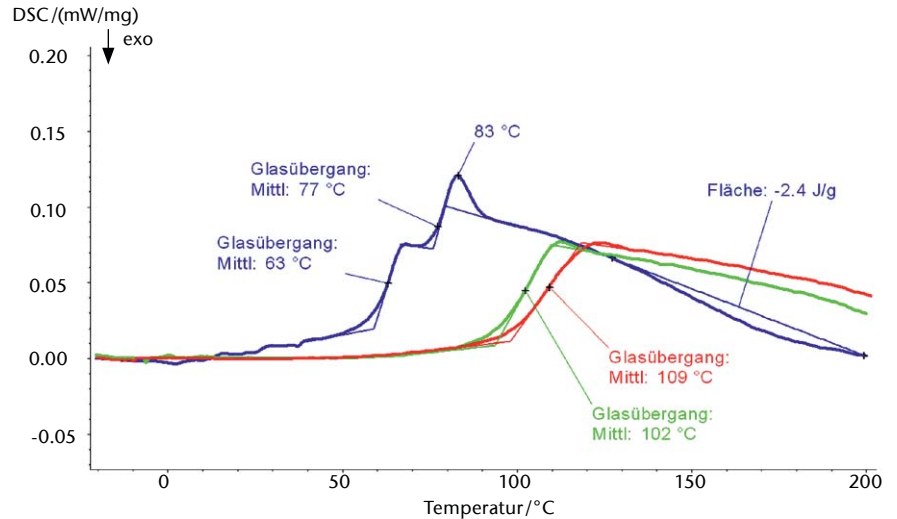


Abb. 7) DSC-Kurven der bei 70 °C gehärteten Probe  $DA_{1+2}85\ 70G$

zu liefern. Wie erwartet ist dieses Bild nicht vollständig. Es bedarf der Anwendung weiterer Messmethoden zur genaueren Charakterisierung auf molekularer Ebene.

Die Messungen an dem reaktiven Epoxidharz-System belegen die Tatsache, dass sich ein polymeres Netzwerk nur bis zum Erreichen von  $T_g$  verfeinern lässt. Mit Erreichen von  $T_g$  wird die molekulare Beweglichkeit so stark eingeschränkt, dass eine weitere Vernetzung nicht mehr erfolgen kann. Dazu bedarf es einer Erhöhung der Temperatur oder der Weichmachung durch flexible bzw. niedermolekulare Substanzen, die nach der Härtung wieder entfernt werden oder als Weichmacher im Harz verbleiben. Das Probensystem veranschaulicht das Zusammenspiel von molekularer Beweglichkeit und thermisch aktivierter Reaktivität. Für eine detaillierte Beschreibung des Epoxidharz-Systems bedarf es einer weiteren systematischen Variation der Zusammensetzung und des Einsatzes weiterer Charakterisierungsmethoden. Wichtig für die Ableitung der Gebrauchseigenschaften und der Stabilität sind zusätzliche Informationen zur Kinetik der Vernetzungsreaktion. Erste Messungen für entsprechende Untersuchungen wurden bereits durchgeführt.

Allein aus den thermo-analytischen Messdaten lassen sich wichtige Hinweise auf die optimierte Einstellung von Systemparametern ableiten. So zeigen die Härter-Kombinationen be-

sonderes Potenzial für optimale Formulierungen. Mit den abgeleiteten Erkenntnissen zur molekularen Struktur der Netzwerke ergeben sich zusätzliche Möglichkeiten bei der weiteren Vorhersage der Langzeitstabilität dieser Systeme.

Das entwickelte Epoxidharzsystem gestattet die nachträgliche Ausstattung von Fußbodenheizungsrohren mit einer praktisch sauerstoffundurchlässigen Schutzschicht in einer bestehenden Heizungsanlage. Die Sauerstoffbarrierewirkung übertrifft die nach DIN 4726 geforderten Werte um mehr als eine Größenordnung. (gefordert:  $\leq 0,32\ \text{mg/m}^2\cdot\text{d}$ , gemessen:  $0,02\ \text{mg/m}^2\cdot\text{d}$ ).

### LITERATUR

- Franck A, Biederbick K (1990) Kunststoff-Kompodium, 3rd edn. Vogel, Würzburg. ISBN: 978-3-8023-0135-3
- Gugumus F (1996a) Thermooxidative degradation of polyolefins in the solid state. Part 1. Experimental kinetics of functional group formation. Polym Degrad Stabil 52(2):131–144. doi: 10.1016/0141-3910(95)00229-4
- Gugumus F (1996b) Thermooxidative degradation of polyolefins in the solid state. Part 2. Homogeneous and heterogeneous aspects of thermal oxidation. Polym Degrad Stabil 52(2):145–157. doi: 10.1016/0141-3910(95)00227-8
- Gugumus F (1996c) Thermooxidative degradation of polyolefins in the solid state. Part 3. Heterogeneous oxidation model. Polym Degrad Stabil 52(2):159–170. doi: 10.1016/0141-3910(95)00228-6
- Kriston I (2010) Some aspects of the degradation and stabilization of Phillips type Polyethylene. Ph. D. Thesis, Budapest University of Technology and Economics, Laboratory of Plastics and Rubber Technology
- Langer B, Berthold A, Grellmann W, Enderle HF (2012) Mechanische Kurzzeitprüfung zur Bewertung des Verhaltens von PE-Rohrwerkstoffen beim langsamen Risswachstum. Mater Test 54(9):578–583. doi: 10.3139/120.110364

Mitroka SM, Smiley TD, Tanko JM, Dietrich AM (2013) Reaction mechanism for oxidation and degradation of high density polyethylene in chlorinated water. *Polym Degrad Stabil* 98(7):1369–1377. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2013.03.020

Ojeda T, Freitas A, Birck K, Dalmolin E, Jacques R, Bento F, Camargo F (2011) Degradability of linear polyolefins under natural weathering. *Polym Degrad Stabil* 96(4):703–707. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2010.12.004

Prüfbericht (2014) K 14 1228.1, Sauerstoffdichtheitsprüfung nach DIN 4726. Technische Universität Darmstadt, Zentrum für Konstruktionswerkstoffe

Robertson D (2013) The oxidative resistance of polymeric geosynthetic barriers (GBR-P) used for road and railway tunnels. *Polym Test* 32(8):1594–1602. doi: 10.1016/j.polymertesting.2013.09.012

Schröder HF, Munz M, Böhning M (2008) A New Method for Testing and Evaluating the Long-Time Resistance to Oxidation of Polyolefinic Products. *Polym Polym Compos* 16(1):71–79

Sittiho M (2011) Quantitative Beurteilung des Gaseintrages in thermische Energieversorgungssysteme aufgrund der Gaspermeation. Dissertation, Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau

Viebke J, Gedde UW (1997) Antioxidant diffusion in polyethylene hot-water pipes. *Polym Eng Sci* 37(5):896–911. doi: 10.1002/pen.11733

Vogt H, Enderle HF, Schulte U, Hessel J (2008) Thermal ageing of PE 100 pipes for accelerated lifetime prediction under service. *Plastic Pipes XIV*, Budapest

Weltschew M (2010) Vergleich der Materialkennwerte von Formstoffen aus Polyethylen hoher Dichte mit dem Baumsterverhalten von Gefahrgutverpackungen. BAM-Dissertationsreihe, vol 53. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. ISBN: 978-3-9812910-9-4

Whelton AJ, Dietrich AM (2009) Critical considerations for the accelerated ageing of high-density polyethylene potable water materials. *Polym Degrad Stabil* 94(7):1163–1175. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2009.03.013

## AUTOREN

Dipl.-Chem. Eckhart Kornejew

Dr. rer. nat. Harald Goering

Prof. Dr. rer. nat. Michael Herzog

Technische Hochschule Wildau

iMEP - Institut für Material, Entwicklung und Produktion

E-Mail für Korrespondenz:

michael.herzog@th-wildau.de

# Objective Function Development Based on the Parameters of a Regional Terminal Network

Valery M. Samuylov, Oksana D. Pokrovskaya, Lyudmila V. Gashkova, Herbert Sonntag\*

## Abstract

The article is devoted to the development of the objective function for calculating the parameters of a terminal network in a region. The key parameters of a terminal network, as logistic system, are described. The factors influencing the parameters of a terminal network are analyzed, and the objective function, concerning the value and qualitative aspects for determining the transport and spatial/quantitative parameters proposed. The level of service quality for the clients is also taken into account. The heuristic solution method, and the results of the approach are demonstrated with the help of an application example concerning different combinations of distribution

## Zusammenfassung

Der Artikel widmet sich der Modellierung eines Transportnetzes, das, unter Beachtung der Lage der Distributionszentren und der Lage der Kunden, minimale Gesamtlogistikskosten ergibt. Diese setzen sich wiederum aus den Transport- und aus den Standortkosten hinsichtlich der Lager- und Betriebskosten der Distributionszentren zusammen. Darüber hinaus wird auch die Maximierung beziehungsweise das Niveau der Servicequalität für die Kunden einbezogen. Das heuristische Lösungsverfahren wird anschließend an einem Anwendungsbeispiel hinsichtlich unterschiedlicher Kombinationen von Distributionszentren erprobt und hinsichtlich der Zielerreichung dokumentiert.

## 1. Introduction

The idea of forming a terminal network, or a network of logistics consolidating distribution centers (hereafter named LCDCs), means building interconnected and continuous chains of centers. A terminal network in a region is a set of interacting and centrally managed terminals (LCDCs) providing interregional integration and access to the transport corridors of the country. A network of LCDCs is a system of geographically separate sites, which are technologically interconnected through the functions of freight handling: collection, batching and sorting down, transshipment, cross-docking and the delivery of goods to the customers. A terminal network is required to ensure an effective intra-regional distribution, a well-organized freight flow management, as well as the ability of terminal infrastructure to support flows for market entrance. LCDCs combine shipping, storage and sales functions with providing com-

prehensive solutions and a complete set of value-added services for the customers. Within the terminal operation, the delivery of goods to the customers is organized through LCDC networks, where the cargo is stocked, handled and serviced (Pokrovskaya et al. 2013, Samuylov et al. 2012). The purpose of this article is to consider the basic parameters of a terminal network and to develop the objective function for a network parameterization in quantitative and qualitative aspects.

## 2. Solution Model Approach

Spatial/quantitative parameters of the terminal network involve the amount and location of terminal network nodes – LCDCs (terminals) and their proximity to manufacturing facilities. Transport parameters of a terminal network include: the mode of transport (road/rail, selected by each transport combination), the type of delivery (mono-modal or multi-modal) and the type

of shipping (direct or terminal). These parameters are affected by the density of industrial/transport nodes, the number and location of customers, the intensity of transport communication and economic ties, the transport and storage infrastructure, the volume and direction of freight flows and the exits to transport corridors, etc.

In addition to these indicators, the organization of a terminal network is influenced by such factors as: socio-demography (population number, cost of living), administration (economy and transport development in the region), economy (competitiveness, amount of investments), industrial potential (industrial output), trading capacity (volume of trade, the availability of logistics and distribution companies), transport (availability and development of transport communications, major carriers) and geography (location of industrial, transport and population centers, ecology).

In accordance with the above-mentioned parameters of a terminal net-

\* corresponding author

work, the objective function can be constructed. The algorithm of selecting a rational number and placement of a LCDC is based on the choice of the most profitable alternative from a variety of options. Minimum total costs for transportation service ( $S_{sum}$ ) are considered to be the optimum criterion (Pokrovskaya 2012).

$$1 \quad F = \sum_i \sum_j \sum_k [S_{sum}^{(\beta;\lambda;\beta+\lambda)}]_{\alpha} \Rightarrow \min$$

Limitations: 1) Sufficient volume of traffic; 2)  $S_{trans} \geq S_{build}$

Expanded form of the objective function:

$$2 \quad F = \sum_i \sum_j \sum_k [S_{trans}, S_{build}, T_{delivery}] \Rightarrow \min$$

where  $S_{sum}^{(\beta;\lambda;\beta+\lambda)}$  is the total cost for transportation service, rub./year.  $S_{sum}^{(\beta;\lambda;\beta+\lambda)}$  consists of:  $S_{trans}$  – the cost of shipping, rub./ year;  $S_{build}$  – the cost of building the required number of LCDCs, considering investment in infrastructure and handling of freight at warehouses, rub./ year;  $T_{delivery}$  – time of delivery using terminal technology, hour.

Expanded form of the cost of shipping function:

$$3 \quad F(S_{trans}) = (\sum_i \sum_k Q_{ik} S_{trans(ik)} + \sum_m Q_{mk} S_{trans(k)} + \sum_j \sum_k Q_{kj} S_{trans(k)} + \sum_j \sum_k Q_{kj} S_{trans(k)}) \Rightarrow \min$$

$S_{trans}$  – the cost of shipping – consists of:  $S_{trans ik}$  – the total cost of transportation service for a freight volume  $Q_{ik}$  at the stage of shipping from supplier  $i$  to terminal  $k$ , rub./year;  $S_{trans k}$  – the total cost of terminal transportation (intra-terminal and inter-terminal), rub./ year;  $S_{trans kj}$  – the total cost at the stage of dispersing a freight volume  $Q_{kj}$  from terminal  $k$  to consumers  $j$ , rub./year;  $Q_{ik}$  – the amount of cargo coming from suppliers  $i$  to terminal  $k$ , tons/day;  $Q_{kj}$  – the quantity of goods shipped (distributed) from terminal  $k$  to consumers  $j$ , tons/day.

The total cost of transportation service ( $S_{sum}^{(\beta;\lambda;\beta+\lambda)}$ ) in  $\alpha^{\varphi}$ -phase ( $\alpha_1 = ik$  – collection;  $\alpha_2 = kj$  – terminal transportation;  $\alpha_3 = kj$  – distribution) of freight flows by means of  $\beta$ -m or  $\lambda$ -m mode of transport ( $\beta$  – delivery by road;  $\lambda$  – delivery by

rail;  $\beta + \lambda$  – multimodal delivery) are minimized according to the following parameters: location and planning of terminals; supplier ( $\sum_i S_i$ ), terminal ( $\sum_k S_k$ ), consumer ( $\sum_j S_j$ ), stages  $m$  and  $n$  ( $m$  – arrival of goods from a supplier to a terminal,  $n$  – departure of goods from a terminal to a customer) different for each transport combination.

Expanded form of the costs for construction and maintenance of a LCDC function:

$$4 \quad F(S_{build}) = \sum_n (S_{storage}, S_{FWH}, S_{operate}, S_{service}) \Rightarrow \min$$

$S_{build}$  – the costs for construction and maintenance of a LCDC (a number of  $n$ ), considering the investment in infrastructure and equipment, rub./year;  $S_{storage}$  – the costs for the storage of freight at a terminal, rub./year;  $S_{FWH}$  – the costs for freight warehouse handling (packaging, assembling etc.), rub./year;  $S_{operate}$  – the costs for loading, unloading, and cross-docking operations rub./year;

$S_{service}$  – the costs connected with freight-forwarding and commercial information service, distribution, tracking and tracing and other logistics services, rub./year.

In addition to the financial indicators, the indicator of traffic efficiency of terminal goods is considered:  $T_{delivery}$  – time of delivery using terminal technology, hour (Pokrovskaya 2012). The objective function  $F$  takes the minimized indicators into account. However, there are maximized indicators as well. The form of the objective function  $G$  for an optimum criterion – the maximum of the overall transportation service efficiency for  $R_{sum}$ :

$$5 \quad G = \sum R_{sum}^{(\beta;\lambda;\beta+\lambda)}_{\alpha} \Rightarrow \max$$

where  $R_{sum}$  – the overall transportation service efficiency, rub./year.

The overall transportation service efficiency ( $R_{sum}^{(\beta;\lambda;\beta+\lambda)}$ ) in  $\alpha$ -phase ( $\alpha_1 = ik$  – collection;  $\alpha_2 = kj$  – terminal transportation,  $\alpha_3 = kj$  – distribution) of freight flows by means of  $\beta$ -m or  $\lambda$ -m mode of transport ( $\beta$  – delivery by road,  $\lambda$  – delivery by rail,  $\beta + \lambda$  – multimodal delivery) in accordance with the objective function  $G$  is maximized for each pa-

rameter. The expanded form for the overall transportation service efficiency function is:

$$6 \quad G(R_{sum}) = [R_{log}, R_{CE}, R_{soc}, R_{customer}, V_{delivery}] \Rightarrow \max$$

where  $R_{log}$  – the efficiency of the logistics of freight forwarding, %;  $R_{CE}$  – the cost-effectiveness, %;  $R_{soc}$  – the social efficiency of terminal technology, %,  $R_{customer}$  – customer satisfaction of transportation and logistics services using a terminal network point.

The efficiency of logistics/freight forwarding  $R_{log}$  refers to a timely delivery of goods to the assigned destination, the reliability of documentation, the information services and cargo safety. Social efficiency  $R_{soc}$  is determined by the social effect (new jobs, wage growth). Customer satisfaction of transportation and logistics services  $R_{customer}$  involve a culture of service, customer convenience, the willingness of consumers to use the services offered and the range of services. In addition, the indicator for the terminal freight flow effectiveness and the speed of cargo delivery  $V_{delivery}$  is included in the objective function in km/h. In order to analyze the influence of the terminal quantity and the location with regard to the total cost value of transportation service, one needs to determine the total costs for each of the possible options and evaluate the feasibility of each one. Maximizing the costs for the objective function allows identifying the best combination of the quantity and the location of the terminals in a region.

In the present study, we restrict the investigation area only to the objective function  $F$ , which determines the basic indicators influencing the final result significantly. Such metrics in a quantitative aspect are: the total cost of transportation service  $S_{sum}^{(\beta;\lambda;\beta+\lambda)}$ , rub./year;  $S_{trans}$  – the costs for transportation, rub./year;  $S_{build}$  – the construction expenditure (zero-base/on the base of operating infrastructure), and the maintenance of a certain amount of LCDCs, considering infrastructure and equipment investments, rub./year (Pokrovskaya 2012). Hence, the heuristic method, as a problem solving approach, was applied for developing the objective function under study. It implies an iterative procedure that con-

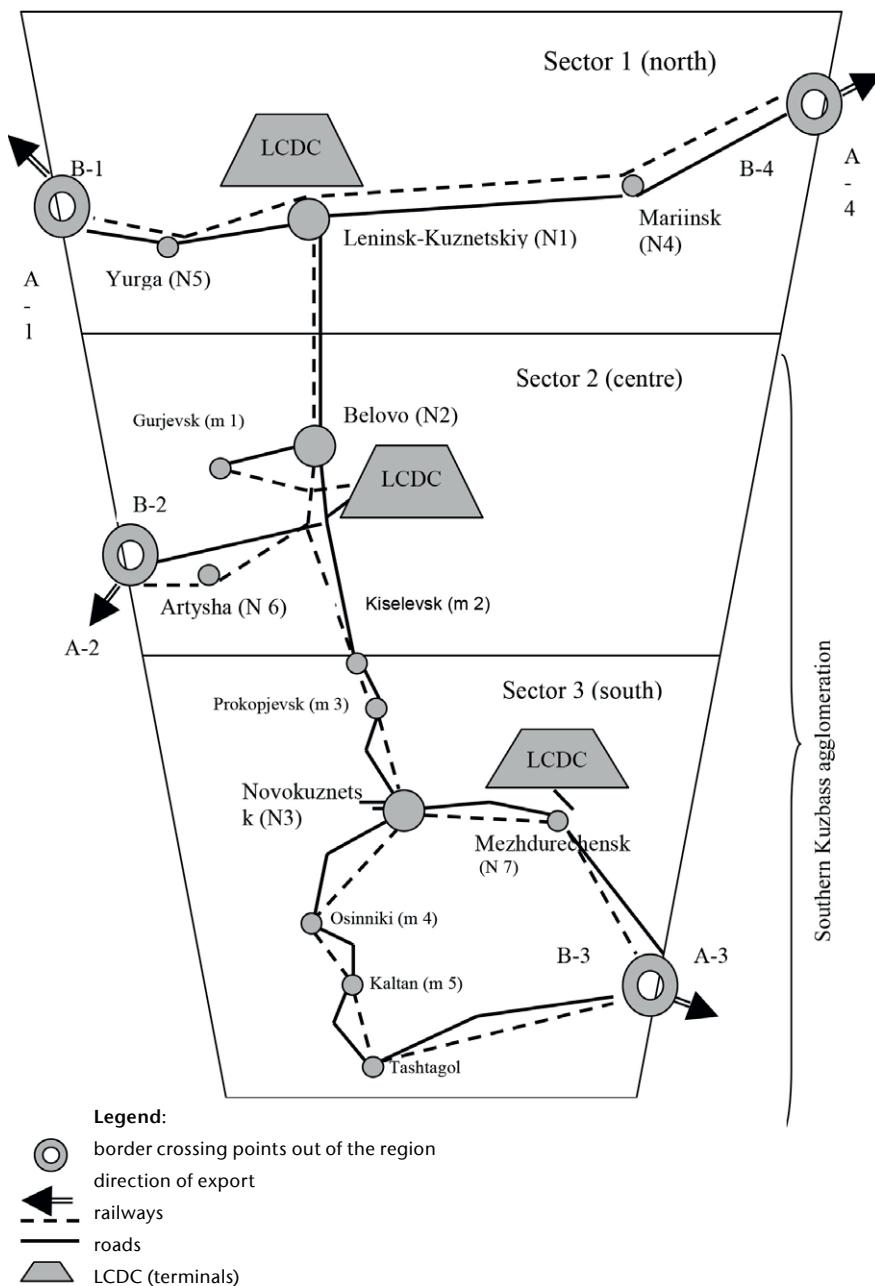


Fig. 1) The best option of Terminal network

verges to an enumeration of possibilities with an additional accounting cycle of selecting a mode of transport (combination of transportation modes). Spatial/quantitative parameters of the terminal network are determined by varying the possible combinations of the LCDCs' number and location.

### 3. Application Example of the Approach

Here, a concrete example of the applicability of this objective function in real conditions is considered. We note that a large amount of calculation of

variations, concerning the number and dislocation of LCDCs, necessitated automation. O. D. Pokrovskaya developed **“Software of the decision-making to build the terminal transport network in the region”** (Ungvári et al. 2014), with the help of which the calculations were performed.

The Russian Kemerovo region was investigated. This region has export and mining areas with a powerful heavy industry, which is orientated towards exporting its products. The coal production represents traffic flows of a powerful mass of bulk cargo to the

outer areas. The railway transport, which has a well-developed network of roads, is the priority development in the region. This is due to the fact that coal mining companies have traditionally focused on the transport service by rail. The reasons are the large volume of freight traffic and the long distances of deliveries to consumers. However, there has recently been an outflow of goods transported over short distances on vehicles. Today, vehicles compete with the rail in the short and the relatively long distances to take the goods to the end consumer, due to the intensification of road constructions, a powerful increase in cargo traffic and the variety of rolling stock.

In this region, there are seven major industrial transport nodes (N1-N7) with terminals. The territory of the region is conventionally divided into three sectors: 1) the north; 2) the center; 3) the south. In the second sector of freight traffic, there are three generating points for goods (n1-3) and in the third sector six (N4-N9). The first sector is in the northern part of the region, which does not belong to the boundaries of the southern Kuzbass agglomeration. Therefore, the production and the distribution of this sector are taken into account, but not in detail. The export is carried out into four areas: A1 – European direction (north-west), A2 – south-west direction (the Altai, Kazakhstan), A3 – south-east direction (Khakassia), A4 – north-east direction (the Far East, the Krasnoyarsk Territory). Accordingly, there are four exits from the region B1-B2, the direction of A1-A4: B1 – Bolognoje, B2 – Tiagun; B3 – Balyksa; B4 – Itat. These are the cities: B1 – Yurga, B2 – Artysh, B3 – Mezhdurechensk, B4 – Mariinsk.

In order to streamline intra-regional economical ties and the export of coal products from the region to foreign destinations, we propose to establish three supporting terminals: LCDC1 – (Leninsk-Kuznetskiy), LCDC2 – (Belovo), LCDC3 – (Novokuznetsk), which is accepted as an initial hypothesis. LCDCs may be located in the geographical center of each sector equidistant from both industrial enterprises and exit points of the area. It is assumed that such a quantitative spatial arrangement of the terminal network in the region will provide a rational freight



**Tab.1:** The results of calculation of the terminal network options and the choice of the best option

Number and dislocation LCDC	Transportation costs to collect the goods from the territory of the region to the terminal/-s, S trans. cost			Transportation cost for distribution of cargo from the terminal/-s to the borders of the region, S trans. distribution		
	V mln. rub./year	RW mln. rub./year	V+RW mln. rub./year	V mln. rub./year	RW mln. rub./year	V+RW mln. rub./year
LCDC 7	11 970,65	8240,36	8657,40	35695,35	11901,02	9603,45
LCDC 2,7	7938,00	7117,74	6902,28	31615,92	11260,62	9359,28
LCDC1,2,7	<b>6102,45</b>	<b>6482,30</b>	<b>5914,30</b>	<b>28932,50</b>	<b>10539,95</b>	<b>9116,40</b>
LCDC1,2,3,7	5456,75	6380,20	4978,60	29568,65	11015,70	9869,60

V – vehicles, RW – railway transport, V + RW – multi-transport delivery. In bold is the best option of the terminal network (BOTN).

\* It is calculated from the average value – 50 % (using the existing infrastructure) \*\* It is calculated at the current value – 100 %

Table. 1 is diagrammed with a representation of the relation of the amount of expenses depending on number of relative positions of LCDC in the terminal network in the region.

movement in terms of reducing transport costs in each spatial sector and the whole region. The selected terminal network nodes are large cities with a developed industrial production, and they are located in the immediate vicinity of mining sites and the production of readymade products. The main transport links are going through the territory of the region under consideration. Figure 1 shows the best option for the terminal network chosen by the criterion of optimality of the objective function.

The calculation results are presented in Tab. 1 and Fig. 2.

#### 4. Conclusions

Finding solutions for the proposed objective function is carried out using a heuristic method (iterative method of directed sorting options) with an additional investment settlement cycle - the choice of the form (a combination of forms) of transport. By varying the number of possible combinations and dislocations of LCDC, modes of transport for their service and the spatial and quantitative parameters of the terminal network are determined. Graphically, the minimum objective function falls on the best option of terminal networks that

were mathematically derived. BOTN is represented by three nodes in the cities: Leninsk-Kuznetskiy (LCDC 1), Belovo (LCDC 2) and Mezhdurechensk (LCDC 7). Cost savings concerning shipping terminals confirm the need to create a network for the efficient organization of the transportation of goods in the region under consideration. Thus, this research characterizes and demonstrates the practical application of the objective function in the design of the terminal network. It proved that minimum total costs for transportation services exist through the verification of calculations using computer programs.

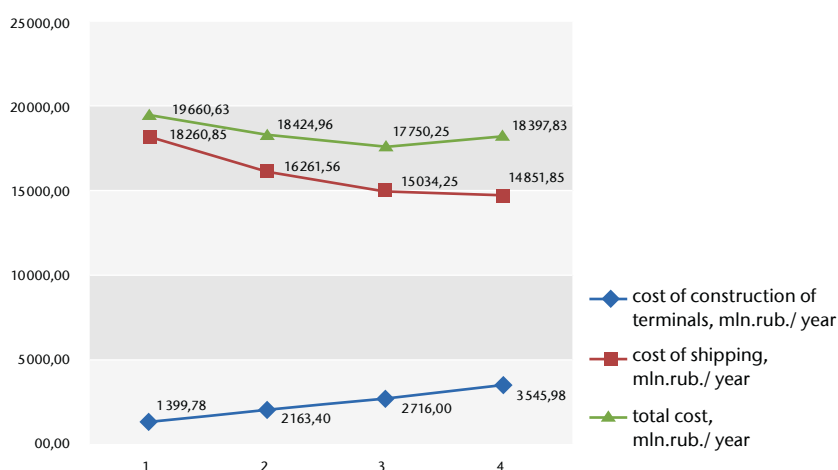


Fig. 2) The dependence of the cost and the number of nodes in the terminal network of the region

Total cost of shipping for terminal circuit (collection, distribution), S trans. total			Transportation cost, mln. Rub./year* S trans. total	Cost construction/formation of LCDC, mln. rub./year** S constr.	Total cost, mln. Rub./year S total
V mln. rub./year	RW mln. rub./year	V+RW mln. rub./year			
47665,88	20141,38	18260,85	18260,85	1399,78	19660,63
39746,70	18382,14	16261,56	16261,56	2163,40	18424,96
<b>35034,95</b>	<b>17022,25</b>	<b>15034,25</b>	<b>15034,25</b>	<b>2716,00</b>	<b>17750,25</b>
35025,40	17399,55	14851,85	14851,85	3545,98	18397,83

## REFERENCES

Pokrovskaya OD (2012) Формирование терминальной сети региона для организации перевозок грузов (Formation of a regional terminal network for the transportation of goods). TransLit, Moskva. ISBN: 978-5-94976-452-7

Pokrovskaya OD, Samuylov VM, Nevolina AD (2013) Инфраструктура международных транспортных коридоров (Infrastructure of the international transport corridors). Иннов трансп научно-публ изд | Innotrans Sci Nonfict Ed 3(9):33–37

Samuylov VM, Galkin AG, Koshkarov VE, Kiselev SA (2012) Развитие международного автотранспортного коридора на территории Свердловской области в системе модернизации транспортной инфраструктуры Урала (The development of the international transport corridor in the territory of the Sverdlovsk region in the system of modernization of the transport infrastructure of the Urals). Иннов трансп научно-публ изд | Innotrans Sci Nonfict Ed 2(3):23–33

Ungvári L, Gashkova LV, Samuylov VM (2014) Модуль «Встроенное образование» на базе НОЦ «Транс-портная логистика» ("Integrated Education" Module based on REC "Transport Logistics"). Иннов трансп научно-публ изд | Innotrans Sci Nonfict Ed 12(2):75–78

## AUTHORS

**Valery M. Samuylov, DSc, Professor**  
**Lyudmila V. Gashkova, Associate Professor**  
 Ural State University of Railway Transport  
 Ekaterinburg, Russian Federation

**Oksana D. Pokrovskaya, PhD, Associate Professor**  
 Siberian State University of Railway Transport  
 Novosibirsk, Russian Federation

**Prof. Dr.-Ing. Herbert Sonntag**  
 Technische Hochschule Wildau |  
 Technical University of Applied Sciences  
 Forschungsgruppe Verkehrslogistik  
 Wildau, Germany

E-Mail for correspondence:  
 herbert.sonntag@th-wildau.de



# Analyse optimaler Bestellmengen für unterschiedliche Preisabsatzfunktionen und Rabattarten

Matthias Forster\*, Victoria Scholl

## Zusammenfassung

Die Beschaffung von Gütern umfasst die Bereitstellung des Materials in der optimalen Menge. EOQ-Modelle (Economic Order Quantity) stellen eine Hilfe zur Optimierung dieser dar. Frühere Studien beschäftigten sich bereits mit Verfahren zur Berechnung der optimalen Bestellmenge bei einer preisabhängigen Nachfrage und mengenabhängigen Preisen. Burwell et al. entwickelten ein Verfahren zur Bestellmengenoptimierung mit preisabhängiger Nachfrage und Mengenrabatten für den Einkaufspreis und die Frachtkosten. Der Mengenrabatt ist entweder inkrementell oder ein Gesamt mengenrabatt. Burwell et al. betrachten die Nachfrage für den Monopolfall. Wir untersuchen den Konkurrenzfall. Die angegebene Beispielrechnung veranschaulicht die Methode.

## Abstract

The procurement of commodities covers supply of the optimal quantities of material. EOQ models are a means to compute optimal quantities. Previous studies have dealt with algorithms that find optimal lot sizes when demand depends on price and quantity discounts are offered. Burwell et al. developed an algorithm to optimize order quantities when demand is considered to be dependent upon price and incorporate quantity and freight discounts. The quantity discount is either incremental or all-unit. Burwell et al. consider the monopolistic case. We study the case of competition. A numerical example is given that illustrates the method.

## 1. Einleitung

Jeder Produktionsbetrieb benötigt Material. Das Material kann der Betrieb entweder (a) verbrauchssynchron beschaffen oder (b) eine Einzelbeschaffung im Bedarfsfall vornehmen oder (c) ein Materiallager nutzen. Das Prinzip (a) verwendet kein Lager und verursacht daher keine Kapitalkosten. Jede Unterbrechung des Materialflusses führt sofort zur Unterbrechung der Produktion, wenn z.B. Liefertermine nicht eingehalten werden. In diesem Falle können enorme Kosten entstehen. Das Prinzip (b) setzt auf Einzelentscheidungen, die sich nicht verallgemeinern lassen. Die Lagerung (c) setzt eine Bestellpolitik voraus, d.h. eine allgemeine Regel. Bestellpolitiken lassen sich mit wissenschaftlichen Methoden untersuchen. Frühe Analysen zur optimalen Lagerverwaltung gehen auf Harris (im deutschsprachigen Raum auf Andler) zurück (Economic Order Quantity, kurz: EOQ-Formel).

Das Harris-Modell ist weit entfernt von der Wirklichkeit. Es wurde daher von vielen Autoren in verschiedenen Aspekten um mehrfache Erweiterungen ergänzt. Oft gehören zu den Erweiterungsaspekten neben Bestelrückständen, Kapazitätsbeschränkungen und Rabatten auch verschiedene Arten des Nachfrageverlaufs. Im Modell von Burwell et al. (1997), welches durch Chang (2013) wegen eines Fehlers verbessert wurde, werden die lineare und die multiplikative Preisabsatzfunktion im Monopol betrachtet. In der Masterarbeit „Bestellmengenoptimierung mit verschiedenen Preisabsatzfunktionen unter der Berücksichtigung von Mengen- und Frachtrabatten“ wurde das Burwell-Chang-Modell um Preisabsatzfunktionen erweitert, die charakteristisch sind für Marktformen, in denen Konkurrenz vorhanden ist (Scholl 2014). Zu den verwendeten Preisabsatzfunktionen gehören die multiplikative unter der Bedingung von Konkurrenz sowie die einfach-

und doppeltgeknickte. Diese Modelle finden in mehreren Marktformen Anwendung und können somit in vielen Unternehmen angewendet werden.

## 2. Algorithmus

Der Algorithmus von Chang (2013) und die Arbeit von Burwell et al. (1997) dienen als Grundlage für die Betrachtung von weiteren Preisabsatzfunktionen. Chang verbesserte den nicht ganz ausgereiften Algorithmus von Burwell et al. im Fall von gemischten Rabatten. Der Algorithmus dient der Lösung des Problems der Mengenrabatte, dabei werden zwei Rabattarten verwendet, die den Einkaufspreis und die Frachtkosten umfassen. Der Algorithmus maximiert den Gewinn. Dabei ist die Nachfrage nach dem Gut preisabhängig und wird hier durch zwei Preisabsatzfunktionen dargestellt. Diese sind die lineare und die multiplikative Preisabsatzfunktion für den Monopolfall. Die Rabattformen sind erstens der Ge-

sammengenrabatt (all-unit discount) und der inkrementelle Rabatt, die jeweils sowohl auf den Einkaufspreis als auch auf die Kosten der Lieferung angewendet werden. Dadurch entstehen vier verschiedene Rabattmöglichkeiten:

- all-unit Rabattstruktur für den Einkaufspreis und die Frachtkosten
- inkrementelle Rabattstruktur für den Einkaufspreis und die Frachtkosten
- all-unit Rabatt für den Einkaufspreis und inkrementeller Rabatt für die Frachtkosten
- inkrementeller Rabatt für den Einkaufspreis und all-unit Rabatt für die Frachtkosten

Damit der Algorithmus den maximalen Gewinn bestimmen kann, müssen folgende Prämissen erfüllt sein:

- Die Nachfrage ist gegeben durch eine Nachfragefunktion und diese ist verkaufspreisabhängig.
- Die Dauer der Bestellung plus Lieferung ist bekannt und konstant.
- Es wird ein Produkt betrachtet.
- Es existieren keine Kapazitätsbeschränkungen.
- Der Planungszeitraum ist unendlich.
- Der Einkaufspreis ist bekannt und mengenabhängig.
- Die Frachtkosten sind bekannt und gewichtsabhängig.
- Das Gewicht der Ware ist bekannt und konstant.
- Die restlichen Beschaffungskosten sind bekannt und konstant.
- Fehlmengen, Produktfehler, verminderte Produktqualität und Nachlieferungen sind nicht erlaubt.
- Die Lagerhaltungskosten sind bekannt und konstant.
- Wertverluste und Entsorgungskosten sind nicht erlaubt.
- Die variablen Marketingkosten sind bekannt und konstant.

Sei  $Q$  die Bestellmenge und  $v$  der Einkaufspreis. Dann stellt Tab. 1 die Rabattstruktur für den Preis des Produktes dar (Burwell et al. 1997: 143 ff.), d. h. die Bestellmenge  $Q$  wird in  $n+1$  Intervalle eingeteilt. Ist  $Q$  in Intervall  $i$ , dann ist der Einkaufspreis  $v_i$ .  $W$  sei das Gewicht der Bestellung. Dann stellt Tab. 2 die Rabattstruktur für den Preis der Lieferung dar, d.h. das Gewicht  $W$

wird in  $l+1$  Intervalle eingeteilt. Ist  $W$  in Intervall  $i$ , dann ist der Einkaufspreis  $Y_i$ .

**Tab.1:** Die Rabattstaffel für den Produktpreis

$i$	$Q$	$v$
0	$0 < Q < q_{v1}$	$v_0$
1	$q_{v1} \leq Q < q_{v2}$	$v_1$
2	$q_{v2} \leq Q < q_{v3}$	$v_2$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$n$	$Q \geq q_{vn}$	$v_n$

**Tab.2:** Die Rabattstaffel für Frachtkosten

$i$	$W$	$Y$
0	$0 < W < X_1$	$Y_0$
1	$X_1 \leq W < X_2$	$Y_1$
2	$X_2 \leq W < X_3$	$Y_2$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$l$	$W \geq X_l$	$Y_l$

Der Produktpreis ist mengenabhängig. Die Frachtkosten sind gewichtsabhängig. Aus den beiden einzelnen Rabattstaffeln kann durch Kombination ein Rabattplan aufgebaut werden mit der Bedingung  $f \leq l + n$  (Tab. 3).

**Tab.3:** Kombinierte Rabattstruktur

$i$	$Q$	$s$
0	$0 < Q < q_{s1}$	$s_0$
1	$q_{s1} \leq Q < q_{s2}$	$s_1$
2	$q_{s2} \leq Q < q_{s3}$	$s_2$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
$f$	$Q \geq q_{sf}$	$s_f$

Im inkrementellen Rabattfall gilt der Rabatt ausschließlich für die Mengen im Intervall, während im Gesamtmengenrabattfall (all-unit discount) der Rabatt für alle gekauften Produkte gilt. Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen, sind zusätzliche fixe Kos-

tenanteile für inkrementelle Rabatte nötig.

## 2.1 Modellbeschreibung

Es gibt Modelle für unterschiedliche Kombinationen von Rabatten auf den Einkaufspreis bzw. auf die Frachtkosten. Allen Modellen gemeinsam ist (a) das Ziel der Gewinnmaximierung, (b) die Bestimmung des optimalen Verkaufspreises  $p$  und der optimalen Bestellmenge  $Q$  und (c) die Berücksichtigung der Nachfragefunktion  $D = D(p)$ . Wir betrachten in diesem Zusammenhang zum ersten Mal Nachfragefunktionen, die sich durch ihre Praxisrelevanz auszeichnen. Sie wurden in der Fachliteratur bisher nicht berücksichtigt. Die Kombinationen bestehen aus (a) inkrementellem Rabatt auf den Einkaufspreis und die Frachtkosten, (b) all-unit Rabatt auf den Einkaufspreis und die Frachtkosten und (c) gemischtem inkrementellem bzw. all-unit Rabatt auf den Einkaufspreis und die Frachtkosten (Burwell et al. 1997).

Grundsätzliche Annahmen, die für alle Rabattfälle gelten: Es wird der Gewinn optimiert, mit den Variablen Verkaufspreis  $p$  und Menge  $Q$ . Die Nachfrage ist eine Funktion des Preises  $p$  mit  $D = D(p)$ .

Folgende Parameter werden für das Grundmodell (Burwell et al. 1997) verwendet:

- $\Pi$  Gewinnfunktion
- $i, j$  Indexe für die Rabattstaffeln
- $C_o$  Bestellkosten
- $C_m$  variable Marketingkosten
- $v_j$  mengenabhängiger Einkaufspreis
- $g$  stückbezogene Frachtkosten ( $g = wY$ )
- $s$  kombinierte Stückkosten ( $s = v + g$ )
- $H$  notwendig für die Beschaffungskosten im inkrementellen Rabattfall
- $Z$  notwendig für die Frachtkosten im inkrementellen Rabattfall
- $t$  Lieferzeit für eine Bestellung
- $r$  Lagerhaltungskosten innerhalb der Lieferung
- $R$  Lagerhaltungskosten nach der Lieferung
- $q_{si}$  Mengenrabattschwelle für den Einkaufspreis
- $q_{vi}$  Mengenrabattschwelle für die kombinierten Einkaufspreise
- $W$  Liefergewicht für eine Bestellung mit der Bestellmenge  $Q$
- $w$  Liefergewicht pro Stück

- $Y$  gewichtsabhängiger Frachtkostenanteil pro Stück
- $X_i$  Gewichtsrabattschwelle für das Gewicht pro Stück für die Frachtkosten  $Y_i$
- $\lambda$  Konvergenzparameter

Für den Fall von fixen Einkaufskosten  
 $s = v + g$  ist der Gewinn für den Käufer:

$$1 \quad \Pi(p, Q) = \left\{ p - s - vrt - C_m - \frac{[H(1+rt) + Z + C_0]}{Q} \right\} D - (H + Z + sQ) \frac{R}{2}.$$

$$2 \quad H = \sum_{b=1}^i (q_{s_b} - 1)(v_{b-1} - v_b).$$

$$3 \quad Z = \sum_{b=1}^i (q_{s_b} - 1)(q_{b-1} - q_b).$$

Das ist so zu verstehen: Für  $s = s_i$  sind  $H$  und  $Z$  zusätzliche Fixkosten auf den Einkaufspreis und die Frachtkosten für den inkrementellen Rabattfall, um diesen richtig darzustellen (Burwell et al. 1997).

Die Ableitung nach  $p$  und  $Q$ :

$$4 \quad \frac{\partial \Pi}{\partial p} = D + \left( p - s - vrt - C_m - \frac{H(1+rt) + Z + C_0}{Q} \right) D'.$$

$$5 \quad \frac{\partial \Pi}{\partial Q} = (H(1+rt) + Z + C_0) \frac{D}{Q^2} - \frac{sR}{2}.$$

Die zweite Ableitung nach  $p$ :

$$6 \quad \frac{\partial^2 \Pi}{\partial p^2} = 2D' + \left( p - s - vrt - C_m - \frac{H(1+rt) + Z + C_0}{Q} \right) D'' < 0.$$

Die Annahme (6) garantiert, dass  $\Pi$  eine konkave Funktion von  $p$  ist, wenn fix ist. Der optimale Wert für  $p$  mit einem fixen Wert für  $Q$  lässt sich durch  $p_{opt}(Q)$  die (= durch die Gleichung) (4) bestimmen. Die Annahme (6) zeigt, dass der optimale Wert  $p_{opt}(Q)$  eine reellwertige Funktion von  $Q$  für die lineare und multiplikative Preisabsatzfunktion ist. Burwell et al. (1997) substituieren die Funktion in Gleichung (1):

$$7 \quad \Pi_1(Q) = \Pi[p_{opt}(Q), Q].$$

Abad (1988) zeigt, dass  $\Pi_1(Q)$  eine konvex-konkave Funktion von  $Q$  ist. Eine konvex-konkave Funktion wie  $\Pi_1(Q)$  hat ihr Optimum entweder im Punkt  $Q = 0$  oder  $Q = Q_{opt}$ , wenn  $Q_{opt} > 0$ . Wenn das Optimum bei  $Q = 0$  ist, ist es nicht profitabel, das Produkt zu kaufen. Weiter nutzen Burwell et al. das iterative Verfahren von Abad, um  $Q_{opt}$  zu finden. So kann  $Q_{opt}$  und der dazugehörige Preis  $p_{opt}(Q_{opt})$  für ein fixes  $s$  gefunden werden. Das iterati-

ve Verfahren, erstmals beschrieben in Abad (1988), verwenden Burwell et al. ebenfalls:

**Schritt 1:**

$$k = 0 \text{ und } Q^0 = \infty$$

**Schritt 2:**

Berechne  $p_{opt}(Q^k)$ , nutze dafür  $\frac{\partial \Pi}{\partial p}$

**Schritt 3:**

$$\text{Berechne } Q^{k+1} = \sqrt{\frac{2(H(1+rt) + Z + C_0)D[p_{opt}(Q^k)]}{sR}}$$

**Schritt 4:**

Wenn  $|Q^{k+1} - Q^k| \geq \lambda$ , dann  $k = k + 1$  und gehe zu Schritt 2.

Im Fall (a) von inkrementellem Produktpreis und inkrementellen Frachtkosten sieht der Algorithmus wie folgt aus:

**Schritt 1:**

Berechne  $Q_{opt}$  und  $p_{opt}$  für jedes  $s_i$  wie oben beschrieben.

**Schritt 2:**

Berechne den Gewinn  $\Pi(p_{opt}, Q_{opt})$  für

jeden gültigen Wert  $Q_{opt}$ ;  $Q_{opt}$  ist gültig, wenn  $q_{s_i} \leq Q_{opt} < q_{s_{i+1}}$  und  $s = s_i$ .

**Schritt 3:**

Die optimale Losgröße und der optimale Preis sind die gültigen  $Q_{opt}$  und  $p_{opt}$ , die zu dem größten positiven Gewinn aus Schritt 2 gehören. Wenn kein positiver Gewinn gefunden werden konnte, dann ist die beste Lösung  $Q = 0$  (Burwell et al. 1997).

Die zusätzlichen Fixkosten  $H$  bzw.  $Z$  auf den Einkaufspreis und die Frachtkosten sind im Falle des inkrementellen Rabattes ungleich 0 und werden deshalb nach den Gleichungen (2) und (3) berechnet.

Im Fall (b) von all-unit Rabatt sowohl auf den Einkaufspreis als auch auf die Frachtkosten sieht der Algorithmus wie folgt aus:

**Schritt 1:**

Für jede Kostenkombination  $s = s_i$  berechne  $Q_{i,opt}$  unter der Annahme eines fixen  $s$ . Identifiziere den größten Indexwert  $I$ , bei dem  $q_{s_i} \leq Q_{opt} < q_{s_{i+1}}$  ist.

**Schritt 2:**

Berechne  $\Pi(p_{opt}, Q_{opt})$  für  $s = s_i$ .

**Schritt 3:**

Für jedes  $j > i$  berechne  $\Pi(p_{opt}(q_{s_j}), Q_{opt})$  mit  $s = s_j$ .

**Schritt 4:**

Vergleiche die Gewinnlevel aus Schritt 2 und 3. Wähle das  $Q$  aus, welches den größten Gewinn erzeugt. Falls dieser negativ sein sollte, kaufe das Produkt nicht.

Die zusätzlichen Fixkosten  $H$  bzw.  $Z$  auf den Einkaufspreis und die Frachtkosten sind im Falle des all-unit Rabattes beide gleich 0 (Burwell et al. 1997).

Im Fall (c) des gemischten inkrementellen und all-unit Rabattes auf den Einkaufspreis und die Frachtkosten sieht der Algorithmus wie folgt aus:

**Schritt 1:**

Berechne  $p_{opt}, Q_{opt}$  und  $\Pi(p_{opt}, Q_{opt})$  für jeden Index  $I$  in der kombinierten Rabattstruktur.

**Schritt 2:**

Sortiere die Ergebnisse aus Schritt 1 in gültige und ungültige Ergebnisse.

### Schritt 3:

Finde den größten  $\Pi(p_{opt}, Q_{opt})$  aus den gültigen Ergebnissen und betittle ihn mit  $\Pi^L(p_{opt}, Q_{opt})$ .

### Schritt 4:

Die ungültigen Ergebnisse aus den Indexen  $j$  werden mit  $\Pi^L(p_{opt}, Q_{opt})$  verglichen. Ist  $\Pi(p_{opt}, Q_{opt}) > \Pi^L(p_{opt}, Q_{opt})$ , dann nimm  $q_{s_j}$  und berechne  $p_{opt}(q_{s_j})$  und  $\Pi(q_{s_j}, p_{opt}(q_{s_j}))$ , sonst ignoriere  $q_{s_j}$  (Chang 2013).

### Schritt 5:

Vergleiche  $\Pi^L(p_{opt}, Q_{opt})$  mit allen  $\Pi(q_{s_j}, p_{opt}(q_{s_j}))$  aus Schritt 4 gefundenen. Wähle das  $Q$  mit dem größten Gewinn.

Im Fall des gemischten Rabattes ist  $H = 0$  oder  $Z = 0$ . Das bedeutet, wenn der Einkaufspreis all-unit Rabatt  $H = 0$  beinhaltet, beinhalten die Frachtkosten inkrementellen Rabatt.  $Z$  wird bestimmt durch (3).

## 2.2 Modifikation durch die lineare Nachfragefunktion

Das verwendete lineare Modell mit Konkurrenz sieht wie folgt aus:

$$8 \quad D(p) = a - bp + c\bar{p} \quad a, b, c > 0, p \in \left(0, \frac{a+c\bar{p}}{b}\right).$$

Der Parameter  $a$  stellt die Sättigungsmenge,  $b$  den Anstieg  $\bar{p}$  den Konkurrenzpreis und  $c$  die Wirkung des Konkurrenzpreises dar. Die Gewinnfunktion für den Fall von fixer Kostenkombination  $s$  und der linearen Preisabsatzfunktion ist im Folgenden dargestellt, dabei ist immer vorausgesetzt  $p, Q > 0$ :

$$9 \quad \Pi_i(Q, p) = \left\{p - s - vrt - C_m - \frac{[H(1+rt)+Z+C_0]}{Q}\right\} (a - bp + c\bar{p}) - (H + Z + sQ) \frac{R}{2}.$$

Vorausgesetzt (Scholl 2014: 60 ff.):  $a, b, (H(1+rt) + Z + C_0) > 0$  und  $a + c\bar{p} > b(s + vrt + C_m)$ . Dabei verändern sich die zusätzlichen fixen Kosten für den inkrementellen Rabatt nicht. Aus Gleichung (4) wird

$$10 \quad p = \frac{a+c\bar{p}}{2b} + \frac{1}{2} \left( s + vrt + C_m + \frac{H(1+rt)+Z+C_0}{Q} \right).$$

Der optimale Preis ist  $p_{opt}$ . Annahme (10) zeigt eine reelle Funktion in Abhängigkeit von  $Q$  und mit  $p = p_{opt}(Q)$ . Wird nun  $p_{opt}(Q)$  in Gleichung (1) substituiert, ergibt sich  $\Pi_i(p_{opt}(Q), Q)$  (Burwell et al. 1997, Abad 1988). Für das lineare Modell mit Konkurrenz heißt das

$$11 \quad \Pi_1(Q) = \frac{b}{4} \left( \frac{a+c\bar{p}}{b} - s - vrt - C_m - \frac{H(1+rt)+Z+C_0}{Q} \right)^2 - (H + Z + sQ) \frac{R}{2}.$$

Aus Gleichung  $\frac{d\Pi_1(Q)}{dQ} = 0$  wird im linearen Fall mit Konkurrenz

$$12 \quad Q = \sqrt{\frac{b(H(1+rt)+Z+C_0) \left( \frac{a+c\bar{p}}{b} - s - vrt - C_m - \frac{H(1+rt)+Z+C_0}{Q} \right)}{sR}}.$$

$Q$  ist eindeutig wenn  $c\bar{p} + a \neq b(s + vrt + C_m)$ , die Beweisführung zeigt aber auch, dass  $c\bar{p} + a > b(s + vrt + C_m)$  und somit  $Q$  immer eindeutig ist.

## 2.3 Modifikation durch die multiplikative Nachfragefunktion

Das verwendete multiplikative Modell mit Konkurrenz sieht wie folgt aus:

$$13 \quad D(p) = a \left( \frac{p}{\bar{p}} \right)^b \quad \text{mit } a, b, p, \bar{p} > 0, b \neq 1 \text{ und } p < \frac{a}{b}.$$

Der Parameter  $b$  gibt die Preiselastizität an und  $a$  stellt die minimale Absatzmenge dar. Gleichung (14) ist die Gewinnfunktion für den Fall von fixer Kostenkombination  $s$  und der multiplikativen Preisabsatzfunktion, dabei ist immer vorausgesetzt  $p, Q > 0$ :

$$14 \quad \Pi_i(Q, p) = \left\{p - s - vrt - C_m - \frac{[H(1+rt)+Z+C_0]}{Q}\right\} a \left( \frac{p}{\bar{p}} \right)^b - (H + Z + sQ) \frac{R}{2}.$$

Vorausgesetzt  $(H(1+r) + Z + C_0)$ ,  $(s + vrt + C_m) > 0$ ,  $b > 2$  ist erfüllt (Scholl 2014: 60 ff.). Dabei verändern sich die zusätzlichen fixen Kosten für den inkrementellen Rabatt nicht. Aus Gleichung (4) wird

$$15 \quad p = \frac{b}{b-1} \left( s + vrt + C_m + \frac{H(1+r) + Z + C_0}{Q} \right)$$

Der optimale Preis ist  $p_{opt}$ . Annahme (15) zeigt eine reelle Funktion in Abhängigkeit von  $Q$  und mit  $p = p_{opt}(Q)$ . Wird nun  $p_{opt}(Q)$  in Gleichung (1) substituiert, dann ergibt sich  $\Pi_1(p_{opt}(Q), Q)$ . Für das multiplikative Modell mit Konkurrenz heißt das

$$16 \quad \Pi_1(Q) = \frac{a}{b \left( \frac{a}{p} \right)^b} \left( s + vrt + C_m + \frac{H(1+r) + Z + C_0}{Q} \right) \left( \frac{b}{b-1} \right)^{b-1} - (h + Z + sQ) \frac{R}{2}$$

Aus Gleichung  $\frac{d\Pi_1(Q)}{dQ} = 0$  wird im multiplikativen Fall mit Konkurrenz

$$17 \quad Q = \sqrt[2]{ \frac{2(H(1+r) + Z + C_0)}{sR} \frac{a}{p} \left( \frac{b}{b-1} \left( s + vrt + C_m + \frac{H(1+r) + Z + C_0}{Q} \right) \right)^b }.$$

Tab. 4: Variablen mit mengenabhängigen Preisen

$l$	$Q$	$s$	$v$	$g$	$H$	$Z$
0	$1 < Q < 500$	5,50	4,50	1,00	0,00	0,00
1	$500 \leq Q < 1.000$	5,30	4,50	0,80	0,00	99,80
2	$1.000 \leq Q < 1.250$	4,80	4,00	0,80	0,00	99,80
3	$1.250 \leq Q < 10.000$	4,60	4,00	0,60	0,00	349,60
4	$10.000 \leq Q$	4,30	3,70	0,60	0,00	349,60

Tab. 5: Werte für die Nachfragefunktionen

Werte für die lineare Funktion:	Werte für die multiplikative Funktion:
$\bar{p} = 9,50$	$\bar{p} = 9,50$
$c = 589,47$	$b = 3$
$b = 900$	$a = 5.000,00$
$a = 6.800,00$	

Tab. 6: Die optimalen Gewinne im Überblick

Nachfragefunktion	Gewinn $\Pi$	Preis $p$	Menge $Q$	Index
Multiplikativ	16.237,30	8,8738	1.999	3
Linear	12.106,09	9,8955	1.509	1

### 3. Fallbeispiele

Das Fallbeispiel zeigt den Einsatz des Algorithmus mit Verwendung der linearen und multiplikativen Preisabsatzfunktion mit Konkurrenz. Die Berechnungen wurden mit dem Programm MATLAB R2013a mit der Version: 8.1.0.604 (R2013a) durchgeführt.

Das Beispiel ist in Anlehnung an Chang (2013) gewählt worden und stellt einen gemischten Rabattfall dar.

Die Tab. 4 zeigt die Preise für die variablen mengenabhängigen Parameter  $s$ ,  $v$ ,  $g$ ,  $H$  und  $Z$  für das Beispiel. Im Beispiel sind somit 5 verschiedene Mengenooptionen enthalten, in den Indizes 0–4.

Die konstanten Parameter für das Beispiel sind:

- $R = 0,40$
- $r = 0,20$
- $t = 0,02$
- $C_0 = 250,00$
- $C_m = 1,00$

Die Werte für die einzelnen Nachfragefunktionen sind gesondert in Tab. 5 dargestellt. Sie sind frei gewählt.

In Tab. 6 findet man die optimalen Gewinne für die beiden Nachfragefunktionen. Abb. 1 zeigt den Gewinn in Abhängigkeit von der Bestellmenge für beide Nachfragefunktionen.

### 4. Praxisbezug

Der Algorithmus aus Kapitel 2 berücksichtigt verschiedene Kosten: Bestellkosten, variable Marketingkosten, mengenabhängiger Beschaffungspreis, Lagerhaltungskosten innerhalb der Lieferzeit und danach und gewichtsabhängige Frachtkosten. Weiter sind 4 Kombinationen von Rabattarten enthalten, der Gesamtmengenrabatt (all-unit) und der inkrementelle Rabatt, welche jeweils auf die Frachtkosten und den Beschaffungspreis angewendet werden können. Mit Hilfe des Algorithmus wird der Gewinn optimiert und der Verkaufspreis berechnet. Der Gewinn wird mithilfe einer preisabhängigen Nachfrage optimiert; dazu wurden vier Varianten von Nachfragefunktionen genutzt: die lineare und multiplikative Preisabsatzfunktion, jeweils mit und ohne Konkurrenz. Der beschriebene Algorithmus geht



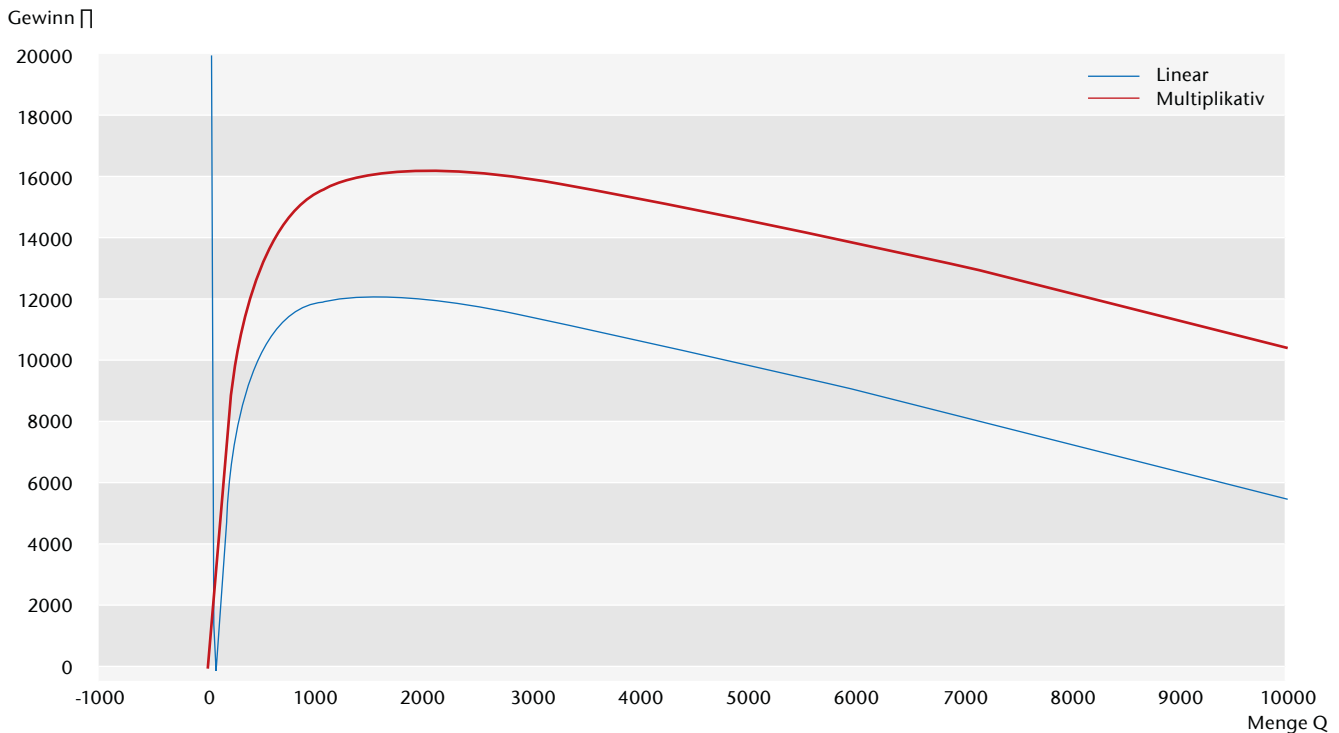


Abb. 1) Gewinn in Abhängigkeit von der Bestellmenge

von Voraussetzungen aus, die in der Praxis nicht immer erfüllt sind. Dazu zählen: Es wird ausschließlich ein Produkt betrachtet. Es handelt sich um ein statisches Modell, d. h., die Kosten ändern sich im Zeitablauf nicht. Das Lager kann jede Liefermenge aufnehmen (theoretisch unendliche Lagerkapazität). Fehlmengen, Produktfehler, verminderte Produktqualität, Schwund, Entsorgungskosten und Nachlieferungen werden im Algorithmus nicht berücksichtigt. Der Verkaufspreis wird mit Hilfe des Algorithmus berechnet. Produktionskosten werden nicht beachtet, sodass eine Anwendung nur für Güter ohne Weiterverarbeitung sinnvoll erscheint. Der Algorithmus bestimmt den Verkaufspreis und die Rabatte auf den Einkaufspreis und auf die Frachtkosten. Produkte, die einer gesetzlichen Preisbindung unterliegen oder bei denen mögliche Rabatte eingeschränkt sind, sind ungeeignet. Einzelne Güter unterliegen der gesetzlichen Preisbindung in Deutschland. Hierzu zählen unter anderem verlags- und buchhandelstypische Produkte und Tabakwaren (§ 2 BuchPrG Abs. 1 Nr. 3 und 4; § 26 TabStG Abs. 1). Durch den Wegfall des Rabattgesetzes sind Unternehmen weitestgehend frei in der Vergabe von Rabatten (§ 1 GWB Abs. 2). Der Algorithmus ist für

die Verwendung im Bereich der Distribution gedacht (Großhandel und Einzelhandel).

Verschiedene Studien beschreiben den Bedarf von Handelsunternehmen: Die Studie von Fauser et al. (1995), in der 81 Unternehmen befragt wurden, beschreibt das Handelslager vor allem im Hinblick auf die Bestellmengen und Bestellzeitpunkte. Die Studie zeigt, dass 81 % der befragten Unternehmen eine EDV-gestützte Lagerführung verwenden. Die Hälfte der befragten Händler führen zwischen 5.000 und 50.000 Güter. Bei 50 % der Befragten ist die Nachfrage deterministisch, also im Voraus bekannt, und etwa 38 % davon besitzen gleichzeitig eine relativ gleichbleibende Nachfrage. Des Weiteren gaben die Unternehmen an, nur geringe Nachfrageausfälle durch Lieferschwierigkeiten zu haben, aber eben auch keine genaue Erfassung durchzuführen. Sammelbestellungen nutzen 40 % der Händler, eine Kombination aus Sammel- und Einzelbestellungen ist bei 28 % zu beobachten und Einzelbestellungen werden hingegen von 32 % der Händler verwendet. Weiter ist die Lagerkapazität als ein sehr wichtiger Aspekt beschrieben worden. Die Untersuchung zeigt: Händler verwenden vorwiegend statische Bestellmengenmodelle in der

Praxis. Fauser et al. empfehlen Handelsunternehmen mit einer großen Anzahl an Produkten, nur für einen Teil der Produkte aufwendige Verfahren zu nutzen.

Also können etwa 19 % der befragten Unternehmen den vorgestellten Algorithmus anwenden, weil die Voraussetzung einer bekannten und gleichbleibenden Nachfrage gegeben ist. Für die einzelnen Produkte im Sortiment kann man davon ausgehen, dass die Lagerkapazität ausreicht, um die Bestellmenge zu lagern.

In Zusammenhang mit dem dargestellten Algorithmus wurden in der Fachliteratur bisher zwei Preisabsatzfunktionen für monopolistische Märkte untersucht. Wir haben in Kapitel 2.2 und 2.3 die Darstellung um zwei Nachfragefunktionen erweitert. Die Erweiterung bezieht das Polypol und das Oligopol auf unvollkommenen Märkten ein. Es handelt sich um häufige Marktformen und einen großen Einsatzbereich (Ott 1997: 170).

Eine weitere Studie aus dem Lebensmittelbereich beschreibt eine Befragung von 23 Herstellern zu deren Vertragsvereinbarungen mit ihren Kunden und zeigt, dass 75 % der Händler und Hersteller einen Rahmenvertrag über die Dauer von einem Jahr abschließen (Schulze 1998: 257). In

diesen Rahmenverträgen sind zu 95 % bereits Preise und Rabatte und zu 90 % Funktionsrabatte enthalten, dabei betrifft diese Studie der Funktionsrabatte unter anderem den logistischen Bereich (Schulze 1998: 65–66). Weiter sind wie oben beschrieben zumeist Mengen- und Lieferrabatte inbegriffen. Im beschriebenen Algorithmus sind also viele wichtige Aspekte aus Rahmenverträgen der betrieblichen Praxis enthalten.

### 5. Zusammenfassende Schlussbetrachtung und Ausblick

Die Nutzung eines Materiallagers setzt eine Bestellpolitik voraus, die unter gegebenen Bedingungen mit quantitativen Methoden untersucht werden kann. Der in dieser Arbeit vorgestellte Algorithmus dient der Optimierung von Bestellmengen. Der Algorithmus wurde von Burwell et al. entwickelt und von Chang korrigiert. Diese Untersuchung bezieht sich auf die lineare und multiplikative Preisabsatzfunktion im Konkurrenzfall. Durch unsere Modifikation des Algorithmus können Marktformen einbezogen werden, die zuvor nicht inbegriffen waren (Polypol und Oligopol). Das Modell wird so praxisnäher.

Der um weitere Preisabsatzfunktionen ergänzte Algorithmus wird beispielhaft im Kapitel Fallbeispiele vorgeführt. Die Beispiele zeigen, dass die untersuchte multiplikative und auch die lineare Funktion in den Algorithmus integriert werden können.

Die Diskussion der Anwendbarkeit in Kapitel 4 zeigt, dass die praktische Verwendung des Algorithmus möglich ist. Die Voraussetzungen sind aber in der Praxis nicht immer gegeben. Eine weitere Verbesserung könnte die Einführung von Kapazitätsrestriktionen sein. Des Weiteren werden viele Einflussfaktoren wie zum Beispiel die Produktqualität, markenpolitische Aspekte, Präferenzen und das Konkurrenzverhalten zu wenig in Preisabsatzfunktionen abgebildet.

## LITERATUR

Abad PL (1988) Determining Optimal Selling Price and Lot Size When the Supplier Offers All-Unit Quantity Discounts. *Decis Sci* 19(3):622–634. doi: 10.1111/j.1540-5915.1988.tb00290.x

Burwell TH, Dave DS, Fitzpatrick KE, Roy MR (1997) Economic lot size model for price-dependent demand under quantity and freight discounts. *Int J Prod Econ* 48(2):141–155. doi: 10.1016/S0925-5273(96)00085-0

Chang H (2013) A note on an economic lot size model for price-dependent demand under quantity and freight discounts. *Int J Prod Econ* 144(1):175–179. doi: 10.1016/j.ijpe.2013.02.001

Fausser M, Leeger T, Morlock M (1995) Einsatz von Lagerhaltungsmodellen bei Handelsunternehmen. *OR Spektrum* 17(1):31–35. doi: 10.1007/BF01719729

Ott AE (1997) Grundzüge der Preistheorie, 3rd edn. *Grundriß der Sozialwissenschaft*, vol 25. Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen. ISBN: 978-3-525-10519-1

Scholl V (2014) Bestellmengenoptimierung mit verschiedenen Preisabsatzfunktionen unter der Berücksichtigung von Mengen- und Frachtrabatten. Masterarbeit, Technische Hochschule Wildau

Schulze M (1998) Nachfragemacht im Lebensmitteleinzelhandel. Ökonomische und kartellrechtliche Aspekte. *Kasseler Wirtschafts- und Verwaltungswissenschaften*, vol 8. Deutscher Universitätsverlag, Wiesbaden. ISBN: 978-3-8244-6770-9. doi: 10.1007/978-3-322-95252-3

## AUTOREN

**Prof. Dr. rer. pol. Matthias Forster**  
Technische Hochschule Wildau  
Betriebswirtschaftslehre mit dem Schwerpunkt Planung inner- und außerbetrieblicher DV-gestützter logistischer Prozesse

**Victoria Scholl, M.A.**  
Ehemalige Studentin der Technischen Hochschule Wildau

E-Mail für Korrespondenz:  
matthias.forster@th-wildau.de



# What Drives the Success of Pop-Up Stores?

Sandra Haas\*, Lisa Schmidt

## Abstract

Pop-up stores are considered an alternative or a further development of the pioneering flagship store concept. They describe a temporary store concept that displays products in an unexpected way to attract the consumers' attention (Hutter 2013). So far, this store format has mainly been applied to the USA and the UK, and has been insufficiently studied. This paper summarizes interim results of a pilot study on pop-up stores, which focuses on identifying factors for their success.

## Zusammenfassung

Pop-up Stores stellen eine konzeptionelle Weiterentwicklung von Flagship Stores dar. Pop-Up Stores beschreiben ein zeitlich limitiertes Storekonzept, bei dem Produkte in einer ungewöhnlichen und finanziell erschwinglichen Art und Weise dem Kunden präsentiert werden (Hutter 2013). Bisher wird dieses neuartige Storekonzept überwiegend in den USA und in UK praktiziert und wissenschaftlich diskutiert. Der vorliegende Beitrag fasst erste Zwischenergebnisse einer Pilotstudie zu den Erfolgsfaktoren von Pop-up Stores zusammen.

## 1. From Flagship Store to Pop-Up Retail

Nowadays, many firms experience changes in their business field, as the Web 2.0 increased competition and changed the buying behavior.

Consumers expect accessible brands that enable everything to be at their fingertips. The increase in "show-rooming," or when consumers compare prices online while browsing in-store, is a sign that customers are engaging with the multi-channel shopping approach" (Subramanian 2014).

Against this background, firms introduced multi-channel retailing concepts (use of a variety of channels, like stationary retail stores, online stores, mobile stores, mail order) to offer more buying opportunities and to meet novel customer preferences (Baumgarth & Kastner 2012). They also try to win and retain customers by delivering buying experiences that exceed the customers' expectations. For this purpose, so-called flagship stores were opened across major cities in the world. Hereby, companies locate unique, exclusive and large-ar-

ea stores, which offer a substantial assortment of their products (Gursch 2013). Being managed under own command or by a franchisee, those stores are characterized by an elaborate architecture and presentation of products (Keller 2013). Flagship stores are predominant among more expensive and upmarket brands, including *Apple*, *Abercrombie & Fitch*, *Ralph Lauren*, *Prada* or *Fendi*. Those companies cannot only locate flagship stores in high-quality places, but can also afford opening stores in multiple cities or countries, and, particularly, continents (Farfan 2015, Lomas 2015). As a flagship store represents a company's commitment, as well as self-confidence, and attracts the customers' attention, more and more companies are extending their physical presence globally. Stores become more multi-variant and professional, representing an important means in the competitive and strategic context (Lehmann 2010, Di Somma 2014):

- as a form of experiential marketing, flagship stores allow customers to interactively experience brands

and help to establish an emotional bonding to it (Lehmann 2010, Di Somma 2014).

- within flagship stores, companies have absolute control over store-related marketing activities. Besides, there are no competing products within the store. Although customers hardly ever purchase products directly in the flagship store, their subconsciousness invokes the emotional bonding that was created in the store. There is a significant chance that those customers will pick brands, which they experienced in such stores, at later buying opportunities. This also underlines the obvious advertising effect of a flagship store (Krug 2002).
- Flagship stores serve as a field for research, as the appeal and acceptance of new products can be measured within such stores (Lehmann 2010). Stores may also function as a "platform" to intensify brand awareness and loyalty (Esch et al. 2014, Hellmann & Pichler 2005).

\* corresponding author

However, these advantages are offset by high costs (Krug 2002). Also, many companies use flagship stores as a more continuous form of experiential marketing, which consequently makes them too predictable for customers. Today, certain customers might view predictability as a weakness. Therefore, companies must try to offer consumers innovative concepts without changing their brand identity (Hutter 2013, Kapferer 2008). Against this background, smaller retailers from the USA invented a fresh experiential marketing format based on scarcity marketing, exclusiveness and surprise (Niehm et al. 2007). As a conceptual way between flagship stores and temporary presentations at the point of sale (POS), the so-called pop-up retail

services were created (*Pop Up Republic* 2015, Winter 2009). This paper summarizes interim results of a pilot study on pop-up stores, which focuses on identifying factors that influence and boost their success. So far, pop-up stores have not been intensively researched within the academic field. Based on an analysis of the existing findings on this topic, factors for success will be derived and further verified by looking at three pop-up stores, which opened in Germany (case study method).

## 2. Pop-Up Retail

**Definition:** According to *Pop Up Republic*, the term “pop-up retail” refers to a shop “(...) that opens in a tempo-

rary location and is intended to operate for a short period of time” (*Pop Up Republic* 2015). The manager of *Vacant*, Russell Miller, first developed this idea in 1999 in Tokyo, when he noticed an enormous interest in his clothing collections after having announced the short-term closure of his shop. Miller decided to entirely close the permanent shop and reopen it intentionally in changing places. His idea paid off, when the store opened for only few weeks in New York City in 2000, and *Vacant* was able to acquire more customers than ever before (Hutter 2013). Despite an increased application of those itinerant or guerilla stores, a standardized definition of pop-up stores is not yet existent in literature. Referring to Hutter (2013), pop-up stores are temporary shopping opportunities that display products and services in a surprising way in order to attract the consumers’ attention. Sometimes even considered as a form of art, potential customers can experience a surprising and exclusive entertainment or supporting program (events including art & music, movies, shows, free food etc.) in the pop-up store. Marketing experts even claim that pop-ups cannot reach the desired success without supporting programs, as these are most likely to encourage the customer to revisit the store (Baumgarth & Kastner 2012, Picot-Coupey 2014). Pop-up stores particularly differentiate themselves from flagship stores concerning accessibility, equipment and strategic purpose. As they only last for a period of four days to five months, consumers can either find them by accident or visit them intentionally (Picot-Coupey 2014). The fact that such stores operate on the principle “first come, first serve”, directly aims at the consumers’ curiosity, ensures that they will retell the experience to their family and friends, and provokes more multi-sensual experiences (Hurth & Krause 2010).

**Pop-Up Stores in the USA and in Germany:** Due to the great success of the first pop-up store in the USA, other firms tried to adopt the concept. The Japanese avant-garde fashion label *Comme des Garçons* is often viewed as the pop-up pioneer that made the retail concept famous. It opened its guer-

**Tab. 1:** Strategic approach of pop-up stores (own work based on Baumgarth & Kastner 2012, Clark 2011, Hurth & Krause 2010: 35, Kastner 2015, Niehm et al. 2007: 3, Zanger 2008: 81)

<p><b>Short-term, distribution-oriented pop-up stores</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Temporary maximization of operative turnover through direct in-house sales</li> <li>■ Sales of former collections by offering price discounts or volume discounts</li> <li>■ Earnings through generating prospective customers due to recommendations</li> <li>■ Strengthening relationships to existing customers</li> </ul>
<p><b>Long-term, communication-oriented pop-up stores</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Inspiration, enthusiasm and curiosity of store visitors</li> <li>■ Involvement and interaction of store visitors</li> <li>■ Generating response and feedback</li> <li>■ Emotionalizing purchases/emotional bonding of customers</li> <li>■ Brand reinforcement (increase of brand equity, brand awareness and brand identity)</li> <li>■ Brand differentiation due to authentic and non-duplicable features</li> <li>■ Benefits in PR and media communication without immense marketing expenses</li> </ul>
<p><b>Others</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Knowledge about customers’ preferences through immediate product tests in the store</li> <li>■ Testing new store formats and locations</li> <li>■ Market entry mode which is flexible, cost-effective and relatively non-binding</li> <li>■ Acquisition of new customers or increase of brand loyalty</li> </ul>

rilla store for one year in the backyard of a former bookshop in Berlin-Mitte in 2004. The rundown appearance of the shop was kept in order to revolutionize the store concept. Between 2004 and 2009, the company opened 37 stores worldwide promoting them via word-of-mouth and posters (Cradle-Point Technology 2012, Hutter 2013, Picot-Coupey 2014). The retail concept quickly became popular, and, thus, also major corporations like Toys “R” Us, Walmart, Macy’s, Gucci and Procter & Gamble integrated pop-up stores in their marketing mix. Today, they use pop-up stores in particular to launch new products or to celebrate company anniversaries (CradlePoint Technology 2012).

Expanding the concept to Europe, major corporations like *Tommy Hilfiger* or *Ikea*, as well as smaller firms captured cities like Zurich, Paris, Amsterdam or London. According to the *Centre for Economics and Business Research*, pop-up retail generated a turnover of almost € 3 billion and employed more than 23,000 people in 9,400 pop-up shops in the UK (Davis & Evans 2014). Despite the success of pop-up stores in the USA and the UK, there are only a few examples of major corporations in Germany: *Hennes & Mauritz* promoting its “Go Green” concept, or Opel displaying its new model Adam, where customers could only have a look at the model, but not buy it (Gondorf 2015, Neuhaus 2013). Like in the USA, pop-up architects, like Go-PopUp, Pop Up Berlin and Rocket Spaces, assist companies with the establishment and design of their stores. Those companies only specialize in locations like Berlin, Munich, Hamburg, Cologne and Frankfurt (Go-PopUp 2015, Rocket Spaces 2015).

**Strategic Approach of Pop-Up Stores:** Firms may launch such stores for different purposes (Tab. 1).

**Factors Influencing the Success of Pop-Up Stores:** According to Melissa Gonzalez, manager of the pop-up architects *The Lionesque Group*, an average pop-up store in the USA enjoys an increase of 35 % in sales from the opening to six months after the closing. Moreover, half of the stores experience a 30 % increase in social media activities (Leinbach-Reyhle 2014). But

what factor is the key to success? By reviewing literature on pop-up stores, six indicators were identified:

- Despite the opinion of marketing practitioners that pop-up stores are feasible for all product categories, experts agree on the fact that lifestyle and luxury goods with high involvement products are predestined for a store’s success (Kastner 2015).
- Millennials (= demographic cohort characterized by birth years between 1980s and the 2000s) are the target audience for this novel store concept, as they are more likely to spend their disposable income on fashion and lifestyle products, but are also very receptive to promotional events, where goods are given away for free (Reisenwitz & Iyer 2009). Also, pop-up retail uses inexpensive marketing measures for promotion, which particularly attracts the younger generation (like word-of-mouth, online or social media marketing (Gursch 2013).
- Pop-up stores must create unexpected, extravagant experiences for customers. Nowadays, German customers increasingly demand less expensive store equipment that is also environmentally sustainable (Lehmann 2010). Pop-up stores satisfy this demand, as they abandon elaborate interior decoration and keep expenditures low. The more a pop-up store differs from conventional frameworks, such as location, interior decoration or design, the more it appears to be unexpected, and, thus, surprising (Baumgarth & Kastner 2012, 2012). Besides, the location of the store must differ by offering store events, which are highly attractive to the target group. Programs shall further convince potential customers to revisit the store at a later date, retell their experiences or purchase the brand’s products via other channels (online shop, supermarket or flagship store) (Hurth & Krause 2010, Picot-Coupey 2014).
- Sales concepts of pop-up stores include elements of scarcity mar-

keting (Gursch 2013). Hereby, an artificial shortage (of supply or opportunities to participate) is created that stimulates feelings of fear of shortage and motivates customers to visit the store or buy “limited” items (Trend Marketers 2015).

- The fit is it! First, it is important to find a location that fits the target group. Shops should be located in “trendy” urban places in fashion capitals. Second, literature highlights a fit between the brand and the pop-up store concepts. Even if the company targets millennials and the store is located in a shopping location, it is still the brand concept that influences the store’s performance in the end (Neuhaus 2013).
- Because of the temporary factor of the format, companies must either have advanced brand awareness and a strong brand identity among its target group, or a distinct innovative power (strong brands, see Neuhaus 2013).

### 3. Methodological Approach

In order to learn more about success factors of pop-up stores, a multiple case study approach was applied. Herewith, the before-mentioned theoretically based factors will be verified on the basis of real cases, and, if appropriate, even strengthened by new findings (Wrona 2005). Our case study analysis follows the research approach by Eisenhardt (1989), which centralizes on developing theories on the basis of case studies (Wrona 2005). With the purpose of the analysis in mind, we searched for three relevant cases of pop-up stores in Germany. Without an official list of marketers using pop-up stores in Germany, the selection is based on a methodical review of websites from pop-up architects or retailers, social media data (social networking pages on *Facebook*, *Twitter* and *Instagram*), and a visit to the pop-up store of Ben & Jerry’s. In order to gain as much information as possible on each case, we practiced a multiple data collection of interviews of store managers, webpages of the respective retailers,

online publications on *Facebook*, *Twitter* and *Instagram* and on-site observations.

#### 4. Results and Discussions

The selected companies *s.Oliver*, *Ben & Jerry's* and *Ace & Tate* will be briefly introduced, followed by an explanation of how they implemented the pop-up store format

##### 4.1 Case 1: Pop-Up Store of *s.Oliver*

**Introduction of the Company:** The German fashion company *s.Oliver* was founded in 1969 in Würzburg. With more than 3,000 shops in 35 countries worldwide, *s.Oliver* established itself as one of the most known and highest selling fashion labels in Europe (*s.Oliver* 2015a, Brandmeyer Markenberatung 2015). The firm sells apparel and accessories branded under several sub-labels, and aims at every age group without limitation. They promote their brand via a 360° marketing mix, including TV advertisements, online and viral marketing and flagship stores. (*s.Oliver* 2015a).

**Pop-Up Store:** In order to attract the younger customers' attention and promote their sub-brand *s.Oliver Denim*, the company opened a pop-up store in 2015 in Berlin (Reudenbach 2015). Lasting only 65 days, from 19 January to 25 March 2015, the 100 m<sup>2</sup> fashion store was located in Oranienburger Straße 87-89 in Berlin-Mitte. Due to the fashion weeks in Berlin and Amsterdam, another store was opened in Amsterdam. With the denim collection for an urban and young target audience, a limited t-shirt and denim Pop-up Store Edition with various prints and washes under the slogan: Be Yourself, Be Denim was sold. The store design was kept simple and focused on denim as a special fabric using blue lights on the outside and plain white interior decoration with neon tubes reminiscent of a fabric building. The firm adjusted the store's design to the younger generation's trend to furnish a room in an urban, clear and modest way.

Aside from selling, the location was used for events with local artists and musicians every Friday evening. The

opening of the store was celebrated with a red carpet event to which several German celebrities, including Cosma Shiva Hagen, Natalia Avelon and Thore Schölermann, who are all predominantly popular with young adults, were invited. Some of them posted their experiences of the launch party on their social networks, contributing thus to a reinforced notice of the store. The urban graffiti artist Steven Karlstedt supplied further entertainment by spraying special and unique jute bags for the "trendy" urban young audience (*s.Oliver* 2015b). The promotion of the store included advertisements in newspaper and below-the-line measures (on partners' websites of their independent sub-labels *Comma* and *Liebeskind*; social media marketing) (*s.Oliver* 2015b). The *s.Oliver* pop-up store was established as a short-term, distribution-oriented format (see table 1), in which they aimed at strengthening relationships to existing customers. Based on the focus of limited editions, one may assume that they wanted to increase brand sales through direct in-house sales.

##### 4.2 Case 2: Pop-Up Store of *Ben & Jerry's* Movie Nights Tour 2015

**Introduction of the Company:** The *Ben & Jerry's* Homemade Holdings Inc. was formed in 1978 in Burlington, Vermont. The company produces and sells fair-trade, premium ice cream, frozen yoghurt and sorbet, abandoning genetically modified ingredients. Today, *Ben & Jerry's* sells 60 flavors to approximately 30 countries worldwide. The ice cream manufacturer is known worldwide for its socially responsible corporate image and commitment to climate issues. Its target group consists of (younger) adults who are willing to pay more for high-quality ice cream or want to support a company focusing on social and environmental responsibility. *Ben & Jerry's* apply broad marketing activities to reach their target group (sponsorship through the *Ben & Jerry* Foundation, online advertising, social media marketing, television or cinema advertisements). They regularly conduct annual events, where customers can try se-

lected flavors for free ("*Ben & Jerry's* Bus Tour") (*Ben & Jerry's* 2015).

**Pop-Up Store:** This year, the premium ice cream manufacturer conducted the "*Ben & Jerry's* Movie Nights Tour 2015". Lasting from July 5<sup>th</sup> to 21<sup>st</sup>, 2015, the pop-up tour took place in eleven major German cities, as well as in Vienna and Zurich. On the tour, a colorful vintage bus toured from city to city and served three flavors for free to 1,000 visitors. All the events were located in rather rundown places, including factory sites, artificial beach bars and inner yards of nightclubs. The "*Movie Nights* Tour 2015" served as a promotional campaign to convince a wider audience of active climate protection. As the company primarily targets young adults, it addresses an audience that can actively participate in the change of the daily worsening circumstances by e.g. legislating to the advantage of the environment. During the event it was apparent that the promotion of the three ice cream flavors was rather inferior. Since *Ben & Jerry's* did not generate revenues during any of these promotional evenings, the "*Movie Nights*" can be considered as a communication-oriented pop-up "store" (see table 1). In order to limit the number of visitors to 1,000, the site of the Malzfabrik was fenced, thus turning the event into a private party. Even if the effect of scarcity was not fulfilled in its proper sense, *Ben & Jerry's* played with the psychological phenomenon of provoking the feeling of scarcity because the Germans would have only one opportunity per year to get the premium ice cream for free. Outside the fence, more than another 1,000 people were trying to join the event. Since more than 17,000 people announced themselves in the specially created Facebook event, this was not surprising. The large number of people shows that the effect of scarcity that *Ben & Jerry's* aimed at worked out.

Music and an entertainer amused the audience. After sunset, the movie "*Her*" was screened with the visitors enjoying it in beach chairs, or on their towels. The film fitted well with the majority of the visitors: 15 to 20-year-olds, primarily female, adolescents. The store promotion also targeted this

age group, and included online marketing and posters on advertising pillars in places primarily younger people go to. Parallel to these two promotional means, viral mechanisms in social networks were activated in order to guarantee the highest possible number of visitors and local media interest. For this reason, a Facebook event was created, as mentioned before, and photos were uploaded daily to *Ben & Jerry's* German *Instagram* account.

### 4.3 Case 3: Ace & Tate Summer Tour 2015

**Introduction of the Company:** The Dutch spectacles brand *Ace & Tate* is a young company founded in 2014 in Amsterdam that specializes in handmade visual aids. All the frames are designed locally and sold for € 98. *Ace & Tate* avoids any surcharge caused by middlemen, like concessionaires or retailers. The CEO and founder, Mark de Lange, wants the customers to pay for high-quality products, so he initiated the collection "Black is the new Green" of spectacles with completely biodegradable material. For every pair of glasses that is sold, *Ace & Tate* helps people in need with access to eye care (Tran 2015). Targeting every person in every age group, the frames are ageless and timeless and designed as an expression of the person's own style. Due to limited resources, the firm applies only social media marketing and public relations through articles in magazines (*ELLE*, *Vogue*, *GRAZIA* or *BAZAAR*). While the social media marketing aims at the younger audience, all magazines, in which they are mentioned, are targeting older and more sophisticated consumers, especially women (Ace & Tate 2015).

**Pop-Up Store:** *Ace & Tate* started various initiatives to find ways to open own stores in Germany and considered pop-up stores as a test. Its first two pop-up stores were opened in Munich (2014) and in Berlin-Mitte (2015) for a period of two months (Tran 2015). After opening the stores with the aim of temporary consolidation of stationary and online retail, the concept was expanded both in strategy and content in 2015 with the "Summer Tour 2015". As a strongly image-driven company,

*Ace & Tate's* aims at offering the haptic experience in pop-up stores, which they cannot offer via their online shop (Ace & Tate 2015). The "Summer Tour 2015" took place in four major German cities (Munich, Hamburg, Cologne, Frankfurt) from May to September 2015. Letting the openings of the stores overlap, each pop-up sold the products for two months. The small, 100 m<sup>2</sup>, shops were located in artistic and innovative places, where customers were invited to come and try the full range of sunglasses and optical collection. To each location an artist was designated showcasing his pieces of art for the duration of the store opening dates. In Munich e.g., free-formed mirrors that play with the light reflection within the room were hung up, so that the potential customers were shown the physical specialties of glass while looking for new spectacles. In order to intensify the shopping experience, the store equipment contained displays that enabled customers to put on glasses instead of using the virtual fitting offered at their online shop.

According to *Ace & Tate*, the pop-up store itself should rather feel like a gallery than an optician's. As the store only functioned as an information center and a physical place to get in touch with consumer, they aimed at long-term and communication-oriented measures (see table 1). Constituting the first real communicative activation and intense promotional activity of *Ace & Tate* in Germany, the pop-up stores were announced through online marketing targeted to mostly young, style conscious adults, as only these follow fashion-related online accounts (Ace & Tate 2015).

### 4.4 Findings

**Product Category:** Due to their distinctive store architecture and design, pop-up stores are said to be highly recommendable for the presentation of products, the purchase of which is characterized by an emotionally charged consumer behavior (Kastner 2015). High involvement products of the lifestyle and luxury goods sector, such as fashion, jewelry, high tech or health devices, and cosmetics are the best examples. The case studies

showed very different results: *s.Oliver* presented a limited product range of its Denim fashion brand, while *Ace & Tate* intended to acquaint the consumers with its handmade spectacles and sunglasses. Although these two examples belong to the lifestyle and luxury goods sector, *Ben & Jerry's* case demonstrates that also conventional goods like groceries can benefit from pop-up retail. We hereby assume that the success of pop-up stores depends less on specific product characteristics, but on the extent to which experience marketing has been/can be included in branding activities (brands create experience; experience create brands) (Florack et al. 2007).

**Young Target Audiences:** The empirical observation of the demographic distribution of pop-up store visitors revealed a disproportional amount of millennials. Both the Denim collection by *s.Oliver* and the glasses collection of *Ace & Tate* consisting of striking frames appeal to young adults, who want to follow the novel wave of "hipster" trendsetters coming from New York and London. *Ben & Jerry's* in particular pitches all its promotion at young adults to convince them to buy their premium brand. Moreover, the case studies proved that the itinerant character of pop-up stores is highly coherent with the fast-paced and flexible rhythm of life of the urban and modern millennials.

**Creation of Unique Customer Experiences:** In order to create unexpected and extravagant experiences for the store's customers, all companies abandoned cost-intensive interior decoration and applied means that differentiated from conventional frameworks. While *s.Oliver* kept its store design plain and simple, *Ace & Tate* turned the store into an art gallery. *Ben & Jerry's* chose for its tour "non-traditional" locations. All stores used entertaining programs, like red carpet events, art and music, entertainers, free non-blockbuster movies. *Ace & Tate* turned its store into a gallery with illustrations by local artists. This complies with Picot-Coupey's view (2014) of the pop-up retail as a form of art.



**Scarcity Marketing:** All companies applied scarcity marketing in their pop-up stores in the form of limited editions or through access restrictions. In the case of *Ace & Tate*, pop-up stores were the only possibility to physically try the brand's handmade and lower-cost glasses.

**The Fit:** Since the pop-up retail addresses a young, urban and style conscious target audience, stores are primarily situated in so-called "scene" locations. As a distribution-oriented store, the *s.Oliver Denim* pop-up store was located in a central, fancy and high-traffic shopping location. The *Ben & Jerry's "Movie Nights Tour 2015"* took place in radical and little known locations, including factory sides, artificial beach bars and yards of night clubs. *Ace & Tate* located its stores in innovative and artistic areas in the city centers, which are visited by young, style conscious people. Designed as rather communication-oriented, pop-up stores, both *Ben & Jerry's* and *Ace & Tate* made sure that their stores are not located on the High Street, but rather in less crowded places. However, all cases showed that the locations fit both the target group and the brand concept.

**Strong Brands:** According to literature, the temporary factor of the store format requires strong brand assets to meet the communication or sales targets. While *s.Oliver* and *Ben & Jerry's* possesses enhanced brand awareness in Germany, *Ace & Tate* proved a distinctive power to come up with an innovative, but also risky brand concept, which, nevertheless, paid off considering the high recognition by consumers in the four major cities. By contrast, *Ben & Jerry's* brand identity with a special emphasis on social, environmental and political commitment appeals to the target audience, as they are more conscious about fair trade or organic goods (Reisenwitz & Iyer 2009).

## 5. Conclusion

The novel retail concept "pop-up stores" has lately gained importance in the field of brand management. Aiming to initiate demand rather than increasing sales, pop-up stores enable

companies to convey messages in a creative way and enrich brand images (Kastner 2015). Although pop-up stores are, as yet, not well documented in literature, six factors for success were pointed out by researchers: product category, young target audiences, creation of unique customer experiences, scarcity marketing, fit between store concept, location and brand concept and strong brands. This paper presented findings on a multiple case study analysis, which focused on verifying those theoretical based success factors. Except for product category, the other factors were identified within the case study analysis. According to our findings, the extent to which experience marketing has been/ can be included in branding activities plays an important role. The described results should be seen as part of a pilot study and may be discussed within marketing science. Although the cases were purposefully chosen to cover different market sectors and company sizes, they do not represent the variety and total number of pop-up stores in Germany.

## REFERENCES

- Ace & Tate (2015) Company's website. <https://www.aceandtate.de>. Accessed 21 Jul 2015
- Baumgarth C, Kastner OL (2012) Pop-up-Stores im Modebereich: Erfolgsfaktoren einer vergänglichen Form der Kundeninspiration. *IMB Working Paper 69*. [http://www.mba-berlin.de/fileadmin/user\\_upload/MAIN-dateien/1\\_IMB/Working\\_Papers/2012/WP\\_69\\_online.pdf](http://www.mba-berlin.de/fileadmin/user_upload/MAIN-dateien/1_IMB/Working_Papers/2012/WP_69_online.pdf). Accessed 16 Oct 2015
- Ben & Jerry's (2015) Company's website. <http://www.benjerry.com/about-us>. Accessed 11 Jul 2015
- Brandmeyer Markenberatung (2015) Was ist Ihre absolute Lieblingsmarke? Statista. <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/235286/umfrage/umfrage-zu-den-liebblingsmarken-der-deutschen>. Accessed 10 Jul 2015
- Clark N (2011) Experiential marketing: The pop-up phenomenon. *Marketing Magazine*. <http://www.marketing-magazine.co.uk/article/1066101/experiential-marketing-pop-up-phenomenon>. Accessed 05 Jul 2015
- CradlePoint Technology (2012) Trends in Pop-up Retail: Innovative Merchandising Driven by Flexible, Dependable Mobile Connectivity. White Paper. [http://www.streakwave.com/cradlepoint/CradlePoint\\_Pop\\_up\\_Store\\_White\\_Paper.pdf](http://www.streakwave.com/cradlepoint/CradlePoint_Pop_up_Store_White_Paper.pdf). Accessed 12 Jul 2015
- Davis C, Evans C (2014) Britain's Pop-Up Retail Economy. A study investigating the pop-up retail industry, its contribution to the UK economy and the barriers it faces. Centre for Economics and Business Research. [http://ee.co.uk/content/dam/everything-everywhere/documents/Pop-up%20business%20PDFs/EE%20Pop-Up\\_Retail\\_Economy\\_Report.pdf](http://ee.co.uk/content/dam/everything-everywhere/documents/Pop-up%20business%20PDFs/EE%20Pop-Up_Retail_Economy_Report.pdf). Accessed 20 Jun 2015
- Di Somma M (2014) Retail Brand Strategy: Role Of The Flagship Store. *Branding Strategy Insider*. <http://www.brandingstrategyinsider.com/2014/07/retail-brand-strategy-role-of-the-flagship-store.html>. Accessed 20 Jun 2015
- Eisenhardt KM (1989) Building Theories from Case Study Research. *Acad Manag Rev* 14(4):532–550. doi: 10.5465/AMR.1989.4308385
- Esch F, Tomczak T, Kernstock J, Langner T, Redler J (eds) (2014) *Corporate Brand Management. Marken als Anker strategischer Führung von Unternehmen*, 3rd edn. Springer Gabler, Wiesbaden. ISBN: 978-3-8349-3446-8. doi: 10.1007/978-3-8349-3862-6
- Farfan B (2015) U.S. Retail Industry Largest Stores of Top Retail Chains in London, England, UK. *Retail Industry*. [http://retailindustry.about.com/od/technologyinnovations/a/flagshipstores\\_3.htm](http://retailindustry.about.com/od/technologyinnovations/a/flagshipstores_3.htm). Accessed 05 Jul 2015
- Florack A, Scarabis M, Primosch E (eds) (2007) *Psychologie der Markenführung*. Vahlen, München. ISBN: 978-3-8006-3352-4
- Gondorf L (2015) Pop-up-Stores: Innovatives Marketings mit den Läden auf Zeit. *Absatzwirtschaft*. <http://www.absatzwirtschaft.de/pop-up-stores-innovatives-marketing-mit-den-laeden-auf-zeit-43665>. Accessed 06 Jul 2015
- Go-PopUp (2015) Store. <http://www.popup-berlin.de/store>. Accessed 14 Jul 2015
- Gursch F (2013) Die Erfolgspotentiale von Pop-Up-Stores. Modellentwicklung und empirische Überprüfung anhand von Erfolgsfaktoren. GRIN, München. ISBN: 978-3-656-49729-5
- Hellmann KU, Pichler R (eds) (2005) *Ausweitung der Markenzone. Interdisziplinäre Zugänge zur Erforschung des Markenwesens*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden. ISBN: 978-3-531-14746-8. doi: 10.1007/978-3-322-80783-0
- Hurth J, Krause M (2010) Ortswechsel : Pop-Up-Stores als innovativer Betriebstyp. *Transfer Werbeforsch Praxis* 56(1):33–40
- Hutter K (2013) Pop-up-Stores als temporäre Kundeninspiration. *Absatzwirtschaft*. <http://www.absatzwirtschaft.de/pop-up-stores-als-temporaere-kundeninspiration-14772>. Accessed 15 Jun 2015
- Kapferer J (2008) *The New Strategic Brand Management. Creating and Sustaining Brand Equity Long Term*, 4th edn. Kogan Page, London. ISBN: 978-0-7494-5085-4
- Kastner OL (2015) Erfolgsfaktoren von Pop-up Stores. Fallstudiengestützte Evaluation am Beispiel der Bekleidungsindustrie. Springer Gabler, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-08944-3. doi: 10.1007/978-3-658-08945-0
- Keller KL (2013) *Strategic Brand Management. Building, Measuring, and Managing Brand Equity*, 4th edn. Pearson, Boston. ISBN: 978-0-13-266425-7
- Krug E (2002) Flagship-Store. *GENIOS WirtschaftsWissen* 09/2002. [http://www.genios.de/wirtschaft/flagship\\_store/c\\_vertrieb\\_20020923.html](http://www.genios.de/wirtschaft/flagship_store/c_vertrieb_20020923.html). Accessed 16 Oct 2015
- Lehmann N (2010) Gib' der Marke ein Zuhause. *Handelsjournal* 19(1):12–24
- Leinbach-Reyhle N (2014) Pop-Up Retailers: Must Know Details to Make Yours a Success. *Forbes Magazine*. <http://www.forbes.com/sites/nicoleleinbachreyhle/2014/12/24/pop-up-retailers-must-know-details-to-make-yours-a-success>. Accessed 20 Jun 2015
- Lomas L (2015) The Future of Retail and Flagship Stores. *The Market Creative*. <http://themarketcreative.com/the-future-of-retail-and-flagship-stores>. Accessed 05 Jul 2015
- Neuhaus C (2013) Vorübergehend geöffnet. *Der Tagesspiegel* 19 Jan 2013. <http://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/pop-up-stores-voruebergehend-geoeffnet/7656762.html>. Accessed 10 Jul 2015
- Niehm LS, Fiore AM, Jeong M, Kim H (2007) Pop-up Retail's Acceptability as an Innovative Business Strategy and Enhancer of the Consumer Shopping Experience. *J Shopping Center Res* 13(1–30)
- Picot-Coupey K (2014) The pop-up store as a foreign operation mode (FOM) for retailers. *Int J Retail Distrib Manag* 42(7):643–670. doi: 10.1108/IJRDM-01-2013-0032
- Pop Up Republic (2015) What Is A Pop-Up? <https://www.popuprepublic.com/pop-up-marketing/what-is-a-pop-up.html>. Accessed 15 Jun 2015
- Reisenwitz TH, Iyer R (2009) Differences in Generation X and Generation Y: Implications for the Organization and Marketers. *Market Manag J* 19(2):91–103

Reudenbach E (2015) S.Oliver Opens Two Denim Pop-up Stores. Sportswear International. [http://www.sportswearnet.com/news/pages/protected/SOliver-opens-two-denim-pop-up-stores\\_9137.html](http://www.sportswearnet.com/news/pages/protected/SOliver-opens-two-denim-pop-up-stores_9137.html). Accessed 10 Jul 2015

Rocket Spaces (2015) Pop Up Stores & Spaces in allen Städten. <http://rocketspaces.de/pop-up-mieten>. Accessed 14 Jul 2015

s.Oliver (2015a) Company's website. <https://company.soliver.com>. Accessed 10 Jul 2015

s.Oliver (2015b) Zwei Städte, eine Leidenschaft. <https://company.soliver.com/stories/pop-up-stores-berlin-amsterdam>. Accessed 10 Jul 2015

Subramanian C (2014) 5 ways companies can leverage pop-up stores. <http://fortune.com/2014/05/20/5-ways-companies-can-leverage-pop-up-stores>. Accessed 05 Jul 2015

Tran V (2015) 5 Fragen an Ace & Tate Gründer Mark de Lange. ELLE. <http://www.elle.de/ace-and-tate-5-fragen-an-den-labelgruender-mark-de-lange-244397.html>. Accessed 21 Jul 2015

Trend Marketers (2015) What is Scarcity Marketing and How to Profit from it? <http://www.trendmarketers.com/marketing/scarcity-marketing-how-to-profit-from-it/1751>. Accessed 25 Aug 2015

Winter K (2009) Wirkung von Limited Editions für Marken. Theoretische Überlegungen und empirische Überprüfung. Gabler, Wiesbaden. ISBN: 978-3-8349-1680-8

Wrona T (2005) Die Fallstudienanalyse als wissenschaftliche Forschungsmethode. [http://www.escpeurope.eu/uploads/media/TW\\_WP10\\_02.pdf](http://www.escpeurope.eu/uploads/media/TW_WP10_02.pdf). Accessed 25 Aug 2015

Zanger C (2008) Entstehung und Systematisierung von erlebnisorientierten Markenplattformen. In: Herbrand NO (ed) Schauplätze dreidimensionaler Markeninszenierung. Innovative Strategien und Erfolgsmodelle erlebnisorientierter Begegnungskommunikation. Neues Fachwissen, Stuttgart, ISBN: 978-3-9811220-2-2, pp 69–84

## AUTHORS

**Prof. Dr. rer. pol. Sandra Haas**  
**Lisa Schmidt**

Technical University of Applied Science Wildau  
International Marketing/International Management

E-Mail for correspondence:  
[sandra.haas@th-wildau.de](mailto:sandra.haas@th-wildau.de)



# Die Abo-Commerce-Landschaft in Deutschland: Eine angebotsbezogene Untersuchung

Sandra Haas\*, Torben Schmolke

## Zusammenfassung

In den letzten Jahren wurde in der Startup-Szene über eine neuartige Form des Onlinehandels debattiert: Abo-Commerce. Hierbei handelt es sich um ein Geschäftsmodell, bei dem Kunden in regelmäßigen Abständen mit einer online bestellten Ware beliefert werden, ohne dafür erneute Bestellungen aufgeben zu müssen (Warkentin 2013, ExperCash GmbH 2015). Bislang findet Abo-Commerce in der deutschen Wissenschaft noch wenig Beachtung. Der vorliegende Beitrag stellt die Ergebnisse einer inhaltsanalytischen Untersuchung zur Abbildung der Abo-Commerce-Landschaft in Deutschland vor.

## Abstract

In recent years, a discussion about a novel form of online-based business models has taken place among young entrepreneurs: online home delivery subscriptions. Thereby, online-subscribers can get convenient home delivery on a continuing basis without reordering (Warkentin 2013, ExperCash GmbH 2015). So far, online home delivery subscriptions have not been intensively researched within the academic field in Germany. The paper presents results on a qualitative research project focusing on mapping the landscape of German companies offering such services.

Abonnements für Zeitschriften, den öffentlichen Personennahverkehr oder auch das Theater sind seit Jahren in Deutschland etabliert und die Vorzüge für Kunden wie auch Unternehmen weithin diskutiert. Seit geraumer Zeit wird in der deutschen Gründerszene jedoch eine neuartige Form des Abonnements diskutiert: **Abo-Commerce** (gruenderszene.de; deutsche-startups.de). Hierbei handelt es sich um ein Geschäftsmodell, bei dem Kunden in regelmäßigen Abständen mit einer online bestellten Ware beliefert werden, ohne dafür erneute Bestellungen aufgeben zu müssen (Warkentin 2013, ExperCash GmbH 2015). Die Abonnements können vielfältige Produkte umfassen (wie etwa Kosmetikartikel, Kleidung, Lebensmittel, Rezepte, Futterboxen für Tiere oder Bastelartikel), werden allerdings hauptsächlich für Konsumgüter angeboten.

Bislang wird das Thema Abo-Commerce in Deutschland nur begrenzt von Wissenschaftlern aufgegriffen und diskutiert. Da die Geschäftsidee erst vor wenigen Jahren aus den USA

nach Deutschland kam, existiert nur sehr wenig deutschsprachige wissenschaftliche Literatur. Der vorliegende Beitrag widmet sich dem Thema aus einer Angebotsperspektive, indem in Deutschland aktive Abo-Commerce-Händler systematisch erfasst und deren unternehmens- sowie angebotsbezogene Merkmale inhaltsanalytisch untersucht werden.

## 1. Charakteristika, Ursprung und Einordnung von Abo-Commerce

Abo-Commerce ist dem Pure Onlinehandel, also dem reinen Onlinehandel zuzuordnen. Händler dieses Betriebs-typs zeichnet aus, dass sie ausschließlich online tätig sind und keinen stationären Handel betreiben (Heinemann 2015). Obwohl Abo-Commerce eine junge Vergangenheit hat, basiert die Geschäftsidee auf einem traditionellen Verkaufsmodell. Die Grundlage bilden klassische Offline-Abonnements wie etwa für Zeitungen. Eine Weiterentwicklung und Übertragung ins E-Commerce-Business stellen reine

Online-Abonnements wie Streaming-Dienste für Musik und Videos dar. Abo-Commerce hingegen verbindet Offline- und Online-Abonnements: Die Ware bzw. die Dienstleistung wird im Abo online bestellt und offline ausgeliefert. Häufig spricht man auch von sogenannten Subscriptions (Heinemann 2015). *Subscriptions* werden oft mit dem *Curated Shopping* verbunden, bei dem der Händler für den Kunden eine Vorauswahl an Produkten trifft (Heinemann & Boersma 2015). Mit der Übernahme eines bewährten Ansatzes aus dem traditionellen Handel (Verkäufer berät Kunden) versucht man im E-Commerce stärker auf individuelle Kundenbedürfnisse einzugehen (Möhlenbruch et al. 2014).

Der Bestellvorgang eines Online-Abonnements ist dem eines typischen Online-Shops ähnlich. Nach dem Aufrufen der Webseite wählt der Kunde die gewünschte Ware. Je nach Abonnement-Typ kann ggf. das Lieferintervall gewählt und Vorlieben angegeben werden. Um den Bestellvorgang abzuschließen, muss der Kunde seine

persönlichen Daten angeben. Zuletzt wählt der Kunde die Versandart aus und schließt die Bestellung mit der Bezahlung ab. Die Gestaltung eines auf Abo-Commerce basierenden Geschäftsmodells muss sich an rechtliche Rahmenbedingungen anlehnen, die sich aus der Gestaltung rechtsgeschäftlicher Schuldverhältnisse durch Allgemeine Geschäftsbedingung des Bürgerlichen Gesetzbuches ergeben (§ 309 Nr. 9 BGB). Dennoch bestehen ausreichend gestalterische Spielräume:

- Ausrichtung des Geschäftskonzeptes: Abo-Commerce-Händler können sich nur auf den Vertrieb von Abonnements fokussieren oder Abonnements als zusätzliche Vertriebsoption anbieten (z. B. *Lindt Chocoladenclub*, *Amazon Sparabo*, *Douglas*)
- Inhalt der Abo-Box: In Abhängigkeit vom Informationsstandes des Kunden zum Boxeninhalte kann zwischen dem klassischen Abo-Modell und dem *Soft-Subscription-Modell* unterschieden werden. Ersteres zeichnet sich dadurch aus, dass zu einem zuvor festgelegten Geldbetrag die Ware in einem bestimmten Zeitintervall geliefert wird oder die Dienstleistung erbracht wird. Dieses Modell ist daher mit einem einfachen Offline-Zeitungsabonnement vergleichbar. Das *Soft-Subscription-Modell* wird oft auch als individuelles Abo beschrieben, bei dem der Kunde neben Lieferintervallen auch den Boxeninhalte selbst festlegen kann. Beispielsweise kann es sich um ein Lebensmittel-Abonnement handeln, bei dem der Kunde jede Woche aus verschiedenen Gerichten wählt.

Laut dem *E-Commerce-Center Köln* wurden die ersten Abo-Commerce-Händler im Jahr 2000 gegründet. Ein verstärkter Anstieg sei allerdings erst in den vergangenen Jahren zu verzeichnen (Warkentin 2013). Als Vorreiter des Abo-Commerce wird häufig der US-amerikanische Händler *Birchbox* genannt, der im September 2010 seine ersten „Beauty-Boxen“ versendete (Jänisch 2014, Birchbox 2015). In Deutschland wurde diese Form des Onlinehandels durch das Unter-

nehmen *Glossybox*, eine Art Klon von *Birchbox* bekannt. *Glossybox* wurde 2011 gegründet und ist mit 21 ausländischen Niederlassungen Vorreiter des Abo-Commerce in Europa (von der Forst 2013).

Begünstigt wird die Entwicklung des Abo-Commerce durch *Smart-Convenience-Geschäftsmodelle* und *Efficient Automation*. Diese Trends des Onlinehandels gehen auf die Bedürfnisse der Kunden ein, indem sie den Einkaufsvorgang nicht nur einfacher und bequemer gestalten, sondern auch eine Kontrolle aufbauen, z. B. durch das ständige Verfolgen der Ware (Heinemann 2015). Erlebnislose Einkäufe des täglichen Bedarfs werden durch das Angebot eines Abonnements für Kunden bequemer gestaltet (Gyllensvärd & Kaufmann 2013).

## 2. Erfassung der Abo-Commerce-Landschaft in Deutschland

Bei der Erfassung der deutschen Abo-Commerce-Landschaft wurde empirisch nach der reduktiven, qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2002) vorgegangen, da die Anwendung einer *Mixed Method* (Kombination aus qualitativen und quantitativen Untersuchungsschritten) angezeigt war (Lamnek 2010). Das untersuchte Material umfasst ausschließlich Webseiteninhalte relevanter Abo-Commerce-Händler. Bei der Identifizierung der Händler wurde mit verschiedenen Suchbegriffen gearbeitet, die einen Bezug zum Abo-Commerce aufwei-

sen. Dafür wurden auch boolesche Suchbegriffe und Google-Operatoren verwendet, um die Suchergebnisse zu erweitern oder zu beschränken. Je nach Suchbegriff wich die Anzahl der erzielten Suchergebnisse stark voneinander ab („abo commerce“: 7.330 Treffer; „abo boxen“: 1.540.000 Treffer und „produkt abo“: 839.000 Treffer). Trotz Löschung und Deaktivierung des Google-Webprotokolls variierten die Suchergebnisse nach Standort der Suchanfrage (unter 1 %). Insgesamt wurden 209 Händler erfasst, die in der Folge auf ihre Relevanz hin überprüft wurden (Prüfkriterien: Definition Abo-Commerce, aktiv, Standort Deutschland). Im Ergebnis wurden **91 Abo-Commerce-Händler** als relevant eingestuft und in die Kategorisierung der Webseiteninhalte einbezogen.

Im Rahmen einer Stichprobenanalyse wurde zunächst der Informationsgehalt von Webseiten verschiedener Abo-Commerce-Händler erfasst und verglichen. Auf diese Weise wurden Inhalte bestimmt, die mehrheitlich von Abo-Commerce-Händlern auf ihren Webseiten kommuniziert werden und in der Folge inhaltsanalytisch ausgewertet wurden. Die Abo-Commerce-Landschaft in Deutschland konnte somit anhand der in Abb. 1 dargestellten Merkmale abgebildet werden.

Informationen zum Preis, zu konkreten Boxeninhalten oder dem Bestellvorgang wurden nicht erfasst. Basierend auf den 12 Merkmalskategorien wurde in **unternehmensbezogene Informationen** und **leistungsangebotsbezo-**

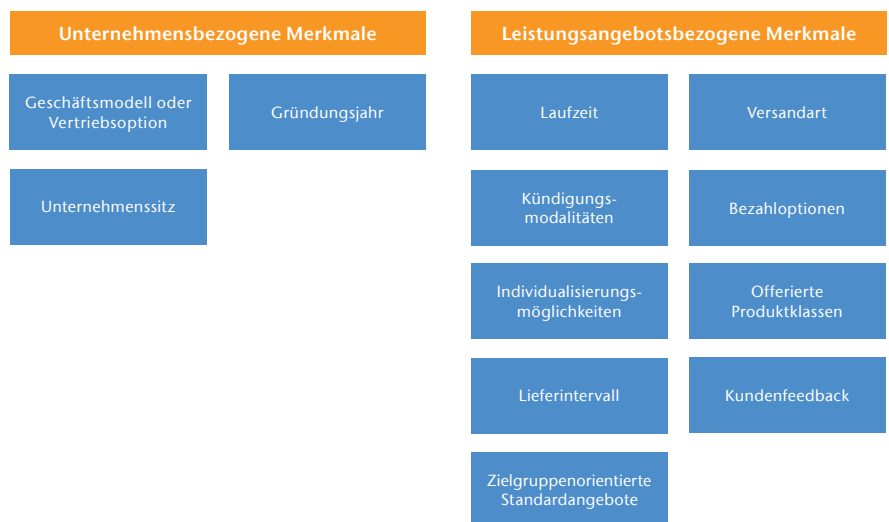


Abb. 1) Codierung des Informationsgehaltes von Webseiten von Abo-Commerce-Händlern (eigene Darstellung)

gene Informationen unterschieden. Zudem wurden die Forschungsfragen der inhaltsanalytischen Analyse weiter konkretisiert:

- Wie hat sich Abo-Commerce in Deutschland im Zeitablauf (2002–2015) entwickelt?
- Sind hinsichtlich des Unternehmenssitzes von Abo-Commerce-Händlern räumliche Agglomerationen feststellbar?
- Wird Abo-Commerce in Deutschland (eher) als Vertriebsoption oder als eigenständiges Geschäftsmodell praktiziert?
- Haben sich in der Branche klassische Vertragsmodalitäten herausgebildet? Welche Relevanz besitzen transparente Kundenbewertungsportale bei diesem Geschäftstyp?
- Welche Besonderheiten weist die Sortimentsgestaltung von Abo-Commerce-Händlern hinsichtlich Sortimentsbreite/-tiefe und zielgruppenspezifischer Standardangebote auf?
- Werden Soft-Subscription-Modelle in Deutschland angeboten? Wenn ja, welche Möglichkeiten zur Individualisierung des Abonnements werden genutzt?

### 3. Darstellung und Interpretation der Ergebnisse

#### Wie hat sich Abo-Commerce in Deutschland im Zeitablauf (2002–2015) entwickelt?

Bezüglich der zeitlichen Entwicklung des Abo-Commerce in Deutschland ist ein Trend erkennbar (s. Abb. 2). Im Jahr 2002 wurde der erste heute noch aktive Abo-Commerce-Händler, der *Pralinen Club*, gegründet. Bis ins Jahr 2009 war die Entwicklung des Abo-Commerce sehr zaghaft. Der erste größere Anstieg in der Anzahl an noch heute aktiven Abo-Commerce-Händlern ist im Jahr 2010 zu verzeichnen. Mit dem Bierabonnement von *BrauKunst*, dem Unterwäsche-Abonnement von *Dailybread* und *Sox in a Box*, mit *Kommt-/Essen* und *Oh!Soft* sowie dem Kaffee-Abonnement von Tchibo starteten sechs weitere Händler. Zwischen 2011 und 2014 erlebte die Geschäftsidee ihren Boom: Nachdem 2011 acht weitere Abonnements angeboten wurden, erfolgte 2012 der größte Anstieg mit 21. Dieser Trend verlief bis 2014 leicht

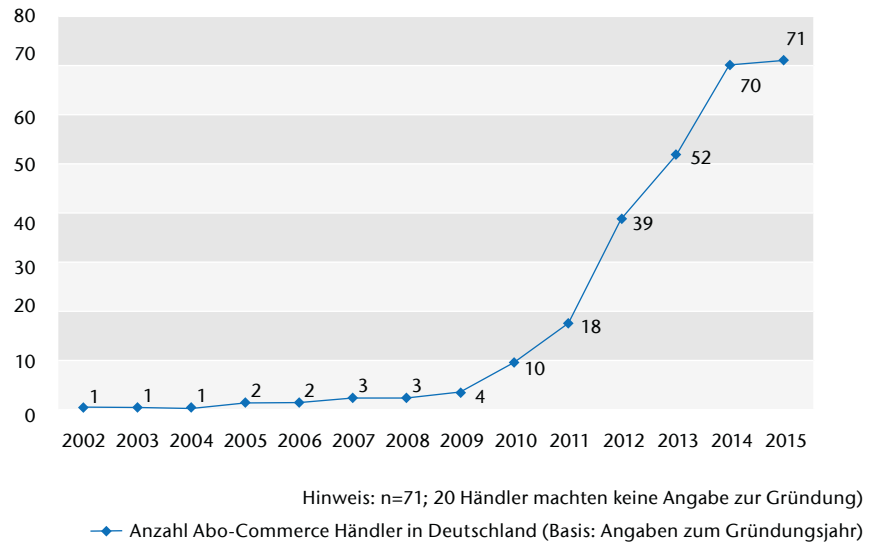


Abb. 2) Kumulierte Anzahl von aktiven Abo-Commerce-Händlern in Deutschland

rückläufig. Zum Stand der Untersuchung wurde für 2015 nur *Lucky Vegan* als Neuhändler erfasst.

#### Sind hinsichtlich des Unternehmenssitzes von Abo-Commerce-Händlern räumliche Agglomerationen feststellbar? Wird Abo-Commerce in Deutschland (eher) als Vertriebsoption oder als eigenständiges Geschäftsmodell praktiziert?

Betrachtet man die Kategorie Unternehmenssitz, so führt Berlin mit 24 Abo-Commerce-Händlern, gefolgt von Hamburg (12) und München (6). Je zwei Abo-Commerce-Händler sitzen in Dresden, Düsseldorf, Köln, Oldenburg und Passau.

Zur Differenzierung nach Geschäftsmodell oder Vertriebsoption wurde deduktiv vorgegangen. Um ein Geschäftsmodell handelt es sich, wenn der Onlineshop auf das Angebot eines Abonnements ausgerichtet ist. Bei einer Vertriebsoption wird das Abonnement nicht als Kerngeschäft, sondern als zusätzliche Bestellmöglichkeit für Kunden offeriert (etwa *amazon sparabo*). Eine diesbezügliche Unterscheidung offenbarte eine stärkere Präsenz von Geschäftsmodellen: 53 Händler betreiben Abo-Commerce als Geschäftsmodell, während 38 Händler es als Add-on-Option für ihre Kunden anwenden.

#### Haben sich in der Branche klassische Vertragsmodalitäten herausgebildet? Welche Relevanz besitzen transparente Kundenbewertungs-

#### portale bei diesem Geschäftstyp?

Zu den Vertragsmodalitäten gehören Laufzeit, Versandart, Kündigungsmodalitäten und Bezahloptionen. Die Ausprägungsmöglichkeiten dieser Kategorien wurden zunächst vollständig erfasst und in Abhängigkeit ihrer Häufigkeiten klassifiziert. Von den 183 erfassten Abonnements wurden ein Drittel als unbegrenztes Abonnement angeboten. Darüber hinaus dominieren 3-monatige, 6-monatige und 12-monatige Laufzeiten. Bei der Versandart dominiert DHL gefolgt von der Deutschen Post. Immerhin neun Händler bieten für ihre Abonnements die Selbstabholung an. *Amazon* liefert als einziger Händler u. a. mit Hermes und benutzt für den Versand, wie auch *Lebensmittel.de*, eine Vielzahl an weiteren Kurieren. *Brötchenbursche*, *Impuls Diät*, *Kochhaus* und *KommtEssen* arbeiten vor allem im städtischen Bereich mit ortsansässigen Kurieren zusammen. Bezüglich der offerierten Kündigungsfristen scheint man im Sinne der Kundengewinnung Zugeständnisse zu machen. So wird die Mehrheit der Abonnements mit fristlosen, kurzen Fristen angeboten oder laufen automatisch aus. Bei den Bezahloptionen ist die Zahlungsmöglichkeit per PayPal, Lastschriftverfahren oder Kreditkarte am häufigsten vorzufinden. Um heute im umkämpften Offline- und Online-Wettbewerb bestehen zu können, ist ein gutes Kundenbeziehungsmanagement unabdingbar. Hierzu „ist es notwendig, dem Kunden den Kontakt mit dem Unterneh-

men zunächst einmal so einfach wie möglich zu gestalten“ (Wiegran & Harter 2012: 39). Zudem sind transparente Kundenbewertungsportale in Onlineshops weithin präsent, um Kauf- und Entscheidungsprozesse der Kunden zu vereinfachen. So wird die Informationsbeschaffung zum Angebot für Neukunden erleichtert und positive Kundenfeedbacks unterstützen bereits im Vorfeld des Kaufs den Vertrauensaufbau zum Onlinehändler (*bandwagon effect*) (Leibenstein 1950). Im Rahmen der Analyse wurden die Kundenbewertungsportale der Abo-Commerce-Händler erhoben und bewertet. Dabei wurde zwischen „kein Feedback möglich“, „Feedback in Textform“ und „Feedback anhand Ranking“ unterschieden. Im Ergebnis ist zunächst festzuhalten, dass 43 Händler das Feedback ihrer Kunden nicht veröffentlichten. Von den 48 Händlern, die ein Feedback veröffentlichten, publizieren fast alle ein Feedback in Textform. 30 Händler setzen Rankings ein. Eine Rückmeldung in Form

von Text und Ranking bieten 29 Anbieter an. Eine Ausnahme bildet foodvibes, das lediglich ein Feedback mit Symbolen, jedoch nicht in Textform veröffentlicht. Die hohe Anzahl an Händlern ohne transparentes Kundenbewertungsportal ist überraschend, meint man doch, dass Kunden an neuartige Geschäftsmodelle herangeführt werden müssen und gerade hier eine Vereinfachung von Kaufentscheidungsprozessen unabdingbar ist.

**Welche Besonderheiten weist die Sortimentsgestaltung von Abo-Commerce-Händlern hinsichtlich Sortimentsbreite/-tiefe und zielgruppenspezifischer Standardangebote auf?**

Um im Onlinehandel erfolgreich zu sein, muss das Sortiment aus Kundensicht einen Mehrwert bieten. Zudem sollte ein Zielgruppenfokus in der Sortimentsgestaltung ersichtlich sein (Gehrckens & Boersma 2013). Zur Erfassung der Sortimentsstrategien wurden die Händler bezüglich

ihrer Sortimentsbreite und möglicher zielgruppenspezifischer Standardangebote untersucht. Hierzu wurden zunächst Anzahl und Art der im Abonnement angebotenen Produktgruppen der Abo-Commerce-Händler erfasst. Im Anschluss wurden die Händler deduktiv in drei Merkmalkategorien strukturiert: „enges Sortiment“, „Kernsortiment“ und „breites Sortiment ohne Schwerpunkt“. Ein „enges Sortiment“ besteht aus nur einer Produktklasse, wie beispielsweise Heißgetränke. „Kernsortiment“ spiegelt das Angebot mehrerer ähnlicher Produktklassen wider, die inhaltlich logisch zu einer Oberkategorie zusammengefasst werden können (wie etwa Getränke). Die Option „breites Sortiment ohne Schwerpunkt“ erfasst alle übrigen Händler, die nicht den zuvor genannten Kategorien entsprechen. Dazu zählen etwa traditionelle Onlinehändler, die diverse Produktklassen anbieten und Abo-Commerce als Vertriebsoption nutzen (z. B. Amazon). Im Ergebnis bieten 40 Händler

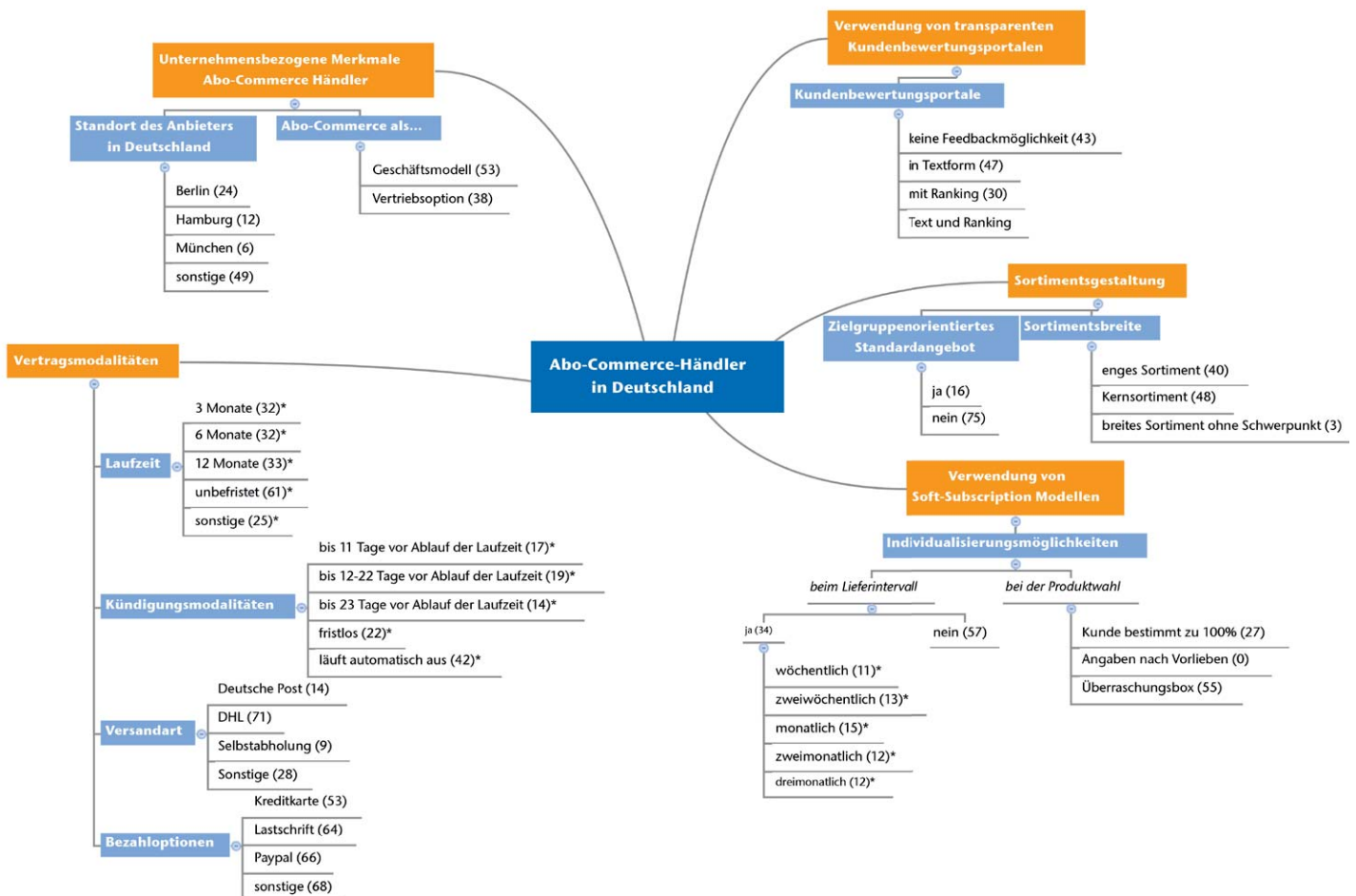


Abb. 3) Abbildung der Abo-Commerce-Landschaft in Deutschland (Kategoriensystem) (eigene Darstellung). \* Auswertungsbasis: Erfasste Abonnements der Händler

ein enges Sortiment und 48 Händler ein Kernsortiment an. Damit sind Nischensortimente sehr stark unter Abo-Commerce-Händlern verbreitet. Dies begründet sich darin, dass ein breites Produktangebot einen höheren Aufwand nach sich zieht (Beschaffungs- und Lagerkosten; zeit- und kostenintensive Produktverwaltung; Vermarktungsaufwand (Onlineshop-basics 2014). Nur drei Händler führen ein breites Sortiment: *Amazon, MyComicBox und Trend Raider*.

Zielgruppenspezifische Standardangebote umfassen vom Anbieter zusammengestellte Leistungsbündel, die auf ähnliche Bedürfnisse bestimmter Kunden zugeschnitten sind, wie etwa spezielle Angebote für Vegetarier/Veganer oder Frauen/Männer. Auch reine alkoholfreie Angebote wurden hierzu gezählt, da sie sich speziell an die Gruppe Menschen richten, die keinen Alkohol bestellen wollen. Die Untersuchung zeigte, dass nicht einmal 20 % der Händler zielgruppenspezifische Standardangebote anbieten.

### Werden Soft-Subscription-Modelle in Deutschland angeboten? Wenn ja, welche Möglichkeiten zur Individualisierung des Abonnements werden genutzt?

Bei einem Soft-Subscription-Modell kann der Kunde das Abonnement hinsichtlich mindestens eines Gestaltungsmerkmals frei bestimmen. Im Rahmen der Erhebung wurde sich auf die Individualisierungsmöglichkeiten beim Lieferintervall und bei der Produktauswahl fokussiert. Hinsichtlich der Produktauswahl wurde zwischen den Optionen „Kunde bestimmt zu 100 %“, „Angabe von Vorlieben“ und „Überraschungsbox“ unterschieden. Bei der Option „Kunde bestimmt zu 100 %“ stellt der Abonnent das Abo inhaltlich selbst zusammen, da er die Produkte frei auswählen kann. Angebote, bei denen Kunden den Inhalt des Abonnements beeinflussen, allerdings nicht vollends bestimmen konnten, charakterisiert die Option „Angabe von Vorlieben“. Dazu zählten z. B. Geschmacksrichtung oder die Wahl zwischen Ohrringen und Ketten. Ein weiteres Beispiel ist die Angabe von Alter oder Größen, die zur Personalisierung der Ware beitragen. Die Zuteilung zur „Überraschungsbox“ erfolgte dann, wenn der Kunde in keiner

Weise Einfluss auf die Produkte nehmen konnte.

Es wurde festgestellt, dass die Mehrheit der Händler ihren Kunden keine Individualisierungsmöglichkeiten anbietet (63 %). Somit werden in Deutschland überwiegend klassische Abonnements und keine Soft-Subscription-Modelle angeboten. 34 Händler offerierten Individualisierungsmöglichkeiten: Beim Lieferintervall dominieren wöchentliche, zweiwöchentliche, monatliche sowie zwei- und dreimonatliche Wahlmöglichkeiten. Hinsichtlich der Produktauswahl ist festzustellen, dass in Deutschland die Überraschungsbox dominiert und somit der Kunde keine Einflussmöglichkeiten auf die Produktauswahl hat. Bei 26 Händlern bestimmt der Kunde die Produktauswahl und bei lediglich 10 Händlern besteht die Möglichkeit, Vorlieben anzugeben. Da es sich bei den meisten Abo-Commerce-Händlern um Startups handelt, sind die mit einer Individualisierung des Angebots verbundenen Zusatzkosten vermutlich zu hoch (geringe Skaleneffekte beim Einkauf, komplexere interne Prozesse und hoher logistischer Aufwand) und der Fokus der Händler liegt zunächst auf dem Aufbau einer (überlebensfähigen) soliden Kundenbasis und der Stärkung ihrer Markenbekanntheit.

## 4. Zusammenfassung

Im Rahmen einer Google-basierten Onlinerecherche konnten 91 aktive Abo-Commerce-Händler ermittelt werden. Insbesondere im Zeitraum 2010–2014 stieg die Anzahl dieser neuen Form des Onlinehandels in Deutschland, wobei Berlin der Sitz der meisten Unternehmen ist.

Basierend auf inhaltsanalytischen Untersuchungen der Webseiten von Abo-Commerce-Händlern gestaltet sich die Abo-Commerce-Landschaft in Deutschland wie in Abb. 3 dargestellt. Es konnten starke Gemeinsamkeiten in den offerierten Geschäftsmodellen festgestellt werden, was die grundsätzlichen Vertragsmodalitäten betrifft (überwiegend unbefristet, Dominanz von 3/6/12-monatigen Laufzeiten, Versand per DHL oder Deutsche Post, klassische Bezahloptionen). Fast alle Händler bieten ein Nischensortiment an, wobei nur knapp 40 % der

Händler ihren (potenziellen) Kunden bestimmte Individualisierungsmöglichkeiten in Form wählbarer Lieferintervalle und Produkte offerieren. Wir vermuten, dass die mit einer Individualisierung des Angebots verbundenen Zusatzkosten zu hoch wären und der Fokus der Händler zunächst auf dem Aufbau einer (überlebensfähigen) soliden Kundenbasis und der Stärkung der Markenbekanntheit liegt.

Überraschend sind zwei Ergebnisse: Die Mehrheit der Abo-Commerce-Händler bietet kurze Kündigungsfristen oder das automatische Auslaufen von Abonnements an. Eventuell möchte man hier gezielt etwaigen negativen Erfahrungen der Kunden mit Offline-Abonnements proaktiv begegnen, indem man den Vorteil der Absatzplanung durch längerfristige Kundenbindungen aufgibt und dem Kunden stattdessen mehr Flexibilität zugesteht. Bei fast der Hälfte der untersuchten Händler war kein transparentes Kundenbewertungsportal feststellbar. Hinsichtlich einer notwendigen Heranführung von Neukunden an diese Form des Onlinehandels ist dies negativ zu werten, da damit Kauf- und Entscheidungsprozesse verlangsamt werden.

## LITERATUR

Birchbox (2015) What Is Birchbox? <https://www.birchbox.com/about/birchbox>. Accessed 08 Nov 2015

ExperCash GmbH (2015) Kundenbindung mit Abo-Commerce. <https://experscash.de/abo-commerce>. Accessed 21 Jun 2015

Gehrckens M, Boersma T (2013) Zukunftsvision Retail – Hat der Handel eine Daseinsberechtigung? In: Heinemann G, Haug K, Gehrckens M, dgroup (eds) Digitalisierung des Handels mit ePace. Innovative E-Commerce-Geschäftsmodelle und digitale Zeitvorteile. Springer Gabler, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-01299-1, pp 51–74. doi: 10.1007/978-3-658-01300-4\_3

Gyllensvärd D, Kaufmann S (2013) Curated Shopping als Alternative zu ePace getriebenen Category-Killer-Konzepten. In: Heinemann G, Haug K, Gehrckens M, dgroup (eds) Digitalisierung des Handels mit ePace. Innovative E-Commerce-Geschäftsmodelle und digitale Zeitvorteile. Springer Gabler, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-01299-1, pp 187–200. doi: 10.1007/978-3-658-01300-4\_11

Heinemann G (2014) SoLoMo - Always-on im Handel. Die soziale, lokale und mobile Zukunft des Shopping. Springer Gabler, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-03967-7. doi: 10.1007/978-3-658-03968-4

Heinemann G (2015) Der neue Online-Handel. Geschäftsmodell und Kanalexzellenz im Digital Commerce, 6th edn. Springer Gabler, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-06785-4. doi: 10.1007/978-3-658-06786-1

Heinemann G, Boersma T (2015) Innovative Formen der „Offsite-Downstream“-Kundeninteraktion. In: Bruhn M, Hadwisch K (eds) Interaktive Wertschöpfung durch Dienstleistungen. Strategische Ausrichtung von Kundeninteraktionen, Geschäftsmodellen und sozialen Netzwerken. Forum Dienstleistungsmanagement. Springer Gabler, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-08517-9, pp 57–81. doi: 10.1007/978-3-658-08518-6\_3



Jänisch S (2014) Abo-Commerce. <http://looking-forward.to/abo-commerce>. Accessed 23 Jun 2015

Kuckertz A (2015) Management: Entrepreneurial Marketing. Studienwissen kompakt. Springer Gabler, Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-08979-5. doi: 10.1007/978-3-658-08980-1

Lamnek S (2010) Qualitative Sozialforschung. Lehrbuch, 5th edn. Beltz, Weinheim/Basel. ISBN: 978-3-621-27770-9

Leibenstein H (1950) Bandwagon, Snob, and Veblen Effects in the Theory of Consumers' Demand. *Q J Econ* 64(2):183–207. doi: 10.2307/1882692

Mayring P (2002) Einführung in die Qualitative Sozialforschung, 5th edn. Beltz, Weinheim. ISBN: 978-3-407-25252-4

Möhlenbruch D, Georgi J, Kohlmann A (2014) Erfolgspotenziale der Prozessorientierung im Curated Shopping. *Mark Rev St Gallen* 31(6):22–33. doi: 10.1365/s11621-014-0422-3

Onlineshop-basics (2014) Produktsortiment und Sortimentsgestaltung im Onlineshop-Betrieb. <http://www.onlineshop-basics.de/produktsortiment-und-sortimentsgestaltung-im-onlineshop-betrieb-67.html>. Accessed 11 Sep 2015

von der Forst F (2013) Beschleunigte Internationalisierung von Pure Plays – Glossybox als Erfolgsbeispiel für einen globalen Ramp-up. In: Heinemann G, Haug K, Gehreckens M, dgroup (eds) Digitalisierung des Handels mit ePace. Innovative E-Commerce-Geschäftsmodelle und digitale Zeitvorteile. Springer Gabler, Wiesbaden, ISBN: 978-3-658-01299-1, pp 235–253. doi: 10.1007/978-3-658-01300-4\_14

Warkentin I (2013) Abo-Commerce – Steckt die Zukunft in Abo-Boxen? <http://www.ecckoeln.de/News/Abo-Commerce-%E2%80%93-Steckt-die-Zukunft-in-Abo-Boxen%3F>. Accessed 21 Jun 2015

Wiegand G, Harter G (2012) Kunden-Feedback im Internet. Strukturiert erfassen, schnell beantworten, systematisch auswerten. Gabler, Wiesbaden. ISBN: 978-3-409-11921-4

## AUTOREN

**Prof. Dr. rer. pol. Sandra Haas**  
**Torben Schmolke**  
Technische Hochschule Wildau  
Internationales Marketing/Internationales Management

E-Mail für Korrespondenz:  
[sandra.haas@th-wildau.de](mailto:sandra.haas@th-wildau.de)

# Szenarien zur Transformation von Energieversorgungssystemen als Voraussetzung für die Ableitung von Anforderungen an zukünftige Kompetenzen

Frank Hartmann, Dana Mietzner\*

## Zusammenfassung

Die Transformation von Energieversorgungssystemen ist durch ein hohes Maß an Unsicherheiten gekennzeichnet. Dies trifft auch auf die Frage zu, welche Qualifikationen und Kompetenzen in der Zukunft notwendig sind, um im Transformationsprozess passfähig zu sein. Eine Möglichkeit des Umgangs mit diesen Unsicherheiten besteht in der systematischen Herausarbeitung von Anforderungen an Qualifikationen und Kompetenzen, die sich auf die Antizipation von möglichen Zukünften der Energieversorgung stützt. Aus diesem Grund gehen die Autoren in ihrem Beitrag der Frage nach, wie diese Anforderungen an Qualifikationen und Kompetenzen bei der Transformation von Energieversorgungssystemen systematisch ermittelt werden können. Hierbei greifen sie auf den Transformationsansatz bzw. die Multi Level Perspective (englisch) zurück und entwickeln ihren Ansatz für ein spezifisches Szenarioanalyse-Design. Im Anschluss daran werden Anforderungen an Qualifikationen und Kompetenzen vor dem Hintergrund unterschiedlicher Szenarien abgeleitet.

## Abstract

The transformation of energy supply systems is characterized by a high degree of uncertainty. This also applies to the question, which skills and competencies are needed in the future in order to be suitable in the transformation process. One way of dealing with these uncertainties is the systematic elaboration of requirements for skills and competences, which is based on the anticipation of possible futures of the energy supply. Thus, the authors discuss how such requirements for qualifications and skills can be systematically identified. The authors use the transformation approach, respectively the multi-level perspective, and, on this basis, develop an approach for the specific design of a scenario analysis. Subsequently, requirements for qualifications and competences are derived.

## 1. Ausgangssituation

Die begrenzte Verfügbarkeit fossiler Rohstoffe, die mit deren Nutzung verbundenen negativen Folgen für das Klima sowie der Atomausstieg sind wesentliche Treiber für die Transformation von Energieversorgungssystemen. Die damit im Zusammenhang stehenden Herausforderungen haben auch eine regionale Dimension. Regionen verfügen über unterschiedliche Bedingungen und Voraussetzungen, um den Umbau ihrer Energieversorgungssysteme voranzutreiben. Hierzu gehören beispielsweise ihre Ausstattung mit natürlichen Ressourcen, die ökonomische Leistungsfähigkeit

und Ausgestaltung ihres politischen Systems oder auch die verschiedenen institutionellen Arrangements. Seit Jahrzehnten sind damit verbundene Fragestellungen Gegenstand von Forschung, öffentlichen Debatten und politischen Entscheidungsprozessen (vgl. z. B. Gailing et al. 2013, WBGU 2011a, Fournier et al. 2013). Die Komplexität der Thematik hat zu einer kaum mehr übersehbaren Vielzahl von Ansätzen, Konzepten, Vorgehensweisen und Strategien für den Umgang mit der Energieversorgungsproblematik geführt. Auch innerhalb von Ländern und Regionen existieren unterschiedliche Sicht- und Herangehensweisen. Es werden Auseinander-

setzungen um die richtige Strategie geführt, basierend auf unterschiedlichen Interessenlagen und vor dem Hintergrund unterschiedlicher Stellungen und Funktionen von Akteuren in der Gesellschaft. Beispiele hierfür sind die Debatten über eine Klimaabgabe für ältere Kohlekraftwerke oder über die Sicherstellung der Beteiligung von Kernkraftwerksbetreibern an den Rückbaukosten für Kernkraftwerke. Dies zeigt, dass der Umbau eines Energieversorgungssystems durch ein **hohes Maß an Unsicherheiten** gekennzeichnet ist. Gleiches gilt für die Frage, welche Qualifikationen und Kompetenzen zukünftig erforderlich sind vor dem Hintergrund der Transformation

\* korrespondierende Autorin

des Energieversorgungssystems. Eine Möglichkeit des Umgangs mit diesen Unsicherheiten besteht in der **systematischen Herausarbeitung von Anforderungen an Qualifikationen und Kompetenzen**, die sich auf die **Antizipation von möglichen Zukünften** der Energieversorgung stützt. Die Analyse bestehender Aus- und Weiterbildungsangebote oder die Orientierung an gegenwärtigen Nachfragen der Unternehmen reicht hierfür nicht aus. Aus diesem Grund gehen die Autoren in diesem Beitrag der Frage nach, wie zukünftige Anforderungen an Qualifikationen und Kompetenzen bei der Transformation von Energieversorgungssystemen systematisch ermittelt werden können. Der vorliegende Beitrag beginnt mit der konzeptionellen Einbettung der Fragestellung und fokussiert hierbei auf **Transformationsansätze** und das **Verständnis von Energieversorgungssystemen**. Im Anschluss daran wird ein Szenarioanalyseprozess unter methodischen Aspekten skizziert. Hieran anknüpfend werden Anforderungen an neue Qualifikationen und Kompetenzen abgeleitet.

## 2. Konzeptioneller Hintergrund

Um einen geeigneten Zugang zur Problematik des Umbaus von Energieversorgungssystemen zu entwickeln, ist ein konzeptioneller Rahmen erforderlich, der es ermöglicht, den Untersuchungsgegenstand in geeigneter Form zu beschreiben und seine Entwicklung in übergeordnete gesellschaftliche Kontexte einzuordnen. Hierfür ist der **Transformationsansatz** geeignet, der in verschiedenen Facetten und mit unterschiedlichen Schwerpunkten seit vielen Jahren thematisiert wird (vgl. Grin et al. 2010, WBGU 2011b). In einem sehr umfassenden Verständnis und fokussiert auf Umwelt und Klima wird er beispielsweise im Hauptgutachten des wissenschaftlichen Beirates der Bundesregierung „Globale Umweltveränderungen“ unter dem Titel „Welt im Wandel – Gesellschaftsvertrag für eine große Transformation“ aus dem Jahr 2011 entwickelt (vgl. WBGU 2011b). Gesellschaftliche Transformationen entstehen – entsprechend diesem Verständnis – durch aufeinander bezoge-

ne Veränderungen von Technologien, gesellschaftlichen Institutionen und individuellen Verhaltensweisen in gesellschaftlichen Subsystemen (WBGU 2011b: 342). Um sie verstehen zu können, ist es erforderlich, eine Systematik zu entwickeln, die es erlaubt, Prozesse in ihrer Dynamik zu beschreiben, Treiber von Veränderungen herauszuarbeiten sowie damit im Zusammenhang stehende Akteurskonstellationen sowie Handlungsebenen sichtbar zu machen (WBGU 2011b: 87). Geeignet hierfür ist die von Geels und Schot im Jahr 2007 vorgeschlagene *multilevel-perspective* für Transformationsprozesse, die 2010 von Grin (Grin et al. 2010) aufgegriffen wurde, um zugängliche Handlungsebenen im Transformationsprozess zu bestimmen. Das Ziel dieses Ansatzes besteht darin, Komplexitäten, Vielschichtigkeiten und Ungleichzeitigkeiten der Transformationsprozesse zu reflektieren und gleichzeitig ein Modell verfügbar zu haben, das radikal vereinfacht. Dieses Modell ist aus der Sicht der Autoren auch geeignet, um den Kontext für den Umbau von Energiesystemen zu strukturieren. Im Zentrum des Modells stehen drei unterschiedliche Handlungsebenen, die sich wechselseitig bedingen und dynamisch sind (Geels 2007, Geels & Schot 2007). Durch Veränderungen und Dynamiken in diesen Handlungsebenen und deren Interaktion entstehen nach Auffassung dieser Autoren Möglichkeitsräume für Transformation. Hierbei handelt es sich um die Ebene „*Socio-technical landscape*“ als exogener Makrokontext, die Ebene „*Socio-technical regime*“ als Transformationsgegenstand im engeren Sinne sowie die Ebene „*Niche innovations*“ als Ebene, in der das Innovationsgeschehen auf der Mikroebene als ein wesentlicher Treiber für die Transformation des soziotechnischen Regimes wirkt. Das etablierte soziotechnische Regime, als System von Technologien, Märkten, Industrien, Wissenschaftssystemen und Kulturen, entwickelt sich unter dem Einfluss der soziotechnischen Landschaft, die Druck auf das Regime sowohl in Richtung von Veränderung als auch möglicherweise in Richtung von Konservierung ausübt. Die soziotechnische Landschaft ist durch lange Zyklen und Trends charakterisiert, die

nicht ohne weiteres durch Akteurskonstellationen beeinflussbar sind. Die Ebene der Nischeninnovationen beschreibt auf der Mikroebene die Entstehung radikaler Innovationen, die in bestimmten Konstellationen die Chance haben, merklichen Einfluss auf das soziotechnische Regime zu nehmen. Insbesondere die Destabilisierung des etablierten soziotechnischen Regimes eröffnet *windows of opportunity* für radikale Nischeninnovationen. Eine Gleichrichtung der Prozesse auf den drei Ebenen ermöglicht Innovationen mit Durchbruchcharakter, die beginnen, vorhandene Märkte zu dominieren und mit dem bestehenden Regime zu konkurrieren (Geels 2007: 400). Das hier skizzierte Modell kann sowohl für die Beschreibung einer oben angesprochenen großen gesellschaftlichen Transformation herangezogen werden als auch für die Analyse der Transformation nationaler Energieversorgungssysteme.

Während es zahlreiche Hinweise dafür gibt, dass sich die **soziotechnische Landschaft** im Zusammenhang mit der Transformation von Energieversorgungssystemen **global** entwickelt, scheint die Übertragung dieser Annahme auf ein soziotechnisches Regime problematisch. Dafür sind die Entwicklungen weltweit historisch gesehen viel zu unterschiedlich verlaufen und die Ausprägung der soziotechnischen Regimes der Energieversorgung ist sowohl in struktureller Hinsicht (z. B. Energiemix) als auch in akteursbezogener Hinsicht (z. B. Regulierung) viel zu differenziert. Insofern rücken auch stärker räumliche Aspekte im Zusammenhang mit der Transformation von soziotechnischen Regimes in das Blickfeld, die bisher weitgehend vernachlässigt wurden (vgl. Truffer 2013). Truffer hat diese Fragestellung explizit aufgegriffen und untersucht, welche Rolle **lokale Formierungsprozesse in der Transformation** beispielsweise von Energieversorgungssystemen spielen. Er hat zu Recht das Problem in den Fokus genommen, wie lokale, nationale und internationale Akteure, Institutionen und Prozesse aufeinander bezogen werden können. In eine ähnliche Richtung gehen Argumentationen von Ohlhorst et al., die jedoch eher auf die Koordination von Aktivitäten auf der subnationalen Ebene

fokussieren (Ohlhorst et al. 2013). Für die Konzipierung der im Mittelpunkt dieses Beitrages stehenden Analyse wurden die wichtigsten Systemzusammenhänge der Energieversorgung, verstanden als soziotechnisches Regime, auf der nationalen Ebene verortet, auch wenn zahlreiche Dezentralisierungsaktivitäten auf regionaler Ebene an Bedeutung gewonnen haben und internationale Entwicklungen nationale Strategien in zunehmendem Maße beeinflussen.

Was die Nischenebene des Modells betrifft, so gehen die Autoren davon aus, dass Innovationen unterschiedlichsten Typs (Produkt- und Prozessinnovationen, soziale Innovationen wie Geschäftsmodellinnovationen, neue Organisations- und Beteiligungsmodelle oder auch neue Institutionen) mit verschiedenen Neuheitsgraden auf allen Ebenen, von lokal über regional und national bis global vorangebracht werden und auf das nationale soziotechnische Regime wirken.

Wird die Transformation des deutschen Energieversorgungssystems rückwirkend betrachtet, ist erkennbar, dass dieser Prozess bereits in den 1970er Jahren mit der Bewegung der Kernenergiegegner begann. Sie wurde auch durch Vorreiter einer auf Ressourcenschonung bedachten globalen ökonomischen Sichtweise gespeist, die sich beispielsweise im Bericht „Die Grenzen des Wachstums“ des Club of Rome aus dem Jahr 1972 zeigte (Meadows et al. 1972). Bestätigt durch die Schocks, welche die Erdölkrisen der Jahre 1973 und 1979/80 auslösten, formierte sich in Deutschland in den 70er und 80er Jahren eine starke Umweltschutzbewegung, etwa im Kampf gegen das Waldsterben und insbesondere gegen die Kernenergienutzung. Diese Umweltbewegung erhielt weiteren Auftrieb und eine breitere Basis im Zuge der Kernenergiekatastrophe in Tschernobyl im Jahr 1986 (vgl. Jacobsson & Lauber 2006). Diese Entwicklungen können als Ausdruck von Veränderungen in der sozioökonomischen Landschaft bzw. als Reaktionen auf diese Veränderungen interpretiert werden. Nach Jacobsen und Lauber führte das zu einer formativen Periode für den Übergang zu einem neuen System der Energieversorgung. Diese formative Periode hat nach Jacobsson

und Lauber vier wichtige Merkmale (Jacobsson & Lauber 2006): Sie ist (1) durch einen institutionellen Wandel gekennzeichnet, der sich in der Form einer veränderten FuE-Politik zeigte. Es formierten sich (2) Märkte in geschützten Nischen, in die (3) neue Unternehmen eintraten. Schließlich bildete sich (4) eine Art „Advocacy Coalition“ aus verschiedenen gesellschaftlichen Akteursgruppen, die sich für den Ausbau der erneuerbaren Energien engagierte. Diese Entwicklungen zeigten sich in der formativen Phase zwar erst in Ansätzen, bei noch intaktem soziotechnischem Regime; allerdings war die Entwicklung bereits auch im politischen System verankert. Dann, mit dem Erlass des Stromeinspeisungsgesetzes aus dem Jahr 1990, begann das vorhandene soziotechnische Regime der Energieversorgung in Deutschland Risse zu bekommen (Jacobsson & Lauber 2006: 272), was eine Take-off-Phase der erneuerbaren Energien, insbesondere der Windenergie, ermöglichte. Diese Take-off-Phase war begleitet durch eine sich allmählich herausbildende Vision eines machbaren Übergangs zu einer auf erneuerbaren Energien basierenden Energieversorgung. Mitte der 90er Jahre war die entsprechende „Advocacy Coalition“ bereits so stark, um Auseinandersetzungen über die Ausgestaltung zentraler Rahmenbedingungen zu gewinnen. Im Jahr 1998, mit dem Antritt der rot-grünen Regierung, wurden Mittel und Wege gefunden, um die Markträume für erneuerbare Energien zu schützen und auszubauen. Hierfür wurden neue Akteure, wie Anlagenhersteller und -betreiber aus dem Bereich der erneuerbaren Energien, aber auch Verbände und Vertreter traditioneller Akteursgruppen in Politiknetzwerke eingebunden (Jacobsson & Lauber 2006: 272). Zum Abschluss ihrer Analysen aus dem Jahr 2006 vermuteten Jacobsson und Lauber, dass es schwierig werden könnte, angesichts etablierter und gut vernetzter Akteure des alten sozio-technischen Regimes und vor dem Hintergrund eines durch Liberalismus und die Privilegierung von Kurzzeitprofitabilität gekennzeichneten Systems die für den Umbau des Energieversorgungssystems erforderliche Förderpolitik entsprechend lange durchzuhalten

(Jacobsson & Lauber 2006: 272 f.). Wie die Diskussionen der vergangenen Jahre gezeigt haben, lagen die beiden Autoren mit ihrer Vermutung richtig.

Aktuelle Forschungsarbeiten zur Transformation des deutschen Energieversorgungssystems gehen davon aus, dass sie in vier Phasen abläuft, wobei der Beginn etwa auf das Jahr 1990 datiert wird (Henning et al. 2014). Die **erste Phase**, bezeichnet als „**Entwicklung erneuerbarer Energien**“, reicht diesen Arbeiten zufolge von 1990 bis etwa 2010. Sie ist durch die Entwicklung der erforderlichen **Basistechnologien** gekennzeichnet, durch wesentliche Kostenreduktionen sowie durch Markteinführungen und den Ausbau der erneuerbaren Energien, ohne signifikante Implikationen für das Gesamtsystem der Energieversorgung. Die **Phase zwei**, genannt „**Systemintegration**“, beinhaltet die Aktivierung von Flexibilitäten bei residualer Stromerzeugung und -nutzung, die Etablierung von Kurzzeitspeichern sowie die Durchsetzung des Demand Side Managements. Sie umfasst einen geschätzten Zeitraum von 20 Jahren und reicht von 2010 bis 2030. Dieser Phase schließt sich die sogenannte **Phase drei** „**Synthetische Brennstoffe**“ an, die von 2030 bis etwa 2050 reicht. Sie ist gekennzeichnet durch signifikante negative Residuallasten und die Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien zur Erzeugung synthetischer Brennstoffe. Diese werden insbesondere im Bereich Mobilität Verwendung finden. Die **vierte Phase** der Transformation schließlich wird für den Zeitraum ab 2050 angenommen („**Erneuerbare Energien Import**“). Sie beinhaltet die vollständige Verdrängung fossiler Ressourcen und den Import von erneuerbaren Energieträgern, z. B. aus sonnenreichen Regionen (Henning et al. 2014). Die gesamte Transformation, die nach Auffassung dieser Autoren über einen Zeitraum von weit über 60 Jahren reicht, wird begleitet von einer **kontinuierlichen Erhöhung der Effizienz auf der Seite des Energieverbrauchs**. Die Transformation wird auf alle Wandlungsketten und Verbrauchssektoren bezogen.

Schließt man sich diesem Verständnis an, so befindet sich der Transformationsprozess gegenwärtig am Anfang

der Phase zwei („Systemintegration“) und ein langer und unsicherer Weg ist absehbar. Auch deshalb hat das BMBF die Fördermaßnahme „Umwelt- und gesellschaftsverträgliche Transformation des Energiesystems“ (2014–2017) ins Leben gerufen, die davon ausgeht, dass die Transformation des Energiesystems nicht technokratisch top-down oder gar im Detail gesteuert werden kann, sondern als gesellschaftlicher Such-, Verhandlungs- und Entscheidungsprozess konzipiert sein muss, der forschungs- und wissenschaftsbasiert ist (Institut für sozial-ökologische Forschung 2014). Dies führt unmittelbar zu der Frage nach der zukünftigen Ausgestaltung dieses Weges und methodisch zu dem Problem, wie diese Zukunft so antizipiert werden kann, dass sinnvolle Handlungsoptionen ableitbar sind.

Um den Transformationsansatz weiter zu operationalisieren, wird das **sozio-technische Regime** der Energieversorgung von den Autoren als **Energieversorgungssystem** beschrieben, das durch **vertikale Wertschöpfungsstufen**, **Systemkomponenten** und entsprechende **Akteursgruppen** charakterisiert ist

(vgl. Abb. 1). Treiber der Transformation dieses Systems sind interne Faktoren, wie beispielsweise neue Energietechnologien und Akteure, die neue Technologieentwicklungen vorantreiben sowie externe Faktoren, die eher der soziotechnischen Landschaft zuzuordnen sind, wie etwa europäische Klimaschutzziele oder übergreifende politisch-rechtliche Rahmenbedingungen.

Zum Energieversorgungssystem gehören die einzelnen **Wertschöpfungsstufen**, von der Primärenergiegewinnung über den Energietransport, die Energiewandlung, die Energieverteilung und den Energiehandel bis hin zum Endenergieverbrauch. Diesen Wertschöpfungsstufen entsprechend kommen Komponenten des Systems hinzu, von Branchen der Primärenergiegewinnung über technische Infrastrukturen bis hin zu den verschiedenen Energienutzungsbereichen wie Industrie, Handel, Gewerbe und Dienstleistungen. Den Wertschöpfungsstufen und Systemkomponenten können entsprechende Akteursgruppen zugeordnet werden, von Unternehmen bis hin zu privaten Haushalten.

### 3. Methodisches Vorgehen

Vor dem skizzierten konzeptionellen Hintergrund wurde ein strukturierter Szenarioanalyseprozess konzipiert, in dessen Mittelpunkt die Transformation des Energieversorgungssystems stand. Hierbei wurde berücksichtigt, dass für die „Antizipation von Energiezukünften“ seit Jahrzehnten weltweit sehr erfolgreich **modellgestützte Szenarien** als Methode angewendet werden. Im Mittelpunkt dieser modellgestützten Szenarien stehen **technisch-ökonomische Parameter**, wie etwa Ausbaupfade für erneuerbare Energien oder Energiemixe. Die quantitative Erfassung von Energieflüssen im komplexen System der Umwandlungs-, Verteilungs- und Nutzungsprozesse hat sich hierbei als deren Stärke erwiesen (Weimer-Jehle et al. 2013: 27). Wenig explizit werden in solchen Szenarien die gesellschaftlichen Kontextbedingungen für die Szenarien dargestellt. Das betrifft beispielsweise den Wertewandel in der Gesellschaft, demografische Entwicklungen, politische Konstellationen, ökonomische Abhängigkeiten oder auch den Stand der Technologieentwicklung. Diese Kontexte beeinflussen die Energiesys-

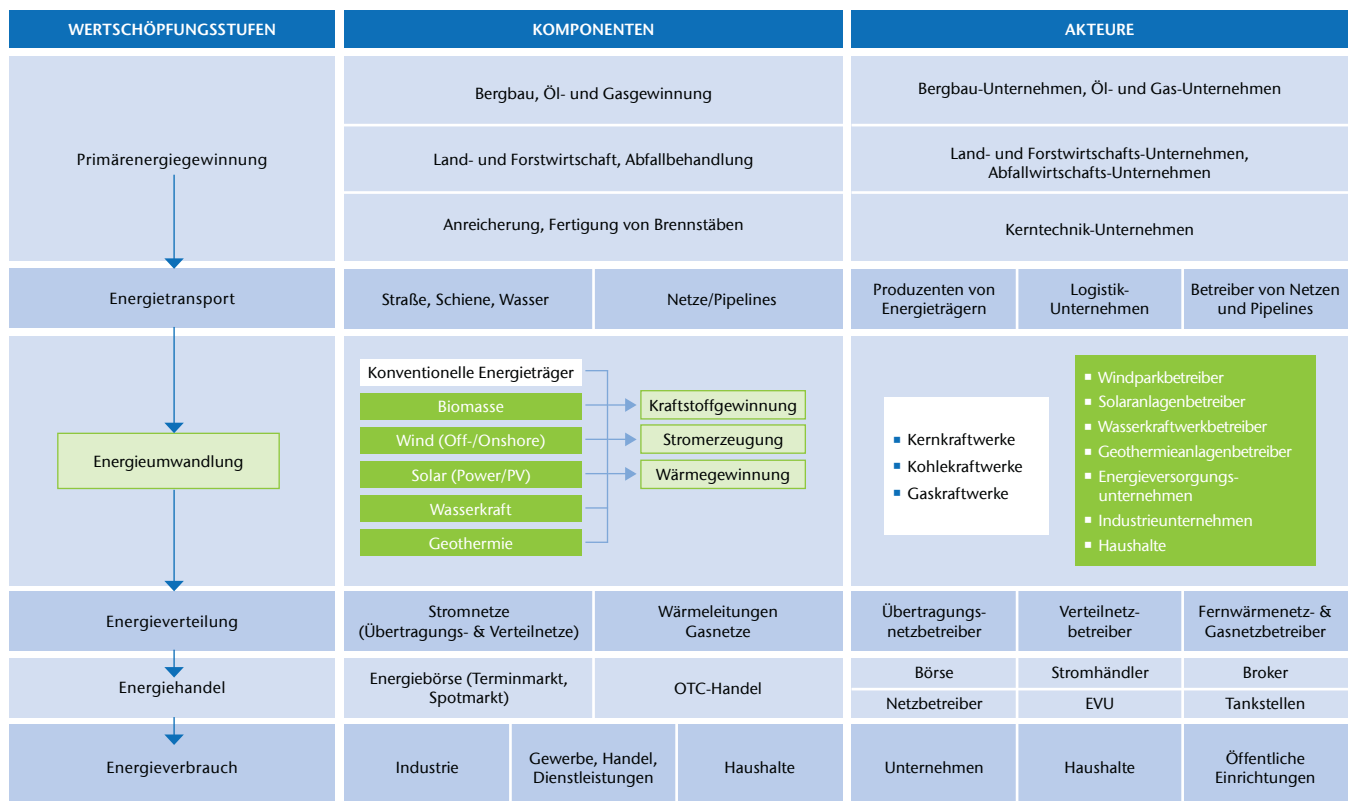


Abb. 1) Struktur und Akteure des Energieversorgungssystems

teme sehr stark und dauerhaft, sodass sie explizit zum Gegenstand der Szenarien gemacht werden sollten (Nielsen & Karlsson 2007). Das Problem besteht hierbei in der systematischen Erfassung der **Komplexität** dieser **gesellschaftlichen Kontextbedingungen** sowie in den Unsicherheiten bei ihrer Projektion in die Zukunft.

Einen Lösungsansatz hierfür bilden **hybride Szenarien**, die einen qualitativen Kontextanteil und quantitativen „Kernanteil“ aufweisen. Die Erstellung der qualitativen Kontexte kann auf der Basis sogenannter Storylines (**Gesellschaftsszenarien**) erfolgen, für deren Entwicklung Expertenwissen aufbereitet wird. Weimer-Jehle et al. schlagen hierfür eine systematische Vorgehensweise vor und beziehen sich dabei auf die Methode der Cross-Impact-Bilanzierung (CIB), die wiederum auf der Methode der Konsistenzanalyse basiert (Weimer-Jehle et al. 2013: 28). Sie zielt darauf ab, den systemanalytischen Gehalt der Kontextanalysen zu steigern. Im Verlauf der CIB-Methode werden zunächst die wichtigsten Faktoren identifiziert, die den Kontext beschreiben bzw. repräsentieren. Für diese werden dann alternative Entwicklungen repräsentiert und die Einflussbeziehungen zwischen den Faktoren systematisch herausgearbeitet. Im Ergebnis entsteht ein Wirkungsnetz dieser Faktoren, das den Kontext für modellbasierte Szenarien bilden kann (Weimer-Jehle et al. 2013: 31).

Im Unterschied hierzu werden für den Energiebereich auch sogenannte **narrative Szenarien** entwickelt, um intersubjektiv überprüfbare Zukunftsbilder zu entwerfen und die Kommunikation zwischen unterschiedlichen, an einem bestimmten Prozess beteiligten Gruppen zu unterstützen. Ihre Stärke besteht darin, dass sie nicht auf die Abbildung quantitativer Trends reduziert sind, sondern die Querbezüge zu den sozialen, wirtschaftlichen und technologischen Rahmenbedingungen sehr direkt herstellen (Venjakob 2012: 64).

Kronenberg et al. verglichen im Jahr 2012 sehr systematisch Energieszenarien für Deutschland (Kronenberg et al. 2012). Sie untersuchten 24 Szenariostudien, die im Zeitraum von 2007 bis 2011 erarbeitet wurden. Die Untersuchung wurde in der Form einer Stär-

ken-Schwächen-Analyse dargelegt, der Kriterien zugrunde lagen, um die Qualität der Szenarien zu bewerten. Auf einige dieser Kriterien wird im Folgenden kurz eingegangen, da sie bei der Konzipierung der eigenen Szenarioanalyse Berücksichtigung fanden (Kronenberg et al. 2012: 149 ff.).

- 1) *Methodische Fundiertheit*: Im Mittelpunkt der methodischen Qualität steht die Frage des Detaillierungs- und Komplexitätsgrades bezogen auf das gesamte Energiesystem. So reicht beispielsweise die ausschließliche Betrachtung einzelner Sektoren des Energieversorgungssystems nicht aus, um daraus Rückschlüsse auf das Gesamtsystem ziehen zu können. Besondere Bedeutung wird von den Autoren der untersuchten Studien dem Strommarktsegment zugemessen (Kronenberg et al. 2012: 150).
- 2) *Szenariobegründung/Rahmenszenarien*: Als ein entscheidendes Kriterium für die Qualität von Szenarien wird deren Einbettung in den Kontext der Entwicklung des Energiesystems insgesamt und seiner Komponenten gesehen. Entsprechende Storylines sollten den Rahmen für quantitative Szenarien bilden. Wert wird auf die Verknüpfung von quantitativen und qualitativen Aspekten in den Szenarien gelegt.
- 3) *Akteursbezüge*: Dieses Kriterium bezieht sich auf den Einbezug von Annahmen über das zukünftige Verhalten von Akteuren, die für das Energiesystem relevant sind.
- 4) *Maßnahmen*: Die Autoren gehen von der Annahme aus, dass Aussagen in Szenarien an Bedeutung gewinnen, wenn sie mit technischen und politischen Maßnahmen kombiniert bzw. durch sie begründet werden. Vor allem die Tiefgründigkeit der Analyse solcher Maßnahmen gerät in den Blick der Bewertung der Qualität von Szenarien (Kronenberg et al. 2012: 160).

Das Fazit dieser Stärken-Schwächen-Analyse hat gezeigt, dass in den untersuchten Szenarien technisch-wirtschaftliche Faktoren eindeutig dominieren, politik- und sozialwissenschaftliche Erkenntnisse oder Methoden kaum oder gar nicht be-

rücksichtigt werden. Auf der anderen Seite nehmen offenbar politikwissenschaftliche Foresight-Aktivitäten die technisch-wirtschaftlichen Szenarien nicht zur Kenntnis, sodass beide Forschungslinien in Deutschland unverbindlich nebeneinander stehen (Kronenberg et al. 2012: 162). Als besonders kritisch wird hervorgehoben, dass die Szenariobegründungen nicht ausreichend sind bzw. die Kontexte der Szenarien zu wenig berücksichtigt werden. Akteursbezüge sind mangelhaft ausgeprägt und die Rolle von Institutionen wird nicht systematisch reflektiert.

Diese Erkenntnisse berücksichtigend, haben sich die Autoren des vorliegenden Beitrages am klassischen Verständnis der Szenarioanalyse orientiert (vgl. z.B. Gausemeier et al. 1998: 3, Reibnitz 1991, Mietzner & Reger 2005, Mietzner 2009, Reibnitz 2006). Demzufolge handelt es sich bei **Szenarien** um die **Beschreibung komplexer, möglicher, zukünftiger Situationen**, deren Eintreten nicht mit Sicherheit bestimmt werden kann sowie die **Darstellung einer Entwicklung**, die aus der Gegenwart zu dieser Situation führen kann. Hiermit unterscheidet sich die Szenarioanalyse von Prognosen. Ihr geht es nicht um das Fortschreiben von vergangenen und gegenwärtigen Entwicklungen einer bestimmten Situation, sondern um die Antizipation von möglichen, unterschiedlichen Zukünften. Die mit Szenarien entwickelten Zukunftsbilder sollen insbesondere den Ansprüchen genügen, konsistent, komplex und plausibel zu sein. Im Mittelpunkt der Szenarioanalyse stehen deshalb begründete **Annahmen über die Entwicklung vernetzter Bedingungen und Einflussfaktoren**. In der Literatur werden unterschiedliche Szenariotypen beschrieben. Für den nachfolgend dargestellten Szenarioanalyseprozess ist charakteristisch, dass **explorative Szenarien** entwickelt werden sollten. D. h. ausgehend von einer gut **strukturierten Ausgangssituation** sollten vorwärtsgewandt **zukünftige Entwicklungspfade** begründet werden. Darüber hinaus war beabsichtigt, **deskriptive Szenarien** zu entwickeln. Deskriptive Szenarien fokussieren auf Wirkungs-Zusammenhänge und beinhalten möglichst wenige Werturteile

des Erstellers der Szenarien. Im Unterschied hierzu fließen in präskriptive Szenarien, die auf der Basis von Finalitätsbeziehungen erstellt werden, die Ziele des Anwenders der Szenarien ein.

Der **Ablauf der Szenarioanalyse** orientierte sich an einem Prozess, der sich aus **fünf Phasen** zusammensetzt. Er beginnt (1) mit der Strukturierung und Beschreibung des Szenariogegenstandes (Energieversorgungssystem). Dem schließt sich (2) die Identifikation von Einflussfaktoren der Transformation des Energieversorgungssystems an, wobei sowohl systeminterne als auch externe Einflussfaktoren identifiziert und analysiert werden. In diesem Arbeitsschritt werden Expertenworkshops und schriftliche Befragungen als Methoden eingesetzt. (3) Die Ermittlung von Schlüsselfaktoren basiert auf der softwaregestützten Vernetzung der Einflussfaktoren (ScenarioManager, ScMI 2013) und der Bestimmung des Charakters der Einflussfaktoren, je nach Stellung im vernetzten Systemzusammenhang. Es wird insbesondere Wert darauf gelegt, die Zusammenhänge zwischen den Faktoren inhaltlich zu beschreiben. In der Phase (4) werden auf einem mehrtägigen Szenarioworkshop in gemischten Teams Projektionen für die unterschiedlichen Sets von Schlüsselfaktoren für die Transformation des deutschen Energiesystems erarbeitet und diskutiert. Das Kernteam des Szenarioanalyseprozesses prüft daraufhin die Konsistenzen der erarbeiteten Projektionen, wobei wiederum das Softwaretool ScenarioManager von ScMI (ScMI 2013) zum Einsatz kommt. Im Ergebnis dieses Arbeitsschrittes können Vorschläge für die Bündelung von Szenarien erarbeitet und hierauf basierend (5) Szenarien beschrieben werden. In der Umsetzungsphase der Szenarioanalyse werden schließlich Anforderungen an Qualifikationen und Kompetenzen abgeleitet.

#### 4. Ergebnisse

Im Ergebnis wurden für Deutschland die drei Szenarien „*Deutschland auf dem schnellen Weg zur vollständigen Energiewende*“, „*Deutschland auf dem steinigen Weg der Energiewende*“ und „*Energiewende – Eingefrorener Traum*“

entwickelt. Sie basieren auf Projektionen der Schlüsselfaktoren (1) Nachfrage nach erneuerbaren Energien, (2) Förderpolitik, (3) Energieeffizienz, (4) Grad der Selbstversorgung, (5) Grad der Dezentralisierung, (6) Akzeptanz, (7) Entwicklung von Energiespeichern, (8) rechtliche Rahmenbedingungen und integrieren Inhalte aus der ausführlichen Analyse und Beschreibung des deutschen Energieversorgungssystems. Vergleicht man die **drei Szenarien der Transformation des Energieversorgungssystems** mit dem Ziel, zukünftige Anforderungen an Qualifikationen und Kompetenzen zu identifizieren, wird Folgendes deutlich: Die Wertschöpfungsstufen des Energieversorgungssystems sind, wie nicht anders zu erwarten, in differenzierter Art und Weise von der Energiewende betroffen. Auf der Wertschöpfungsstufe der Primärenergiegewinnung sieht sich insbesondere der Kohlebergbau durch den Transformationsprozess herausgefordert. Während er sich im Szenario 3 weitgehend stabilen Entwicklungsbedingungen gegenüber sieht, ist seine Entwicklung in den anderen beiden Szenarien rückläufig bzw. stark rückläufig. Hieraus resultieren zwar keine neuen Anforderungen an zukünftige Qualifikationen und Kompetenzen; diese Entwicklung ist jedoch unter arbeitsmarktlichen Gesichtspunkten relevant, da hierbei Arbeitsplätze verloren gehen bzw. andere Einsatzmöglichkeiten für Arbeitsplätze geschaffen werden müssen. Die Land- und Forstwirtschaft sowie die Abfallwirtschaft als Primärenergieerzeuger sind in allen drei Szenarien nur in geringem Maße von Veränderungen betroffen, neue Anforderungen an Qualifikationen werden in diesem Bereich nicht gesehen. Auf der Ebene des Transports der Primärenergie werden keine spürbaren Veränderungen im Zuge der Transformation des Energieversorgungssystems erwartet. Alle drei Szenarien gehen nicht explizit auf diese Wertschöpfungsstufe ein. Demzufolge zeichnen sich für entsprechende Akteursgruppen, wie beispielsweise Logistik-Provider oder Pipelinebetreiber, keine neuen Anforderungen an Qualifikationen ab.

Die Wertschöpfungsstufe Energieumwandlung umfasst neben der Umwandlung traditioneller Energieträger die Umwandlung regenerativer Energiequellen, wie beispielsweise Wasserkraft oder Windkraft, in Strom, Wärme und/oder Brennstoff/Treibstoff. Neben den Betreibern traditioneller Kraftwerke gehören als Akteure zu dieser Wertschöpfungsstufe insbesondere die Betreiber von Wind- und Solarkraftwerken, von Wasserkraftwerken und Geothermieanlagen sowie Industrieunternehmen mit eigenen Kraftwerkskapazitäten. Diese Akteure sind in den drei Szenarien in unterschiedlicher Weise von der Energiewende betroffen. Im Szenario 1 wird ein schneller Ausbau der erneuerbaren Energien beschrieben, was insbesondere die Wind- und Solarkraftwerke sowie die Biomasseanlagen in unterschiedlichen Konversionspfaden betrifft. Die entsprechenden Umwandlungsprozesse sowie die dazugehörigen Anlagen sind überwiegend bekannt. Dennoch werden zahlreiche Herausforderungen im Prozess der Energieumwandlung gesehen. Im Bereich der Bioenergie befinden sich beispielsweise Technologien wie die Holzstaubverfeuerung mit Motor/Turbine, die Holzvergasung im Zusammenhang mit der Brennstoffzelle oder auch die Biogasgewinnung und Brennstoffzelle noch in der Laborphase. Die Heißgasturbine, die Holzvergasung und Biokraftstoffsynthese oder auch Pyrolyse und Stromerzeugung hingegen befinden sich bereits in der Pilotphase (Eltrop et al. 2014: 8). Was die Umsetzung von Bioenergieprojekten betrifft, so hängen das Anspruchsniveau und demzufolge auch Anforderungen an Qualifikationen von der **Komplexität und Verfügbarkeit typengeprüfter Anlagen bzw. Anlagenkomponenten** ab, vom **Umfang der Energieversorgung** und vom erforderlichen **Genehmigungsprozess**. Während im ersten Szenario Bestrebungen hinsichtlich der Lösung des Problems der Abspaltung und Lagerung von Kraftwerks-CO<sub>2</sub> als nicht sinnvoll erscheinen, passen sie sehr gut zum Szenario 3. Neue Qualifikationen und Kompetenzen könnten mit diesem Technologiepfad verbunden sein. Das Szenario 1, mit einem verstärkten Einsatz von erneuerbaren Energien,

geht weiterhin einher mit der Notwendigkeit der Entwicklung und des Einsatzes von Energiespeichern. Erste Modellprojekte mit großen Speicheranlagen (Power-to-Gas), modularen Batteriespeichern im Bereich 5 MW und dezentralen Stromspeichern in privaten Haushalten deuten auf den Vormarsch von Speichertechnologien hin (vgl. FIZ Karlsruhe 2015). Während für die Errichtung und den Betrieb von großen Speicheranlagen nicht mit neuen Qualifikationsanforderungen in großem Umfang gerechnet wird, zeichnen sich für **dezentrale Energiespeicher** und deren **Integration** beispielsweise **in Gebäude** neue Anforderungen ab. Hierbei sind nicht nur Stromspeicher, sondern auch Wärmespeicher in der Diskussion.

Die Wertschöpfungsstufe der Energieverteilung, die Stromnetze sowie Gas- und Wärmenetze umfasst, ist in erheblichem Maße von der Transformation des Energieversorgungssystems betroffen bzw. in diese involviert, was sich insbesondere im Szenario 1 mit einem hohen Grad von Dezentralität der Energieversorgung zeigt. Dies betrifft den Ausbau und die Optimierung der Übertragungsnetze, die in der Verantwortung der Übertragungsnetzbetreiber liegen, wobei davon ausgegangen wird, dass diese Unternehmen auch über die hierfür erforderlichen personalen Ressourcen verfügen. Auch bei den Verteilnetzen steht ein massiver Ausbau im Szenario 1 an, der verbunden sein wird mit einer zunehmend intelligenten Netzsteuerung. Mit der Energieflussüberwachung, die verbunden ist mit dem stärkeren Einsatz von Messtechnik, wird es möglich, neue Formen des Lastmanagements zu entwickeln und umzusetzen, was bedeutet, dass die unterschiedlichen Verbrauchergruppen durch zeitlich versetzte Nutzung überschüssiger Energie bzw. entsprechende Energieabgabe Kosten sparen bzw. Zusatzerlöse einnehmen können. Dies erfordert die weitere **Entwicklung und den Einsatz von Smart-Grid-Technologien und -Modellen wie Smart Meter oder flexible Tarife** (Strunz et al. 2012: 12). In diesem Bereich ist mit neuen Anforderungen an Qualifikationen sowohl bei der Planung, der Installation und dem Betrieb entsprechender Systeme zu rechnen.

Weitere Fortschritte in der **Elektromobilität** sind mit dem Ausbau der **öffentlichen und privaten Ladeinfrastrukturen** verbunden, die ebenfalls installiert und gewartet werden müssen, was zu spezifischen Anforderungen an die entsprechenden Betreiber führen kann. Im Unterschied hierzu wird davon ausgegangen, dass keine neuen Anforderungen für die Errichtung neuer Tankstelleninfrastrukturen (z. B. Wasserstoff) entstehen. Gleiches gilt auch für den Ausbau und den Betrieb von Gas- und Wärmenetzen im Zusammenhang mit der stärkeren Nutzung erneuerbarer Energien. Eine Ausnahme bilden hier die Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen Netzarten. So kann beispielsweise durch dezentrale Blockheizkraftwerke eine geregelte Entnahme von Gas einhergehen mit der Wandlung in Strom und Wärme (Strunz et al. 2012: 13), was zu neuen Anforderungen an technische Kompetenzen führen kann.

Der **Energiehandel** wird in allen drei Szenarien vor neue Herausforderungen gestellt, da ein stärkerer Übergang zu marktwirtschaftlichen Regulierungsformen erfolgen wird. Betroffen werden Betreiber von Erneuerbare-Energie-Anlagen sein, Unternehmen, die die Direktvermarktung im Auftrag der Erzeuger übernehmen, Broker und Energieversorgungsunternehmen wie beispielsweise Stadtwerke. Aber auch große Unternehmen werden sich zukünftig in stärkerem Maße mit Beschaffungsstrategien für ihre Energieversorgung beschäftigen und entsprechende Qualifikationen nachfragen.

Auf der Wertschöpfungsstufe des Endenergieverbrauchs sind die privaten Haushalte, die Industrie, der Bereich Handel, Gewerbe und Dienstleistungen Akteure der Energiewende. Ihr Interesse besteht darin, einen bestimmten Nutzen mit minimalem Energieaufwand zu erreichen. Das betrifft Heizen, Kühlen und Warmwasser im Gebäude. Dieser Nutzen liegt insbesondere in den Themenfeldern Raumwärme, Warmwasser und Beleuchtung in Gebäuden, Prozessenergie in der Industrie sowie Kraft- und Treibstoffe im Verkehrssektor. Alle drei Szenarien gehen von einer wichtigen Rolle der Endenergieverbraucher bei der Transformation des Energieversorgungssystems aus. Vor allem im ersten

Szenario wird herausgearbeitet, dass der Primärenergieverbrauch erheblich sinken wird, wozu im Verkehrssektor die zunehmende Elektromobilität beitragen wird, mit neuen Anforderungen an die Ladeinfrastruktur, an Geschäftsmodelle von Flottenbetreibern sowie an Wartung und Reparatur. Im Bereich der Industrie wird mit der umfangreichen Einführung von **Energiemanagementsystemen** gerechnet, was mit neuen Anforderungen an geeignete Energiemanagementberater einhergehen wird. Die **Effizienzsteigerung in Gebäuden** ist ein sehr differenziertes Themenfeld, was sowohl Einfamilienhäuser als auch Mehrfamilienhäuser, Altbau und Neubau sowie Quartiereffizienz betrifft. Hier entstehen neue Anforderungen für das Handwerk, was die Systemintegrationsleistungen betrifft, für die Wohnungswirtschaft und Kommunen, um den Gebäudebestand sinnvoll zu sanieren.

## 5. Schlussfolgerungen

Unter methodischem Gesichtspunkt ergeben sich insbesondere zwei Schlussfolgerungen. (1) Die Aussagefähigkeit von Szenarien steigt, wenn Szenarioanalyseprozesse konzeptionell verortet werden, wie dies hier am Beispiel des Konzeptes „Multi-Level-Perspektive“ skizziert wurde. Eine erfolgreiche Operationalisierung setzt dabei voraus, dass sich Szenario-Teams nicht nur intensiv mit der Gegenwart ihres Gegenstandes beschäftigen, sondern stärker auch dessen Geschichte in den Blick nehmen, um ihre Analyse in übergreifende Prozesse einordnen zu können. Eine sehr systematische Beschreibung des Szenariogegenstandes (hier des Energieversorgungssystems) ermöglicht Szenarien, aus denen auch sehr konkrete Handlungsansätze im Prozess des Szenariotransfers mit vergleichsweise kurzen Zeithorizonten abgeleitet werden können. (2) Eine systematische Verknüpfung von quantitativen, modellbasierten Szenarien und eher qualitativ beschreibenden (narrativen) Szenarien erweist sich nach wie vor als eine anspruchsvolle methodische Herausforderung, die eine engere interdisziplinäre Zusammenarbeit, insbesondere von Natur- und Sozialwissenschaftlern, erfordert.



## LITERATUR

- Eltrop L, Härdtlein M, Jønsen T, Özdemir ED, Henßler M, Kruck C (2014) Grundlagen und Planung von Bioenergieprojekten. Dachleitfaden Bioenergie. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow-Prüzen. ISBN: 978-3-942147-13-2
- FIZ Karlsruhe (2015) Energiespeicher – Forschung für die Energiewende. <http://forschung-energiespeicher.info>. Accessed 10 Aug 2015
- Fournier J, Koske I, Wanner J, Zipperer V (2013) The Price of Oil – Will it Start Rising Again? OECD Economics Department Working Papers, vol 1031. OECD Publishing, Paris. doi: 10.1787/5k49q186vxnnp-en
- Gailing L, Huesker F, Kern K, Röhring A (2013) Die räumliche Gestaltung der Energiewende zwischen Zentralität und Dezentralität. Explorative Anwendung einer Forschungsheuristik. Working Paper, vol 51. Leibniz-Institut für Regionalentwicklung und Strukturplanung, Erkner
- Gausemeier J, Fink A, Schlake O (1998) Scenario Management: An Approach to Develop Future Potentials. *Technol Forecast Soc Change* 59(2):111–130. doi: 10.1016/S0040-1625(97)00166-2
- Geels FW (2007) Transformations of Large Technical Systems. A Multilevel Analysis of the Dutch Highway System (1950–2000). *Sci Technol Hum Val* 32(2):123–149. doi: 10.1177/0162243906293883
- Geels FW, Schot J (2007) Typology of sociotechnical transition pathways. *Res Pol* 36(3):399–417. doi: 10.1016/j.respol.2007.01.003
- Grin J, Rotmans J, Schot J (2010) Transitions to Sustainable Development. *New Directions in the Study of Long Term Transformative Change*. Routledge, New York. ISBN: 978-0-415-87675-9
- Henning HM, Palzer A, Schmidt M, Jachmann H, Strauß P, Pape C, Stock S, Fishedick M, Borggrefe F, Klann U (2014) Phasen der Transformation des Energiesystems – Ein ganzheitlicher Blick auf alle Wandlungsketten und Verbrauchssektoren. In: FVEE-Jahrestagung: Forschung für die Energiewende – Phasenübergänge aktiv gestalten, 6–7 Nov 2014, Berlin
- Institut für sozial-ökologische Forschung (2014) Übergänge in eine nachhaltige Entwicklung. Wissenschaftliche Koordination der Fördermaßnahme „Umwelt- und gesellschaftsverträgliche Transformation des Energiesystems“ des BMBF. <http://www.isoe.de/projekte/aktuelle-projekte/transdisziplinaere-methoden-und-konzepte/wiko-soef-energie>. Accessed 10 Sep 2015
- Jacobsson S, Lauber V (2006) The politics and policy of energy system transformation—explaining the German diffusion of renewable energy technology. *Energ Pol* 34(3):256–276. doi: 10.1016/j.enpol.2004.08.029
- Kronenberg T, Martinsen D, Pesch T, Sander M, Fischer W, Hake JF, Kuckshinrichs W, Markewitz P (2012) Energieszenarien für Deutschland: Stand der Literatur und methodische Auswertung. In: Bruhns H (ed) *Energiewende. Aspekte, Optionen, Herausforderungen*. Deutsche Physikalische Gesellschaft, Bad Honnef, ISBN: 978-3-9811161-2-0, pp 132–166
- Meadows DL, Meadows DH, Zahn E, Milling P, Heck H (1972) Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. DVA, Stuttgart. ISBN: 978-3-421-02633-0
- Mietzner D (2009) Strategische Vorausschau und Szenarioanalysen. Methodenevaluation und neue Ansätze. Gabler, Wiesbaden. ISBN: 978-3-8349-1687-7. doi: 10.1007/978-3-8349-8382-4
- Mietzner D, Reger G (2005) Advantages and disadvantages of scenario approaches for strategic foresight. *Int J Tech Intell Plann* 1(2):220–239. doi: 10.1504/IJ-TIP.2005.006516
- Nielsen SK, Karlsson K (2007) Energy scenarios: a review of methods, uses and suggestions for improvement. *Int J Global Energy Issues* 27(3):302. doi: 10.1504/IJ-GEI.2007.014350
- Ohlhorst D, Tews K, Schreurs M (2013) Energiewende als Herausforderung der Koordination im Mehrebenensystem. *TATuP* 22(2):48–55
- Reibnitz UH von (1991) *Szenario-Technik. Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung*. Gabler, Wiesbaden. ISBN: 978-3-409-13431-6
- Reibnitz UH von (2006) From Anticipation to Action: How to put Foresight and Future Thinking into Concrete Action. *Futures Res Q* 22(2):5–14
- ScMI (2013) *Handbuch „Scenario-Manager“*
- Strunz K, Kusche M, Schipper M, Viebig R (2012) Die Kompetenzen Berlin-Brandenburger Technologieunternehmen und Netzbetreiber für Energieversorgungssysteme. Szenarienanalyse – Übersicht regionaler Kompetenzen und Akteure. TSB Innovationsagentur Berlin GmbH, Bereich Energietechnik, Berlin
- Truffer B (2013) Zur geografischen Spezifizierung soziotechnischer Systeme. *Energiewende zwischen lokaler Verankerung und globaler Vernetzung*. *TATuP* 22(2):20–26
- Venjakob J (2012) Qualitativ-narrative Szenarios für die langfristige Entwicklung des polnischen Energiesektors. Eine energiegeographische Untersuchung. *Ecological Energy Policy*, vol 13. ibidem, Stuttgart. ISBN: 978-3-8382-0354-6
- WBGU (2011a) *Transforming Energy Systems. Factsheet 2/2011*. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Berlin. ISBN: 978-3-936191-53-0
- WBGU (2011b) *Welt im Wandel. Gesellschaftsvertrag für eine große Transformation*, 2nd edn. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Berlin. ISBN: 978-3-936191-38-7
- Weimer-Jehle W, Prehofer S, Vögele S (2013) Kontextszenarien. Ein Konzept zur Behandlung von Kontextunsicherheit und Kontextkomplexität bei der Entwicklung von Energieszenarien. *TATuP* 22(2):27–36

## AUTOREN

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

E-Mail für Korrespondenz:  
[dana.mietzner@th-wildau.de](mailto:dana.mietzner@th-wildau.de)







Technische Hochschule  
Wildau  
*Technical University  
of Applied Sciences*

Hochschulring 1  
15745 Wildau  
Germany

[www.th-wildau.de](http://www.th-wildau.de)