# SITZUNGSBERICHTE LEIBNIZ-SOZIETÄT DER WISSENSCHAFTEN

## Technologie und nachhaltige Entwicklung

VII. Symposium des Arbeitskreises "Allgemeine Technologie" der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V.

Ehrenkolloquium anlässlich des 80. Geburtstages von Ernst-Otto Reher

Herausgegeben von Gerhard Banse & Ernst-Otto Reher †

Mit Beiträgen von Benjamin Apelojg, Dietrich Balzer, Gerhard Banse. Kerstin Becker, Johannes Briesovsky, Marek Hauptmann, Ulf Holzendorf, Ernst-Peter Jeremias, Christian Kohlert, Jens-Peter Majschak, Bernd Meier, Norbert Mertzsch, Gerhard Öhlmann, Ernst-Otto Reher †, Dieter Seeliger & Bernd Thomas



BAND 130
JAHRGANG 2017

### Inhalt

Gerhard Banse, Ernst-Otto Reher † Einführung	7
Gerhard Banse Symposium "Technologie und nachhaltige Entwicklung" – Eröffnung und Laudatio	21
Gerhard Banse, Ernst-Otto Reher † Technologie und nachhaltige Entwicklung – Einführende Überlegungen	31
Dietrich Balzer Automatisierung und Nachhaltigkeit technologischer Lösungen	49
Johannes Briesovsky Resonanzpulsationstechnik für ressourcenschonende Prozesse in der Verfahrenstechnik	69
Kerstin Becker, Ernst-Peter Jeremias Nachhaltigkeitsaspekte einer zukunftssicheren Energieversorgung von Städten und Gemeinden	77
Christian Kohlert Nachhaltigkeit von Kunststoffverpackungen – von der Wiege bis zur Bahre	89
Marek Hauptmann, Jens-Peter Majschak Die Rolle der Nachhaltigkeit in der Konsumgüterproduktion, ihre Einschätzung und Kommunikation am Beispiel der Verpackungstechnik	99
Norbert Mertzsch, Bernd Thomas Technologische Herausforderungen auf dem Weg zu einer nachhaltigen Energieversorgung	131
Gerhard Öhlmann Ausgewählte innovative Effizienztechnologien auf Basis von Methan und Kohlenstoffdioxid	147

6	Inhal
Dieter Seeliger	165
Perspektiven und Probleme einer kohlenstofffreien Energiewirtschaft	
Benjamin Apelojg, Ulf Holzendorf	193
Erziehung zum nachhaltigen Konsum – Aufgabe von Schule	
Bernd Meier	213
Nachhaltigkeit als Basiskonzept in der Curriculum-Entwicklung?	
Ernst-Otto Reher †	229
Schlusswort	
Autorinnen und Autoren	231

### Gerhard Banse, Ernst-Otto Reher †

### Einführung

Nachdem alle Arbeiten an diesem "Sitzungsbericht" Anfang November durch die beiden Herausgeber abgeschlossen worden waren und nun die Druckvorlage erstellt werden sollte, erhielt ich die mich sehr traurig machende Nachricht, dass mein langjähriger Freund, Ko-Autor und Ko-Herausgeber Ernst-Otto Reher, seit der Gründung des Arbeitskreises "Allgemeine Technologie" der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin im Jahre 2001 deren Ko-Vorsitzender, am 18. November verstorben ist. – Es ist wohl in seinem Sinne, wenn die restlichen Arbeiten nun von mir übernommen werden und dieser "Sitzungsbericht" als sein Vermächtnis angesehen wird.

Gerhard Banse

Der vorliegende Band der "Sitzungsberichte" enthält die Beiträge des 7. Symposiums des Arbeitskreises "Allgemeine Technologie" der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin, das am 13. Mai 2016 in Berlin stattfand. Dieser Arbeitskreis, gegründet am 12. Oktober 2001, hatte in Kooperation mit dem Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse des Forschungszentrums Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft (jetzt: Karlsruher Institut für Technologie), hatte bislang folgende Symposien zur Allgemeinen Technologie durchgeführt:

- Allgemeine Technologie Vergangenheit und Gegenwart (2001);
- Fortschritte bei der Herausbildung der Allgemeinen Technologie (2004);
- Allgemeine Technologie verallgemeinertes Fachwissen und konkretisiertes Orientierungswissen zur Technologie (2007);
- Ambivalenzen von Technologien Chancen, Gefahren, Missbrauch (2010);
- Technik Sicherheit Techniksicherheit (2012);
- Technologiewandel in der Wissensgesellschaft qualitative und quantitative Veränderungen (2014).<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Die Ergebnisse dieser Symposien wurden in den Bänden 50, 75, 99, 112, 116 und 122 der "Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät" veröffentlicht.

Gegenstand des siebenten Symposiums war der Zusammenhang von technologischer und nachhaltiger Entwicklung. Mit "nachhaltiger Entwicklung" wird eine Entwicklung bezeichnet, in der die Bedürfnisse heutiger Generationen befriedigt werden, ohne die Befriedigung der Bedürfnisse kommender Generationen zu gefährden, d.h. zu riskieren, dass diese ihre eigenen Bedürfnisse nicht (ausreichend) befriedigen können – wie es sinngemäß bereits im Jahr 1987 im sogenannten Brundtland-Bericht, dem programmatischen Dokument für eine Entwicklung in Richtung mehr Nachhaltigkeit, hieß. Dieses Leitbild hält mit seinen sozialen, ökonomischen, technischen, ökologischen und institutionell-politischen Komponenten die fundamentalen Überlebens- und Entwicklungsbedingungen sowohl dieser als auch der zukünftigen Gesellschaft durchgängig präsent. Nachhaltige Entwicklung kann als regulatorische Idee für die Gestaltung der natürlichen Existenzund Entwicklungsbedingungen heutiger wie kommender Generationen verstanden werden.

Angesichts der Bedeutung des Technischen für gesellschaftlichen Wandel ist Nachhaltigkeit deshalb auch im Zusammenhang mit Technik und ihrer Entwicklung einzufordern. Einerseits muss dazu dieses Prinzip zunächst im Prozess des Entwurfs, der Konzipierung, der Gestaltung und der Fertigung technischer Lösungen und sodann im Verwendungshandeln einen angemessenen Platz haben. Andererseits sind nach dem Potenzial technologischer Lösungen für nachhaltige Entwicklung sowie nach den Bedingungen, unter denen sich dieses Potenzial realisieren lässt, zu fragen. Über die individuelle Verwirklichung der Nachhaltigkeitspotenziale von Technik entscheidet sodann zusätzlich eine Kombination aus Technikgebrauch, Lebensstil und Konsumverhalten. Somit schließt nachhaltige Entwicklung auch den breiten Dialog über Gestaltungsziele, über Visionen einer zukünftigen Gesellschaft, über Wünschbarkeit, Akzeptabilität und Zumutbarkeit technischer Entwicklungen ein. Das aber setzt auch Wissen voraus, vor allem über Ursache-Wirkungsund Zweck-Mittel-Beziehungen, über Folgen technisch instrumentierten Verhaltens sowie über ökologische, soziale u.a. Effekte der Techniknutzung.

Abbildung 1 zeigt ein Schema, nach dem alle Produkt- und/oder Vorgangstechnologien einer Analyse unterzogen werden können. Damit sind dann Rückwirkungen auf die entsprechende technologische Lösung möglich, um eine Optimierung des Nachhaltigkeitsgrades bewirken zu können. Das betrifft alle drei Dimensionen. Das "Prinzip Nachhaltigkeit" kann so sowohl als "Korrektur" traditioneller Technologien als auch als "Motor" für veränderte technologische Möglichkeiten bis hin zu neuartigen Technologien wirken.

Einführung 9

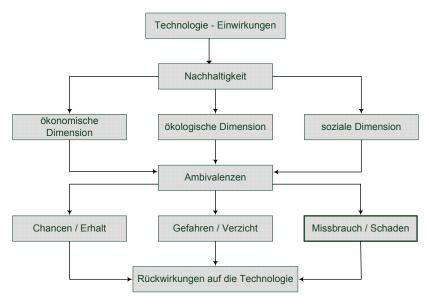


Abb. 1: Schema zur Nachhaltigkeits-Analyse von Technologien

Eigene Darstellung

Mit den drei (Haupt-)Komponenten nachhaltiger Entwicklung, dem Ökonomischen, dem Ökologischen und dem Sozialen, lässt sich ein weiteres Schema entwickeln, das als "Nachhaltigkeitsdreieck" bezeichnet sei. Der Zustand aus heutiger Sicht kann dann wie in Abbildung 2 gekennzeichnet werden.

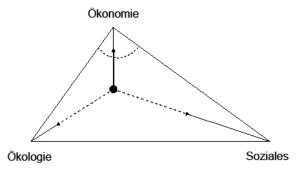


Abb. 2: Nachhaltigkeitsdreieck

Eigene Darstellung

Der Dreiecksschwerpunkt liegt heute immer noch in dem gestrichelten Bereich der "Ökonomie". Er verschiebt sich nur durch öffentlichen Druck in Richtung "Ökologie". Und in Richtung "Soziales" bewegt er sich nur durch den Druck der Zivilgesellschaft und der Gewerkschaften. Es wird noch lange dauern, bis der Dreiecksschwerpunkt tatsächlich im Zentrum liegen wird und alle drei Dimensionen gleichwertig Berücksichtigung finden werden. Es gilt, diesen Vorgang der "Schwerpunktverschiebung" zu beschleunigen.

Diese und weitere Facetten des Zusammenhangs zwischen nachhaltiger Entwicklung und Technikentwicklung waren Gegenstand des 7. Symposiums und sind inhaltliche Anknüpfungspunkt der Beiträge in diesem Band.

Mit dem Symposium wurde zugleich das Wirken des langjährigen Ko-Vorsitzenden des Arbeitskreises Allgemeine Technologie der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Herrn *Ernst-Otto-Reher*, anlässlich seines 80. Geburtstages geehrt. Deshalb enthält die "Eröffnung" des Symposiums durch den Präsidenten der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften auch eine umfassende Würdigung des Jubilars.

\*\*\*

Mit "Technologie und nachhaltige Entwicklung" wird von Gerhard Banse und Ernst-Otto Reher überblicksartig in die Thematik des Symposiums eingeführt. Angesichts der offensichtlichen Diskrepanz zwischen der gegenwärtigen, auf enormer Naturausbeutung und Umweltbelastung basierenden Lebensart eines Teils der Menschheit einerseits und den bereits heute absehbaren Erfordernissen für die Sicherung der Existenz- und Entwicklungsbedingungen künftiger Generationen andererseits sind Konzepte notwendig. die sowohl politisches wie wissenschaftliches, sowohl individuelles wie gesellschaftliches Handeln in seiner "Zukunftsfähigkeit" orientieren und befördern können. Dabei fällt auf, dass in vielen dieser Nachhaltigkeitsüberlegungen Technik keine Erwähnung findet, dass zwar ökonomische, ökologische, soziale und politisch-administrative Zusammenhänge als relevant angesehen werden, nicht jedoch technische (mit einer Ausnahme, dem Verweisen auf die sogenannte Informations- und Kommunikationstechnik). Damit gewinnt die Einsicht (bzw. Frage), dass (bzw. ob) Technologien in der Regel per se weder nachhaltig noch nicht nachhaltig sind, eine wichtige Bedeutung: Für nachhaltige Effekte von Technik sind zwar die (internen) technischen Leistungsparameter bedeutsam, entscheidender ist zunächst jedoch die Art und Weise, wie Technik in der Gesellschaft eingesetzt und geEinführung 11

nutzt wird, in welche Kontexte sie integriert und welchen Zwecksetzungen sie untergeordnet ist. Im Beitrag geht es um das Potenzial technischer und technologischer Lösungen an bzw. für (mehr) Nachhaltigkeit (das unterschiedlich groß bzw. klein sein kann) sowie um die Bedingungen, unter denen sich dieses Potenzial realisieren lässt.

Dietrich Balzer geht dem Zusammenhang von "Automatisierung und Nachhaltigkeit technologischer Lösungen" nach. Der heute viel und manchmal auch etwas oberflächlich verwendete Begriff der Nachhaltigkeit (Sustainability) hat einen direkten Bezug zur Automatisierung. Wenn wir von Nachhaltigkeit reden, müssen wir technische, ökonomische, ökologische und soziale Kriterien betrachten. Im Sinne der Nachhaltigkeit muss also eine polykriteriale Optimierungsaufgabe (Vektoroptimierung) gelöst werden. Es geht um die Bestimmung einer Pareto-Menge. Es liegt auf der Hand, dass die Automatisierung als Schlüssel zu nachhaltigen technologischen Prozessen angesehen werden kann. Unter dem technischen Kriterium verstehen wir die Einhaltung von Optimalitätsbedingungen bei der automatischen Prozessführung, -stabilisierung und -sicherung. Dabei geht es erstens um adaptive Lösungen unter Nutzung echtzeitfähiger Elemente der künstlichen Intelligenz und zweitens um die Wiederverwendbarkeit von Automatisierungslösungen. Unter dem ökonomischen Kriterium verstehen wir die Wettbewerbsfähigkeit, unter dem ökologischen Kriterium die Ressourceneffizienz und unter dem sozialen Kriterium die physiologischen und psychologischen Arbeitsbedingungen. Die Automatisierung verfügt als integrierende Wissenschaftsdisziplin über alle Voraussetzungen, um diese Polyoptimierungsaufgabe zu lösen. Die Beziehung zwischen Automatisierung und Nachhaltigkeit wird an Hand folgender Beispiele innovativer technologischer Lösungen erläutert: Gewinnung elektrischer Energie aus Abwärme im Niedertemperaturbereich, Energieautonomie von Wohn- und Gewerbegebieten durch Einsatz von virtuellen Kraftwerken sowie Nutzung von organischen Abfällen zur Erzeugung von Diesel durch pyrolysefreie katalytische drucklose Verölung.

Die "Resonanzpulsationstechnik für ressourcenschonende Prozesse in der Verfahrenstechnik" nutzbar zu machen ist das Anliegen von *Johannes Briesovsky*. Die Resonanzpulsationstechnik ist einsetzbar in verfahrenstechnischen Prozessen mit festen oder fluiden Grenzschichten (Fluid-Fluid- und Fest-Fluid-Systemen). Dabei kommt es zu wesentlichen Verbesserungen der Prozessführung. Über einige Prozessverbesserungen wird berichtet. Ausführlich wird die Querstromfiltration von Bier behandelt. Dieser Prozess entstand mit der Entwicklung der Membrantechnik. Membranfiltration wird

zunehmend zu einer Alternative zur Kieselgurfiltration, die den Stand der Technik darstellt. Bei der Querstromfiltration ist eine wesentliche Aufgabe, die Deckschichtbildung auf der Feedseite zu verhindern oder zu vermindern. Dies wird üblicherweise durch eine Erhöhung der Überströmgeschwindigkeit des Unfiltrates an der Membran erreicht, was zu erhöhtem Energieeinsatz führt. Auf Grund der Erfahrungen mit pulsierenden Flüssigkeitssäulen bei der Foulingverminderung in Wärmeübertragern (Aufheizen von Deponiesickerwasser und Altöl) wurde die Bierfiltration mit der Resonanzpulsationstechnik (RPT) untersucht. Dabei wird die Fluidsäule zu Eigenschwingungen (Resonanz) im Infraschallfrequenzbereich erregt. Die Schwingungen führen zu einer Hin- und Herbewegung der Flüssigkeitsmasse an der Membranwand und damit zu einem ständigen Auf- und Abbau der Strömung (Einlaufströmung, Richardson-Effekt). Die Filtrationsversuche wurden in der Privatbrauerei Metzler in Dingsleben, Thüringen, durchgeführt, wobei mit Originalbier und mit Pulsationssystemen versehenen Filtrationsanlagen industrieller Größe gearbeitet wurde. Durch Einsatz der Pulsation konnten der Umlaufstrom stark reduziert und eine wesentliche Durchsatzerhöhung des Filtrates über einen längeren Zeitraum als bei der dynamischen Filtration mit einer Umlaufpumpe erreicht werden.

Kerstin Becker und Ernst-Peter Jeremias geht es um "Nachhaltigkeitsaspekte einer zukunftssicheren Energieversorgung von Städten und Gemeinden". Vor dem Hintergrund einer Erschöpfung der Vermögensenergien, der zunehmenden Verschärfung des Gegensatzes von Arm und Reich und der Notwendigkeit einer wirksamen, positiven Einflussnahme auf die Stabilisierung des Weltklimas ergeben sich neue Herausforderungen an die Versorgung der Menschen mit Nutzenergie. Die Industrienationen haben über Jahrzehnte einen hohen Energiebedarf entwickelt und sind trotz eingeleiteter Maßnahmen zur Energieeinsparung und -effizienz immer noch führend beim Einsatz von Energie für Verkehr, Heizung und Klimatisierung und industrieller Nutzung. Deutschland ist durchaus beispielgebend bei der politischen Einflussnahme auf die Ausprägung eines Energie- und Klimabewusstseins und bei konkreten Maßnahmen zur Begrenzung des Nutzenergieeinsatzes. Trotz des in Deutschland inzwischen verfügbaren Instrumentariums zur Beeinflussung von Energieverbrauch und -effizienz sind die Autoren der Meinung, dass diese Maßnahmen nicht ausreichend durchgreifend und effizient sind in Bezug auf die Bewältigung der anstehenden globalen Erfordernisse. Genannt werden soll an dieser Stelle die Nutzung von Einkommensenergien im Bereich der Stromerzeugung aus Wind und Sonne bei gleichzeitiger Vernachlässigung des Wärmesektors. Sehr umstritten ist ein Engagement der Einführung 13

Kommunen im Bereich der Wärmeversorgung, insbesondere dann, wenn die Wärmenutzenergie durch Nah- und Fernwärmenetze verteilt wird. Hier treten regelmäßig und oft antagonistische Auseinandersetzungen bezüglich des Monopolcharakters dieser Versorgungslösungen mit der Unterstellung überhöhter Versorgungspreise auf. Aus physikalischer Sicht wird diese Diskussion zusätzlich auch durch die Wärmeverluste dieser Versorgungsform genährt, die nicht als unrealistisch abgetan werden können. Wichtige Schlussfolgerungen aus dieser Diskussion können aus Sicht der Autoren wie folgt zusammengefasst werden:

- (1) Die zentrale Erzeugung und Verteilung von Wärmenutzenergie in Wärmenetzen sind für eine zukunftsorientierte, nachhaltige Energieversorgung unverzichtbar.
- (2) Die temporäre Umstellung auf dezentrale Vermögensenergien (Erdgas, Heizöl) in bestehenden zentralen Wärmeversorgungssystemen wird zum irreversiblen Verlust der zentralen Systeme führen.
- (3) Diese Entwicklung kann nur verhindert werden, wenn bei der ökonomischen, sozialen und ökologischen Bewertung der zentralen und dezentralen Systeme die Bilanzkreise einer derzeit eher regional abgegrenzten Betrachtung deutlich erweitert werden.

Der Beitrag beschäftigt sich in diesem Sinne mit den Möglichkeiten, Nahund Fernwärmenetze in Deutschland wettbewerbsfähig im Sinne der vorstehenden Thesen zu halten bzw. zu machen.

"Nachhaltigkeit von Kunststoffverpackungen – von der Wiege bis zur Bahre" ist der Gegenstand der Überlegungen von *Christian Kohlert*. Die Entscheidung für bestimmte Kunststoffverpackungen setzt sich zusammen aus der "Ökonomie" (Kosten, Preis, Gewinn), den Eigenschaften (Barriere, Festigkeit) und der Nachhaltigkeit (Ökologie, Energie, CO<sub>2</sub>-Verbrauch). In entwickelten Industrieländern ist der Quotient von Preis/Eigenschaften konstant: hoher Preis für herausragende Eigenschaften und umgekehrt. Seit einigen Jahren setzt sich der Nachhaltigkeitsgedanke zusätzlich mehr und mehr durch. In Entwicklungsländern ist noch oft der ökonomische Aspekt überbetont. Auf Eigenschaften wird oft zu Gunsten des Preises verzichtet, Nachhaltigkeit wird den entwickelten Industrieländern überlassen. Inhalt des Beitrages ist eine Analyse von Nachhaltigkeitsgedanken am Beispiel von Kunststoffverpackungen. Dabei werden neuste Daten in ihrer historischen Entwicklung betrachtet und Unterschiede der amerikanischen und europäischen Nachhaltigkeitswerte dargestellt. Abschließend wird an prak-

tischen Beispielen ein Ökobilanztool zur Eigenbewertung nachhaltiger Verpackungsentscheidungen vorgestellt.

"Die Rolle der Nachhaltigkeit in der Konsumgüterproduktion, ihre Einschätzung und Kommunikation und Nutzung am Beispiel der Verpackungstechnik" wird von Marek Hauptmann und Jens-Peter Majschak untersucht. Nachhaltigkeit begleitet mit zunehmendem Bevölkerungswachstum und zunehmender Intensivierung der Ressourcennutzung die Konsumgüterproduktion als kontinuierlich an Bedeutung gewinnender Entwicklungszweig. Die Verpackungstechnik ist als integrales Bindeglied in einer Vielzahl von Wertschöpfungsschritten von Konsumgütern präsent. Die Verpackung selbst lässt Wertschöpfungsketten entstehen, in denen die Notwendigkeit einer stringenten Umsetzung vor allem ökologischer Gesichtspunkte bei der Gestaltung von Produkten bzw. ihrer Verpackung häufig durch Negativerscheinungen wie z.B. Abfällen sichtbar wird. Die Umsetzung ökologischer Gesichtspunkte wird innerhalb der wettbewerbsdominierten und umsatzorientierten Konsumgüterproduktion nur gelingen, wenn diese mit wettbewerblichen Kriterien bzw. Marketingstrategien in Einklang gebracht werden können. Substantielle Grundlage dafür ist eine vollständige und transparente Kommunikation aller Aufwendungen in der Produktion des Produktes und seiner Verpackung. Der Beitrag fasst aktuelle gesellschaftlichen Entwicklungstendenzen und Konfliktpotenziale zusammen, erläutert Methoden zur Beurteilung von Aufwendungen in der Konsumgüterproduktion, erörtert deren Mehrwert und Grenzen in der Verpackungstechnik und gibt einen Überblick über etablierte Unternehmensstrategien beim Umgang mit dem Thema Nachhaltigkeit.

Der Gegenstand des Beitrages von Norbert Mertzsch und Bernd Thomas sind "Technologische Herausforderungen auf dem Weg zu einer nachhaltigen Energieversorgung". In der Jahrtausende währenden Entwicklung der Menschheit konnte der Mensch seit dem Beginn des Gebrauchs des Feuers bis zur Mitte des 18. Jh.s im Wesentlichen nur auf Einkommensenergie zurückgreifen. Der Begriff der Nachhaltigkeit wurde erstmalig von Hans Carl von Carlowitz im Jahr 1713 im Sinne eines langfristig angelegten verantwortungsbewussten Umgangs mit der Ressource Holz verwendet. Der Nachhaltigkeitsbegriff auf die Energieversorgung angewendet kann nur bedeuten, dass die Vermögensenergien langfristig wieder durch Einkommensenergien abgelöst werden und diese bis dahin möglichst schonend genutzt werden. Um die Entwicklungsziele für die Energieversorgung im Rahmen der Klimapolitik Deutschlands bis 2050 zu erreichen, sind große technologische Herausforderungen zu meistern. Im Bereich der Energieeffizienz betrifft dies alle Bereiche von der Energiebereitstellung bis zur Verwendung.

Einführung 15

Eine besondere Herausforderung ist dabei die Senkung des Heizenergieverbrauchs durch Wärmedämmmaßnahmen. Für den Bereich der Bereitstellung von Elektroenergie ist in den nächsten Jahren die größte Herausforderung neben dem Übergang von der Vermögensenergie zur Einkommensenergie die langfristige und sichere Speicherung großer Mengen Elektroenergie. Bei der Versorgung mit Wärmeenergie liegen die technologischen Herausforderungen vor allem in der großflächigen Einbindung der Solarthermie in Wärmenetze und in der langfristigen Speicherung von Wärme. Eine weitere große Herausforderung wird die effektive Nutzung der tiefen Geothermie werden. Der Verkehrsbereich steht vor der Herausforderung, trotz eines prognostizierten steigenden Verkehrsaufkommens durch den Übergang zu einkommensenergiebasierter Mobilität die beschlossenen Klimaschutzziele zu erreichen. Auf Grund der erzielbaren Wirkungsgrade werden voraussichtlich vorrangig die Energieträger Elektroenergie, Wasserstoff und Methan eine Perspektive besitzen. Die notwendige Reduzierung der Emissionen von Kohlenstoffdioxid bei der Bereitstellung von Energieträgern für Industrie und privaten Verbrauchern ist neben allen technologischen Herausforderungen aber vor allem eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Von der Politik gesetzte Rahmenbedingungen für diesen Wandel sind damit mitentscheidend für Erfolg oder Misserfolg von technischen und technologischen Entwicklungen.

"Ausgewählte innovative Effizienztechnologien auf Basis von Methan und Kohlenstoffdioxid" sind die Thematik der Darlegungen von Gerhard Öhlmann. Für die chemische Industrie gehören Ressourcenknappheit und Klimawandel zu den großen Herausforderungen für die nachhaltige Gestaltung der weiteren Entwicklung. Die effiziente, klimaverträgliche Nutzung der Ressourcen und die Verbreiterung der Rohstoffbasis sind daher unabdingbare Voraussetzungen für die mittel- und langfristige Lösung der aus dieser Sachlage abzuleitenden Aufgaben. Große, aber auch mittlere Unternehmen der Chemie und weiterer stoffwandelnder Industriezweige wie z.B. der Eisen- und Stahlindustrie entwickeln Konzepte für neuartige Technologien, die eine effizientere Nutzung fossiler Kohlenstoffträger, darunter vor allem die effizientere, stoffliche Nutzung von Erdgas, sowie die stoffliche Nutzung von Kohlendioxid ermöglichen. Mit ihrer Fördermaßnahme "Technologien für Nachhaltigkeit und Klimaschutz - Chemische Prozesse und stoffliche Nutzung von CO2" hat das BMBF erstmalig im Jahre 2009 diese Entwicklung gezielt unterstützt. Mit der Richtlinie zur Förderung der Aufgabe "CO<sub>2</sub>Plus - Stoffliche Nutzung von CO<sub>2</sub> zur Verbreiterung der Rohstoffbasis" setzte das Ministerium im Jahre 2015 diese Förderinitiative fort. Einer der Hauptwege der stofflichen Nutzbarmachung von CO2 ist seine Reduktion mit Wasserstoff. Dazu bedarf es aber einer großvolumigen Wasserstoffquelle, die im Interesse des Klimas ihrerseits nicht mit der Bildung großer Mengen Kohlendioxids verbunden ist, wie das gegenwärtig bei dem Hauptverfahren der Wasserstoffproduktion, dem sogenannten Dampfreformieren von Methan, der Fall ist. Die gegenwärtige Zusammensetzung des deutschen Strommixes macht Elektrolyse-Wasserstoff noch nicht ausreichend wirtschaftlich, um hierfür eingesetzt zu werden. Im Beitrag wird gezeigt, wie, warum und unter welchen Voraussetzungen die rein thermische Spaltung des Methans in Wasserstoff und Kohlenstoff ein realistischer Weg sein kann, wenngleich auch von der erfolgreichen Forschung bis zur Entwicklung einer Pilot- oder Demonstrationsanlage noch einige Hürden zu überwinden sind. Die chemisch-industrielle Forschung (BASF, hte Heidelberg) hat Anlagenentwickler (Linde AG u.a.) einbezogen und die Eisenund Stahlindustrie (ThyssenKrupp AG) für die Erprobung der Anwendbarkeit des in der Methanspaltung anfallenden festen Kohlenstoffs für die Verhüttung von Eisenerz gewonnen. Das Projekt der Entwicklung eines zweistufigen Verfahrens der Herstellung von Synthese-Gas durch Wechselwirkung des aus der Methanspaltung gewonnenen Wasserstoffs mit CO2 wurde als Teil des oben genannten Förderprogrammes des BMBF am 1. Juli 2013 gestartet und ist mit einer Laufzeit von drei Jahren geplant. Nicht eindeutig klar bleibt allerdings, in welchem Maße eine Kooperation innerhalb dieses Projektes mit den Untersuchungen am KIT und am IASS in Potsdam zur thermischen Spaltung von Methan zu Wasserstoff und festen Kohlenstoff bestanden hat oder noch besteht. Im Beitrag wird jedoch auf diese Ergebnisse, soweit zugänglich, zurückgegriffen. Interessant ist die Entwicklung der Forschungsaktivitäten bei der Thyssen Krupp AG, die nicht nur die stoffliche Nutzung der Hüttengase ihrer Anlagen anstrebt, sondern auch die dadurch fehlende energetische Nutzung derselben für den Betrieb ihrer eigenen Anlagen durch regenerativen Strom zu ersetzen. Dazu will der Konzern überschüssiges Stromangebot aus Wind- und Sonnenenergie in weiter zu entwickelnden Redox-Flow-Batterien speichern und dadurch das schwankende Angebot regenerativer Energien stabilisieren. Auf diese Weise würde außerdem nicht nur eine Einsparung fossiler Kohlenstoffträger, sondern auch eine echte Senkung der CO2-Emissionen erreicht. Neben der zweistufigen Erzeugung von Synthesegas werden im Beitrag auch die Direktsynthesen von Methanol und Dimethylether aus Kohlendioxid und Wasserstoff behandelt. Soweit öffentlich zugänglich, werden bei allen chemischen Prozessen die Ergebnisse zu den Katalysatorentwicklungen besonders berücksichtigt.

Einführung 17

Die stärker technisch orientierten Nachhaltigkeitsüberlegungen werden durch den Beitrag von Dieter Seeliger "Perspektivische Beiträge atomarer und nuklearer Prozesse zu einer künftigen kohlenstofffreien Energiewirtschaft" abgerundet. Durch die UN-Klimakonferenz in Paris wurde im Dezember 2015 ein Klimaabkommen beschlossen, das die Begrenzung der globalen Erwärmung auf deutlich unter 2°C, möglichst 1,5°C, vorsieht. Um dieses Ziel erreichen zu können, sollen die Nettotreibhausgasemissionen weltweit zwischen 2045 und 2060 auf Null zurückgefahren werden. Dies erfordert eine sehr konsequente Klimaschutzpolitik, in deren Zentrum die Dekarbonisierung der Energiewirtschaft steht – die Vermeidung oder drastische Reduzierung des Einsatzes von Kohlenstoff aus fossilen Energieträgern. Zahlreiche industriell entwickelte Länder sehen auch in Zukunft die Nutzung der Kernspaltung als unabdingbare Technologie zur Reduzierung des Einsatzes fossiler Energieträger. Deutschland und andere Staaten setzen vor allem auf den Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energieträger und nehmen die aus deren Volatilität resultierenden Schwierigkeiten in Kauf, um die radiologischen Risiken aus der Kernspaltung zu vermeiden. Auf der 5. Jahrestagung der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften 2012 zum Thema "Energiewende - Produktivkraftentwicklung und Gesellschaftsvertrag" wurde unter anderen die Frage aufgegriffen, ob Kernfusion die Bedarfslücke bei Elektroenergie im 21. Jh. umweltverträglich schließen kann. Der Autor beleuchtet diese Frage erneut anhand jüngster Fortschritte der Fusionstechnologie auf Basis von Magnet- und Trägheitshalterung. Kurz behandelt werden neue Entwicklungen zur Energiefreisetzung in diversen Metall-Wasserstoff-Systemen. Die Fortschritte geben Anlass zu der berechtigten Erwartung, dass atomare und nukleare Prozesse – neben der weltweit genutzten Kernspaltung – langfristig eine tragende Rolle bei der Dekarbonisierung der Energiewirtschaft und damit für den Klimaschutz spielen können.

In den zwei folgenden – aufeinander bezogenen – Beiträgen sind Bildungsfragen im Zusammenhang mit nachhaltiger Entwicklung zentral. Zunächst stellen *Benjamin Apelojg* und *Ulf Holzendorf* die Frage: "Erziehung zum nachhaltigen Konsum – Aufgabe von Schule?". Mit der Einführung der Weltdekade "Bildung für eine nachhaltige Entwicklung" von 2005 bis 2014, beschlossen auf dem UN-Weltgipfel 2002, wurde das Ziel ausgerufen, die Thematik "Nachhaltigkeit" in allen gesellschaftlichen Bereichen zu behandeln. Regierungen sind damit beauftragt worden, die Verwirklichung der Leitidee "Nachhaltigkeit" in Form konkreter inhaltlicher, pädagogischer und didaktischer Ansätze in der Schule umzusetzen. Folgt man den Leitlinien der Bundesregierung und vielfältiger Organisationen, so sind sie sich hin-

sichtlich der grundsätzlichen Frage einer nachhaltigen Bildung, eingeschlossen den Konsumbereich, alle einig. Die Zielinhalte zum nachhaltigen Konsum werden durch den Beschluss der Kultusminister-Konferenz vom 12. September 2013 "Zur Verbraucherbildung an Schulen" kanalisiert. Nimmt man allerdings die Ziele einer nachhaltigen Bildung genauer unter die Lupe, so findet man zu Beginn der Diskussion (im Jahr 2008) ein diffuses Bild unterschiedlicher pädagogischer und didaktischer Zielvorstellungen hinsichtlich dessen, was die Funktion und die didaktischen Elemente einer nachhaltigen Bildung sind oder seien sollten. Trotz pädagogischer und didaktischer Differenzen wirkt eine nachhaltige Bildung teilweise wie ein leichtverdaulicher Happen, ein Heilsbringer einer besseren Zukunft. Den gesellschaftlich vorherrschenden Begriff von Nachhaltigkeit unter beispielsweise sozialen und ökonomischen Aspekten zu problematisieren tun nur wenige. In dem die Autoren die Differenzen und die Entwicklung verschiedener Ansätze einer nachhaltigen Bildung und des Nachhaltigkeitsbegriffs an sich aufzudecken versuchen, möchten sie der Frage, inwieweit Erziehung zum nachhaltigen Konsum eine Aufgabe von Schule ist, nachgehen. Hier sind die Entwicklungen sowohl aus Erzeugersicht (Produktion) als auch aus Verbrauchersicht (Konsumtion) zu betrachten. Da Nachhaltigkeit als Basiskonzept im Lehrplan für Wirtschaft-Arbeit-Technik (WAT) sowohl im Themenfeld Haushalt und Konsum als auch im Themenfeld Unternehmen verankert ist. sollen am Ende des Vortrages kurz zwei Praxisbeispiele aus beiden Bereichen vorgestellt werden.

Bernd Meier geht dann abschließend in "Nachhaltigkeit als Basiskonzept in der Curriculum-Entwicklung?" noch einen Schritt weiter. In der Curriculum-Entwicklung haben sich in den vergangenen Jahren deutliche Veränderungen ergeben). Eine klar zu bestimmende Tendenz ist der Übergang von der Inputsteuerung zur Output-Orientierung. In diesem Kontext steht vor allem auch die Diskussion um Kompetenzen. Darüber hinaus zeigen die aktuellen Entwicklungen im Bestreben um eine Konzentration auf das Wesentliche die Bestimmung von Basiskonzepten als eine weitere Tendenz in der Curriculum-Entwicklung. Als Basiskonzept versteht man in der Curriculum-Entwicklung die strukturierte Vernetzung aufeinander bezogener Begriffe, Theorien und erklärender Modellvorstellungen, die sich aus der Systematik eines Faches zur Beschreibung elementarer Prozesse und Phänomene historisch als relevant herausgebildet haben. Ein solches Basiskonzept im Rahmen der arbeitsorientierten bzw. naturwissenschaftlich-technischen Bildung wird mit "Nachhaltigkeit" beschrieben. Der Beitrag geht der Frage nach, inwieweit Nachhaltigkeit als Basiskonzept von Curricula tragfähig Einführung 19

sein kann. Beispielsweise betont der einheitliche Rahmenlehrplan für Berlin und Brandenburg für das Fach Wirtschaft-Arbeit-Technik Nachhaltigkeit als ein normatives Konzept. Es fordert den Ausgleich von wirtschaftlicher Entwicklung, ökologischer Tragfähigkeit und sozialer Verträglichkeit. Es ist damit ein Konzept umfassender Gerechtigkeit, sowohl zwischen den heute lebenden Menschen als auch zwischen diesen und zukünftigen Generationen unter globaler Perspektive sowie der Bewahrung natürlicher Lebensgrundlagen. Mit diesem Basiskonzept wird offensichtlich auch an die Ergebnisse der UN-Dekade "Bildung für nachhaltige Entwicklung (2005-2014)" angeknüpft. Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) soll Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen nachhaltiges Denken und Handeln ermöglichen. Die Lernenden werden in die Lage versetzt, sinnvolle Handlungsentscheidungen zu treffen, indem sie die Konsequenzen für künftige Generationen oder das Leben in anderen Weltregionen berücksichtigen. Zur Verwirklichung nachhaltiger Entwicklungsprozesse wurde das Konzept der Gestaltungskompetenz ausformuliert. Damit wird die Fähigkeit bezeichnet, Wissen über nachhaltige Entwicklung anwenden und Probleme nicht-nachhaltiger Entwicklung erkennen zu können.

\*\*\*

Dieser Band wäre wiederum nicht zustande gekommen, wenn die Autorin und die Autoren nicht bereit gewesen wären, den zahlreichen Wünschen der Herausgeber – z.B. hinsichtlich Terminstellung, Manuskriptumfang, Präzisierungen – nachzukommen. Dafür herzlicher Dank. Unser Dank gilt auch Herrn *Georg B. Kaiser*, BMB-BuchManufacturBerlin, bei dem die "formale" Vereinheitlichung und Gestaltung dieses Bandes in besten Händen lag. Last – but not least – sind die Herausgeber sowohl der Rosa-Luxemburg-Stiftung – Gesellschaftsanalyse und politische Bildung e.V., Berlin, als auch der Berliner Senatsverwaltung für Wirtschaft, Technologie und Forschung zu Dank verpflichtet, ohne deren finanzielle Unterstützung einerseits das Symposium, aus dem diese Publikation hervorgegangen ist, nicht hätte durchgeführt werden können, andererseits der Druck dieses "Protokollbandes" nicht möglich gewesen wäre.

#### Gerhard Banse

# Symposium "Technologie und nachhaltige Entwicklung" – Eröffnung und Laudatio

Meine sehr geehrten Damen und Herren, liebe Mitglieder und Freunde der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften,

ich begrüße Sie ganz herzlich zum VII. Symposium des Arbeitskreises *Allgemeine Technologie* der Leibniz-Sozietät, das der Thematik "Technologie und nachhaltige Entwicklung" gewidmet ist. Ganz besonders herzlich begrüße ich Ernst-Otto Reher und seine Frau Svetlana.

Die Entwicklung des Arbeitskreises sowie die Initiierung dieses Symposiums und der sechs vorangegangenen Symposien sind vor allem mit dem Namen *Ernst-Otto Reher* verbunden. Deshalb findet dieses Symposium auch ihm zu Ehren und anlässlich seines 80. Geburtstages – den er vor gut einem Monat, am 12. April, beging – statt. Ich werde auf unseren Jubilar noch zurückkommen.

Seit 15 Jahren führt der Arbeitskreis regelmäßig seine Symposien durch, denn das 1. Symposium fand im Jahr 2001 zur Thematik "Allgemeine Technologie – Vergangenheit und Gegenwart" statt. Damals führten Ernst-Otto Reher und ich aus:

"Analogiebetrachtungen unter technologischen Gesichtspunkten zwischen, Stoff, Energie und Information [führten] unter technologischen Gesichtspunkten zu mehreren Neuansätzen einer Allgemeinen Technologie. [...] [Darin] wurde der Rahmen von technischen Sachsystemen über sozio-technische Systeme bis zu politischen, ökologischen u.a. Systemen gespannt. Sie richten sich vor allem an Lehrer (z.B. im Bereich der Polytechnik und der Arbeitslehre/Technikkunde), Ökonomen, Philosophen, Soziologen, Politiker u.a. "Begleiter" konkreter technologischer Lösungen. Natur- und Technikwissenschaftler als "Schöpfer" von Technologien gehörten nicht zu den vorrangigen Rezipienten. Das bedeutet jedoch nicht, dass sie keinen Nutzen an diesen Arbeiten haben konnten bzw. hatten [...] Ein Symposium "Allgemeine Technologie – Vergangenheit und Gegenwart" [...] hatte es sich zur Aufgabe gemacht, Überlegungen zu Verallgemeinerungen und Ganzheitsbetrachtungen im Sinne einer Allgemeinen Technologie vorzustellen, die sowohl dem Bereich der Technik- und Naturwissenschaften als auch dem der

22 Gerhard Banse

Sozial- und Geisteswissenschaften zuzuordnen sind [...] Die Vortragenden waren bemüht, aus ihren speziellen Fachgebieten heraus sich zu allgemeintechnologischen Überlegungen, wie sie von Johann Beckmann bzw. von Horst Wolffgramm, Günter Ropohl, Josef Hölzl, Günter Spur u.a. bisher vorgezeichnet wurden, anzuschließen und durch Beiträge auf verschiedenen Hierarchieebenen zu konkretisieren. [...] Auf dem Symposium wurde sichtbar, dass eine durchgehende Gestaltung der Disziplin 'Allgemeine Technologie" auch für die 'Technologiemacher" (homo faber) noch in weiter Ferne liegt – wobei noch nicht klar ist, ob es überhaupt möglich sein wird, ein derartiges Ziel zu erreichen." (Banse/Reher 2002, S. 11ff.)

Lässt man das dann Nachfolgende inhaltlich Revue passieren, dann sind wir dem Ziel sicher etwas näher gekommen:

- 2004: Fortschritte bei der Herausbildung der Allgemeinen Technologie;
- 2007: Allgemeine Technologie verallgemeinertes Fachwissen und konkretisiertes Orientierungswissen zur Technologie;
- 2010: Ambivalenzen von Technologien Chancen, Gefahren, Missbrauch;
- 2012: Technik Sicherheit Techniksicherheit;
- 2014: Technologiewandel in der Wissensgesellschaft qualitative und quantitative Veränderungen –.

Zu ergänzen sind diese Aktivitäten in Form von Symposien durch zwei weitere:

- (1) Das bis dahin Erarbeitete wurde im Sommersemester 2013 vor Studenten der Hochschule Merseburg und vor der Gruppe "Sachzeugen der chemischen Industrie" (ca. 80 Anwesende) durch Ernst-Otto Reher, Wolfgang Fratzscher, Klaus Krug und mich in der Lehrveranstaltung "Einführung in die Allgemeine Technologie Umriss einer Theorie der Technik –" im Umfang von zwei Semesterwochenstunden erfolgreich vorgestellt bzw. genutzt. Die dazugehörenden Materialen sind im Internet verfügbar.<sup>1</sup>
- (2) Im Jahr 2014 erschienen die "Beiträge zur Allgemeinen Technologie", deren Autoren wie Zielgruppe nicht in erster Linie "Technologiebegleiter", sondern Technologie-/Technik-Schöpfer waren bzw. sind (vgl. Banse/Reher 2014).

Und heute nun "Technologie und nachhaltige Entwicklung". Ich will dem Einführungsvortrag nicht vorgreifen, deshalb hier nur so viel:

<sup>1</sup> Vgl. http://web.hs-merseburg.de/~martin/Allg Technologie/.

Mit "nachhaltiger Entwicklung" wird eine Entwicklung bezeichnet, in der die Bedürfnisse heutiger Generationen befriedigt werden, ohne die Befriedigung der Bedürfnisse kommender Generationen zu gefährden, d.h. zu riskieren, dass diese ihre eigenen Bedürfnisse nicht (ausreichend) befriedigen können – wie es bereits im Jahr 1987 im sogenannten Brundtland-Bericht, dem programmatischen Dokument für eine Entwicklung in Richtung mehr Nachhaltigkeit hieß (vgl. Hauff 1987, S. 46). Dieses Leitbild hält mit seinen sozialen, ökonomischen, technischen, ökologischen und institutionell-politischen Komponenten die fundamentalen Überlebens- und Entwicklungsbedingungen sowohl dieser als auch der zukünftigen Gesellschaft durchgängig präsent. Nachhaltige Entwicklung kann als regulatorische Idee für die Gestaltung der natürlichen Existenz- und Entwicklungsbedingungen heutiger wie kommender Generationen verstanden werden.

Angesichts der Bedeutung des Technischen für gesellschaftlichen Wandel ist Nachhaltigkeit deshalb auch im Zusammenhang mit der Technik und ihrer Entwicklung einzufordern. Einerseits muss dazu dieses Prinzip zunächst im Prozess des Entwurfs, der Konzipierung, der Gestaltung und der Fertigung technischer Lösungen und sodann im Verwendungshandeln einen angemessenen Platz haben. Andererseits sind nach dem Potenzial technologischer Lösungen für nachhaltige Entwicklung sowie nach den Bedingungen, unter denen sich dieses Potenzial realisieren lässt, zu fragen.

Über die individuelle Verwirklichung der Nachhaltigkeitspotenziale von Technik entscheidet sodann zusätzlich eine Kombination aus Technikgebrauch, Lebensstil und Konsumverhalten. Somit schließt nachhaltige Entwicklung auch den breiten Dialog über Gestaltungsziele, über Visionen einer zukünftigen Gesellschaft, über Wünschbarkeit, Akzeptabilität und Zumutbarkeit technischer Entwicklungen ein. Das aber setzt auch Wissen voraus, vor allem über Ursache-Wirkungs- und Zweck-Mittel-Beziehungen, über Folgen technisch instrumentierten Verhaltens sowie über ökologische, soziale u.a. Effekte der Techniknutzung.

Diese und weitere Facetten des Zusammenhangs zwischen nachhaltiger Entwicklung und Technikentwicklung werden Gegenstand des heutigen Symposiums sein.

Nun zurück zu unserem Jubilar.

Ich gestatte mir, als Laudatio das Glückwunschschreiben zu verlesen, das der Sekretar der Klasse Naturwissenschaften und Technikwissenschaften, Herr Lutz-Günther Fleischer, und ich ihm zu seinem Geburtstag übersandt hatten:

24 Gerhard Banse

"Sehr geehrter Herr Kollege Reher, lieber Ernst-Otto,

zur Vollendung Deines achtzigsten Lebensjahres übermitteln wir Dir die herzlichsten Glückwünsche der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin: seines Präsidiums sowie der Klasse Naturwissenschaften und Technikwissenschaften. Mit Freude pointieren wir auch unsere ganz persönlichen Wünsche und unsere hohe Wertschätzung, die das Ergebnis des langjährigen, vertrauensvollen gemeinsamen Wirkens ist. Wir verbinden dies mit der Hoffnung auf gute Genesung, nachfolgend bestmögliche Gesundheit sowie eine noch lang anhaltende Schaffenskraft.

Seit 1999 bist Du eng und wirkungsvoll mit unserer traditionsreichen Gelehrtengesellschaft, der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin verbunden, vor allem in Form des Ko-Vorsitzenden ihres Arbeitskreises "Allgemeine Technologie".

In jeder Phase Deines jahrzehntelangen Schaffens als Ordentlicher Professor für Verfahrenstechnik an der TH Merseburg wirktest Du erfolgreich als Hochschullehrer, Forscher und international hoch geachteter Autor. Hohe Verantwortung übernahmst Du zudem als Direktor der Sektion Verfahrenstechnik bzw. später der Sektion Werkstoff- und Verarbeitungstechnik sowie mit der Funktion des Direktors des Sonderforschungsbereiches "Polymere Werkstoffe" und als Leiter des Problemlaboratoriums 'Technologie der Informationsaufzeichnungsmaterialien'.

Mit beharrlichem interdisziplinärem Engagement und stetigem persönlichen Einsatz trugst Du als bedeutende Persönlichkeit der Wissenschaft mit gleichgesinnten Kollegen auf dem sich etablierenden und beindruckend entwickelnden Gebieten der Verfahrens- und Verarbeitungstechnik, speziell der Technischen Rheologie – insbesondere mit effizienten rheologischen Analysen und Modellierungen – zu deren hoch bewerteten und dringend benötigten theoretischen und produktionspraktischen Erfolgen bei. So lebtest Du die verpflichtende Leibniz'sche Maxime 'Theoria cum praxi et commune bonum' und die Devise 'man müsste gleich anfangs das Werck samt der Wissenschaft auf den Nuzen richten'.

Das belegen in beeindruckender Weise Deine mehr als 200 wissenschaftlichen Veröffentlichungen in Form von Fachbeiträgen, Monographien und Lehrbüchern, 100 Patente sowie Deine erfolgreichen nationalen und internationalen Kooperationen. Mehrere Wissenschaftspreise, die hohe Auszeichnung Verdienter Techniker sowie die Ehrenprofessur und die Ehrendoktorwürde des Leningrader (St. Petersburger) Technologischen Instituts zählen zu den hervorragenden Prädikaten Deiner Verdienste.

Es verdient besondere Hochachtung, wie Du die Wende persönlich bewältigst hast und Deine reichen Erfahrungen als Leiter Forschung und Entwicklung der Göttfert Werkstoff-Prüfmaschinen GmbH in Buchen/Odenwald einbrachtest.

Besondere danken wir Dir für die schon genannte Mitwirkung in der Leitung des Arbeitskreises 'allgemeine Technologie' unserer Sozietät, der wesentlich zur deren theoretischer Begründung und Fundierung als Wissenschaft in statu nascendi beitrug sowie immer wieder überzeugend mit bislang sechs eintägigen Symposien zu aktuellen Themenkomplexen öffentlichkeitswirksam hervortritt. Dazu gehört auch die jeweilige Drucklegung der Symposiums-Materialien. Das am 13. Mai nun stattfindende VII. Symposium des Arbeitskreises wird zu Recht Deiner Ehrung dienen.

Wir möchten – auch ganz persönlich – die willkommene Gelegenheit nutzen, um für Deine kontinuierliche, umsichtige, anregende, nachhaltige und vielfältig gestaltende Anteilnahme am wissenschaftlichen Leben unserer Sozietät zu danken.

Die Klasse Naturwissenschaften und Technikwissenschaften sowie das Präsidium schätzen es außerordentlich, Dich als Mitglied in unserer Gelehrtensozietät zu wissen. Sehr gern nutzen wir Dein Jubiläum, um Dir, lieber Ernst-Otto, weiterhin alles Gute, eine rege Teilnahme und noch lange währende Teilhabe am wissenschaftlichen Leben unserer traditionsreichen Sozietät und einen angenehm verlaufenden Ehrentag zu wünschen."

Ich will persönlich nur kurz ergänzen: Zwischen uns stimmte von Anfang an die "Chemie" (vgl. dazu auch Reher 2016).

Meine sehr verehrten Damen und Herren,

zu seinem 70. Geburtstag hatte ich für Ernst-Otto Reher eine kurze wissenschaftshistorische Notiz verfasst, die ich – da sowohl Anlass als auch Rahmen passend sind – hier nochmals verlesen werde:

# Bemerkungen zu einem Fund in der Bibliothek der Technischen Hochschule (TU) St. Petersburg (Leningrad)

Lieber Ernst,

während meines Aufenthalts in Moskau vor einiger Zeit saß ich mit einem Freund, der als Technikphilosoph und Historiker der Technikwissenschaften seit vielen Jahren an der Akademie der Wissenschaften der Russischen Föderation arbeitet, nahe der Moskva im Gorki-Park, Bier und

26 Gerhard Banse

anderes trinkend. Er erzählte mir dabei folgende Begebenheit, die er wiederum von einem Kollegen eines Akademie-Instituts in St. Petersburg erfahren hatte:

Bei Renovierungsarbeiten in der Bibliothek der Technischen Hochschule in St. Petersburg wurden in einem Bücherregal drei zusammengeheftete und ein Mal gefaltete DIN A4-Blätter gefunden. Diese Blätter waren wohl zufällig hinter die Bücher dieses Regals gerutscht. In diesem Regal standen Bücher technikhistorischen und allgemeintechnischen Inhalts, die in der Regel von Ingenieurstudenten selten bis gar nicht genutzt werden. Deshalb hatte man bislang diese Blätter auch noch nicht gefunden. Dann holte mein Freund die Blätter aus der Tasche und zeigte sie mir. Es handelte sich um bereits ziemlich vergilbtes, holzhaltiges Papier, die mit Bleistift eng beschrieben waren, und zwar in deutsch und in russisch. Einige Stellen waren unleserlich. Als wahrscheinliches Entstehungsdatum kann der 12.04.1968 gelten – jedenfalls findet sich dieses Datum auf der ersten Seite rechts oben. Die Überschrift lautete "Gedanken nach der Lektüre einiger Arbeiten von JB". Zunächst war nicht klar, wer mit "JB" gemeint ist, aber der erste Anstrich ("Hintergrund") enthielt folgende Liste:

- Anleitung zur Technologie oder zur Kenntnis der Handwerke, Fabriken und Manufakturen ... – 1777;
- Entwurf der allgemeinen Technologie 1806 (offensichtlich nicht korrekt abgeschrieben, denn im Original steht "algemeine");
- diverse Briefe von und an JB;
- Die "Beyträge zur Geschichte der Erfindungen" (1782ff.) leider nicht vorhanden.

Aus dieser Zusammenstellung konnte rasch gefolgert werden, wer mit "JB" gemeint war: Johann Beckmann. Dieser spätere Göttinger "Professor für Weltweisheit" weilte von 1763 bis 1765 als Lehrer für Mathematik, Physik und Naturgeschichte am evangelischen St.-Peter-Gymnasium in St. Petersburg. Sowohl der "Zeitgeist" St. Petersburgs am Ende des 18. Jh.s als auch die Studienergebnisse der fast zweijährigen (!!) Rückreise von St. Petersburg nach Göttingen, die über Schweden und Dänemark führte, haben Beckmann entscheidend geprägt. (In diesem Zusammenhang sei nur der Aufenthalt in Uppsala bei Carl von Linné erwähnt, dessen "Systema naturae" Beckmann zu seinem "Systema technologiae" anregten.)

Doch zurück zu den aufgefundenen Blättern.

Nach der Liste der genutzten Materialien finden sich als zweiter Anstrich als "Hauptschlussfolgerungen" die folgenden:

- "1. Genial: JB denkt wie ich!"
- "2. Unbedingt einen Technikphilosophen konsultieren!"
- "3. Prüfen, ob sich die Überlegungen von JB nicht zu einer modernen Allgemeinen Prozesstechnik weiterentwickeln lassen!"

Danach folgen einige mehr oder weniger leserliche bzw. unleserliche Textteile. Dabei handelt es sich wahrscheinlich um Zitate aus den o.g. Werken (vor allem den nicht so bekannten Briefen), ergänzt durch Kommentare und Anmerkungen. Ich habe mir nur die folgenden notiert, die nicht nur ziemlich aufschlussreich sind und sehr modern klingen, sondern mir auch irgendwie bekannt vorkamen:

"T ist 'die Wissenschaft, welche die Verarbeitung der Naturalien, oder die Kenntniß der Handwerke, lehrt', eine Wissenschaft, 'welche alle Arbeiten, ihre Folgen und ihre Gründe vollständig, ordentlich und deutlich erklärt".

"AT [d.h. Allgemeine Technologie] soll ,die gemeinschaftlichen und besondern Absichten der ... Arbeiten und Mittel anzeigen, die Gründe erklären, worauf sie beruhen, und sonst noch dasjenige kurz lehren, was zum Verständniß und zur Beurtheilung der einzelnen Mittel, und zu ihrer Auswahl bey Übertragungen auf andere Gegenstände, als wozu sie bis jetzt gebraucht sind, dienen könnte."

Weiters: 'Dieß würde den Künstlern und Handwerkern gründliche und algemeine Begriffe von den Gegenständen, welche sie bearbeiten, und von dem dazu gebräuchlichen Verfahren erleichtern, und überhaupt eine Uebersicht gewähren, welche erfinderische Köpfe zu neuen nützlichen Verbesserungen hinleiten könnte.' Wissenschaftlicher "Anlass" dazu: 'Wer sich ein Studium daraus gemacht hat, viele Handwerke und Künste kennen zu lernen, und wer sich geübt hat, viele mit einem Blicke zu übersehn, der muß bemerken, daß sehr viele Handwerke, so verschieden auch ihre Materialien und Waaren sind, dennoch manche Arbeit zu einerley Absichten zu verrichten haben; oder daß sie einerley Absicht auf sehr verschiedene Weise zu erreichen wissen.' – Klar ist, dass man zwischen Technologie-Schöpfern und Technologie-Begleitern unterscheiden muss."

"AT beinhaltet Darstellungen zu den Rohstoffen, zur Herstellung und zur Ware – es wird schon damals deutlich, dass AT ein interdisziplinäres Objekt darstellt." 28 Gerhard Banse

"AT ist eine Utopie, der wir uns stets annähern. Sie bleibt aber eine Utopie. Jede Verallgemeinerung in der Technologie ist jedoch ein Meilenstein in Richtung der Gestaltung einer Allgemeinen Technologie im Beckmannschen Sinne."

"Innerhalb der Ingenieurdisziplinen Verfahrenstechnik, Fertigungstechnik und Verarbeitungstechnik wurden Verallgemeinerungen im Rahmen der technologischen Grundoperationen bzw. Prozessgruppen realisiert. Die Mechanik und die Grundlagen des Impuls-, Wärme- und Stoffüberganges, die Systemtechnik lieferten hierzu die Voraussetzungen. Aber auch außerhalb der Verfahrenstechnik, Fertigungstechnik und Verarbeitungstechnik gab es Bestrebungen, den Schulterschluss zu benachbarten Ingenieurdisziplinen zu suchen. Beispiele sind die Verfahrenstechnik und die Verarbeitungstechnik, aber auch die Verfahrenstechnik und die Energietechnik, die Fertigungstechnik und die Verarbeitungstechnik. Die Basis für derartige partielle Integrationen der Prozesstechniken der Stoffwandlung war die einheitliche Methodik in der Modellierung, Simulation und Optimierung der Prozesselemente."

"Kernstück der Allgemeinen Prozesstechnik der Stoffwandlung ist die Modellierung, Simulation und Optimierung der Prozesselemente der Stoffwandlung sowie die Prozesselementegestaltung unter Beachtung entsprechender Restriktionen."

"Zur Gestaltung der Allgemeinen Prozesstechnik der Stoffwandlung sind folgende Problemkreise zu lösen, die nur durch interdisziplinäre Arbeiten erreicht werden können:

- Ingenieurtechnische Dekomposition verfahrenstechnischer, verarbeitungstechnischer und fertigungstechnischer Prozesse. Formulierung der Bilanzräume und der prozessbedingten Bilanzgleichungen in Form differentieller, integraler oder fraktaler Gleichungssysteme.
- Ableitung mechanischer, thermodynamischer, kinetischer Materialgesetze zur Komplettierung der Bilanzgleichungen (Nichtlineare Transporttheorie).
- 3. Entwicklung prozessrelevanter Randbedingungen zur Lösung der mathematischen Modelle.
- 4. Entwicklung und Gestaltung informationstechnologischer Voraussetzungen zur Anwendung der erhaltenen Lösungen.
- 5. Formulierung technischer, technologischer, sozialer, kultureller Restriktionen als Nebenbedingungen für das Lösungsfeld."

"Der 'Technologie-Trichter' verdeutlicht, dass der Wege von der Forschung über die Entwicklung und die Optimierung bis zur Zulassung einer technologischen Neuerung zugleich der Weg vom naturwissenschaftlich Möglichen über das technisch-technologisch Realisierbare und das ökonomisch und ökologisch Machbare bis zum sozial, juristisch, politisch und human Vertretbaren ist. Für (natur-)wissenschaftliche, technische, ökonomische und wohl auch einige anthropologische (Arbeitswissenschaft!) Restriktionen gibt es anerkannte, bewährte und auch mathematisierte Verfahren ihrer Berücksichtigung und Einbeziehung in den o.g. Prozess der Konkretisierung technologischer Lösungen. Anders jedoch bei den anderen Restriktionen. Sie beginnen erst langsam, an Aufmerksamkeit zu gewinnen, vor allem im Rahmen von Prozessen der Folgenabschätzung und -bewertung, die jedoch durchgängig Anwendung finden sollten."

Abschließend werden auf der dritten Seite drei Empfehlungen genannt:

"Gründung eines interdisziplinären Technologie-Arbeitsgruppe";

"Organisation einer Konferenz-Serie zur AT, etwa 1. Vergangenheit und Gegenwart der AT, 2. AT und Fortschritte bei ihrer Herausbildung, 3. AT – verallgemeinertes Fachwissen und konkretisiertes Orientierungswissen zur T":

"Wissenschaftliche Informationen für die AdW der DDR vorbereiten; z.B. für 1977, 1989 (250. Geburtstag), 2006".

Soweit zu dem Geschriebenen.

Sie werden sich nun fragen, was das alles mit unserem Jubilar zu tun hat. Zunächst wohl nur so viel, dass Ernst-Otto ja jahrlang in St. Petersburg – bzw. Leningrad, wie es seinerzeit hieß – gewirkt hat, und zwar an der bereits genannten Technischen Hochschule: 1962 bis 1965 wissenschaftliche Aspirantur und Promotion zum Dr.-Ing. und 1971 Promotion zum Dr. sc. techn.

Bei einem näheren Vergleich des Inhalts dieser drei Blätter mit den Überlegungen, die Ernst-Otto auf zwei Symposien vorgetragen und in zwei "Protokollbänden" publiziert hat, konnte ich dann interessante Analogien feststellen, die ich hier nicht darstellen kann. Der Interessierte sei auf diese zwei Publikationen verwiesen, genauer auf die Seiten 18, 12f., 11, 87, 89, 90, 97 bzw. 146f. Merkwürdiger Weise ähneln auch die Themen der zwei Symposien, die der Arbeitskreis AT der Leibniz-Sozietät (geleitet vom Jubilar!) in den Jahren 2001 und 2004 durchgeführt haben, sehr den o.g. Empfehlungen: "Allgemeine Technologie in Vergangen-

30 Gerhard Banse

heit und Gegenwart" sowie "Fortschritte bei der Herausbildung der Allgemeinen Technologie". Hinzu kommt, dass der Mitherausgeber dieser zwei Bände in meiner Person nun auch noch ein Technikphilosoph ist. Neugierig geworden, habe ich mir die Blätter noch einmal genau angesehen und fand einen Hinweis auf den Autor: links oben stand in großen Buchstaben das Wort "GEORG". Und damit war für mich alles klar: Wenn man die zwei "G's" wegstreicht, bleibt die Buchstabenfolge "EOR" übrig – und das sind die Initialen unseres Jubilars. Er war der Autor, der an seinem 32. Geburtstag zu ergründen begann, was die Technologie "im Innersten zusammenhält"...

Lieber Ernst, eigentlich wollte ich Dir Deine drei Blätter heute überreichen, aber als mein Freund und ich so im Gorki-Park saßen, Bier und anderes trinkend, kam eine Windbö und wehte das interessante Dokument samt eines Teils meiner Notizen in die Moskva. So muss ich mich und musst Du Dich auf meine Erinnerung verlassen – auf Erinnerungen nach Bier und anderem. Ich versichere Dir jedoch, dass alles genau so war...

Dem Jubilar nochmals ganz herzlichen Glückwunsch zu seinem Ehrentag. – Ich wünsche dem VII. Symposium des Arbeitskreises Allgemeine Technologie einen ergebnisreichen Verlauf.

#### Literatur

- Banse, G.; Reher, E.-O. (2002): Einleitung. In: Banse, G.; Reher, E.-O. (Hg.): Allgemeine Technologie. Vergangenheit, Gegenwart, Zukunft. Berlin, S. 11–16 (Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Bd. 50, Jg. 2001, H. 7)
- Banse, G.; Reher, E.-O. (Hg.) (2014): Beiträge zur Allgemeinen Technologie. Berlin (Abhandlungen der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 36)
- Hauff, V. (Hg.) (1987): Unsere gemeinsame Zukunft. Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung. Greven
- Reher, E.-O. (2016): Allgemeintechnologische Erkundungen mit Gerhard Banse. In: Banse, B.; Jähne, A. (Hg.): Zeiten & Spuren. Wege. Begegnungen. Rückblicke. Gerhard Banse zum 70. Geburtstag. Berlin, S. 205–210 (Abhandlungen der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 43)

Gerhard Banse, Ernst-Otto Reher †

### Technologie und nachhaltige Entwicklung – Einführende Überlegungen

### 1 Konzeptionelles

"Dauerhafte" (d.h. "nachhaltige") Entwicklung ist eine Entwicklung, "die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, daß künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können" (Hauff 1987, S. 46). Dieses Leitbild hält mit seinen sozialen, ökonomischen, technischen, ökologischen und institutionell-politischen Komponenten die fundamentalen Überlebens- und Entwicklungsbedingungen sowohl dieser als auch der zukünftigen Gesellschaft durchgängig präsent (vgl. RSU 1996, S. 51), denn es basiert auf

- einer globalen Perspektive (bezogen sowohl auf die Problemanalyse wie auch auf Strategien zu deren Lösung);
- der untrennbaren Verknüpfung von Umwelt- und Entwicklungsaspekten;
- der Realisierung von Gerechtigkeit zugleich in der intergenerativen Perspektive (Verantwortung für künftige Generationen) und in der intragenerativen Perspektive (Verantwortung für die heute Lebenden).

Sustainability kann als regulatorische Idee für die Gestaltung der natürlichen Existenz- und Entwicklungsbedingungen heutiger wie kommender Generationen verstanden werden. Dabei ist es in diesem Zusammenhang zunächst noch nicht entscheidend, ob mit Nachhaltigkeit im Sinne von Dieter Birnbacher und Christian Schicha eine Erhaltung (1.) des physischen Naturbestands, (2.) der Funktionen des gegenwärtigen Naturbestands, (3.) eine Sicherung der Befriedigung der Grundbedürfnisse zukünftiger Generationen oder (4.) eine aktive Vorsorge für die Bedürfnisse zukünftiger Generationen gemeint ist (vgl. Birnbacher/Schicha 1996, S. 150f.).

Angesichts der offensichtlichen Diskrepanz zwischen der gegenwärtigen, auf enormer Naturausbeutung und Umweltbelastung basierenden Lebensart eines Teils der Menschheit einerseits und den bereits heute absehbaren Erfordernissen für die Sicherung der Existenz- und Entwicklungsbedingungen

künftiger Generationen andererseits ist ein Konzept notwendig, das sowohl politisches wie wissenschaftliches, sowohl individuelles wie gesellschaftliches Handeln in seiner "Zukunftsfähigkeit" orientieren und befördern kann – und das ist mit "nachhaltiger Entwicklung" gegeben (bzw. – schwächer – könnte gegeben sein).

Das Konzept nachhaltiger Entwicklung im genannten Sinn geht auf den im Dienste des sächsischen Kurfürsten August des Starken tätigen Oberberghauptmann Hans-Carl von Carlowitz zurück. In seinem 1713 in Leipzig verlegten Buch "Sylvicultura oeconomica, oder haußwirtschaftliche (haußwirthliche) Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur Wilden Baum-Zucht" formuliert er als "Management-Regel": Es wird

"derhalben die größte Kunst/Wissenschaft/Fleiß und Einrichtung hiesiger Lande darinnen beruhen / wie eine sothane Conservation und Anbau des Holtzes anzustellen / daß es eine continuierliche beständige und nachhaltende Nutzung gebe / weiln es eine unentberliche Sache ist / ohne welche das Land in seinem Esse nicht bleiben mag" (Carlowitz 2013, S. 105f.),

kurz: Es darf nur so viel Holz verbraucht werden, wie nachwächst!

Hinsichtlich der offensichtlichen Notwendigkeit von "mehr Nachhaltigkeit" ist auch daran zu erinnern, dass Rückstände ("Exkremente") der Produktion und Konsumtion in nennenswertem Umfang erst mit Beginn der Industrialisierung auftreten; vorher gab es eine möglichst vollständige Verwertung sowohl der Roh- und Ausgangsmaterialien als auch der aus dem Verwendungszusammenhang ausscheidenden Artefakte. Industrialisierung hieß (und heißt vor allem noch heute) vor allem vermehrter ("exzessiver") Technikeinsatz. Dieser erst ermöglichte mit das heute bekannte Ausmaß des Eingriffes in die Natur.

Bei der Konkretisierung des in zahlreichen nationalen und internationalen Dokumenten verankerten Leitbildes "Nachhaltigkeit" in die verschiedenen Politikfelder und bei der Frage nach konkreten Zielen, Strategien oder Handlungsprioritäten gehen jedoch die Vorstellungen der am Diskurs Beteiligten auseinander. Der Konsens in Bezug auf das allgemeine Leitbild weicht sofort der kontroversen Diskussion, wenn es um Operationalisierungen und Konkretisierungen geht. Das betrifft bereits die Frage, in welchen "Dimensionen" (vor allem ökologisch, ökonomisch, sozial und institutionell-politisch) Nachhaltigkeit konkret zu fassen und wie das Verhältnis dieser Dimensionen untereinander zu verstehen sein soll. Hier wird davon ausgegangen, dass diese prinzipiell gleichrangig und "integriert" zu behandeln sind

Ziel eines solchen Nachhaltigkeitskonzepts ist es, die Erhaltung bzw. Verbesserung ökonomischer und sozialer Lebensbedingungen mit der langfristigen Sicherung der natürlichen Lebensgrundlagen in Einklang zu bringen und nach hierfür geeigneten institutionell-politischen Voraussetzungen zu suchen. (Das wird mit dem bereits in der "Einführung" vorgestellten "Nachhaltigkeits-Dreieck" zum Ausdruck gebracht.)

### 2 Integratives Nachhaltigkeitskonzept

Angesichts dieser Situation wurde im Rahmen des Projekts "Global zukunftsfähige Entwicklung – Perspektiven für Deutschland" der Helmholtz-Gemeinschaft deutscher Forschungszentren (HGF) in den 1990er Jahren (im bewussten Gegensatz zu einem "Zwei-" bzw. "Drei-Säulen-Ansatz – ökonomisch, ökologisch, sozial<sup>2</sup>) ein Konzept entfaltet und zur Diskussion gestellt (vgl. Kopfmüller et al. 2001), das seinen Ausgangspunkt in einer gleichrangigen Betrachtung inter- und intragenerativer Gerechtigkeit nimmt: Die Rechte nachfolgender Generationen und die Rechte der heute Lebenden in den verschieden entwickelten Gebieten der Erde müssen in Einklang gebracht werden. Der Unteilbarkeit des Gerechtigkeitsprinzips auf dieser allgemeinen Ebene entspricht die Notwendigkeit einer integrativen Betrachtung der ökologischen, der ökonomischen und der sozialen Dimension von Nachhaltigkeit. Und in der Tat, über Zukunftsfähigkeit wird nicht nur in einer dieser Dimensionen entschieden, sondern in einer komplexen Verknüpfung zwischen diesen. Hierbei ergibt sich auch die Notwendigkeit der expliziten Berücksichtigung der institutionell-politischen Dimension.

Ein wesentlicher Hintergrund für diese Herangehensweise war die Einsicht, dass nachhaltige Entwicklung (als Prozess!) mit einigen wichtigen Sichtweisen verbunden ist, vor allem mit

<sup>&</sup>quot;Mit dem Leitbild dauerhaft-umweltgerechte Entwicklung wird somit ein Denken auf den rechten Weg gebracht, das entschieden gegen simple Polarisierungen im umweltpolitischen Diskurs gerichtet ist [...] Es geht darum zu lernen, außerordentlich komplexe Wirkungsgefüge, wie sie nicht nur ökologische Systeme, sondern ebenso auch moderne ökonomische und soziale Systeme darstellen, in vertretbarer Weise miteinander zu vernetzen und so zu einem funktionsfähigen Ganzen zu machen. Es geht um Integrationsleistungen, die letztlich nur über ein Leitbild sicherzustellen sind, das die fundamentalen Überlebensund Entwicklungsbedingungen dieser Gesellschaft durchgängig präsent hält" (RSU 1996, S. 51).

<sup>2</sup> Damit soll nicht in Abrede gestellt werden, dass ein "Säulen-Ansatz" methodisch hilfreich sein kann, wie mit dem "Nachhaltigkeitsdreieck" gezeigt werden kann. Die konzeptionelle Schwäche dieser Ansätze liegt in ihrer "additiven" Verknüpfung der einzelnen Komponenten, der sich stets weitere Komponenten hinzufügen lassen, wie etwa das "Nachhaltigkeitsviereck" bei Ute Stoltenberg zeigt (vgl. Stoltenberg 2010, S. 10).

- einer umfassenden, holistischen Sicht "auf Alles" (unter Berücksichtigung der Komplexität der sozialen, ökonomischen, ökologischen, kulturellen u.a. Entwicklungsbedingungen sowie ihrer Wechselwirkungen);
- dem Anerkennen der entscheidenden Rolle von Verteilungsgesichtspunkten (bezüglich Umwelt- und finanzieller Ressourcen, ökologischer Risiken und Erfordernisse, Vor- und Nachteile politischer Maßnahmen usw.);
- einer globalen Perspektive, d.h. Zielsetzungen auf globaler Ebene und deren Überführung in nationale, regionale und lokale Implementierungen bei Berücksichtigung entsprechender Implikationen;
- einer Langzeitorientierung (d.h. nicht nur gemessen an parlamentarischen Wahlperioden oder Unternehmensstrategien);
- der Idee von "Grenzen" (etwa hinsichtlich Ressourcenverfügbarkeit, Umweltbelastungen u.ä.).

Ausgangsprämisse des integrativen Nachhaltigkeits-Konzepts ist, dass die ökologische, ökonomische, soziale und institutionell-politische Dimension nachhaltiger Entwicklung prinzipiell gleichrangig und integriert zu behandeln sind. Ziel eines solchen Nachhaltigkeitskonzepts ist es, die Erhaltung bzw. Verbesserung ökonomischer und sozialer Lebensbedingungen mit der langfristigen Sicherung der natürlichen Lebensgrundlagen in Einklang zu bringen und nach hierfür geeigneten institutionell-politischen Voraussetzungen zu suchen.

Dazu wird von folgenden drei generellen *konstitutiven Elementen* des Nachhaltigkeits-Leitbildes ausgegangen (vgl. Kopfmüller et al. 2001, S. 129ff.):

- 1. Intra- und intergenerative Gerechtigkeit;
- 2. Globale Orientierung;
- 3. Anthropozentrischer Ansatz.

Aus diesen drei Prämissen ("konstitutive Elemente") ergeben sich in einem ersten Operationalisierungsschritt folgende drei *generelle Ziele* nachhaltiger Entwicklung (vgl. Kopfmüller et al. 2001, S. 163ff.):

- 1. Sicherung der menschlichen Existenz;
- 2. Erhaltung des gesellschaftlichen Produktivpotenzials;
- 3. Bewahrung der Entwicklungs- und Handlungsmöglichkeiten.

Diese Ziele wurden in einem nächsten Schritt anhand von *Handlungsleit-linien* bzw. *Regeln* konkretisiert, die den Kern des Konzepts darstellen. Sie umfassen zum einen *substanzielle Regeln*, die Mindestanforderungen für die Realisierung der generellen Ziele darstellen, zum anderen *instrumentelle* 

*Regeln*, die Wege zur Umsetzung dieser Mindestanforderungen beschreiben (siehe Tab. 1a und 1b).

Tab. 1a: System von Nachhaltigkeitsregeln – substanzielle (Was-)Regeln

1	Sicherung der mensch- lichen Existenz	2	Erhaltung des gesellschaft- lichen Produktions-potenzials	3	Bewahrung der Entwicklungs- und Handlungs-möglichkeiten
1.1	Schutz der menschlichen Gesundheit	2.1	Nachhaltige Nutzung erneuerbarer Ressourcen	3.1	Chancengleichheit im Hinblick auf Bildung, Beruf, Information
1.2	Gewährleistung der Grundversorgung	2.2	Nachhaltige Nutzung nicht-erneuer- barer Ressourcen	3.2	Partizipation an gesellschaftli- chen Entscheidungsprozessen
1. 3	Selbständige Existenz- sicherung	2.3	Nachhaltige Nutzung der Umwelt als Senke	3.3	Erhaltung des kulturellen Erbes und der kulturellen Vielfalt
1.4	Gerechte Verteilung der Umweltnutzungsmöglich- keiten	2.4	Vermeidung unvertretbarer technischer Risiken	3.4	Erhaltung der kulturellen Funktion der Natur
1.5	Ausgleich extremer Ein- kommens- und Vermö- gensunterschiede	2.5	Nachhaltige Entwicklung des Sach-, Human- und Wissenskapitals	3.5	Erhaltung der "sozialen Ressourcen"

Quelle: kombiniert nach Kopfmüller et al. 2001, S. 172, 174

Tab. 1b: System von Nachhaltigkeitsregeln – instrumentelle (Wie-)Regeln

Regel 1 Internalisierung externer sozialer und ökologischer Kosten	Die Preise müssen die im Wirtschaftsprozess entstehenden externen ökologischen und sozialen Kosten reflektieren
Regel 2 Angemessene Diskontierung	Durch Diskontierung dürfen weder künftige noch heutige Generationen diskriminiert werden
Regel 3 Verschuldung	Um zukünftige Handlungsspielräume des Staates nicht einzuschränken, müssen die laufenden konsumtiven Ausgaben des Staates im Prinzip aus den laufenden Einnahmen finanziert werden
Regel 4 Faire weltwirtschaftliche Rahmenbedingungen	Die weltwirtschaftlichen Rahmenbedingungen sind so zu gestalten, dass wirt- schaftlichen Akteuren aller Staaten eine faire Teilnahme am Wirtschaftsprozess möglich ist
Regel 5 Förderung der internationalen Zusammenarbeit	Die verschiedenen Akteure (Regierungen, Unternehmen, Nichtregierungsorganisationen) müssen im Geiste globaler Partnerschaft mit dem Ziel zusammenarbeiten, die politischen, rechtlichen und faktischen Voraussetzungen für die Einleitung und Umsetzung einer nachhaltigen Entwicklung zu schaffen
Regel 6 Resonanzfähigkeit der Gesell- schaft	Die Resonanzfähigkeit der Gesellschaft gegenüber den Problemen in der Natur- und Anthroposphäre ist durch geeignete institutionelle Innovationen zu steigern

 $\rightarrow$ 

Regel 7 Reflexivität der Gesellschaft	Es sind institutionelle Bedingungen zu entwickeln, um eine über die Grenzen partikularer Problembereiche und über Einzelaspekte hinausgehende Reflexion von gesellschaftlichen Handlungsoptionen zu ermöglichen
Regel 8 Steuerungsfähigkeit	Die Steuerungsfähigkeit der Gesellschaft in Richtung einer zukunftsfähigen Entwicklung ist zu erhöhen
Regel 9 Selbstorganisation	Die Selbstorganisationspotenziale gesellschaftlicher Akteure sind zu fördern
Regel 10 Machtausgleich	Meinungsbildungs-, Aushandlungs- und Entscheidungsprozesse sind so zu gestalten, dass die Artikulations- und Einflussmöglichkeiten verschiedener Akteure ge-

recht verteilt und die Verfahren transparent sind

Tab. 1b:(Fortsetzung)

Quelle: kombiniert nach Kopfmüller et al. 2001, S. 172, 174

In einem dritten Schritt sind für diese Regeln *Indikatoren* zu finden bzw. festzulegen, mit deren Hilfe ihre Einhaltung, Umsetzung, Vernachlässigung usw. "gemessen" und – und bezogen auf unterschiedliche Bereiche – verglichen werden können.

### 3 Technik und Nachhaltigkeit

Es fällt auf, dass in vielen Nachhaltigkeitsüberlegungen Technik keine Erwähnung findet, dass ökonomische, ökologische, soziale und politisch-administrative Zusammenhänge als relevant angesehen werden, nicht jedoch technische. Ausnahmen sind vor allem das Verweisen erstens auf negative ökologische Effekte der Technisierung insgesamt oder einzelner Bereiche, zweitens auf "Langzeit"konsequenzen singulärer technischer Lösungen (etwa die mit der Endlagerung radioaktiven "Abfalls" verbundenen Probleme oder die Auswirkungen von "Großprojekten" von der Art des Assuan-Staudamms), drittens auf die sogenannte Cleaner Production (vgl. z.B. Nowak 2005; Rosemann 2005) und viertens auf die sogenannte Informations- und Kommunikationstechnik.<sup>3</sup> Aber die Technik insgesamt, ihre Gestaltung wie ihre

Das könnte ein Hinweis darauf sein, dass die stark ausdifferenzierten ingenieurwissenschaftlichen Disziplinen (noch) keinen Bezug zu "Nachhaltigkeit" haben: diese verfügen (noch) nicht über ein adäquates generalisierendes bzw. integratives theoretisch-methodisches Konzept. – Die Beiträge dieses Bandes deuten indes perspektivische Richtungen an (vgl. auch Grunwald 2002a). Deutlich wird, dass es einerseits nicht allein um "end-ofpipe"-Technologien gehen kann, bei denen erst im Nachhinein und additiv Belange der negativ bewerteten Umweltbeeinflussung berücksichtigt werden, und dass es andererseits nicht allein nur auf die "Nutzerverantwortung" bei der Nachfrage- oder Nicht-Nachfrage, beim Einsatz oder Nicht-Einsatz von "sustainability-gerechter" Technik ankommt.

Nutzung, ist ein bedeutender Aspekt für die Realisierung einer nachhaltigen Entwicklung.

Damit gewinnt die Einsicht (bzw. Frage), dass (bzw. ob) Technologien in der Regel per se weder nachhaltig noch nicht nachhaltig sind, eine wichtige Bedeutung: Für nachhaltige Effekte von Technik sind zwar die (internen) technischen Leistungsparameter bedeutsam, entscheidender ist zunächst jedoch die Art und Weise, wie Technik in der Gesellschaft eingesetzt und genutzt wird, in welche Kontexte sie integriert und welchen Zwecksetzungen sie untergeordnet ist (vgl. auch Banse 1997, 2004b).

Zu fragen ist damit nach dem Potenzial technologischer Lösungen an bzw. für Nachhaltigkeit (das unterschiedlich groß bzw. klein sein kann) sowie nach den Bedingungen, unter denen sich dieses Potenzial realisieren lässt. Dazu muss "Nachhaltigkeit" zuerst im Prozess des Entwurfs und der Gestaltung technischer Lösungen und sodann auch im Verwendungshandeln einen angemessenen Platz haben, denn: Über die individuelle Verwirklichung der Nachhaltigkeitspotenziale von Technik entscheidet sodann zusätzlich eine Kombination aus Technikgebrauch, Lebensstil und Konsumverhalten (siehe Abb. 1 – die genannten Leitbilder und Konzepte gelten auch für nachhaltige Entwicklung).

Lebensstile	Politische Konzepte	Verfahrensleitbilder	Inhaltliche Leitbilder
Askese	Internalisierung externerKosten	Nachhaltige	e Entwicklung
Neue Bescheidenheit	Internationale Konventionen	Technikbewertung	Recyclinggerechtes Konstruieren, Stoffrecycling
Neue Gemächlichkeit	Verbote	Risikoanalyse	Integrierter Umweltschutz
Sanfter Tourismus	Gebote	Ökobilanzierung	Rationelle Energienutzung
Neuer Lebensstil	Anreizsysteme		Sicherheitstechnik
			Angepasste Technologien
		Unterneh	mens-Kultur

Abb. 1: Leitbilder und Konzepte für eine umweltschonende Technikgestaltung

Quelle: nach Detzer 1993, S. 58

Analysiert man die "handlungsleitenden Gründe" von Akteuren der Technikgestaltung wie -nutzung, so kommt man zunächst zu unterschiedlichen Einstellungen und Werthaltungen, in denen Werte und Wertvorstellungen sowie deren Präferenzfolgen in je individueller Weise zum Ausdruck kom-

men. Werte sind mehrstellige Relationen, die die Bedeutung von Sachverhalten für den Menschen bestimmen. Sie kommen in Wertungen (Bewertungen) zum Ausdruck und sind ausschlaggebend dafür, dass etwas anerkannt, geschätzt, verehrt oder erstrebt (bzw. abgelehnt, verachtet oder nicht erstrebt) wird; sie dienen somit zur Orientierung, Beurteilung oder Begründung bei der Auszeichnung von Handlungs- und Sachverhaltsarten, die es anzustreben, zu befürworten oder vorzuziehen (bzw. auszuschließen) gilt (vgl. auch VDI 1991). Sie stellen die – bewusste oder unbewusste – Grundlage auch für das Abwägen zwischen verschiedenen, auf Nachhaltigkeit bezogenen (Schutz- oder Rechts-)Gütern dar. Weiterhin werden jedoch auch "aggregierte Phänomene" wirkmächtig, vor allem in Form von Leitbildern (vgl. Dierkes et al. 1992; Giesel 2007; Huber 1989). Als Leitbild kann man komplexe ("aggregierte"), idealhafte, richtungs- und perspektivgebende Vorstellungen bezeichnen, die in Wahl- und Entscheidungssituationen eine selektierende Funktion übernehmen (können). Da Überlegungen zu Leitbildern und ihrer Rolle in der Technikgenese erst ganz am Anfang stehen, soll Leitbild hier als Oberbegriff für die "Bilder" (als aggregierte Phänomene!) stehen, die bei der Konzipierung, Gestaltung und "Durchsetzung" (Realisierung) von nachhaltiger Entwicklung relevant, d.h. sinngebend sowie denkund handlungsleitend werden (können), etwa in Form des Umwelt-, des Zukunfts-, des Gesellschafts- und des Technikbildes. Zu bedenken ist jedoch dreierlei: Erstens wird "nachhaltige Entwicklung" selbst als Leitbild betrachtet; demzufolge wäre von einer Leitbild-Hierarchie auszugehen. Zweitens besteht die Gefahr, dass der Leitbildbegriff einer Inflation unterliegt, wenn vorschnell vieles zu "Leitbildern" (v)erklärt wird. Das liegt wohl auch in der – nicht generell als negativ zu bewertenden – diffusen Unschärfe und begrifflichen Verschwommenheit der Ziel- oder Wunsch-Vorstellungen, die dann als Leitbild tituliert anscheinend exakt umrissen werden (z.B. "papierloses Büro", "menschenleere Fabrik", "autogerechte Stadt", "schadstofffreie Produktion", "menschliche Technik"). Da die Schicksale dieser Leitbilder bekannt sind, die ähnliche Karrieren wie "Sustainability" hatten – nur Jahre zuvor -, bleibt zu hoffen, dass dem Leitbild nachhaltige Entwicklung eine derartige "Biographie" nicht beschieden sei. Drittens ist zu bedenken, dass Leitbilder nur abstrakte Maßstäbe setzen, abstrakt in dem Sinne, dass sie kaum direkt handlungsrelevant wirken können, sondern immer erst konkretisiert, operationalisiert, in umsetzbare, unmittelbar handlungsmotivierende, -stimulierende oder gar -leitende "Gebilde" transformiert werden müssen – wie oben mit dem Verweis auf Regeln und Indikatoren für nachhaltige Entwicklung bereits verdeutlich wurde.

Nachhaltige Entwicklung schließt den breiten Dialog über Gestaltungsziele, über Visionen einer zukünftigen Gesellschaft, über Wünschbarkeit, Akzeptabilität und Zumutbarkeit technischer Entwicklungen ein. Erforderlich ist aber auch Wissen vor allem über Ursache-Wirkungs- und Zweck-Mittel-Beziehungen, über Folgen technisch instrumentierten Verhaltens sowie über ökologische, soziale u.a. Effekte der Techniknutzung. Dabei sind mögliche "Bumerang-Effekte" (negative Effekte bzw. Problemlagen von Technologien, Strategien, Entscheidungen usw., die die Überwindung früherer negativer Effekte bzw. Problemlagen zum Ziel hatten) zu beachten.

Die Beantwortung der Frage "Wie kann (bzw. muss!!!) Technik so gestaltet werden, dass ein Mehr an nachhaltiger Entwicklung möglich wird?" setzt u.a. zunächst voraus, die Fragen zu beantworten, was "nachhaltige" Technik ist und wie beurteilt werden kann, inwieweit ein konkreter Technikeinsatz zu mehr oder zu weniger nachhaltiger Entwicklung führt (gemessen vor allem an den oben genannten "Was-" und "Wie-Regeln).

Damit ergeben sich erstens (mindestens) folgende zwei Konsequenzen:

- (1) Die globalen Nachhaltigkeitskriterien sind an konkreten Technologien, wie der chemischen Technologie, der Energiewirtschaft, der Prozesstechnik usw., zu präzisieren (siehe Abb. 2).
- (2) Dabei gilt es, eine angemessene Kombination von drei Ansätzen zu realisieren (vgl. Huber 2000):
- Effizienz (d.h. die Reduzierung des Stoff- und Energieverbrauchs je Einheit hergestellter Güter oder Dienstleistungen),
- Suffizienz (Reduzierung der hergestellten Menge und Nutzung von Gütern/Dienstleistungen) und
- Konsistenz (Erhöhung der Vereinbarkeit anthropogener mit natürlichen Stoffströmen).

Zweitens stellen sich in diesem Zusammenhang vorrangig folgende drei Probleme (vgl. Grunwald 2002b):

- das Wissensproblem: Wissen über politische, rechtliche, ökonomische, soziale u.a. Rahmenbedingungen; über Konsumentenverhalten, Techniknutzung und -folgen;
- das Bewertungsproblem: multikriterielle, dimensionenübergreifende Bewertung; Konsens und Dissens über Kriterien und deren Hierarchie;
- das Umsetzungsproblem: Akzeptanz und Realisierung von neuen Technologien, die eine nachhaltige Entwicklung befördern können.

Einfluss von Technologie(n) auf			
Ökonomie	Ökologie	Soziales	
	durch/über		
Einsparung von  – Ressourcen  – Rohstoffen  – Energie  – Arbeitskräften	Klimaschutz	Schaffung (und Vernichtung!) von Arbeitsplätzen	
Einsatz neuer Wirkprinzipien	schonenden Umgang mit  – Böden  – Gewässern  – Luft (Umwelt allgemein)	Verbesserung der Lebensqualität	
	Vermeidung bzw. Verwertung von Abprodukten	Erhöhung der gesellschaftlichen Zufriedenheit	

Abb. 2: Einflussmöglichkeiten von Technologien für (mehr) Nachhaltigkeit Eigene Darstellung

Zum Wissensproblem seien noch zwei Überlegungen angeführt (vgl. auch Banse 2003). Es geht *erstens* (auch) um die "Zukunftsfähigkeit" des generierten und des vermittelten (genauer: angeeigneten) Wissens (also um gültige Aussagen bzw. Behauptungen, um Bewertungen bzw. Werturteile, um Handlungsanweisungen – etwa in Form von Aufforderungen – und um Normen – z.B. als Verfahrensregeln –), bezogen auf die unterschiedlichsten Bereiche. Die Diskussionen über das exponentielle Wachstum und die "Halbwertszeit" von Wissen, über Datenflut und "Informationsmüll", über Kernkompetenzen und Schlüsselqualifikationen, über lebenslanges Lernen und berufliche Flexibilität, aber auch über die Langfristigkeit von Bildungs- und Forschungsstrategien bei höchstmöglicher Flexibilität machen damit verbundene Problemlagen deutlich. Der Hintergrund lässt sich z.B. wie folgt beschreiben:

"Im sogenannten Informationszeitalter wird sich das, was wir gern als "gesichertes Wissen" bezeichnen, sehr viel schneller und gründlicher verändern als in der Vergangenheit. Einmal deshalb, weil sich unsere technische, soziale, ökonomische und kulturelle Umwelt sehr viel schneller verändern wird und wir deshalb immer neues "operatives" Wissen aufbauen müssen, um darin zurechtzukommen. Zum anderen, weil durch die verbesserte und beschleunigte globale Kommunikation in Verbindung mit den kognitionsunterstützenden neuen Technologien eine rasante Beschleunigung unserer kulturellen und vor allem technischen Evolution in Gang gekommen ist, die sich auch in nächster Zukunft noch

weiter fortsetzen und sogar verstärken dürfte. Wissen im Sinne von operationsund kommunikationsfähigen Beschreibungen von Systemen wird qualitativ (immer komplexere Beschreibungen) und quantitativ (immer mehr Beschreibungen) anwachsen." (Iglhaut 2000, S. 125)

Es geht somit auch um Prioritäten- und Akzentsetzungen, aber auch um Selektions- und Bewertungsprozeduren für die Generierung wie für die Vermittlung bzw. Aneignung von Wissen. Dass damit sicherlich auch von "gewohnten" Vorstellungen etwa über Wahrnehmung, Realität, Gewissheit und Information Abschied genommen werden muss, kann hier nur genannt, nicht jedoch weiter ausgeführt werden.

Deutlich wird *zweitens* auch, dass es eine Kluft gibt zwischen dem, was Wissenschaft und Bildung mit Blick auf Nachhaltigkeit "anbieten", und dem, was die Gesellschaft zur Realisierung von Nachhaltigkeit benötigt. Thematisiert ist auf diese Weise die Nutzung des Humankapitals für Nachhaltigkeit. Eines ist deutlich: Hier muss ein gesellschaftliches Umdenken einsetzen, um "Nachhaltigkeit" stärker als bisher zum Bewertungskriterium und zur Anforderungsstrategie für die Förderung von Forschungs- und Bildungsprogrammen werden zu lassen (vgl. Hennen/Krings 1998).

Nachhaltige Entwicklung wird sich technisch vermittelt – wenn überhaupt – vorrangig auf der Ebene größerer technischer Einheiten, umfassenderer Mensch-Technik-Systeme oder gar ganzer technischer Entwicklungsrichtungen durchsetzen lassen, da vor allem dort der Bezug zu Nachhaltigkeit deutlich wird bzw. da sich dort am ehesten ein ("technikbasierter") Beitrag zur Umsetzung von Nachhaltigkeit leisten lässt. Mit gebotener Vorsicht sei dazu Folgendes ausgeführt.

(a) Eine der Problemsituation angemessene *komplexe* Sicht- und Handlungsweise darf nicht nur die naturale, sondern muss gleichermaßen auch die humane und soziale Dimension der Technik erfassen (vgl. Ropohl 2009, S. 29ff.) und dabei deren globales Ausmaß in Rechnung stellen. Damit wird deutlich, dass Technisches nur dann problemadäquat behandelt wird, wenn es als "Sozio-Technisches" behandelt, mithin Technik als gesellschaftliches "Phänomen" unterstellt wird (vgl. dazu Banse 2015). Technik ist nicht anders denn als Soziotechnisches, d.h. als Ergebnis zielorientierter menschlicher Aktivitäten (vor allem Erkennen, Zwecksetzen, Bewerten, Entscheiden und praktisch-gegenständlich Handeln) in einem konkreten sozialen Umfeld, das "Inhalt" wie "Form" sowohl von spezifischen technischen Lösungen als auch den gesamten Bereich der Technik in hohem Maße beeinflusst ("strukturiert"), lebensweltliche Wirklichkeit. Im Zuge von selektiven Wahr-

nehmungsprozessen ist es allerdings möglich, Technik gedanklich so weit aus dieser "gesellschaftlichen Verklammerung" herauszulösen, dass als Resultat unter "Technik" allein die mit der unmittelbaren Funktionserfüllung verbundenen Beziehungen und Zusammenhänge erfasst sind. Wird dann ein solchermaßen reduziertes Verständnis als Ausgangspunkt für umfassendere Fragestellungen der vorliegenden Art genommen - was im Bereich der Technikentwickler nicht unüblich ist -, dann muss zum "Technischen" notwendigerweise nachträglich das "Nichttechnische" hinzugefügt werden, um das "Soziotechnische" rekonstruieren bzw. reformulieren zu können. Durch die vielfältigen Interdependenzen ihrer Voraussetzungen und Wirkungen mit Individuum, Gesellschaft, Politik, Kultur, Recht, Arbeits- und Lebensweise sowie Weltsicht weist das Technische weit über das rein Artifizielle hinaus, verweist darauf, das es ein menschliches Konstrukt ist, das in und mit dem Konstruktcharakter (dem "Entworfensein" und dem "Gemachtsein") seine anthropologische, seine soziale und vor allem seine kulturelle Dimension offenbart, die in ihren vielfältigen Ausformungen in Überlegungen zur Technikentwicklung und -gestaltung unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit von Anfang an einzubeziehen sind. Dessen erst nachträgliche Berücksichtigung oder gar weitgehende Ausblendung wird immer zu Defiziten in der Zielerreichung führen (z.B. in Form von ökonomischen oder Zeitverlusten, Akzeptanzschwierigkeiten, Nichtbewährung am Markt, Verkürzung des Lebensdauerzyklus u. ä.), die – bestenfalls! – mit der erstaunten Frage verbunden sind, warum denn das "so gut" oder "so exakt" Geplante nicht oder nicht in vollem Umfang eingetreten sei.

(b) Die Berücksichtigung der Zeitdimension darf sich sicherlich nicht nur auf das Einfordern der Beachtung zukünftiger Generationen und ihrer Lebensgrundlagen bei heutigen Planungen und Entscheidungen beschränken. Unseres Erachtens geht es um (nicht mehr, aber auch nicht weniger als um) Konsequenzen aus der Einsicht, dass die Zukunft "prinzipiell offen" und "unsicher" ist (vgl. Banse 2016b). Das hat z.B. einen wissensmäßigen Aspekt, nämlich den, dass wir hinsichtlich Zukünftigem nicht über "kein Wissen", sondern vielmehr über "Nicht-Wissen" verfügen. "Nicht-Wissen" ist jedoch nicht nur durch die Zeitdimension des Zukünftigen begründet, sondern hat auch eine strukturelle Seite, die sich beispielsweise darin äußert, dass zum Zeitpunkt der Gegenwart infolge der Vielzahl von interessierenden Komponenten und deren möglichen aktuellen Beziehungen untereinander nicht alle relevanten Informationen vorliegen bzw. vorliegen können; man denke etwa an Schadstoffe und deren Kombinationseffekte. Die Auf-

gabe besteht mit Blick auf Nachhaltigkeit darin, *erstens* unsere Wissensbestände auch auf diese Weise zu "ordnen" (denn dann werden möglicherweise Forschungsfragen besser formulierbar), und *zweitens* die Frage zu beantworten, wie wir (bewusst und kompetent) mit diesem "Nicht-Wissen" umgehen, wie es gegenwärtig "prozessiert" und "kommuniziert" wird sowie unser (aktuelles wie strategische) Denken und Handeln beeinflusst.

(c) Es ist jene "Umgebung" zu beachten, in die hinein dem Prinzip der Nachhaltigkeit verpflichtete technische Lösungen implementiert werden bzw. zu implementieren sind, und innerhalb derer diese Lösungen akzeptabel sind bzw. akzeptiert werden usw. Diese "Umwelt" bzw. "Umgebung" kann man als Kultur bezeichnen, wenn man darunter das Ergebnis menschlicher Lebens- und Daseinsbewältigung in einer Handlungs- und Kommunikationsgemeinschaft versteht. 4 Repräsentiert wird Kultur dann vorrangig durch das (Handlungs-)Wissen, durch technische Sachsysteme und deren Einbeziehung in Handlungsabläufe, durch verfestigte Wertekonstellationen sowie durch tradierte Praxen, die sowohl Sitten<sup>5</sup> als auch Institutionen einschließen (vgl. Banse 2004a, S. 44ff.). Damit ist zugleich das kulturelle (und auf diese Weise auch das technikbezogene) Selbstverständnis einer Gesellschaft zu thematisieren, welches (technikbezogen!) einerseits "technogenen" Erwartungen und Erfordernissen Rechnung tragen bzw. Ausdruck verleihen sowie andererseits einen vorausschaubaren Einsatz von bzw. Umgang mit technischen Lösungen zulassen und garantieren muss. Dazu sind deren mögliche Vor- und Nachteile, deren "Gewinne" und "Verluste" vor allem in individueller, sozialer, ökologischer und ökonomischer Art zu kommunizieren. Auf diese Weise wird auch die Grenze des – je zeit- und kontextabhängigen – akzeptablen bzw. akzeptierten technischen "Verhaltens" festgelegt, deren Überschreitung zu (individuellen wie institutionellen) "Abwehrreaktionen" (Ablehnung, uneffektive Nutzung, Rückgriff auf konventionelle und bewährte Routinen oder Schemata u.ä.) führen kann. Eine Lösung der mit dem Bedürfnis der Gestaltung "nachhaltiger Technik" verbundenen Probleme wird nur dann erfolgen können, wenn die Entwicklung einer angemessenen "technischen Kultur" (im Rahmen von Lebens- und Gesellschaftsentwürfen) dem Spannungsfeld von individuellen und gesellschaftlichen Erforder-

<sup>4</sup> Kultur sei hier verstanden als (mehr oder weniger) stabile "Muster" (pattern) und "Praktiken" (practices) auch der Produktion und Konsumtion. Auf den Zusammenhang von nachhaltiger Entwicklung, Technik und Kultur kann hier nicht näher eingegangen werden; vgl. näher Banse 2016a; vgl. auch Banse et al. 2011; Parodi et al. 2010, 2011.

<sup>5</sup> Hierzu z\u00e4hlen auch die in ihrer Bedeutung nicht zu vernachl\u00e4ssigenden ritualisierten und symbolischen Handlungen.

nissen vor dem Hintergrund von Gegenwart und (wünschenswerter) Zukunft Rechnung trägt.

(d) Forderungen sind schneller aufgestellt als in operationalisierbare Vorgaben oder Anweisungen umgesetzt, und diese sind gewiss leichter formuliert denn realisiert. Die gemachten Anregungen ("Forderungen", "Erfordernisse") bedürfen unbedingt einer Untersetzung und Erweiterung ("Konkretisierung") im Hinblick auf anwendbare Handlungs- und Verhaltensoptionen, einer "Transformation" in Gestaltungsprinzipien und in technische Strategien, in Bewertungskriterien und in ein zweckbezogenes methodisches Instrumentarium. Dazu ist auch - wie oben bereits angedeutet - die Einbeziehung aller Akteure erforderlich, denn ohne die Berücksichtigung ihrer sicherlich differierenden Sichten ist eine Konkretisierung und Operationalisierung des Leitbildes nachhaltige Entwicklung nur schwerlich möglich, wenn nicht überhaupt gänzlich unmöglich. Es gilt herauszufinden, wo - bezogen auf Komplexität und Zeit (und damit auch auf Nachhaltigkeit) – die "goldenen Schnitte" liegen bzw. welche Randbedingungen nichttechnischer, aber auch technischer Art bewirken, dass der "goldene Schnitt" gerade hier und nicht dort liegen sollte oder müsste.

Vor diesem Hintergrund seien abschließend einige Zielstellung für Technik-/ Technologie-Forschung und -lehre lediglich genannt:

- Nachhaltige Technologie-Innovationen müssen das Nachhaltigkeitsdreieck erfüllen. Dabei darf keine der Komponenten bevorzugt werden. Durch
  Export nachhaltiger Technologien und Ausrüstungen kann Deutschland
  zum "Nachhaltigkeitstreiber" in der Welt werden.
- Eine nachhaltige Technologie-Ausbildung sollte in den MINT-Fächern nur in Masterstudiengängen erfolgen. Eine zweistufige Ausbildung (a) Technologie-Grundlagen (Allgemeine Prozess- und Systemtechnik) und (b) technologische Spezialisierungen (chemische, physikalische, biologische, Lebensmittel- u.a. Technologien) wird empfohlen (Hochschulwechsel nach den Grundlagen möglich bzw. erwünscht).
- Der entsprechende Qualifizierungsbedarf ist im Rahmen der Digitalisierung 4.0 für Ingenieure (Prozessgestaltung 54%) und Wirtschaftsinformatiker (e-commerce 43%) sehr hoch und sollte in der Ausbildung besonders beachtet werden (Masterausbildung, Diplomstudiengänge).
- Eine nachhaltige Technologie-Forschung muss zentrale Menschheitsprobleme lösen helfen (Ernährung, Klima, Gesundheit, Umweltschutz, Lebensstandard u.a.; siehe Tab. 2).

Artefakt Maßnahmen zur Nachhaltigkeit Auto Automatisierter Motorstop an Haltestellen, Katalysatoreinsatz "Elektroauto", Geschwindigkeitsbegrenzungen Flugzeuge Kerosineinsparung durch Einsatz von Verbundwerkstoffen. Formgestaltung zur Minimierung des Widerstandsbeiwertes Schiffe Buggestaltung zur Widerstandsminimierung Produktionsabfälle stoffliche Verwertung durch neue Wirkprinzipien z.B. Bakterien, Katalyseforschung CO2-Wandlung, Beifang bei Fischen minimieren durch neuartige Netzkonstruktionen, Recycling-Technologien entwickeln Maschinen. komplexe Prozessanalysen reduzieren den Energie- und Stoffeinsatz (z.B. optimale Rührmaschinen, Wärmeüberträger, optimale Anlagenstruktur u.v.m.) Apparate, Anlagen Energieversorgung wachsenden Anteil an erneuerbaren Energien einbringen

Tab. 2: Beiträge technischer Forschung für nachhaltige Entwicklung

Eigene Darstellung

#### 4 Fazit

- (1) Die Umsetzung des Nachhaltigkeits-Leitbildes ist realiter mit sogenannten "lebensweltlichen Widerfahrnissen" konfrontiert, vor allem mit dem Prognose-, dem Pluralismus- und dem Wertedilemma:
- Prognose-Dilemma: Inwieweit sind Aussagen über mögliche Folgen wissenschaftlich-technischer Hervorbringungen angesichts der Komplexität des Gegenstandes, der Offenheit der Zukunft und der Veränderung der Bedingungen rechtfertigbar?
- Pluralismus-Dilemma: Wie können die Vielfalt von handlungsleitenden Wertvorstellungen, Präferenzen, Interessen und Zielen, aber auch von Hoffnungen und Ängsten praktikabel berücksichtigt werden?
- Werte-Dilemma: Gibt es allgemeinverbindliche wenn auch zustimmungspflichtige - humane und soziale Werte als Zielorientierung und Anforderungsstrategie für technisches Handeln?

Der Umgang mit diesen Dilemmata wird wohl zu Kompromissen und suboptimalen Lösungen führen. Das sollte jedoch nicht daran hindern, das Konzept der "Nachhaltigkeit" weiter zu verfolgen, es diskutierend weiter zu konkretisieren.

- (2) Nachhaltigkeitsziele und -vorstellungen sind einem wissenschaftlichen wie gesellschaftlichen Lernprozess zu überantworten, der hinsichtlich des zu generierenden, des zu vermittelnden wie des anzueignenden Wissens weitgehend, aber nicht vollständig offen ist, denn "die Verpflichtung auf das Nachhaltigkeitspostulat schränkt die Offenheit ein" (Kopfmüller et al. 2001, S. 367). Dieser Lernprozess kann und sollte sich auf unterschiedlichen Ebenen vollziehen: kognitives Wissen, normative Orientierung, Konflikterkennung und -bewältigung, Relevanzeinschätzung, Monitoring der Folgen von Maßnahmen (vgl. Kopfmüller et al., S. 367f.).
- (3) Nachhaltige Entwicklung ist (vor allem?) eine Frage der Kultur, denn:

"Es ist die Praxis unseres alltäglichen Tuns, es sind die kulturell eingefahrenen Gepflogenheiten und sozial eingespielten Praktiken, die große Ansatzpunkte für Verhaltensänderungen auch hin zur Nachhaltigkeit bieten." (Hörning 2010, S. 334)

#### Literatur

- Banse, G. (1997): Nachhaltigkeit ohne Technik? Drei Thesen zu einem aktuellen Thema. In: technica didactica, Jg. 1, H. 1, S. 5–29
- Banse, G. (2003): Themenkreis "Humankapital und Bildung". Einführung. In: Kopfmüller, J. (Hg.): Den globalen Wandel gestalten. Forschung und Politik für einen nachhaltigen globalen Wandel. Berlin. S. 63–73
- Banse, G. (2004a): Der Beitrag der interdisziplinären Technikforschung zur Weiterentwicklung der Allgemeinen Technologie. In: Banse, G.; Reher, E.-O. (Hg.): Fortschritte bei der Herausbildung der Allgemeinen Technologie. Berlin, S. 35–48 (Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Bd. 75)
- Banse, G. (2004b): Solarzeitalter Nachhaltigkeit Technikfolgenabschätzung. In: Blumenthal, G.; Öhlmann, G. (Hg.): Solarzeitalter Vision und Realität. 8<sup>th</sup> Augustusburg Conference of Advanced Science 11.–13. September 2003 auf Schloß Augustusburg. Berlin, S. 13–24 (Abhandlungen der Leibniz-Sozietät, Bd. 15)
- Banse, G. (2015): Technikverständnis Eine unendliche Geschichte... In: Banse, G.; Reher, E.-O. (Hg.): Technologiewandel in der Wissensgesellschaft qualitative und quantitative Veränderungen –. Berlin, S. 19–34 (Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 122)
- Banse, G. (2016a): Technisches und Kulturelles. Anmerkungen zu historischen und aktuellen Interdependenzen. In: Mitteilungen der Wilhelm-Ostwald-Gesellschaft zu Großbothen e.V., S. 9–40
- Banse, G. (2016b): Über den Umgang mit Unbestimmtheit. In: Leibniz Online. Zeitschrift der Leibniz-Sozietät e. V., Nr. 22. – URL: http://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2016/ 03/Banse.pdf

- Banse, G.; Nelson, G. L.; Parodi, O. (eds) (2011): Sustainable Development The Cultural Perspective. Concepts Aspects Examples. Berlin
- Birnbacher, D.; Schicha, Chr. (1996): Vorsorge statt Nachhaltigkeit. Ethische Grundlagen der Zukunftsverantwortung. In: Kastenholz, H. G.; Erdmann, K.-H.; Wolff, M. (Hg.): Nachhaltige Entwicklung. Zukunftschancen für Mensch und Umwelt. Berlin u.a.O., S. 141–154
- Carlowitz, H.-C. von (2013): Sylvicultura oeconomica, oder haußwirtschaftliche (haußwirthliche) Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur Wilden Baum-Zucht [1713]. Neuaufl. München
- Detzer, K. A. (1993): Unsere Verantwortung für eine umweltverträgliche Technikgestaltung. Von abstrakten Leitsätzen zu konkreten Leitbildern. Düsseldorf (VDI)
- Dierkes, M.; Hoffmann, U.; Marz, L. (1992): Leitbild und Technik. Zur Entstehung und Steuerung technischer Innovationen. Berlin
- Giesel, K. D. (2007): Leitbilder in den Sozialwissenschaften. Begriffe, Theorien und Forschungskonzepte. Wiesbaden
- Grunwald, A. (Hg.) (2002a): Technikgestaltung für eine nachhaltige Entwicklung. Von der Konzeption zur Umsetzung. Berlin
- Grunwald, A. (2002b): Technik nachhaltig gestalten Herausforderung für die Technikfolgenabschätzung. In: Berg, Chr.; Tulbure, I.; Charbonnier, R. (Hg.): Folgenabschätzungen – Resonanzen zum 65. Geburtstag von Michael F. Jischa. Clausthal (Forum Clausthal), S. 101–113
- Hauff, V. (Hg.) (1987): Unsere gemeinsame Zukunft. Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung. Greven
- Hennen, L.; Krings, B. (1998): TA-Projekt "Forschungs- und Technologiepolitik für eine nachhaltige Entwicklung". Zwischenbericht. Bonn (TAB) (TAB-Arbeitsbericht Nr. 58)
- Hörning, K. H. (2010): Kultur und Nachhaltigkeit im Netz alltäglicher Lebenspraktiken. In: Parodi, O.; Banse, G.; Schaffer, A. (Hg.): Wechselspiele: Kultur und Nachhaltigkeit. Annäherungen an ein Spannungsfeld. Berlin, S. 333–345
- Huber, J. (1989): Technikbilder. Weltanschauliche Weichenstellungen der Technologie- und Umweltpolitik. Opladen
- Huber, J. (2000): Industrielle Ökologie. Konsistenz, Effizienz und Suffizienz in zyklusanalytischer Betrachtung. Baden-Baden. URL: http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0168-ssoar-121622
- Iglhaut, S. (2000): Wie inszeniert man "Nachhaltigkeit"? Wissen, Information, Kommunikation im Themenpark der EXPO 2000. In: Radermacher, F. J. (Hg.): Informationsgesellschaft und Nachhaltige Entwicklung. Ergebnisband der Stuttgart-Konferenz, 2. Juli 1998. Ulm, S. 121–134
- Kopfmüller, J.; Brandl, V.; Jörissen, J.; Paetau, M.; Banse, G.; Coenen, R.; Grunwald, A. (2001): Nachhaltige Entwicklung integrativ betrachtet. Konstitutive Elemente, Regeln, Indikatoren. Berlin
- Nowak, Z. (2005): Cleaner Production. Eine Nachhaltigkeitsstrategie für die Bereiche Produktion und Dienstleistungen Ein polnisches Beispiel. In: Banse, G.; Kiepas, A. (Hg.): Nachhaltige Entwicklung: Von der wissenschaftlichen Forschung zur politischen Umsetzung. Berlin, S. 223–227

- Parodi, O.; Banse, G.; Ayestaran, I. (eds.) (2011): Sustainable Development Relationships to Culture, Knowledge and Ethics. Karlsruhe
- Parodi, O.; Banse, G.; Schaffer, A. (Hg.) (2010): Wechselspiele: Kultur und Nachhaltigkeit. Annäherungen an ein Spannungsfeld. Berlin
- Ropohl, G. (2009): Allgemeine Technologie. Eine Systemtheorie der Technik (3. Aufl.). Karlsruhe
- Rosemann, B. (2005): Nachhaltige Entwicklung und Produktion. Zusammenhänge, Probleme und Handlungsstrategien. In: Banse, G.; Kiepas, A. (Hg.): Nachhaltige Entwicklung: Von der wissenschaftlichen Forschung zur politischen Umsetzung. Berlin, S. 193–206
- RSU Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen (1996): Zur Umsetzung einer dauerhaft-umweltgerechten Entwicklung. Umweltgutachten 1996. Stuttgart
- Stoltenberg, U. (2010): Kultur als Dimension eines Bildungskonzepts für nachhaltige Entwicklung. In: Parodi, O.; Banse, G.; Schaffer, A. (Hg.): Wechselspiele: Kultur und Nachhaltigkeit. Annäherungen an ein Spannungsfeld. Berlin, S. 293–311
- VDI Verein Deutscher Ingenieure (1991): Technikbewertung Begriffe und Grundlagen. Erläuterungen und Hinweise zur VDI-Richtlinie 3780. Düsseldorf (VDI)

## Automatisierung und Nachhaltigkeit technologischer Lösungen

## 1 Einleitung

Der heute viel und manchmal auch etwas oberflächlich verwendete Begriff der Nachhaltigkeit (Sustainability) hat einen direkten Bezug zur Automatisierung. An anderer Stelle wurde bereits dargestellt, welchen Beitrag die Theorie der Prozessführung im Sinne der automatisierten Prozessoptimierung, -stabilisierung und -sicherung zur Nachhaltigkeit und Zuverlässigkeit technologischer Lösungen leisten kann (vgl. Balzer/Thierse 2014). Im vorliegenden Beitrag wird an konkreten Beispielen gezeigt, wie diese theoretischen Überlegungen in die Praxis umgesetzt werden können. Dabei wird über die Erfahrungen berichtet, die drei Konsortien aus dem Netzwerk >> www. Eureffus.de << bei der Planung und teilweise bereits bei der Realisierung automatisierter nachhaltiger Lösungen bei der Nutzung erneuerbarer Energien gesammelt haben.

Wenn wir von Nachhaltigkeit reden, müssen wir technische, ökonomische, ökologische und soziale Kriterien betrachten. Im Sinne der Nachhaltigkeit muss also eine polykriteriale Optimierungsaufgabe (Vektoroptimierung) gelöst werden. Es geht um die Bestimmung einer Pareto-Menge. Es liegt auf der Hand, dass die Automatisierung als Schlüssel zu nachhaltigen technologischen Prozessen angesehen werden kann.

Unter dem technischen Kriterium verstehen wir die Einhaltung von Optimalitätsbedingungen bei der automatischen Prozessführung, -stabilisierung und -sicherung. Dabei geht es erstens um adaptive Lösungen unter Nutzung echtzeitfähiger Elemente der künstlichen Intelligenz und zweitens um die Wiederverwendbarkeit von Automatisierungslösungen. Unter dem ökonomischen Kriterium verstehen wir die Wettbewerbsfähigkeit, unter dem ökologischen Kriterium die Ressouceneffizienz und unter dem sozialen Kriterium die physiologischen und psychologischen Arbeitsbedingungen. Die Automatisierung verfügt als integrierende Wissenschaftsdisziplin über alle Voraussetzungen, um diese Polyoptimierungsaufgabe zu lösen.

Die Beziehung zwischen Automatisierung und Nachhaltigkeit wird an Hand folgender Beispiele innovativer technologischer Lösungen erläutert: Gewinnung elektrischer Energie aus Abwärme im Niedertemperaturbereich, Energieautonomie von Wohn- und Gewerbegebieten durch Einsatz von virtuellen Kraftwerken sowie Nutzung von organischen Abfällen und Reststoffen zur Erzeugung von Diesel durch pyrolysefreie katalytische drucklose Verölung. In diesem Zusammenhang wird die Wechselwirkung zwischen Nachhaltigkeit und Innovation analysiert. Dabei ist zu beachten, dass Innovation grundsätzlich mit einem technischen Risiko verbunden ist. Dieses Risiko muss im Rahmen des Projektierungsprozesses minimiert werden, damit die Innovation auch tatsächlich einen Beitrag zur Nachhaltigkeit leisten kann. Es kommt also darauf an, die Sicherheit der innovativen technologischen Prozesse zu gewährleisten (vgl. Balzer 2016).

# 2 Nachhaltige automatisierte technische Lösungen des Energiemanagement und der Energieautonomie für neue Formen des Wohnens und Arbeitens

## 2.1 Gesellschaftliches Umfeld und neue Technologien

Es ist im gesellschaftlichen Interesse des Klima-, Natur- und Umweltschutzes, eine nachhaltige Entwicklung beim Einsatz der Energie und Ressourcen zu erreichen, die individuelle Belastung der Verbraucher mit Energiekosten zu senken und die *Weiterentwicklung und Optimierung von Technologien* zur effizienten Energienutzung zu unterstützen und damit letztendlich auch einen Beitrag zur Vermeidung von Konflikten um fossile Energieressourcen zu leisten. Ein Konsortium aus Industrieunternehmen und wissenschaftlichen Einrichtungen bearbeitet ein Projekt zur Nachhaltigkeit von automatisiertem Energiemanagement (vgl. EnergieAutark et al. 2016).

Analysen der Energienutzung insbesondere in Wohn- und Gewerbeanlagen/-parks haben ergeben, dass der Wunsch nach einer rationellen Energienutzung und klimaneutralen Energieerzeugung eine zunehmende Rolle spielt. Unter diesem Gesichtspunkt erhalten Unternehmen der Bereiche Bauwesen und Infrastruktur zunehmend Anfragen bezüglich der Rekonstruktion von Wohn- und Gewerbeanlagen einerseits als Berater bzw. Projektant mitzuwirken und andererseits die gebäudetechnischen Anlagen und Energiesysteme vor Ort auf die neuen Anforderungen einzustellen bzw. ihre Funktionalität anzupassen. Gleichzeitig gibt es einen zunehmenden Bedarf an vollständig neu konzipierten, innovativen Lösungen, die neben dem Bedürf-

nis nach innovativer Energienutzung auch ganz neue Formen des Wohnens und Arbeitens unter effizienter Nutzung der heute verfügbaren Technologien in diesem Kontext fordern (siehe Abb. 1). Mit dem Wissen, dass die Energiepreise noch weiter steigen werden, weil zunehmend Erzeuger mit umweltschonenden Technologien subventioniert werden müssen, um diese Technologien am Markt durchzusetzen, müssen die Restrukturierungen von Wohnund Gewerbeparks und -anlagen unter dem Blickwinkel hoher Energieeffizienz voran gebracht werden und neue Anlagen unmittelbar von den aktuellen technischen Möglichkeiten Gebrauch machen.

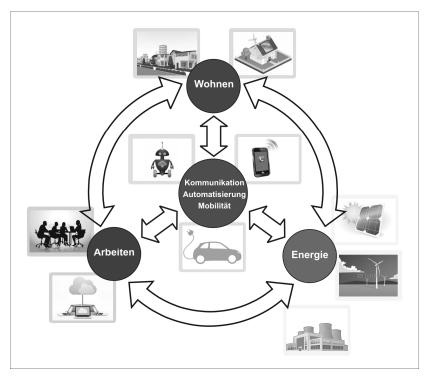


Abb. 1: Innovatives Gesamtkonzept – Neue Formen des Wohnens und Arbeitens unter den Kerngesichtspunkten Nachhaltigkeit, Energieund Ressorceneffizienz und Gesundheit

Eigene Darstellung

Dabei ist festzustellen, dass die in diesem Umfeld bisher verfügbaren Produkte – etwa Solaranalagen, Passivhäuser, Heizanlagen unter Nutzung von Erdwärme, Ansätze des Ambient Assited Living etc. – bisher keinen ganzheitlichen Ansatz verfolgen und nur als Insellösungen zu verstehen sind, die für sich betrachtet zwar die jeweiligen Primäranforderungen erfüllen, jedoch viele Synergien sowohl bei der Effektivität als auch bei der Nutzerfreundlichkeit insbesondere in Kombination ungenutzt lassen. Es wird das Ziel verfolgt, diese Ansätze zu einem ganzheitlichen Wohn- und Gewerbekonzept, das den gegenwärtigen und absehbaren zukünftigen gesellschaftlichen Anforderungen gerecht wird, weiterzuentwickeln.

Dies geht über eine bloße Kombination vorhandener Technologien weit hinaus. Im Kern entsteht eine Technologieplattform, die teilweise bereits durch das Konsortium realisiert wurde und die wir im Folgenden als wissensbasiertes integriertes Prozessführungssystem im Sinne eines Smart-Grid bezeichnen.

Um die Motivation für die Schaffung dieses Systems deutlich zu machen, sollen zunächst die bestehenden gesellschaftlichen Herausforderungen in Deutschland (und einer Reihe anderer Industrienationen) betrachtet werden. Unsere Gesellschaft wird heute in erheblichem Maße durch die folgenden gesellschaftlichen Herausforderungen bestimmt:

- Demografischer Wandel, d.h. Alterung der Gesellschaft;
- Energiewandel, d.h. Umstrukturierung des Energiemixes hin zu den Erneuerbaren;
- Forderung eines ständig wachsenden Bildungsniveaus innerhalb der Gesellschaft bei kontinuierlicher Weiterbildung zur Sicherung des High-Tech-Standorts Deutschland;
- Forderung einer hohen Mobilität der Arbeitnehmer aufgrund der Globalisierung und der Schnelllebigkeit der heutigen Ökonomie;
- überproportionales Wachstum von Beschäftigung im Dienstleistungssektor.

Begünstigt wird die Entwicklung eines wissensbasierten integrierten Prozessführungssystems für das Energiemanagement durch eine Reihe von Voraussetzungen, die in sich in den letzten Jahren etabliert haben, etwa

- allgemeine Verfügbarkeit von Breitbandinternetverbindungen (sowohl stationär als auch mobil);
- steigende Datenspeicherung und Informationsgewinnung in verschiedensten Technologie- und Lebensbereichen (verstärkter Einsatz von

- Sensorik in technischen Anlagen aller Art, durch den Einsatz von RFID-Technologie, Big Data etc.);
- Entwicklung "smarter" Lösungen zur Nutzung der vorliegenden Daten, um bestehende Prozesse intelligenter, d.h. effizienter und nachhaltiger zu gestalten;
- Verfügbarkeit von Web- und Cloud-Technologien als Service-basierte Lösungen.

Das wissensbasierte integrierte Prozessführungssystem soll neben dem Energiemanagement die informationstechnische Basis für ein quartierorientiertes Wohn- und Betreuungskonzept bilden. Eckpunkte dieses Konzeptes sind:

- Neben der Energieautarkie ist der Ansatz der gegenseitigen Hilfe ein wichtiges Alleinstellungsmerkmal. Ein Quartiermanager wird unter Nutzung des Steuerungs- und Kommunikationssystems die Moderation und Koordination der Nachbarschaftshilfe übernehmen, die vor allem für Hochaltrige, Familien mit Kindern als auch Menschen mit Behinderungen von großer Bedeutung sind. Bei Bedarf werden telemedizinische Leistungen in Anspruch genommen.
- Es werden Heimarbeitsplätze unter Einbindung moderner Informationsund Kommunikationstechnologien direkt in die Gebäudeplanung integriert. Damit wird den gegenwärtigen Trends zu neuen Konzepten des Arbeitens und Wohnens (z.B. Remote-Arbeitsplätze) entsprochen.
- Integration von Systemlösungen der e-Mobilität in die Kommunikationsund Automatisierungsstrukturen von baulichen Anlagen.

# 2.2 Innovativer Kern der automatisierten technischen Lösung des Energiemanagement

Ausgehend von der Notwendigkeit, auf die o.g. gesellschaftlichen Trends zu reagieren, wird unter Nutzung der beschriebenen Technologieentwicklung eine ganzheitliche Technologieplattform für eine neue Generation des regionalen Energiemanagements geschaffen. Dabei werden auch intelligente Schnittstellen erstens zu neuen bisher nicht genutzten Energiequellen (Thermoelektrische Wandler zur Erzeugung von Strom aus Abwärme, Erzeugung von Diesel aus organischen Abfällen und Reststoffe für Blockheizkraftwerke) und zweitens zu Produktionsanlagen im Gewerbegebiet geschaffen.

Es geht dabei um eine koordinierte intelligente Steuerung der Erzeugung, Speicherung und Nutzung von Wärmeenergie und elektrischer Energie. Es wird eine breite Palette von Speichertechnologien eingesetzt: Festkörperspeicher, elektrische Batterien, Gasspeicher (z.B. Wasserstoff), Flüssigkeitsspeicher (z.B. Diesel), Fronius-Energiezelle u.a.

Die operativ im Echtzeitbetrieb zu lösende Optimierungsaufgabe des Energiemanagement zur Sicherung der Nachhaltigkeit bzw. Energieeffizienz beim Betreiben der Infrastruktur eines Wohn- und Gewerbeparks besteht in folgendem:

Optimierungskriterium:

$$\int_{0}^{T} \left[ G(e, v, t) + K(e, v, t) \right] dt \xrightarrow{e, v} \max$$
 (1)

Nebenbedingungen:

$$\int_{0}^{T} k_{r} \left[ E_{0}(t) + \sum_{i=1}^{N} E_{i}(e_{i}, t) - \frac{1}{k_{r}} V_{0}(t) - \frac{1}{k_{r}} \sum_{j=1}^{M} V_{j}(v_{i}, t) \right] dt = S_{r} \ge 0$$
(2)

$$r=1,2,...,R$$

Die verwendeten Bezeichnungen sind:

 $E_j$  ( $e_j$ , t),  $V_j$  ( $v_j$ , t) – mathematische Modelle (Abhängigkeiten der erzeugten bzw. verbrauchten Energiemengen von den jeweiligen Steuergrößen und der Zeit) des i-ten Erzeugers bzw. des j-ten Verbrauchers

 $E_0$ ,  $V_0$  – aus dem öffentlichen Netz entnommene Energiemenge bzw. in das öffentliche Netz eingespeiste Energiemenge

G (e, v, t), K (e, v, t) – Gewinn aus der in das öffentliche Netz eingespeiste Energiemenge bzw. Kosten aus dem öffentlichen Netz entnommene Energiemenge

 $e_j$  – Steuergröße des i-ten Erzeugers

 $v_j$  – Steuergrößen des j- ten Verbrauchers

e – Vektor der Steuergrößen der Erzeuger

v – Vektor der Steuergrößen der Verbraucher

 $S_r$  – im r-ten Speicher vorhandene Energiemenge

T – Betrachteter Zeitraum des Energiemanagement (bis zu einem Jahr)

 $k_r$  – Wirkungsgrad des Speichers ( $0 \le k_r \le 1$ )

R – Gesamtanzahl der Speicher (Strom und Wärme)

Zur Optimierungsaufgabe (1) und (2) sind folgende Bemerkungen zu machen:

- Es handelt sich um eine Aufgabe der modellbasierten Vorwärtssteuerung. Für jeden Stromspeicher und für jeden Wärmespeicher wird eine Energiebilanz erstellt, die als Nebenbedingung der Optimierung fungiert. Die in den Nebenbedingungen enthaltenen mathematischen Modelle sind entweder einfache zeitabhängige algebraische Gleichungen (z.B. für Anlagen der Photovoltaik und Photothermie) oder die zeitabhängigen Lösungen von Systemen gewöhnlicher oder partieller Differentialgleichungen (z.B. für Anlagen der katalytischen drucklosen Verölung oder für Biogasanlagen).
- Für die Lösung der Optimierungsaufgabe werden auf dem Markt vorhandene vorgefertigte Module verwendet, die zu einem Lösungsalgorithmus konfiguriert werden.
- Das Energiemanagement wird für gekoppelte Strom- und Wärmenetze durchgeführt.
- Unter Steuergrößen eines Erzeugers verstehen wir erstens externe Steuergrößen (z.B. Rohstoffmenge/Zeiteinheit bei Biogasanlagen, Wärmemenge/Zeiteinheit bei thermoelektrischen Wandlern wie ORC, Stirling, Seebeck, Rotationskolbenmaschine) und zweitens interne Steuergrößen (z.B. Temperatur, Druck, Durchsätze).
- Unter Steuergrößen eines Verbrauchers verstehen wir solche internen Steuergrößen wie z.B. Drehzahlen, Sollwerte, Schaltzustände).
- Bei K(e, v, t) = 0 haben wir es mit einer energieautonomen Lösung zu tun.

Neben den dargestellten mathematischen Methoden des Energiemanagements werden auch heuristische Methoden der Künstlichen Intelligenz in das Automatisierungs- und Steuerungssystem integriert, auf deren Darstellung aber an dieser Stelle verzichtet wird.

# 3 Automatisiertes Verfahren zur Herstellung von Dieselöl aus organischen Abfall- und Reststoffen basierend auf Technologien zur katalytischen drucklosen Verölung (KDV)

# 3.1 Ausgangssituation und Marktbedarf

Energie aus nachwachsenden Rohstoffen sowie aus organischen Reststoffen der Abfallwirtschaft mit hohem Kohlenstoffgehalt durch neue innovative Technologien mit Modellcharakter verfügbar zu machen, stellt zunehmend eine Alternative zur Produktion von Energieträgern aus fossilen Ressourcen

dar. Das ist von besonderer Bedeutung bei der Sicherung der Energieautonomie im kommunalen Bereich.

Um diese im gesamtstaatlichen Interesse liegende Forderung umzusetzen, ist ein neues dezentrales automatisiertes verfahrenstechnisches System zur Gewinnung von Dieselöl aus Haus- und Gewerbemüll sowie Kunststoff, Holz und Klärschlamm durch ein Konsortium aus Industrieunternehmen und wissenschaftlichen Einrichtungen entwickelt und in mehreren Anlagen im In- und Ausland erfolgreich getestet worden (vgl. Alphakat et al. 2015). Für dieses verfahrenstechnische System der katalytischen drucklosen Verölung (KDV) besitzt die Firma Alphakat GmbH ein Hauptpatent DE 100 49 377 und mehrere Patente der letzten Jahre. Diese KDV-Anlage wird in ein virtuelles Kraftwerk (Mikro grid) integriert, mit dem die vor Ort erzeugte Energie auch vor Ort genutzt werden kann. Teure Energietrassen entfallen. Gleichzeitig werden im Vergleich zu zentralen Energieerzeugungsanlagen die Transportkosten für die Input-Stoffe drastisch reduziert. Das Prinzip der Integration wurde im Abschnitt 2 bereits dargestellt.

Zentrale Elemente der KDV-Anlage sind ein Turbogenerator, welcher sich mit hoher Dynamik an Änderungen in der Wärmezufuhr anpassen kann, optimierte Katalysatoren, eine Kompakteinheit zur Substitution der bisherigen einzelnen Verfahrenseinheiten zur katalytischen drucklosen Verölung und ein wissensbasiertes Mischungssystem für die Input-Stoffe (siehe Abb. 2). Das Inputmaterial soll aus regionalem Aufkommen an Siedlungsreststoffen generiert werden. Dies sind insbesondere Kunststoffe und Holz ("gelber Sack"-Fraktionen, Holzschnitzel), Klärschlamm aus Kläranlagen, Braunkohlenstaub und gegebenenfalls weitere organische Reststoffe, die derzeit noch verklappt werden, wie z.B. Trester. Dazu sind neue Anlagenteile zur Materialkennung, Materialaufbereitung, Mischung, Dosierung und Prozesseinbringung zu entwickeln.

Im Turbogenerator laufen die tribochemischen katalytischen Reaktionen der Stoffumwandlung vor allem als Depolymerisation und Polymerisation ab. Die chemische Summengleichung der Depolymerisation ohne Beachtung der stöchiometrischen Koeffizienten lautet:

Kunststoff 
$$(C_{50}H_{96})$$
 + Zellulose  $(C_6H_{11}O_5)$  = Diesel  $(C_{14}H_{28})$  + Kohlendioxyd  $(CO_2)$  (3)

Die chemische Summengleichung der Polymerisation ebenfalls ohne Beachtung der stöchiometrischen Koeffizienten lautet:

Zellulose 
$$(C_6H_{11}O_5)$$
 = Mitteldestillat/Diesel  $(C_{14}H_{28})$  + Kohlendioxyd  $(CO_2)$  + Wasserstoff  $(H)$  (4)

Diese chemischen Gleichungen (3) und (4) bilden die Grundlage für die Erstellung des mathematischen Modells in Form von Material- und Energiebilanzgleichungen. Unter Nutzung des mathematischen Modells erfolgt dann die operative Prozessoptimierung, -stabilisierung und -sicherung als Beitrag zur Nachhaltigkeit.

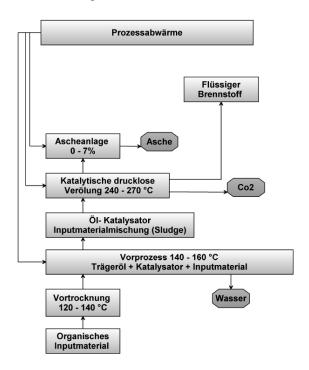


Abb. 2: Prinzipschema der Technologie zur katalytischen drucklosen Verölung

Eigene Darstellung

Es wird ein neuartiges Steuerungs- und Regelungssystem sowohl für die Leitebene als auch für die Feldebene entwickelt. Die Abwärme wird innerhalb der Anlage genutzt. Dadurch wird eine höhere Wirtschaftlichkeit und Effizienz des Prozesses erreicht. Gleichzeitig muss aber auch beachtet werden, dass das optimale Betriebsregime der Anlage in der Nähe der Stabilitätsgrenze liegt. Es ist deshalb notwendig, dass mit Hilfe der Automatisierungssysteme ein entsprechender Sicherheitsabstand zur Stabilitätsgrenze

eingehalten wird. Die Gesamtanlage wird in ihrer Größe so konzipiert, dass mit ihr ein regionaler Wertstoff- und Wirtschaftskreislauf durchgeführt werden kann. Die Inputmaterialien werden aus regionalem Aufkommen generiert und das Endprodukt Diesel kann sowohl in einem BHKW zur Erzeugung von Regelenergie als auch in der Region in Industrie und Landwirtschaft verwendet werden. Dadurch können Umweltbelastungen durch Transporte minimiert werden.

Für die Integration von KDV-Anlagen in das automatische Energiemanagement in virtuellen Kraftwerken für Gewerbe- und Wohngebiete sind insbesondere folgende Aufgaben zu lösen:

- Modellierung und optimale Auslegung der KDV-Anlagen mit dem Ziel, durch die Erhöhung der Zuverlässigkeit, Flexibilität und Steuerbarkeit der Anlagen Regelenergie bereit zustellen;
- Untersuchungen zum Einfluss des Katalysatortyps und Prozessbedingungen auf die katalytische Verölung von individuellen biogenen und polymeren organischen Reststoffen und deren Gemischen;
- Entwurf eines modellbasierten Prozessführungssystems für die KDV-Anlagen mit standardisierten Schnittstellen zum Energiemanagementsystem;
- Bestimmung der dynamischen und statischen Vorgaben bzw. Sollwerte für die Steuerung der KDV-Anlagen (Requirement-Engineering) unter Beachtung der Anforderungen an die Energieversorgung für Gewerbeund Wohngebiete sowie der Quantität und Qualität der zur Verfügung stehenden Input-Stoffe.

Das neue verfahrenstechnische System besitzt folgende Alleinstellungsmerkmale:

- Hohe Kraftstoffausbeute bezogen auf die verwendeten Einsatzstoffe;
- keine Erzeugung von Dioxinen oder Furanen durch Betrieb bei Temperaturen unterhalb der Pyrolysetemperatur;
- Umsetzung unter Normaldruckbedingungen;
- flexibler und modularer Betrieb der Anlage sowohl mit biogenen als auch mit mineralischen und synthetischen Abfallstoffen oder Mischungen derselben;
- die geringen Totzeiten und Zeitkonstanten der Steuerkanäle gestatten die Erzeugung von Regelenergie für virtuelle Kraftwerke auch ohne zusätzliche Speicherkapazität für den Kraftstoff; die Speicherkapazität kann damit optimiert werden;

 Inputstoffe können Altöle, Fettrückstände, Plastikmaterial einschließlich PVC, Gummireifen, sortierter Müll einschließlich Krankenhausmüll, Klärschlämme etc. sein.

## 3.2 Modellbasierte Prozessführungssysteme für die KDV-Anlage

Die notwendigen Elemente bei der Lösung der Automatisierungsaufgaben führen dazu, dass die Struktur des Automatisierungs- und Steuerungssystems der KDV-Anlage eine zweistufige Hierarchie besitzt (siehe Abb. 3). Dazu wurde im Rahmen eines EU-Forschungsprojektes die Konzeption für "Virtual Automation Networks (VAN)" entwickelt, in dem sowohl öffentliche und private als auch industrielle Kommunikationstechnologien zu einem einzigen skalierbaren System mit einer im Idealfall garantierten Dienstgüte (Quality of Service – QoS) integriert werden kann (VAN enabled; vgl. VAN 2009).

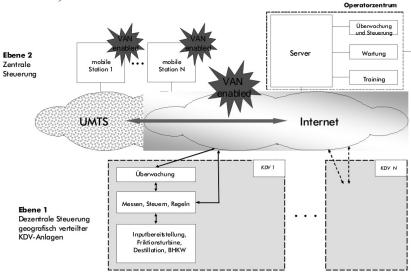


Abb. 3: VAN basierte Automatisierungsstruktur geografisch verteilter KDV-Anlagen

Eigene Darstellung

Die praktischen Vorteile und damit die Nachhaltigkeit der zentralen Steuerung und Wartung dezentraler technologischer Anlagen mit Hilfe eines Operatorzentrums sind:

Know-how eines Operators oder Wartungsingenieurs ist für viele Anlagen ohne Zeitverzögerung für die Lösung von Prozessführungsaufgaben einsetzbar;

- ein modellgestütztes Prozessführungssystem ist für viele Anlagen einsetzbar;
- die Kosten für die zentrale Leittechnik werden durch die Anzahl der dezentralen Anlagen geteilt;
- Integration eines Trainingssimulators in die zentrale Leittechnik (e-Learning) ist möglich;
- der geschätzte ökonomische Nutzen bei der Steuerung von KDVi-Anlagen beträgt unter Beachtung der Erfahrungen in der Verfahrenstechnik (z.B. Abfallwirtschaft, Nutzung erneuerbarer Energien) eine etwa dreißigprozentige Gewinnerhöhung.

# 4 Wissensbasierte automatisierte Restwärmenutzung zur Stromerzeugung

### 4.1 Internationaler Stand bei der Restwärmenutzung zur Stromerzeugung

Es geht in diesem Fall um einen neuen Ansatz zur Erhöhung der Energieeffizienz. Die bei vielen industriellen Prozessen anfallende "Abwärme" bzw. "Restwärme" in Form von thermischer Energie auf aus energietechnischer Sicht niedrigem Temperaturniveau (< 300°C, im Weiteren "Niedertemperaturwärme" genannt) soll für die Elektroenergiegewinnung nutzbar gemacht werden. Auch im 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung wird gefordert, dass die Abwärme von thermischen Prozessen mittels Umwandlung in elektrische Energie zu einer alternativen Energiequelle werden sollte. Um Technologien für die Nutzbarmachung immer niedriger temperierter "Abwärme" letztlich als Produkt erfolgreich platzieren zu können, benötigt man einen innovativen Ansatz und eine kostengünstige Lösung mit verbesserten technischen Parametern.

Ausgehend von dieser Einschätzung wurde die Patentanmeldung beim DPMA mit dem Aktenzeichen 10 2013 104 868.4 "Anordnung und Verfahren zur Umwandlung von Niedertemperaturwärme in mechanische Energie" als aussichtsreicher Ansatz für die Entwicklung einer neuen Variante zur Gewinnung von Elektroenergie aus Niedertemperaturwärme identifiziert.

Laut Patentbeschreibung besteht die Aufgabe der Erfindung in einer effizienten Umwandlung von Niedertemperaturwärme in mechanische bzw. elektrische Energie. Insbesondere sollen die Kondensationswärme in Kraft-

werken, Abwärme und solar erzeugte Wärme als Energiequelle zu Bereitstellung mechanischer Energie genutzt werden können.

Das Verfahren zur Umwandlung von Niedertemperaturwärme in mechanische Energie arbeitet mit einem gasförmigen Arbeitsmittel – vorrangig verdichteter Außenluft. Dazu wird von einer Wärmequelle Wärme mittels Wärmeübertrager auf das verdichtete Gas, insbesondere Luft, übertragen. Dabei dehnt sich das Gas aus, was zu einer Volumenvergrößerung und/oder Druckerhöhung des Gases führt. Nachfolgend wird das erwärmte Gas in einer Kraftmaschine entspannt und dabei mechanische Arbeit zur Erzeugung elektrischer Energie verrichtet.

Auf dem Markt bisher vorhandene Lösungen mit ihren Vor- und Nachteilen sind in Tabelle 1 dargestellt.

Vorhandene Lösungen	Vorteile	Nachteile
Entspannung von Wasser- dampf in Turbinen (Siemens)	erprobte und robuste Technologie ins- besondere für große Leistungen	hohe Eingangstemperaturen erforderlich, kostenintensive Technik
Thermisch angepasste Kreis- prozesse (ORC)	bei vergleichsweise niedrigen System- drücken an verschiedene Temperatur- niveaus anpassbar	systembedingt vergleichsweise niedriger Wirkungsgrad bei relativ hohen Investi- tionskosten
Stirlingmaschinen	übersichtliches Aggregatekonzept durch äußere Wärmezu- und abführung	technologische Probleme beim konkreten Aufbau und Betrieb, derzeit Beschrän- kung auf Leistungen unter 100 kW

Tab. 1: Vergleich vorhandener Technologien

Eigene Darstellung

Von den bereits existierenden Verfahren der Restwärmenutzung zur Stromerzeugung (Entspannung von Wasserdampf in Turbinen der Firma Siemens, thermisch angepasste Kreisprozesse ORC, Stirlingmaschinen) ist auf Grund der geforderten hohen Eingangstemperaturen der Wärmeträger und der Beschränkungen der Leistungen nur der ORC-Prozess ein echter Wettbewerber der neuen Lösung. Gegenüber dem ORC-Prozess hat die neue Lösung folgende Vorteile:

- Niedrige relative Investitionskosten (neue Lösung 3.000 € pro KW erzeugter elektrischer Leistung, ORC 4.900 € pro KW erzeugter elektrischer Leistung);
- Nutzung der Luft als Arbeitsmedium führt zu höherem Wirkungsgrad (ORC ca. 10%, neue Lösung ca. 14%); Gründe für den hohen Wirkungsgrad der neuen Lösung sind offener Kreislauf ohne Kühlung des Arbeits-

mediums, keine Änderung des Aggregatzustandes des Arbeitsmediums im Arbeitsbereich;

 die Anlage zur Restwärmenutzung verfügt über zwei intelligente Schnittstellen, die eine operative Anpassung an die sich ändernden Bedingungen beim Produzenten der Restwärme und beim Elektroenergiesystem durchführen.

Technische Basis der oben genannten zwei Schnittstellen ist ein neuartiges dreistufiges Prozessführungssystem. Durch dieses System erfolgt eine operative Änderung der Sollwerte in Abhängigkeit von den Störgrößen und von den geänderten Zielfunktionen. Bei einer geschätzten Zeitkonstante der Steuerkanäle von ca. 50 Minuten und der Störkanäle von ca. 60 Minuten ist durch eine operative Prozessoptimierung eine Erhöhung der Stromausbeute um ca. 30% zu erwarten. Das neue System der Restwärmenutzung wird also in einem dynamischen Regime betrieben, während die auf dem Markt vorhandenen Systeme in einem stationären Regime betrieben werden.

## 4.2 Konzept der Umwandlung der Restwärme in elektrische Energie

Auch in diesem Fall wurde ein Konsortium aus Industrieunternehmen und wissenschaftlichen Einrichtungen gebildet, das ein Konzept entwickelt hat zur Umwandlung der Restwärme in elektrische Energie auf der Basis des oben genannten Patentes (vgl. ILK et al. 2016). In einem Heizkraftwerk soll dieses Konzept prototypisch umgesetzt werden. Weitere Anwendungen zur Nutzung der Abwärme bzw. Restwärme in Destillationskolonnen, in BHKW, Biogasanlagen u.a. sind denkbar.

Erhebliche Mengen an Niedertemperatur-Abwärme fallen in konventionellen Heizkraftwerken an. Dort wird durch die Verbrennung von Rohbraunkohle Elektroenergie und Wärmeenergie erzeugt. Mit der Wärme kann ein großer Teil einer Stadt mit Heizwärme und Warmwasser versorgt werden.

In einem abgeschlossenen System der Energieumwandlung wird zunächst im konventionellen Dampfturbinenprozess Dampf erzeugt, um eine Turbine für die Elektroenergie-Erzeugung anzutreiben. Nachdem der Dampf die Turbine verlassen hat, ist dieser entspannt und muss kondensiert werden. Dazu wird der Dampf durch einen Wärmetauscher geleitet, der das Wasser der Heiztrasse für die Wärmeversorgung aufheizt. Dem Dampf wird die Energie entzogen, er kondensiert und kann wieder erhitzt werden, um ihn erneut als Dampf der Turbine zuzuführen. Damit gestaltet sich die Erzeugung von Elektroenergie abhängig von der Möglichkeit, den entspannten Dampf kondensieren zu lassen, mit anderen Worten: eine energieeffiziente

Produktion von Elektroenergie ist nur möglich, wenn ausreichend Heizwärme abgenommen wird.

Um diesem Zustand abzuhelfen und die Elektroenergieerzeugung kontinuierlich und unabhängig von den Jahreszeiten gestalten zu können, soll eine Anlage entwickelt werden, die als Regelungs- bzw. Ausgleichselement in diesem Prozess fungiert und dabei idealerweise noch weitere Elektroenergie erzeugen kann. Mit der zu entwickelnden Anlage könnten sowohl die Dampferzeugung als auch die Erzeugung von Elektroenergie erheblich verstetigt werden. Wird im Wärmetauscher eine zu geringe Temperaturdifferenz zwischen abgegebenem und rückgeführtem Dampf erreicht, wird ein Teil des Dampfes umgeleitet und durch das zu schaffende Regelungselement dem Dampf Wärme entzogen. Die Abbildung 4 ist eine konkrete Untersetzung dieser Lösungsprinzips unter Nutzung von Rotationskolbenmaschinen.

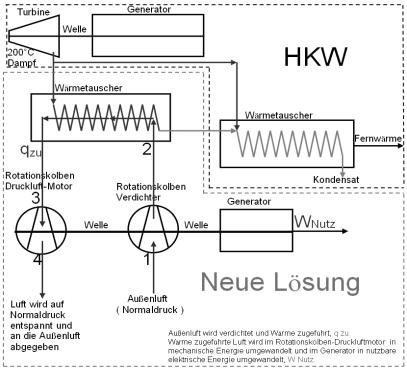


Abb. 4: Lösungsprinzip am Beispiel eines Heizkraftwerkes (HKW)

Ouelle: nach ILK et al. 2016

Der Motor und der Verdichter sind mit einer starren Welle verbunden. Es ist die Frage zu beantworten, wie hoch der zu erwartende Wirkungsgrad bzw. die Machbarkeit der Anlage zur Restwärmenutzung ist. Zu diesem Zweck wurde der zugrunde liegende Kreislaufprozess thermodynamisch analysiert. Den entsprechenden Prozessverlauf (Übergänge zwischen vier thermodynamischen Zuständen) zeigt Abbildung 5.

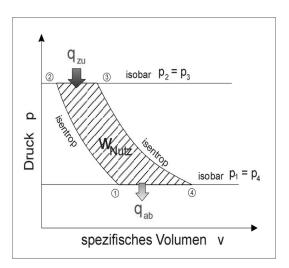


Abb. 5: Prozess der Gewinnung technischer Arbeit

Quelle: nach ILK et al. 2016

Um die im Prozess der Restwärmenutzung gewonnene Arbeit zu ermitteln, betrachten wir die Übergänge zwischen den in Abbildung 5 dargestellten Zuständen. Für die thermischen und energetischen Abschätzungen wurden folgende Prozessberechnungen durchgeführt, die im Einzelnen aus Platzgründen aber nicht dargestellt werden sollen:

*Isentrope Kompression*  $\mathbb{O} \to \mathbb{O}$ 

Die Verdichtungsendtemperatur  $T_2$  nach der isentropen Kompression berechnet sich aus der Eintrittstemperatur  $T_I$ .

*Isobare Erwärmung*  $@ \rightarrow @$ 

Die isobare Erwärmung der komprimierten Luft erfolgt in einem Wärmetauscher, der einen Teil der Abwärme q<sub>zu</sub> an die komprimierte Luft überträgt.

# *Isentrope Expansion* $\mathfrak{I} \to \mathfrak{A}$

Die Endtemperatur nach der isentropen Expansion  $T_4$  berechnet sich analog wie bei der isentropen Kompression aus der Anfangstemperatur der Expansion  $T_2$ . Aus der Differenz der Anfangs- und der Endtemperatur, der isochoren spezifischen Wärmekapazität und dem Expander-Wirkungsgrad berechnet sich die spezifische Abtriebsarbeit des Expanders  $q_{ab}$ .

Eine erste Systemanalyse des zu schaffenden Gesamtsystems hat gezeigt, dass die Prozessführung bzw. Steuerung der neuen Anlage zur Restwärmenutzung nach verschiedenen Zielfunktionen in Abhängigkeit von den sich dynamisch ändernden energetischen und wirtschaftlichen Anforderungen an das Heizkraftwerk zu erfolgen hat:

- Erzeugte Elektroenergiemenge/Zeiteinheit;
- zugeführte Dampfmenge/Zeiteinheit;
- kombinierte Zielfunktion (gewichtete Zielfunktionen): erzeugte Elektroenergiemenge/Zeiteinheit und zugeführte Dampfmenge/Zeiteinheit.

Dabei sind folgende technologische Größen bzw. Parameter automatisiert zu erfassen, zu verarbeiten und zu optimieren:

## Steuergrößen:

- Durchsatz der Luftmenge/Zeiteinheit am Eingang in den Wärmetauscher.
- zugeführte Dampfmenge/Zeiteinheit (kann auch Zielfunktion sein).

# Regelgrößen:

- Temperaturfeld des Wärmetauschers (neues Prinzip: Regelung nach dem Temperaturfeld);
- Drehgeschwindigkeit der Welle.

# Störgrößen:

- Variation der Sollwerte für die zu erzeugende Fernwärmemenge/Zeiteinheit;
- Variationen der Außenlufttemperatur;
- Variationen der Zielfunktion;
- Variationen der Nebenbedingungen.
- Nebenbedingungen bzw. einzuhaltende Vorgaben:
  - Erzeugte Fernwärmemenge/Zeiteinheit unter Beachtung der kritischen Unterbrechungszeiten;
  - vollständige Kondensierung des Dampfes am Ausgang aus dem Wärmetauscher des HKW;

 Begrenzung der Änderungsgeschwindigkeiten der zugeführten Dampfmenge nach der Zeit und der produzierten Elektroenergiemenge nach der Zeit.

Aus der Beschreibung der Prozessführungsaufgabe geht hervor, dass zwei intelligente Schnittstellen zu entwickeln sind:

- Schnittstelle zwischen Restwärmeproduzent (Heizkraftwerk) und der neuen Lösung mit dem Ziel der Bestimmung und Einstellung der zugeführten Wärmemenge/Zeiteinheit;
- Schnittstelle zwischen dem Generator der neuen Lösung und dem Elektroenergiesystem, das die erzeugte Elektroenergie aufnimmt.

Diese Prozessführungsaufgabe wird mit einem Steuerungssystem mit drei Hierarchieebenen gelöst (siehe Tab. 2). Die Struktur dieses Steuerungssystem ist ähnlich der Struktur des VAN-basierte Systems in Abbildung 3.

Ebene		Informationsverarbeitungs-Algorithmus	Bemerkungen	
1.	Stabilisierung der Steuergrößen	eindimensionale Festwertregelkreise mit linearen Reglern	Einsatz von Standardkompo- nenten möglich	
2.	Bestimmung der Sollwerte für die Regelgrößen	neuartige Steuerung des Wärmetauschers nach dem Temperaturfeld, mehrdimensionale nichtlineare Re- gelungssysteme, Beachtung der Nebenbedingungen bei der Optimierung der Sollwerte	keine Standardsysteme vor- handen, mathematische Mo- dellierung der Dynamik des Wärmetauschers notwendig	
3.	Auswahl der Zielfunk- tion und der Neben- bedingungen	Nutzung von Elementen der künstlichen Intelligenz, Modellierung des Gesamtsystems Heizkraftwerk – Neues System	keine Standardlösungen vorhanden	

Tab. 2: Beschreibung der Prozessführungsaufgaben

Eigene Darstellung

Ohne dieses Steuerungssystem kann die neue Lösung nicht betrieben und nicht auf dem Markt angeboten werden, da die Stabilität des Gesamtsystems und die geforderten Parameter nicht eingehalten werden können. Das ist vor allem auf Folgendes zurückzuführen:

- Die Zielfunktionen und die Nebenbedingungen sind nicht stationär, sondern stark zeitabhängig. Eine Nachführung muss zeitoptimal und mit hoher Genauigkeit erfolgen.
- Die Prozessgrößen "Durch den Verdichter transportierte Luftmenge pro Zeiteinheit" und "Drehzahl der Welle" besitzen eine positive Rückkopplung, was zu Instabilitäten führen kann.

Die beiden Wärmetauscher (Neue Lösung und HKW) sind technologisch in Reihe geschaltet. Das führt zu bedeutenden Totzeiten und Zeitkonstanten der Übertragungskanäle "Eingang in den neuen Wärmetauscher – Ausgang aus dem HKW-Wärmetauscher". Um der Steuerung vorausschauenden Charakter zu verleihen, wird als Regelgröße nicht, wie allgemein üblich, die Temperatur am Ausgang des Wärmetauschers, sondern das Temperaturfeld über die Länge des Wärmetauschers benutzt. Nach dem gleichen Prinzip wird der Sollwert für diese Regelgröße berechnet.

## 4 Zusammenfassende Bemerkungen

Die dargestellten Beispiele neuer technologischer Lösungen zur Erhöhung der Energie- und Ressourceneffizienz zeigen die enge Beziehung zwischen Nachhaltigkeit und Automatisierung. Wenn eine technologische Lösung nachhaltig sein soll, muss sie optimal, stabil und sicher sein. Man könnte den Begriff "Nachhaltigkeit" auch durch den Begriff "Kontinuierliche Optimalität" ersetzen, wie das bereits im russischen Sprachraum erfolgt ist. Automatisierungs- und Steuerungssysteme sichern die Optimalität und Stabilität der technologischen Lösung. In der Verfahrens- und Fertigungstechnik haben wir seit langem schon die Tendenz zu verzeichnen, dass der optimale Betriebspunkt in der Nähe der Stabilitätsgrenze liegt. Das stellt verständlicherweise erhöhte Anforderungen an die Automatisierung, wie wir besonders im zweiten Beispiel gesehen haben.

Energieeffiziente Lösungen besitzen oft innere positive stoffliche und energetische Rückführungen. Das führt zur strukturellen Instabilität des Gesamtsystems, was im dritten Beispiel deutlich wurde. In diesen Fällen ist eine informationelle Rückführung durch ein Automatisierungssystem eine unbedingte Voraussetzung für ein sicheres Betreiben des Gesamtsystems.

Nachhaltige automatisierte technologische Lösungen erfordern in der Regel eine mathematische Modellierung des technologischen Systems bzw. des Steuerungsobjektes. Das mathematische Modell geht als Nebenbedingung in die Optimierungsaufgabe ein. Gleichzeitig wird das Modell für die Simulation des technologischen Systems benutzt. Das erste Beispiel macht diese Herangehensweise deutlich.

#### Literatur

Alphakat, Vesper, Aumos, TUD (2015): Automatisierte Anlage zur katalytischen drucklosen Verölung. Unveröffentlichte Projektbeschreibung

- Balzer, D. (2016): Die gegenwärtige und zukünftige Rolle der Automatisierungs- und Kommunikationstechnik in der Sicherheitswirtschaft. In: Oleksiewicz, I.; Stępień, K. (red.): Zagrożenia i wyzwania bezpieczeństwa współczesnego świata. Wymiar ekonomiczno-społeczny [Bedrohungen und Herausforderungen der Sicherheit in der modernen Welt. Die ökonomische und soziale Dimension]. Warszawa, S. 229–243
- Balzer, D.; Thierse, P. (2014): Überwachung und Steuerung technologischer Prozesse und Systeme. In: Banse, G.; Reher, E.-O. (Hg.): Beiträge zur Allgemeinen Technologie. Berlin, S. 205–262 (Abhandlungen der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 36)
- EnergieAutark, ILK, Vesper, Zesys (2016): Wissensbasiertes Energiemanagement für autonome Wohn- und Gewerbeparks. Unveröffentlichte Projektbeschreibung
- ILK, Kunz, GAD (2016): Restwärmenutzung unter Verwendung einer Rotationskolbenmaschine. Unveröffentlichte Projektbeschreibung
- VAN (2009): EU-R&D-Project "Virtual Automation Networks (VAN)". Deliverable D09.2-1

# Johannes Briesovsky

# Resonanzpulsationstechnik für ressourcenschonende Prozesse in der Verfahrenstechnik

Ich war Student im zweiten Studienjahr, als Otto und seine Ehefrau Sweta nach Leningrad kamen und Ernst-Otto die Aspirantur bei Professor Pjotr Grigorjewitsch Romankow begann und wir gute Freunde und Partner bis heute wurden. Ich wünsche uns, dass diese Freundschaft und Partnerschaft noch lange währt.

## 1 Einführung

Die Resonanzpulsationstechnik (RPT; vgl. Briesovsky 2015) bringt ein Fluidsystem in Eigenschwingungen. Es findet eine Reziprog-Bewegung statt, die mit starken Beschleunigungen und einer Homogenisierung des Prozessraumes verbunden ist.

Dabei werden wesentliche Prozessverbesserungen erreicht (siehe Tab. 1). Besonderer Schwerpunkt der Untersuchungen waren Flüssigphasenprozesse mit Feststoffen (Ionenaustauscherharz, Filtration, Extraktion und Wandablagerungen). Als Beispiel wird die Bierfiltration behandelt.

#### 2 Filtration von Bier

# 2.1 Anschwemmfiltration

Die Anschwemmfiltration von Bier mit Kieselgur stellt den Stand der Technik dar (vgl. Weber/Modrok 2004). Ca. 82 Prozent der Ausgaben für die Bierfiltration entfallen auf diese Methode. Die Nachteile der Kieselgur-Anschwemmfiltration liegen sowohl im gesundheitlichen Bereich (Cristoballit als möglicher Silicoseverursacher) als auch bei Problemen beim Handling und in der Entsorgung.

System	Prozess	Effekt	
Gas-Flüssigkeit	Belüftung von Wasser	Sauerstoffdurchgangserhöhung: 1.000%	
Gas-i iussigkeit	Denitrifizierung von Abwasser	Mikroorganismenaktivitätserhöhung: 25%	
Flüssigkeit-Flüssigkeit	Extraktion von Caprolactam	Energiereduzierung: 90%	
Trussignett-Frussignett	Gammalactonherstellung	Ausbeuteerhöhung: 40%	
	lonenaustausch bei der Prozesswasserbehandlung von Schwermetallen (Nickelionen)	Erhöhung der Beladungsfähigkeit: 70%	
	Filtration (Kaolinsuspension)	Ablagerungsvermeidung	
Flüssigkeit-Feststoff	Verminderung der Wandablagerungen bei der Aufheizung von Deponie-Sickerwasser	Keine Ablagerungen	
	Verminderung der Wandablagerungen bei der Aufheizung von Altöl	Keine Ablagerungen	
	Querstromfiltration von Bier	Energieeinsparung: 90%	
	Extraktion von Eibennadeln	Ausbeuteerhöhung: 50%	
Gas-Feststoff	Wirbelschicht	Homogene Wirbelschicht für Geldart C-Pulver (z.B. Titandioxid); Gasreduzierung: 90%	

Tab. 1: Prozesseffekte der Resonanzpulsationstechnik

Eigene Darstellung

## 2.2 Membranfiltration

Mit der Entwicklung der Membrantechnik (ursprünglich in der Dialyse) entstand das Querstromfiltrationsverfahren, das auch in der Getränkefiltration eingesetzt werden kann.

Die Querstromfiltration stellt zunehmend eine Alternative zur "dead end"-Betriebsweise dar (siehe Abb. 1).

Bei der Querstromfiltration ist eine wesentliche Aufgabe, die Deckschichtbildung auf der Unfiltratseite zu verhindern oder zu vermindern. Dies wird üblicherweise durch eine Erhöhung der Überströmgeschwindigkeit des Unfiltrates an der Membran bis 8 m/s erreicht. Dabei steigt die erforderliche Pumpenenergie stark an. So wird beschrieben (vgl. Thiel/Rip-

perger 2010), dass bei einer Überströmgeschwindigkeit des Feeds von 2 m/s die Energiekosten 3,8 Prozent der Gesamtkosten, bei 4 m/s 24 Prozent und bei 8 m/s 65,3 Prozent ausmachen Außerdem kann die Verstopfungsneigung der Kapillaren verstärkt und somit der Permeatfluss vermindert werden. Diese Nachteile beseitigt die Resonanzpulsation als druckgetriebenes Verfahren der Mikrofiltration problemlos.

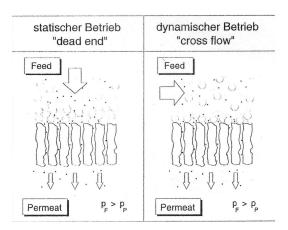


Abb. 1: Feed- und Permeat-Fluss bei der statischen und der dynamischen Filtration

Quelle: Rautenbach 1997, S. 200

# 3 Resonanzpulsationstechnik

## 3.1 Verfahren

Auf Grund der Erfahrungen mit pulsierenden Flüssigkeitssäulen bei der Foulingverminderung in Wärmeübertragern (Aufheizen von Deponiesickerwasser und Altöl) wurde die Bierfiltration mit der Resonanzpulsationstechnik (RPT) untersucht. Dabei wird die Fluidsäule zu Eigenschwingungen (Resonanz) im Infraschallfrequenz-Bereich erregt. Die Schwingungen führen zu einer Hin- und Herbewegung der Flüssigkeitsmasse an der Membranwand und damit zu einem ständigen Auf- und Abbau der Strömung (Einlaufströmung, Richardson-Effekt).

### 3.2 Bierfiltration mit RPT

Die Filtrationsversuche wurden in der Privatbrauerei Metzler in Dingsleben, Thüringen, durchgeführt, wobei mit Originalbier und mit Pulsationssystemen versehenen Filtrationsanlagen industrieller Größe gearbeitet wurde (vgl. Lauckner et al. 2015). Durch Einsatz der Pulsation konnte die Überströmgeschwindigkeit stark reduziert und eine wesentliche Durchsatzerhöhung des Filtrates über einen längeren Zeitraum als bei der dynamischen Filtration mit Umlaufpumpe erreicht werden.

Das Ziel dieser Vorgehensweise bestand darin, bei der Bierfiltration die Nachteile der Querstromfiltration, wie die Membranverblockung nach kurzen Betriebszeiten, den Energieeintrag für die Umwälzpumpen für hohe Anströmgeschwindigkeiten zu reduzieren und den apparatetechnischen Aufwand zu verringern. Die Anwendung der RPT führt zur Lösung dieser Probleme, indem die Überströmgeschwindigkeit des Unfiltrats über der Membran wesentlich reduziert wird und eine gegenphasige Doppelpulsation zwischen der Innen- und Außenwand der Membran das Ablagern von Feststoffen auf der Membran vermindert bzw. vermieden (vgl. DE 10 2012 209 820).

Durch die pulsierende Bewegung der Fluide im Infraschallbereich (unter 20 Hz) auf der Retentatseite und im Gegentakt auch auf der Filtratseite wird der Deckschichtaufbau verhindert bzw. vermindert. Gleichzeitig kann mit höheren Durchsätzen gearbeitet und die Betriebszeit bis zur Reinigung verlängert werden.

Die Abführung des Retentats erfolgt gegenüber dem praktizierten Verfahren kontinuierlich. Damit konnte das Verfahren der Cross-Flow-Filtration für die Bierfiltration modifiziert und die Wirtschaftlichkeit deutlich verbessert werden.

Die Untersuchungen wurden mit zwei Prototypen-Anlagen durchgeführt: einer Sechsmodulanlage mit 30 m<sup>2</sup> Filterfläche und einer Einmodulanlage (12 m<sup>2</sup> Filterfläche) (siehe Abb. 2).

Die Frequenz der Schwingung wurde zu < 3 Hz ermittelt. Es wurde eine Fluxrate von 108 l/m²h erreicht und lag damit über dem in der Literatur (vgl. Gans 1995) angegebenem Zielwert von 80 l/m²h. Es konnte ohne Umlaufpumpe gefahren werden, wodurch sich eine wesentliche Energieeinsparung ergibt.

Wichtig ist der Nachweis des Deckschichtabbaus bei Zuschaltung des Pulsators (siehe Abb. 3).

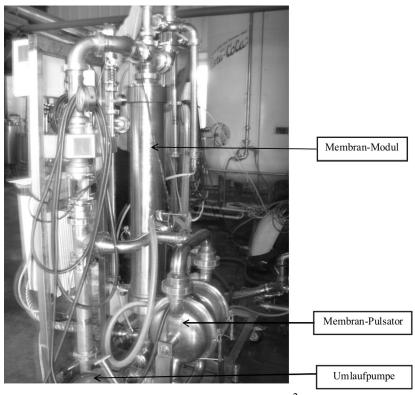
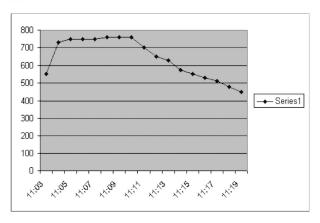


Abb. 2: Querstromfiltrationsanlage (Filterfläche 12 m²) mit Pulsator und Umlaufpumpe

Quelle: Archiv des Verfassers

## (a) Die Pulsabschaltung um 11:11 Uhr führt zu Fluxverringerung



(b) Die Pulszuschaltung um 11.25 zeigt die Fluxzunahme als Effekt der Deckschicht-Reduzierung bis zur Abschaltung um 11:40 Uhr

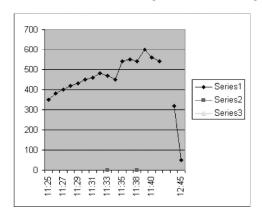


Abb. 3: Filtratstrom (l/h) eines Versuchstages von 11:03 Uhr bis 11:40 Uhr mit (a) Pulsabschaltung und (b) Pulszuschaltung

Quelle: Archiv des Verfassers

# 4 Zusammenfassung

Die Querstromfiltration mit Resonanzpulsation im Gegentaktbetrieb ist ein ressourcenschonender Prozess, d.h. er ist energieeinsparend, führt zu größeren Duchsätzen, zu einer wesentlichen Standzeiterhöhung des Filtermoduls

und damit ist der Durchsatz höher als bei der dynamischen Filtration mit Umlaufpumpe. Die Querstromfiltration von Bier kann als Dead-end-Filtration als druckgetrieben geführt werden, d.h. es findet ein reduzierter Umlauf des Unfiltrats statt. Das wirkt sich auch auf den Leistungsbedarf der Umlaufpumpen aus.

#### Literatur

- Briesovsky, J. (2015): Technologische Prozessintensivierung durch resonante Pulsationen. In: Banse, G.; Reher, E.-O. (Hg.): Technologiewandel in der Wissensgesellschaft qualitative und quantitative Veränderungen –. Berlin, S. 169–175 (Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin, Bd. 122)
- DE 10 2012 209 820 A1: Offenlegungsschrift "Verfahren zur Filtration einer Flüssigkeit sowie Filtrationsvorrichtung". Anmelder: Privatbrauerei Metzler GmbH & Co. KG; Erfinder: Briesovsky, J.; Lauckner, G.; Metzler, U.; Metzler, Ch. Offenlegungstag: 12.12.2013
- Gans, U. (1995): Die wirtschaftliche Crossflow-Mikrofiltration von Bier. Düsseldorf (zugleich: Dissertation TU München)
- Hahn, A. (2008): Die kieselgurfreie Bierfiltration auf dem Prüfstand. In: Brauindustrie, H. 11, S. 34
- Lauckner, G.; Briesovsky, J.; Metzler, U. (2015): Schwingungen ohne Bedenken. In: Brauindustrie, H. 4, S. 40–43
- Rautenbach, R. (1997): Membranverfahren. Berlin u.a.O.
- Thiel, A.; Ripperger, S. (2010): Verfahren und Verfahrenskombination zur Klärung und Entkeimung biotechnologisch hergestellter Produkte und ihre Wirtschaftlichkeit dargestellt am Beispiel der Bierklärung. In: F&S – Filtrieren und Separieren, Jg. 24, Nr. 5, S. 238–242
- Weber, D.; Modrok, A. (2004): Crossflow-Filtration von Bier. URL: www.prozesstechnik-on line.de/food/-/article/5829531/25681335

# Kerstin Becker, Ernst-Peter Jeremias

# Nachhaltigkeitsaspekte einer zukunftssicheren Energieversorgung von Städten und Gemeinden

# 1 Nachhaltigkeit bei der kommunalen Energieversorgung – Eine globale Herausforderung

Das Ingenieurunternehmen tetra ingenieure – www.tetra-ingenieure.de –, u.a. kooperatives Mitglied im VBIW, ist seit 1994 auf dem Gebiet der ingenieurtechnischen Planung und Beratung für die Energie- und Gebäudetechnik tätig. Die Leistungen werden anbieter- und produktneutral erbracht. Betrachtungen zu einer nachhaltigen, zukunftssicheren Energieversorgung von Städten und Gemeinden haben sich in den letzten Jahren für das Unternehmen zu einem sehr marktrelevanten und nachgefragten Thema entwickelt. In der immer komplexeren Welt auch der Energieversorgung suchen Städte und Gemeinden nach Strategien, wie sie die Energieversorgung in ihrem Einflussbereich langfristig sichern können.

Das sogenannte Zieldreieck der öffentlichen Energieversorgung setzt sich aus der Versorgungssicherheit, der Preiswürdigkeit und dem Umweltschutz zusammen (siehe Abb. 1). Heute bezieht man auch den Aspekt der Akzeptanz mit in die Betrachtung ein. Diese Aspekte beschreiben den allgemeinen Anspruch an die Versorgung mit Energie. Jeder Haushalt oder Betrieb möchte zu jedem Zeitpunkt bedarfsgerecht mit Energie versorgt werden. Dabei soll der Preis für die Bereitstellung mit Energie marktgerecht, möglichst niedrig sein. Dass Energie umweltschonend erzeugt und verteilt wird, wird vorausgesetzt und soll aus Kundensicht möglichst ohne deutliche Zusatzkosten erfolgen. Dass sich die Wünsche und Anforderungen durchaus diametral entwickeln, ist eine wesentliche Erkenntnis der letzten Jahre. Berechtigt sind Vermögensenergien Kohle und Kernenergie auf Grund ihrer klimaschädlichen und sicherheitspolitischen Wirkungen in die Kritik geraten. Inzwischen hat sich fehlende Akzeptanz der Bevölkerung auch auf die Einkommensenergien Wind, Sonne und Biomasse ausgeweitet. Die Diskussionen dazu sind in Deutschland derzeit intensiv und kontrovers. Sie konzentrieren sich dabei auf die kommunale Ebene und insbesondere dort, wo

die jeweiligen Belastungen "vor der Haustür" anzutreffen sind. Aus unserer Sicht gibt es aber noch eine andere Betrachtungsweise, nämlich die globale Betrachtungsebene. Es ist aus der Sicht der Verfasser notwendig, zukünftig den Betrachtungsrahmen weiter zu ziehen. Die Ursachen für die aktuellen Probleme der Migrationsbewegung in die EU sind ein beachtenswertes Indiz für diese Auffassung.

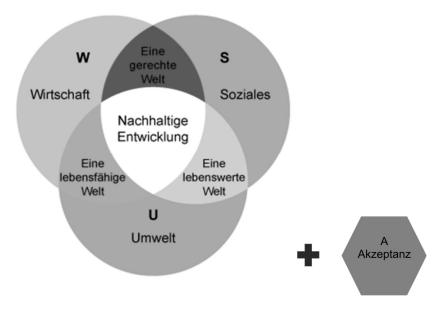


Abb. 1: Energetisches Zieldreieck

Quelle: modifiziert nach http://www.solidarisch-einkaufen.de/index.php?content=Nachhaltig keit [2016]

Für eine Beurteilung der Nachhaltigkeit der Energieversorgung sind neben den technischen und wirtschaftlichen Aspekten vor allem die sozialen und gesellschaftlichen Wirkungen zu berücksichtigen. Wesentliche Ursachen für die heutigen Migrationsprozesse sind durch Arbeits- und Lebensbedingungen in den Entwicklungsländern bedingt. Auch die inzwischen spürbaren Auswirkungen des Klimawandels führen zu Beeinträchtigungen der Lebensbedingungen in den Entwicklungsländern und tragen zu einer Verschärfung der Situation bei.

Die reichen Industrie-Nationen sichern sich Energie- und Rohstoffquellen auch durch militärische Einflussnahme. Die Auswirkungen zeigen sich in der Fluchtbewegung.

In vielen Ländern haben die Versuche einer Einflussnahme auf die politischen Systeme zu negativen Auswirkungen geführt, der Demokratieexport ist häufig gescheitert und die Einflussnahme von außen konnte nationale Situationen nicht stabilisieren. Nicht zuletzt sind die negativen Auswirkungen der vorherrschenden Weltwirtschaftsordnung auf die sozialen und wirtschaftlichen Bedingungen in den Entwicklungsländern zu nennen. In Verbindung mit der globalen Verbreitung und Glorifizierung des heute vorherrschenden westlichen Weltbildes durch moderne Kommunikationstechnologien führen die vorgenannten Ursachen zu einem wachsenden Migrationswillen nach Europa. Ohne eine Änderung des politischen und wirtschaftlichen Handlungsansatzes in den wirtschaftlich starken und stabilen Staaten dieser Welt wird die heute zu beobachtende weltweite Völkerwanderung von derzeit ca. 12 Mio. Menschen nicht einzudämmen sein und sich weiter verschärfen.

Ein nachhaltiger Lösungsansatz der Energieversorgung ist, dass die ausbeuterische Nutzung von Vermögensenergie-Trägern umgehend zurückgedrängt wird. Vermögensenergieträger sollten vorrangig einer stofflichen Nutzung vorbehalten sein. Die heimischen Einkommensenergien müssen unter Nutzung der bestehenden Infrastrukturen und der vorhandenen Potenziale in Wissenschaft und Technik verstärkt genutzt werden.

Um diese Entwicklung zu ermöglichen, ist es förderlich, die heute üblichen, sehr eng gezogenen energetischen und wirtschaftlichen Bilanzkreise zu Gunsten volkswirtschaftlicher Betrachtungsweisen aufzulösen und die politischen Rahmenbedingungen dazu entsprechend zu gestalten. Dabei ist es unumgänglich, dass zukünftig Kosten für eine gerechte Weltordnung, bislang externalisierte Kosten der Vermögensenergien in die Betrachtungen einfließen:

Global denken – lokal handeln gilt heute mehr denn je.

# 2 Anmerkungen zur deutschen Energie- und Klimapolitik

Die bisherigen Aktivitäten der deutschen Politik, die Nutzung der Einkommensenergien in Deutschland voranzutreiben, sind aus der Sicht der Autoren nicht grundsätzlich zielführend in Bezug auf den oben beschriebenen notwendigen Politikansatz.

In den letzten fünfzehn Jahren ist in Deutschland eine Energie- und Umweltgesetzgebung geschaffen worden, die vorrangig auf die Interessen, Wünsche und Forderungen der deutschen Großindustrie und der Energiekonzerne ausgerichtet ist. Die internationale und europäische Harmonisierung der gemeinsamen, energiepolitischen Maßnahmen ist unzureichend. Die "Energiewende" wird hauptsächlich durch die Endkunden, also die deutsche Bevölkerung und das Gewerbe finanziert, die sowohl die direkte Förderung der "Erneuerbaren" Energien über die EEG-Umlage auf den Strompreis als auch die Subventionierung der fossilen Energieträger über Steuergelder tragen. Die gesetzlichen Strukturen im Bereich der Energiewirtschaft sind zunehmend komplexer geworden. Sie wirken nicht marktorientiert und sind hinsichtlich ihrer langfristigen Folgen und Wirkungen häufig nicht durchdacht.

In der Folge der sich mit steigender Geschwindigkeit ändernden gesetzlichen Vorgaben gibt es für Investoren im Hinblick auf die langfristig wirkenden Investitionen im Energiesektor keine Verlässlichkeit mehr. Kommunales Eigenengagement bei der Energieversorgung wird politisch nicht wirklich gefördert. Kurzfristige politische Entscheidungsprozesse mit gegenläufigen Wirkungen führen zum Verlust der erreichten technologischen Marktführerschaft und zur Vergeudung von Steuergeldern. Die Politikansätze für die Bereiche Strom, Wärme und Mobilität sind nicht ganzheitlich und behindern sich daher mitunter gegenseitig.

In dieser Situation besteht eine Chance zur Sicherung der Nachhaltigkeit der Energieversorgung durch Wahrnehmung kommunaler Verantwortung für die Energieversorgung der Städte und Gemeinden. Zahlreiche kommunale Körperschaften haben eigene Unternehmen in Form von Stadtwerken oder Eigenbetrieben gegründet, die zentrale Aufgaben der kommunalen Daseinsvorsorge wahrnehmen.

Dazu gehört neben den allgemein anerkannten Handlungsfeldern der Wasserver- und Abwasserentsorgung in zunehmendem Maße auch die Energieversorgung, also die Versorgung der Bevölkerung mit Elektro- und Wärmeenergie. Unser tägliches Leben ist ohne sichere, preiswerte und umweltfreundliche Energieversorgung nicht mehr vorstellbar. Somit gehört nach unserer Auffassung die Energieversorgung untrennbar zur kommunalen Daseinsvorsorge. In welcher Art und Weise die kommunale Einflussnahme gestaltet wird, unterliegt vielfältigen Rahmenbedingungen und Möglichkeiten und ist nicht Thema unseres Vortrages.

Zu bemerken ist jedoch, dass die Energieversorgung in der allgemeinen Diskussion häufig auf den Stromsektor reduziert wird. Mobilität und Wärme sind aber ebenso wichtige Handlungsfelder. Sie sind nach eigenen Untersuchungen gerade in ländlichen Gegenden zu gleichen Anteilen wie die Stromversorgung im Gesamtenergiebedarf der Region enthalten.

### 3 Die Wärmeversorgung im kommunalen Handlungsfeld

In der täglichen Arbeit von *tetra ingenieure* spielt die Wärmeversorgung eine ganz wesentliche Rolle. Sie unterliegt weit mehr als die Stromversorgung lokalen Besonderheiten, die sich im Gebäudebestand, den Eigentümerstrukturen und den kommunalen Rahmenbedingungen widerspiegeln.

Viele Kommunen, auch Kleinstädte, verfügen heute über kleinere und größere Nah- und Fernwärmenetze, die von völlig unterschiedlichen Unternehmen betrieben werden. Nah- und Fernwärmenetze, insbesondere in kleinen und mittleren Kommunen, sind aber oft nicht unumstritten. Es treten jahresbezogene Wärmeverluste auf, die abhängig von der Größe des Wärmenetzes und der Fahrweise zwischen fünf und fünfundzwanzig Prozent betragen können. Dieser Fakt unterscheidet die Wärmenetze von den direkten Objektversorgungen mittels Einzelfeuerstätten. Das Auftreten von Wärmeverlusten ist physikalisch unvermeidlich und führt bisher in der Regel zu einem erhöhten Einsatz von Vermögensenergie. Monetär sind diese Wärmeverluste dann mit dem Energiepreis zu bewerten und vom Wärmekunden zu tragen. Das kann im engeren Bilanzkreis ein entscheidender wirtschaftlicher Nachteil der zentralen Wärmeversorgung sein, der Akzeptanzprobleme beim Wärmekunden aufwirft. Weitere Kritikpunkte bestehen häufig in der üblichen langfristigen Vertragsbindung der Kunden über zehn Jahre, die aber für die Absicherung der Investitionskosten nötig ist. Durch die Errichtung eines Wärmenetzes hat der Betreiber heute in der Regel eine natürliche Monopolstellung inne, die in der zunehmend wettbewerblich orientierten Energiewirtschaft kritisch gesehen wird.

Diese Punkte liefern den Stoff für mitunter heftig geführte Diskussionen, die häufig in der Forderung münden, Wärmenetze zugunsten gebäudezentraler Erzeugeranlagen aufzulösen. Eine solche Entwicklung stellt aber die Aspekte der Zukunftssicherung und Nachhaltigkeit in Frage. Die effiziente Nutzung von Kraft-Wärme-Kopplung, von betrieblicher Abwärme, sogar von Stromüberschüssen aus Einkommensenergien (Power-To-Heat, P2H; vgl. auch Jeremias et al. 2014) und die Umverteilung lokaler solarthermischer Potenziale sind an das Vorhandensein von geeigneten Wärmenetzen gebunden. Die Chancen zur Nutzung dieser Energien werden dauerhaft vergeben, falls heute bestehende Wärmenetze zurückgebaut werden.

Wir empfehlen deshalb, vorhandene Wärmenetze einer kritischen Prüfung zu unterziehen. Der Fokus sollte dabei jedoch auf dem Erhalt und der Optimierung der Betriebsbedingungen dieser Wärmenetze liegen. *tetra ingenieure* hat dazu eigene technisch-technologische und wirtschaftliche Un-

tersuchungen vorrangig im Rahmen KfW-geförderter Quartierskonzepte durchgeführt. Das Unternehmen hat in den letzten fünf Jahren kommunale Energieversorgungsstrategien u.a. in folgenden Kommunen entwickelt: in den Städten Prenzlau (vgl. B.B.S.M. et al. 2013b), Wittstock (vgl. B.B.S.M. et al. 2013a), Gransee (vgl. B.B.S.M./tetra 2013), Neuruppin (vgl. Becker et al. 2015a, 2015b, 2016) und Güstrow (vgl. Föniger/Jeremias 2014).

Ein Schwerpunkt dieser Untersuchungen ist die Entwicklung von technisch-technologischen Möglichkeiten zur Senkung der energetischen Wärmenetzverluste. Eine Möglichkeit ist zum Beispiel, die Wärmenetztemperaturen weitmöglichst abzusenken. Neben der Verringerung der physikalischen Netzverluste ist die Senkung der monetären Netzverluste ein wichtiger Optimierungsschritt. Die monetären Netzverluste lassen sich verringern, indem zur Deckung der verbleibenden Wärmeverluste von preisintensiven Vermögensenergien auf arbeitspreisneutrale Einkommensenergien umgestellt wird. Außerdem sind die Entwicklung und der Einsatz "Energierückspeisender Hausanschlussstationen" und die Konzipierung und Simulation dynamischer Wärmenetze mit Strömungsumkehrung sowie die saisonale Wärmespeicherung als aktuelle Untersuchungsschwerpunkte zu nennen.

Alle diese konzeptionellen Ansätze und Maßnahmen müssen sich in unserer Gesellschaft jedoch regelmäßig dem Gebot der Wirtschaftlichkeit unterwerfen, insbesondere dann, wenn die Akteure Kommunen, wirtschaftlich orientierte Unternehmen oder/und Monopolinhaber sind. Die zentrale Wärmeversorgung muss sich am allgemeinen Wärmemarkt messen lassen können. Hier kommt in der Auseinandersetzung häufig erschwerend hinzu, dass der Wärmepreis für die Fernwärme dem Preis für einen Primärenergieträger wie Erdgas oder Heizöl gleichgesetzt wird. Die Betrachtungsweise ist aber fachlich falsch.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für Wärmeversorgungssysteme vergleichen in der Regel die Kosten für verschiedene Versorgungsalternativen. Das Ergebnis ist ganz wesentlich abhängig vom gewählten Bilanzkreis. Betrachtet der Investor nur seinen unmittelbaren Bilanzkreis, spielen folgende Faktoren eine ausschlaggebende Rolle für die Wirtschaftlichkeit der Fernwärme:

- Wärmedichte im Versorgungsgebiet,
- Investitionskosten,
- Brennstoffkosten und
- die rechtlichen Rahmenbedingungen. Dazu gehören die energiewirtschaftlichen Regelungen, die Energiesteuern und Umlagen, die Förderungen und das EEWärmeG.

Zieht man den Bilanzkreis für die Wirtschaftlichkeitsberechnung jedoch weiter, z.B. um die betrachtete Kommune, sind auch die Auswirkungen auf den Klima- und Umweltschutz, die lokalen Wirtschaftskreisläufe und z.B. den kommunalen Haushalt zu beachten. Diese Auswirkungen werden im Allgemeinen nicht berücksichtigt, sofern sie nicht genehmigungsrechtlich oder preislich (Energiesteuern) in die Kalkulation einfließen (müssen).

Für Wohngebäude bis 100 kW im Bestand (hier konkret für ein Einfamilienhaus) wurden diese Wirtschaftlichkeitsberechnungen beispielhaft für verschiedene, heute typische Heizungsvarianten nach VDI 2067 ("Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen") durchgeführt. Die Wärmeerzeugungskosten der unterschiedlichen Erzeugungsarten werden dabei mit den örtlich üblichen Fernwärmekosten verglichen. Es handelt sich in dieser Betrachtung um Momentaufnahmen mit aktuellen Preisstellungen. Preissteigerungen werden hier nicht berücksichtigt. Die Varianten wurden wie folgt ausgewählt:

- Variante 1: Die Fernwärme wird auf Basis fossiler Brennstoffe und teilweise in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt.
- Variante 2: Die Fernwärme wird auf Basis von Biomasse und teilweise in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt, ergänzt durch geringen Einsatz fossiler Brennstoffe in der Spitzenlast.
- Variante 3: Die Fernwärme wird zum überwiegenden Anteil auf der Basis von Biomasse in Kraft-Wärme-Kopplung erzeugt, ergänzt durch die Verwendung fossiler Brennstoffe in der Spitzenlast.

Die Fernwärme ist in den ersten beiden Fällen gegenüber allen anderen Heizungsarten mindestens konkurrenzfähig. In Variante 3 gilt das für den Fall, dass die Anforderungen des EEWärmeG zur Nutzung erneuerbarer Energien berücksichtigt werden müssen. Diese Anforderungen sind in Deutschland nur für neue Gebäude verbindlich.

Erweitert man nun den Bilanzkreis dieser theoretischen Betrachtung um die externen Kosten für fossile Brennstoffe (vgl. BFE 1994; Breitschopf 2010; Wronski et al. 2015), so zeigt sich, dass die Fernwärme in allen Fällen wettbewerbsfähig ist. Wärmenetze, die ausschließlich mit Vermögensenergien (Heizöl, Erdgas) betrieben werden, haben, auch bei Einsatz von Kraft-Wärme-Kopplung, bei diesem Bilanzkreisansatz keinen nennenswerten Vorteil gegenüber den dezentralen Lösungen. Das Optimum liegt hier bei einem Primärenergiefaktor zwischen 0,1 und 0,2. Der überwiegende Einsatz von Biomasse mit einer anteiligen Nutzung in Kraft-Wärme-Kopplung führt wirtschaftlich zu den besten Ergebnissen (Variante 2) beim End-

kunden. Hier ist die zentrale Wärmeversorgung aus Einkommensenergien allen dezentralen Lösungen deutlich überlegen.

#### 4 Fazit

Es sind also die politisch-wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zu schaffen, die die heute üblichen Bilanzkreisgrenzen erweitern und damit die Berücksichtigung der externalisierten Kosten der Vermögensenergien in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ermöglichen. Das muss für den Energiemarkt insgesamt und gleichberechtigt durch Veränderungen der rechtlichen Rahmenbedingungen, insbesondere der Energiepreisstrukturen, der Förderstrukturen und der steuerlichen Veranlagungen erreicht werden. Aber auch im deutschen Mietrecht sind Anpassungen zur Umsetzung innovativer Energieversorgungskonzepte angezeigt.

Weiterhin leitet sich ab, dass langfristig gesehen die Nutzung erneuerbarer und arbeitspreisneutraler Energieträger wie Sonne und Geothermie unabdingbare Voraussetzung für den Erhalt und Betrieb der Wärmenetze sind.

Die Schlussfolgerung aus der vorstehenden Erkenntnis ist, dass Wärmenetze der Zukunft, auch und insbesondere im Bestand, für die Nutzung von Einkommensenergien tauglich gemacht (vgl. Föniger/Jeremias 2014) werden müssen. Schwerpunkte dabei sind:

- Umstellung der Gebäudeheizanlagen auf Niedertemperatur mit möglichst niedriger Heizwasser-Rücklauftemperatur mit der Maximalzielstellung, Low-Ex-Wärmenetze zu betreiben. Low-Ex-Wärmenetze verwenden Niedrig-Exergie-Technologien. Dadurch lassen sich die Übertragungsverluste in den Netzen deutlich senken und insbesondere auch niederexergetische Energien, wie beispielsweise industrielle Abwärme (auch Abwärme von Klimaanlagen, die wiederum mit möglichst hohen Systemtemperaturen betrieben werden sollten), für die Energieversorgung der Kommunen und Kunden nutzen. Die physikalisch-technische Komplexität dieses Herangehens hat in den letzten Jahren zu zahlreichen Forschungsansätzen und Pilotprojekten, auch in Deutschland, geführt (vgl. z.B. LowEx 2010).
- Neugliederung der Fernwärmenetze in temperaturabhängige Netzebenen unter Berücksichtigung der technisch-physikalischen Kundencharakteristiken.
- Einführung und Umsetzung von Wärmespeicherkonzepten im Fernwärmeversorgungsnetz.

Hydraulische und regelungstechnische Optimierung des Wärmenetzbetriebes für örtlich verteilte Wärmeenergieeinspeisungen und Umkehr von Strömungsrichtungen im Fernwärmenetz.

Nachfolgende Abbildung 2 zeigt zusammenfassend eine mögliche Wärmenetzvision, die auch schon Gegenstand früherer Erörterungen war (vgl. Mertzsch/Jeremias 2015).

Worin bestehen nun heute Umsetzungshindernisse?

- Die technische Anpassung der Verbraucherseite bei fernwärmeversorgten Objekten hat maßgeblichen Einfluss auf eine Konzeptumsetzung. Motivation und Bereitschaft zur Kostenübernahme beim Kunden müssen erreicht werden
- Umstrukturierung und Anpassung der bestehenden Fernwärmenetze ist auch für den Energieversorger kostenintensiv. Es sind erprobte, aber preiswerte Systeme erforderlich.

Die Schaffung der politischen Rahmenbedingungen und Einstellungen sowie die Umsetzung der erforderlichen technischen Konzeptionen werden augenscheinlich langwierig und aus technologischen und wirtschaftlichen Gründen nicht sofort zu erreichen sein. Aber gerade deshalb ist es auch aus der Sicht der Autoren notwendig, bereits heute mit einer schrittweisen Umsetzung zu beginnen. Die Autoren halten einen Umsetzungszeitraum von mindestens zehn Jahren für notwendig.

Grundvoraussetzung für die Einbindung von Einkommensenergien ist dabei die Senkung der Rücklauftemperaturen in den Fernwärmenetzen als vorrangige Maßnahme. Die Rücklauftemperaturen werden durch die Heizungs- und Trinkwarmwassersysteme der Verbraucher maßgeblich bestimmt. Daher stehen heute insbesondere geringinvestive Maßnahmen im Bereich der Haustechnik und der Fernwärmübergabestationen im Vordergrund der Betrachtungen.

tetra ingenieure führt derzeit diverse Messprogramme an verschiedenen FW-Hausanschlussstationstypen in realen Fernwärmenetzen durch, mit denen der Ausgangszustand ermittelt und analysiert wird, um dann Veränderungen durch Umbau- und Sanierungsmaßnahmen in der Anlagentechnik der Fernwärme-Hausanschlussstationen messtechnisch zu begründen. Weiterhin werden durch das Unternehmen bestehende und neue Nah- und Fernwärmenetze thermohydraulisch mit dem Programm sisHYD simuliert und im Sinne der hier diskutierten Zielsetzung optimiert. Technische Nutzungskonzepte für eine solare Wärmeversorgung und Abwärmenutzung befinden

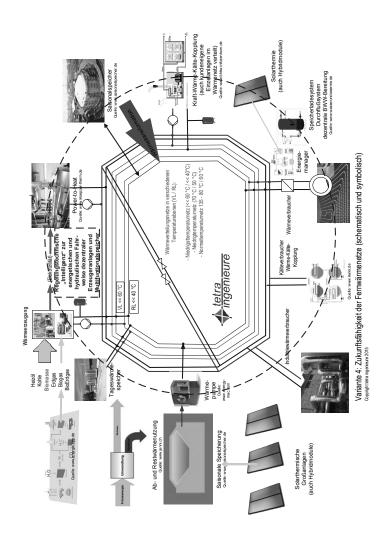


Abb. 2: Elemente eines zukunftsfähigen Fernwärmenetzes

Quelle: tetra ingenieure [2016]

sich derzeit in der Ausarbeitung, Planung und Implementierung. Späterhin sollen diese Einzel- und Detailkonzepte zum innovativen Gesamtkonzept zusammengeführt werden. Ein erster Schritt dazu ist die fachliche Mitwirkung des Ingenieurunternehmens am BMWi-Förderprojekt "Wärmedrehscheibe Stadt Hennigsdorf" (vgl. Wärmedrehscheibe 2016).

Die aktuellen sozialen und ökologischen Herausforderungen erfordern also zwingend neue Denk- und Handlungsansätze in der kommunalen Energieversorgung. Wärmenetze werden zukünftig ein wesentlicher Faktor zur nachhaltigen kommunalen Energieversorgung sein, wenn vorrangig Einkommensenergien und Abwärme genutzt, also vorrangig arbeitspreisneutrale Energieträger eingesetzt werden. Weiterhin sind die politisch-wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zu schaffen, die die heute üblichen Bilanzkreisgrenzen erweitern und damit die Berücksichtigung der externalisierten Kosten der Vermögensenergien in der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ermöglichen.

#### Literatur

- B.B.S.M. Brandenburgische Beratungsgesellschaft für Stadterneuerung und Modernisierung; tetra; Abel (2013a): Integrierte Quartiersentwicklung "Röbeler Vorstadt" in Wittstock/ Dosse. KfW-Abschlussbericht. Potsdam (Brandenburgische Beratungsgesellschaft für Stadterneuerung und Modernisierung mbH Potsdam)/Neuruppin (tetra ingenieure GmbH)/ Wittstock (Architekturbüro Abel) Oktober
- B.B.S.M. Brandenburgische Beratungsgesellschaft für Stadterneuerung und Modernisierung; tetra; complan (2013b): Integriertes energetisches Quartierskonzept für die Innenstadt in Prenzlau. KfW-Abschlussbericht. Potsdam (Brandenburgische Beratungsgesellschaft für Stadterneuerung und Modernisierung mbH; complan Kommunalberatung GmbH)/Neuruppin (tetra ingenieure GmbH) Oktober
- B.B.S.M. Brandenburgische Beratungsgesellschaft für Stadterneuerung und Modernisierung; tetra (2013): KfW-Programm 432 Energetische Stadtsanierung Stadt Gransee "Oranienburger Straße und Straße des Friedens". KfW-Abschlussbericht. Potsdam (Brandenburgische Beratungsgesellschaft für Stadterneuerung und Modernisierung mbH/Neuruppin (tetra ingenieure GmbH) November
- Becker, K.; Frinken, M.; Jeremias, E.-P. (2015a): Dokumentation Integriertes Quartierskonzept Historische Innenstadt Neuruppin im KfW-Programm 432 "Energetische Stadtsanierung". KfW-Abschlussbericht. Neuruppin (tetra ingenieure) Juni
- Becker, K.; Frinken, M.; Jeremias, E.-P. (2015b): Dokumentation Integriertes Quartierskonzept
   Wohngebiet I-III Neuruppin im KfW-Programm 432 "Energetische Stadtsanierung".
   KfW-Abschlussbericht. Neuruppin (tetra ingenieure) Juni
- Becker, K.; Frinken, M.; Jeremias, E.-P. (2016): KfW-Förderung von Kommunen und kommunalen Unternehmen zur Umsetzung der Energiewende in Deutschland. In: Klimaschutz in

- der Stadt- und Regionalplanung im Rahmen des SPECIAL-Projektes (www.spezial-eu. org). Neuruppin (tetra ingenieure GmbH)/Hamburg (Frinken Stadtplaner und Architekt, SLR), S. 133–137
- BFE Bundesamt für Energiewirtschaft (1994): Externe Kosten und kalkulatorische Energiepreiszuschläge für den Strom- und Wärmebereich. Bern (Bundesamt für Energiewirtschaft)
- Breitschopf, B. (2010): Einzel- und gesamtwirtschaftliche Analyse von Kosten- und Nutzenwirkungen des Ausbaus Erneuerbarer Energien im deutschen Strom- und Wärmemarkt. Untersuchung im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Karlsruhe (Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung)
- Föniger, E.; Jeremias, E.-P. (2014): Partnerschaftliches Energiekonzept der Barlachstadt Güstrow aus der Sicht eines Energieerzeugers. Vortrag auf der Kommunaltagung 2014 "Kommunale Energiekonzepte Chancen für die Wohnungswirtschaft". Güstrow
- Jeremias, E.-P.; Becker, K.; Mertzsch, N.; Samuel, D. (2014): Energetische Quartierskonzepte für die Stadtsanierung – Was kann Power-to-Heat beitragen? Fachvortrag Power-to-Heat Forum, Schwerin, 23.01. – URL: http://www.tetra-ingenieure.de/fileadmin/dateien/Vor traege/140120\_PtH\_Schwerin\_tetra\_Januar\_2014.pdf
- LowEx (2010): LowEx Fernwärme Multilevel District Heating. Dresden (Technische Universität, Fakultat Maschinenwesen, Institut für Energietechnik). URL: http://www.eneffstadt.info/fileadmin/media/Publikationen/Dokumente/Buch\_Multilevel\_District\_Heating\_Inhalt.pdf
- Mertzsch, N.; Jeremias, E.-P. (2015): Entwicklungstendenzen in der Wärmeversorgung. In: Banse, G.; Reher, E.-O. (Hg.): Technologiewandel in der Wissensgesellschaft – qualitative und quantitative Veränderungen –. Berlin, S. 125–132 (Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 122)
- Wärmedrehscheibe (2016): Erneuerbare Fernwärme 2020 Das multifunktionale Fernwärmenetz als Wärmedrehscheibe. URL: www.enargus.de
- Wronski, R.; Fiedler, S.; Sorge, L (2015): Gesellschaftliche Kosten der Braunkohle im Jahr 2015. Kurzstudie im Auftrag von Greenpeace e.V. Hamburg. – URL: https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/kosten-braunkohle-foes-greenpeace-20151110\_0.pdf

#### Christian Kohlert

## Nachhaltigkeit von Kunststoffverpackungen – von der Wiege bis zur Bahre

So, wie in der Einführung zum Symposium dargestellt, kann man auch bei Produktionsprozessen eine Bewertung der Einflussgrößen für Entscheidungsprozesse heranziehen.

Die Entscheidung am Beispiel von Kunststoffverpackungen setzt sich zusammen aus

- Ökonomie (Kosten, Preis, Gewinn),
- Nachhaltigkeit (Ökologie, Energie, CO<sub>2</sub>-Verbrauch) und
- Eigenschaften (Barriere, Festigkeit).

In entwickelten Industrieländern ist der Quotient von Preis/Eigenschaften konstant. Hoher Preis für herausragende Eigenschaften und umgekehrt. Seit einigen Jahren setzt sich der Nachhaltigkeitsgedanke zusätzlich mehr und mehr durch (siehe Abb. 1).

In Entwicklungsländer ist noch oft der ökonomische Aspekt überbetont. Auf Eigenschaften wird oft zu Gunsten des Preises verzichtet, Nachhaltigkeit wird dabei den entwickelten Industrieländern überlassen.

Zur Bewertung der Nachhaltigkeit werden oft Lebenszyklusanalysen genutzt. Diese bewerten die Umweltauswirkungen von der Wiege, also der Rohstoffgewinnung, bis zur Bahre, also dem Recycling oder der Deponierung. Dabei unterscheidet man zwischen Ökobilanz, vergleichender Ökobilanzierung oder einer ganzheitlichen Betrachtung.

Eine Lebenszyklusanalyse (auch bekannt als Ökobilanz oder Life Cycle Assessment bzw. LCA) ist eine systematische Analyse der Umweltwirkungen von Produkten

- während des gesamten Lebensweges ("from cradle to grave", "von der Wiege bis zur Bahre") oder
- bis zu einem bestimmten Zeitpunkt der Verarbeitung ("from cradle to factory gate", "von der Wiege bis zum Fabriktor").

90 Christian Kohlert

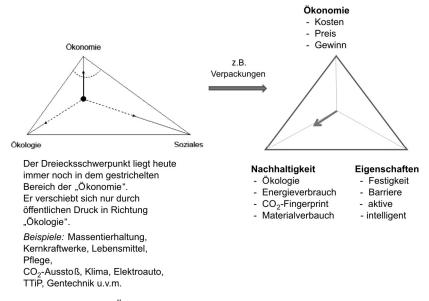


Abb. 1: Verhältnis Ökonomie, Eigenschaften und Nachhaltigkeit

Quelle: Anlage 1 zum Programm des VII. AT-Symposium 2016 sowie eigene Darstellung; vgl. auch Abbildung 2 der "Einführung" auf S. 9.

### Allgemein wird unterschieden zwischen

- einer Ökobilanz, die den Umweltaspekt eines einzelnen Produkts berücksichtigt,
- einer vergleichenden Ökobilanz, die eine Gegenüberstellung mehrerer Produkte verfolgt, sowie
- einer ganzheitlichen Bilanzierung, die wirtschaftliche, technische und/ oder soziale Aspekte mit einbezieht.

Die Methodik zum Erstellen einer Ökobilanz ist in den international gültigen Normen ISO 14040 bis ISO 14043 festgelegt. Für die Erstellung einer Ökobilanz geht man von einer Zielstellung, einer Sachbilanz, einer Wirkungsabschätzung und einer entsprechenden Auswertung aus (siehe Abb. 2).

Die Interpretation der Ergebnisse sollte dann zu verbesserten Produkten, Entscheidungsprozessen und häufig auch zu Marketingvorteilen führen. Tabelle 1 zeigt die Entwicklung von ökologischen Daten in den vergangenen Dezennien bis zu den heutige publizierten Werten. Man erkennt deutliche Unterschiede, die in der Regel im Bilanzraum sowie der betrachteten Region liegen.

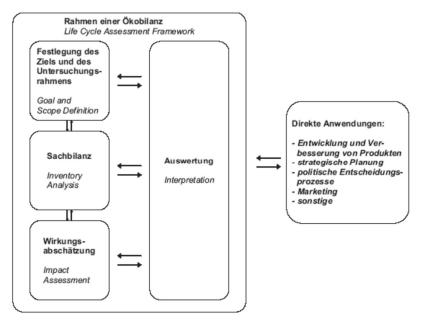


Abb. 2: Methodik einer Ökobilanz

Quelle: Schneider 2007, S. 41

Klöckner Pentaplast (kp) kalandriert PVC-Hartfolien und nutzt ökologische Daten von der Wiege bis zum Folienprodukt für eigene Beiträge zur Nachhaltigkeitsgestaltung (siehe Abb. 3).

In Tabelle 2 sind die Ergebnisse von kontinuierliche Energieeinsparungsprozessen in verschiedenen Standorten von kp zu erkennen, auch wenn infolge von Produktionsänderungen oder -erweiterungen nicht immer ein Einsparungspotenzial erzielt wird.

Für diese vergleichende Bewertung ökologischer Daten für verschiedene Verpackungsvarianten nutzt kp das speziell dafür entwickelte Programm "Oekobil". "Oekobil" zeigt den ökologischen Vergleich verschiedener Verpackungen von der Rohstoffgewinnung bis zur Verpackung. Vergleichsgrundlage sind Verpackungen, die den selben Inhalt mit dem selben Gewicht oder Volumen beinhalten. Bei mengenmäßigen Unterschieden an Packgut muss auf gleiche Mengen umgerechnet werden. Bewertet werden die Verpackungsstoffe PS, PET, PVC, PP, HDPE, LDPE, PLA, CaCO<sub>3</sub>, Weißblech, Glas, Aluminium, Papier und Karton nach den neuesten wissen-

Tab. 1: Ökodaten von Verpackungsstoffen 1991 bis 2013

for 1kg material  Energy  MJ/kg  Material			Band	Ecological assessments or packaging materials	S							Stanu 2	Stand 20.1.2016	
Energy MJ/kg Material			oekobil4	bil4				okeobil5	2				oekobil6	
Energy MJ/kg Material			1991 - 2005	305				2000 - 2010					2011 -2013	
۸ <i>J/</i> kg Vaterial	Buwal Buwal	Buwal	EuPc			Probas DE	Probas DE	Probas EU	Probas DE	Probas EU		value USA		
Material	1991	1996	2002			2000	2005	2005	2010	2010		ACC	EuPC (USA) ELCD3	LCD3
	ĺ	old values		Oekobil 4			new values				Oekobil 5	2011		2013
PVC	51,1		56,73		56,73		53,1				53,1	59,2		
PET	84,5		80,74		80,74	98,21					98,21	70,4	4'69	
PP	71		73,37		73,37		95,4				95,4			
PS	75,3		87,41		87,41		87,26				87,26	95,1		
HDPE	9'29		79,92		79,92		77,32				77,32		7.97	
LDPE	68,1		80,57		80,57		82,33				82,33			
PVdC			80,6		90'8						9'08			
PLA					67,82					68,62	68,62			
Paper/carton	38'8	59,98			59,98				21,49		21,49			
_	93,38	95,51			95,51		179,24	191,95			179,24			
Blech	26,31	27,9	3 24,69		24,7			13,43			13,43			
Glas	8'9				12,74		11,95				11,95			
CaCO3							0,14725				0,14725			1,3
C02	Buwal Buwal	Buwal	EuPc		ľ	Probas DE	Probas DE	Probas EU	Probas DE	Probas EU		value USA		
kg/kg	1991	1996	2005			2000	2005	2005	2010	2010		ACC	EuPC (USA)	ELCD3
Material	ĺ	old values		Oekobil 4			new values				Oekobil 5	2011		2013
PVC			1,8		1,8		4,61				4,61			
PET			2,8		2,8	6,28					6,28	2,73		
PP			1,7		1,7		7,25				7,25		1,96	
PS			2,8		2,8		5,94				5,94			
HDPE			1,7		1,7		4,96				4,96	1	1,93	
_DPE			1,9		1,9		5,55				5,55	2,2		
PVdC			3,8		3,8									
PLA					0,83					5,61				
Paper/carton			0,91		0,91				2,62	2	2,62			
Al			4,02		4,02		28				28			
Blech			1,73		1,73			2,69	6		2,69			

Quelle: kombiniert aus verschiedenen Angaben des BUWAL und des UBA sowie von Plastic Europe (BUWAL – Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, Schweiz; UBA – Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Deutschland; PlasticsEurope. Verband der Kunststofferzeuger. Brüssel, Belgien)

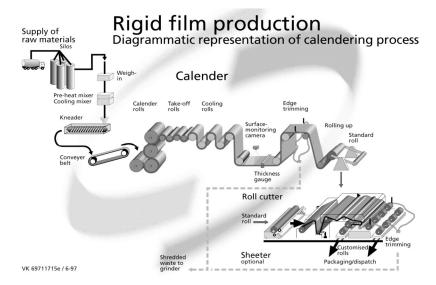


Abb. 3: Kalandrierprozess

Quelle: Klöckner Pentaplast intern

schaftlichen Erkenntnissen. Die Basisdaten dafür wurden offiziellen ökologischen Publikationen entnommen (siehe Tab. 3).

Es werden dabei der Energieverbrauch zur Herstellung von Folien, die kritische Luft- und Wassermenge für die Neutralisierung von austretenden Schadstoffen, die übrigbleibenden zu deponierenden Restabfälle, der CO<sub>2</sub>-Fingerprint sowie der Erdöl- und Wasserverbrauch bilanziert:

- Energieverbrauch (MJ/kg): Bezugswert für den gesamten Energieaufwand (incl. Erdölaufwand als Energie) zur Herstellung und Verarbeitung von 1 kg eines bestimmten Packstoffes bzw. Packmittel (z.B. Folie oder Becher);
- kritische Luftmenge (m³/kg): Mindestvolumen pro kg Packstoff, um die Schadstoffmenge in die Luft auf die gesetzlich zugelassene Konzentration zu reduzieren;
- kritische Wassermenge (dm³/kg): Mindestvolumen pro kg Packstoff, um die Schadstoffmenge im Wasser auf die gesetzlich zugelassene Konzentration zu reduzieren;
- feste Abfälle (cm³/kg): feste zu deponierende Stoffe unter Berücksichtigung ihres spezifischen Deponievolumens;

94 Christian Kohlert

1,40 Higher SEC because of post-Including Administration and IT 1,00 0,80 SEC [kWh/kg] 0,60 0,40 0,20 0,00 ko St. Petersburg **KO**CTUMIN

■ FY\_10\_11

■ FY\_11\_12

Tab. 2: Energieverbrauch pro kg Folie für kp Europa

Quelle: Klöckner Pentaplast intern

Tab. 3: Daten und Quellen für Oekobil 4

Material	Inquiry date	Data source	Region
PS	2006	Plastics Europe	Europe
PET	2005	Plastics Europe	Europe
PVC	2005	Plastics Europe	Europe
PP	2005	Plastics Europe	Europe
HDPE	1995	Plastics Europe	Europe
LDPE	1993	Plastics Europe	UK
PVdC	2005	Plastics Europe	Europe
Glass, aluminum, carton, paper, tin plate	1991 & 1996	Federal Office for the Environment FOEN	Switzerland
PLA	2010	NatureWorks	USA
CaCO <sub>3</sub>	2011	ELCD3	Europe

Quelle: Klöckner Pentaplast intern

- CO<sub>2</sub>-Fingerprint (mg/kg): Mindestvolumen pro kg Packstoff, um die Schadstoffmenge CO<sub>2</sub> in die Luft auf die gesetzlich zugelassene Konzentration zu reduzieren;
- Erdölverbrauch (g/kg): Gesamtmenge an Erdöl zur Herstellung von 1 kg Packstoff;
- Wasserverbrauch (l/kg): Gesamtmenge an Wasser zur Herstellung von 1 kg Packstoff.

Für alle zu vergleichenden Verpackungsvarianten werden für jeden einzelnen Stoffanteil obige Ökokriterien aufsummiert und der prozentuale Anteil an der aufsummierten Summe aller Vergleichsverpackungen berechnet. Diese Prozentzahlen werden mit Wichtungsfaktoren multipliziert. Dadurch entsteht eine dimensionslose Zahl (Totalindex), welche den ökologisch gewichteten Parameteranteil der einen Verpackung im Vergleich mit den anderen Verpackungen darstellt. Über eine Bewertung der prozentualen Anteile einzelner vergleichbarer Verpackungen bezogen auf die Gesamtsumme der einzelnen Parameter sowie eine Zusammenfassung über vorgebbare Wichtungsfaktoren lässt sich dann eine Aussage über bessere oder schlechtere ökologische Werte einzelner Verpackungen treffen. Für die hier bewerteten Verpackungsbeispiele wurden in Anlehnung an die Ökoeffizienz-Analyse der BASF folgende Wichtungsfaktoren für den Totalindex gewählt:

Energieverbrauch 30%;

- CO<sub>2</sub>-Fingerprint 10%;

- Kritische Luftmenge 20%;

- Erdölverbrauch 5%;
- Kritisches Wassermenge 20%;

Wasserverbrauch 5%.

Feste Abfälle 10%;

Die Ermittlung des Totalindexes für vergleichende Verpackungen erfolgt dann nach folgender "Formel": Eco Index Packaging 1 = (Energy cons. / total energy cons.) \* 30% + (Air cons. / total air cons.) \* 20% ... + (oil cons. / total oil cons.) \* 5%.

Abbildung 4 zeigt das Eröffnungsbild dieses Programmes.

In Abbildung 5 wird ein Beispiel einer vergleichenden Ökobilanzierung für unterschiedliche Pharmaverpackungen dargestellt, wie sie aus dem Programm Oekobil berechnet wird.

Man erkennt, dass unter den gegebenen Voraussetzungen die Verpackung 5 (PVC, Papier, Al) sowohl beim Energieverbrauch und der Luftverschmutzung wie auch beim Deponievolumen und CO<sub>2</sub>-Fingerprint am besten abschneidet. Dies spiegelt sich dann auch im Totalindex wieder. Ökologisch ungünstig sind hingegen die Varianten 1 bis 3.

96 Christian Kohlert

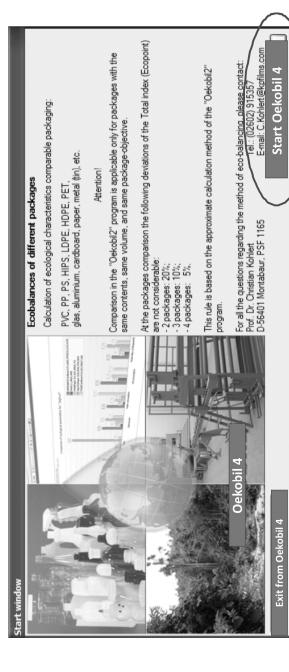


Abb. 4: Eröffnungsbild des oekobil-Programmes

Quelle: Klöckner Pentaplast intern

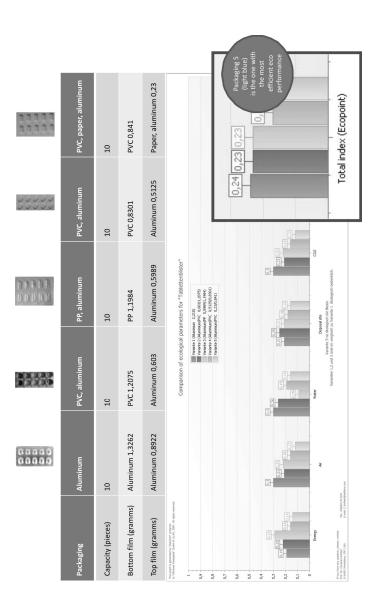


Abb. 5: Beispiel eines Ökobilanzvergleiches für Pharmaverpackungen

Quelle: Klöckner Pentaplast intern

98 Christian Kohlert

Derzeit wird daran gearbeitet, dieses Programm als App für alle Interessenten und Kunden zugänglich zu machen (siehe Abb. 6):

- Ökobil wird als App für Tablets und Handys mit einfacher Menüführung entwickelt;
- die App kann dann komfortabel f
   ür Kunden und externe Partner genutzt werden:
- die Basisdaten werden verifiziert durch TÜV, DEKRA oder andere Institutionen;
- sich laufend verbessernde Ökodaten durch Energie- und Recyclingentwicklungen können unkompliziert durch den App-Betreiber implementiert werden.

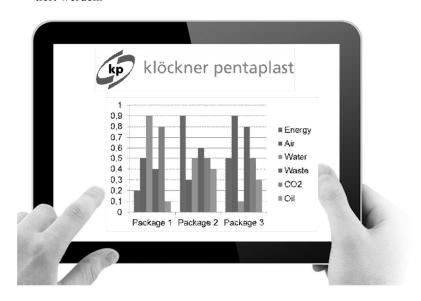


Abb. 6: Weitere Entwicklung: die Oekobil 7 App

Quelle: Klöckner Pentaplast intern

### Literatur

Schneider, M. (2007): Bewertung unterschiedlicher Verpackungsmaterialien hinsichtlich ihrer Folieneigenschaften und ökologischen Profils. Bachelorarbeit. Stuttgart (Hochschule der Medien)

Marek Hauptmann, Jens-Peter Majschak

Die Rolle der Nachhaltigkeit in der Konsumgüterproduktion, ihre Einschätzung, Kommunikation und Nutzung am Beispiel der Verpackungstechnik

### 1 Gesellschaftliche Entwicklungen in der Konsumgüterproduktion

Die Bevölkerung der Erde wächst seit Beginn der Zeitrechnung annähernd kontinuierlich. Bis 1804 ist der Gradient der Wachstumskurve gering. Die Weltbevölkerung erreicht innerhalb dieser ca. 1800 Jahre eine Milliarde Menschen. In den darauf folgenden 123 Jahren steigt sie bereits um eine weitere Milliarde Menschen. Die Intervalle, in denen jeweils eine weitere Milliarde Menschen hinzukommen, werden in der Folge zunehmend kürzer und haben derzeit ihren Minimalwert mit zwölf Jahren angenommen (vgl. UNFPA 2011). Die Entstehung des sprunghaften Wachstums der Weltbevölkerung zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts wird auf die technischen Entwicklungen zur Unterstützung der Produktion von Konsumgütern zurückgeführt. Diese Entwicklungen werden nach Henning Kagemann, Wolfgang Wahlster und Johannes Helbig in vier Stufen der Industrialisierung untergliedert, die jeweils als industrielle Revolution bezeichnet werden (vgl. Kagemann et al. 2013). Eine differenziertere Betrachtung des Bevölkerungswachstums unter Berücksichtigung der Gesellschaftsentwicklungen auf Kontinenten bzw. in einzelnen Ländern zeigt, dass derzeit mehrere gesellschaftliche Entwicklungsstadien parallel ablaufen, die durch ihre Wechselwirkungen nicht vollständig unabhängig voneinander sind und demnach nicht nach identischem, aber dennoch vergleichbarem Schema ablaufen. Diese Stadien werden in der Soziologie durch das Modell des demographischen Wandels beschrieben, was auf die Interpretation der demographischen Geschichte von Warren Thompson aus dem Jahr 1929 zurückgeht (vgl. Demeney/McNicoll 2003).

Neben der Lebenserwartung steigt mit den höheren Entwicklungsstadien der Gesellschaft auch der Lebensstandard, für den das Pro-Kopf-Einkommen ein Indikator ist. Mit der Veränderung des Lebensstandards verändern sich die Bedürfnisse der Menschen, die durch die Konsumgüterproduktion befriedigt werden sollen. Nach Abraham H. Maslow setzen sich die Bedürf-

nisse der Menschen über ihren Lebenszyklus aus physiologischen Bedürfnissen (Ernährung, Schlaf ect.), Sicherheitsbedürfnissen (Schutz vor Gefahren), sozialen Bedürfnissen (soziale Rolle im Umfeld, Freundschaft etc.), Individualbedürfnissen (Unabhängigkeit, Freiheit, Wertschätzung etc.) und dem Drang nach Selbstverwirklichung zusammen (vgl. Maslow 1943). 1971 ergänzt er diese Theorie um kognitive und ästhetische Bedürfnisse und die Transzendenz als Suche nach etwas, das außerhalb des betrachteten Systems liegt (vgl. Maslow 1971). Nach Maslow überlagern sich die Bedürfnisse; diese sind aber dennoch in ihrer Prioritätsabstufung nacheinander priorisiert. Auch der Entwicklungsstand der Gesellschaft und die daraus resultierenden Lebensbedingungen haben wesentlichen Einfluss auf die Prioritäten und die Persönlichkeitsentwicklung. In den Ländern, die höheren Entwicklungsstufen zugerechnet werden, bestehen demnach wesentlich höhere Ansprüche an die Vielfalt der Konsumgüter als in Entwicklungsländern, in denen meist schon die Nahrungsmittelbereitstellung das Primärziel ist. Durch die Entkoppelung von Wohn- und Arbeitsort aufgrund der sich durchsetzenden arbeitsteiligen Produktion beginnt die Urbanisierung, die sich als wesentlicher Trend durch alle Stadien fortsetzt und progressiv verläuft. Aktuell leben bereits über 50% der Bevölkerung in Städten (vgl. UNDESA 2012). Mit der breitflächigen Zentralisierung und dementsprechend großtechnisch angelegten Energieerzeugung wird diese Entwicklung bestärkt.

Aus diesen gesellschaftlichen Entwicklungen heraus wird eine Globalisierung von Märkten der Konsumgüterindustrie erzeugt. Die primären Ressourcen wie Energieträger, Wasser, Boden usw. und der Bedarf an Gütern höherer Wertschöpfung lassen zunächst einen internationalen Handel entstehen. Die Grundlage dieser Globalisierung ist die Nutzung der Ressource Erdöl als Energieträger für Transportmittel, die mit wirtschaftlicher Förderung und Verteilung in großen Mengen eine weltweite Distribution von Konsumgütern und der Rohstoffe, die zu deren Herstellung notwendig sind, ermöglicht. Als politischer Startpunkt der Globalisierung gilt das GATT-Abkommen (General Agreement on Tariffs and Trade) von Genf 1947.

Die Globalisierung eröffnet den Unternehmen die Möglichkeit, die Arbeitskraft auszunutzen und kostenintensive Regularien wie beispielsweise Umweltschutzvorschriften zu umgehen. Der Drang nach Produktivitätssteigerung, um die Versorgung der Menschen mit Konsumgütern zu sichern, diese aber möglichst kostengünstig zu produzieren, bewirkt eine Spezialisierung von Unternehmen auf bestimmte Verarbeitungsschritte (z.B. Beschichtung von Packmitteln). Eine weitgehende Automatisierung dieser Schritte lässt eine wesentliche Steigerung der Produktivität in der Arbeitsteilung zu

und es gelingt, in den höheren Entwicklungsstadien die Versorgung der anspruchsvollen Bedürfnisse der Menschen sicher zu stellen. Die Verlagerung von Produktionskapazitäten zieht sich durch alle Stufen der Wertschöpfungskette und erzeugt eine Ausweitung der Transport-, Umschlag- und Lager-Prozesse (TUL-Prozesse). Es entsteht ein internationaler Wettbewerb, der Konsumgüter global verteilt und zugänglich macht. Durch den internationalen Austausch werden Technologien nutzbar gemacht und auf verwandte Anwendungsgebiete übertragen. Neue Märkte und ansteigende Umsätze der Unternehmen aus Industrieländern wirken als Entwicklungs- und Innovationsbeschleuniger. Es werden Produkte in neuen Regionen eingeführt, die den Lebensstandard erhöhen. Der globale Wettbewerb reagiert jedoch nicht ausschließlich auf Bedürfnisse der Konsumenten, sondern unterstützt den Verkauf, indem er den Konsumenten die Notwendigkeit neuer Konsumgüter und ihres Mehrverbrauchs suggeriert. Es entsteht ein ständiges Überangebot an Waren, das nicht immer im Verhältnis zum tatsächlichen Konsum und Bedarf steht. Beides sind Faktoren, die den Bedarf an Ressourcen steigern und zu einem weltweiten Abfallproblem führen. Die Verluste werden vor allem in der Wertschöpfungskette von Lebensmitteln aufgedeckt und von Jenny Gustavsson, Christel Cederberg und Ulf Sonesson auf über 30% der weltweiten Agrarproduktion für Lebensmittel beziffert. In Industrieländern sind die Verluste tendenziell nur geringfügig höher als in Entwicklungsländern. Die Art der Verluste nach dem Ort ihres Auftretens innerhalb der Wertschöpfungskette unterscheidet sich aber signifikant. In Regionen höherer Entwicklungsstufen werden durch effizientere Technik bei der agrartechnischen Produktion und der Nachverarbeitung der Ernte geringere Verluste erzielt als in Entwicklungsregionen, in denen diese Verluste den größten Anteil darstellen. Das Verbraucherverhalten erzeugt hingegen in Industrieländern einen starken Anstieg der Verluste beim Verbrauch der hergestellten Produkte (vgl. Gustavsson et al. 2011).

In Deutschland gehen ca. 11 Mio. Tonnen Lebensmittel verloren. Davon sind 61% privaten Haushalten zuzurechnen. Allein 65% der gesamten Verluste in der Wertschöpfungskette werden als vermeidbar oder zumindest bedingt vermeidbar eingestuft (vgl. Kranert et al. 2012). Die Ursachen sind vielfältig. Bei der Verarbeitung inklusive Verpackung von Lebensmitteln gehen die Arten der Verluste und deren Ursachen weitgehend konform mit dem in der Verarbeitungstechnik bekannten Fachgebiet "Betriebsverhalten" (vgl. Bleisch et al. 2011). Beispiele sind hier Verluste durch Ausfälle der Maschine, Fehlverhalten von Personal oder Fehlorganisation des Produktionsablaufes. Im Handel prägen Wettbewerb und globale Vernetzung die

Verluste, die beispielsweise durch volle Regale bis Ladenschluss, Ablauf von Mindesthaltbarkeiten, Überbestände aufgrund kaum kalkulierbaren Kaufverhaltens oder durch Überbeanspruchung während Transport-, Lager- und Umschlagprozessen entstehen. Bei Einzelverbrauchern dagegen reduziert das ständige Überangebot die Wertschätzung der Lebensmittel. Dadurch entstehen beispielsweise Fehlkäufe aufgrund fehlenden Überblicks über Vorräte (vgl. Kranert et al. 2012).

Mit der Entwicklung und schnellen Verbreitung des Internets seit 1980 werden die Reaktionszeiten auf Produktionsanfragen verringert und die kurzfristige Vergleichbarkeit von Angeboten sowie die zunehmende weltweite Vergabe von Aufträgen sind Beschleunigungsfaktoren für Innovationstätigkeiten (vgl. Röhrig et al. 2010). Das begünstigt einen anhaltenden Trend hin zur Entwicklung von Konzernstrukturen auf der Seite des Handels, der in diesen Strukturen im Wesentlichen nur noch auf Informationssammlung, -verarbeitung und -verteilung besteht und global handlungsfähig ist.

Die Verwendung der Ressourcen, die für die Produktion von Konsumgütern notwendig sind, nimmt durch das rasante Bevölkerungswachstum und die zunehmenden Ansprüche an die Versorgung mit Gütern drastisch zu. Neben dem Industrialisierungsbeschleuniger Energie sind vor allem Wasser sowie Raum für den Anbau und die Nutzung nachwachsender Rohstoffe Ressourcen, deren Überbeanspruchung bereits eingesetzt hat. Die Nutzung fossiler Rohstoffe ist zeitlich begrenzt und es besteht die Herausforderung, die benötigte Energie aus erneuerbarer Quelle zu generieren.

Der Wasserverbrauch der Menschheit ist seit 1950 deutlich angestiegen, hat sich inzwischen mehr als verdreifacht und wächst kontinuierlich weiter. Über 70% der durch den Menschen genutzten Wassermenge wird durchschnittlich in der Landwirtschaft eingesetzt. In der verarbeitenden Industrie werden durchschnittlich ca. 20% des weltweit verfügbaren Wassers verwendet und nur 10% werden durch die Menschen direkt genutzt (vgl. Shiklomanov 1999). Dennoch ist ein Fünftel der Weltbevölkerung in Regionen mit Wasserengpässen angesiedelt und Wasser wird bereits weltweit als verknappende Ressource betrachtet (vgl. UNESCO 2012).

Die Versorgung der Menschen mit Lebensmitteln und anderen Bedarfsgütern führt zu einem breitflächigen Umbruch von Land zur agrartechnischen Nutzung (vgl. WRI 2005), und das Wachstum der Bevölkerung erfordert zudem fortlaufend die Erweiterung des Lebensraums. Eine weitere Ausweitung des nutzfähigen Raumes ist nicht mehr in ausreichendem Maße möglich, wie es für das Bevölkerungswachstum notwendig wäre. Die projizierten Szenarien des Bevölkerungswachstums bis 2050 auf über 9 Mrd.

Menschen bedeuten einen notwendigen Zuwachs in der Nahrungsmittelproduktion von bis zu 70%, um ausreichende Ernährungssicherheit zu gewährleisten (vgl. UNESCO 2012). Eine zunehmende Bewässerung in der Landwirtschaft kann bis zu 55% Zuwachs in der Nahrungsmittelproduktion bringen, würde aber einen Mehrverbrauch an Wasser um 40% bedeuten (vgl. IWMI 2007). Die Ressourcen stehen miteinander in Wechselwirkung und führen zu einem Nexus, der in der Produktion von Konsumgütern in seiner ganzen Komplexität präsent ist.

Diese Entwicklungen führen zu einer breiten Wahrnehmung und zunehmender Akzeptanz gegenüber ökologischen Gesichtspunkten. Der Begriff Nachhaltigkeit beinhaltet eine Reihe von Implikationen, die mit fortlaufender Zeit von der reinen Ausrichtung an ökologischen Gesichtspunkten auch auf gesellschaftliche Aspekte übertragen wurden. Nach dem 1987 veröffentlichten Brundtland-Bericht wird eine nachhaltige Entwicklung definiert als

"Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können." (WCED 1987, p. 1)

Zu diesem Zeitpunkt bemerkt eine breite Öffentlichkeit, dass der sparsame Umgang mit Ressourcen sowie ein veränderter Umgang mit Ökosystemen und deren Leistungen notwendig ist.

## 2 Methoden zur Bewertung und Kommunikation der Nachhaltigkeit

# 2.1 Wasser-Fußabdruck

Die Charakterisierung und Darstellung von Einflüssen der Produktion von Konsumgütern auf die Umwelt und ihre Ökosysteme ist eine grundlegende Voraussetzung für die gezielte Steigerung der Effizienz der Ressourcennutzung sowie ihrer Einschätzung und Kommunikation. Dazu haben sich in jüngerer Vergangenheit unterschiedliche Methoden und Werkzeuge entwickelt. Einzelbilanzen werden in Bezug auf vitale Medien wie Wasser, CO<sub>2</sub>, Energie bzw. genutzte Landfläche erstellt. Da Wasser als eine strategische und verknappende Ressource betrachtet wird, etablierten Arjen Y. Hoekstra, Ashok K. Chapagain, Maite M. Aldaya und Mesfin M. Mekonnen den Wasser-Fußabdruck (WF) als Kenngröße für die Verwendung von Wasser (vgl. Hoekstra et al. 2011) und unterteilen diesen in den

Blauen Wasser-Fußabdruck, der die Menge entnommenen und verwendeten Oberflächen- bzw. Grundwassers kennzeichnet;

- Grünen Wasser-Fuβabdruck, der die Menge genutzten Regen- und Bodenwassers darstellt;
- Grauen Wasser-Fußabdruck, der die Menge des Wassers kennzeichnet, das benötigt wird, um Wasseremissionen so zu verdünnen, dass die darin enthaltenen Schadstoffe unterhalb der festgelegten Emissionsgrenzwerte liegen.

Diese Differenzierung ist eine wichtige Grundlage für die Einschätzung der Wassereffizienz. Während der Grüne WF im Grunde ein passives Maß für die Nutzung der natürlichen Bedingungen ist, kennzeichnet der Graue Wasser-Fußabdruck im Grunde direkt die Umweltverschmutzungen. Der Blaue WF stellt nicht wirklich einen Verlust dar, da das Wasser im Kreislauf erhalten bleibt, beinhaltet aber dennoch eine indirekte Beurteilung der Umweltbeeinflussung, da eine Nutzbarmachung von Wasserressourcen und eine spürbare Änderung ihrer Verteilung im Kreislauf häufig gravierende Eingriffe zur Folge hat (z.B. Entwässerung von Mooren).

Für die Bestimmung des WF wird zunächst der direkte Wasserverbrauch von Prozessen, wie z.B. der Energiegewinnung, dem landwirtschaftlichen Anbau, dem Transport von Gütern oder deren Verarbeitung als Basis ermittelt (vgl. Hoekstra et al. 2011). Diese Werte lassen sich dann zu einem WF von Personen, Personengruppen, ganzer Gebiete (z.B. Länder) oder Produkten akkumulieren. Die in der Wertschöpfungskette entstehenden Wassermengen einzelner Stufen werden als "virtuelles Wasser" bezeichnet. Durch diese differenzierte Betrachtung werden einerseits die Ortsbedingungen der Prozesse berücksichtigt, von denen der Betrag des WF maßgeblich abhängen kann (siehe Tab. 1), und andererseits die Handelsbeziehungen aufgelöst, die vor allem bei der Ermittlung des Wasser-Fußabdrucks von Personen und Personengruppen großen Einfluss auf das Ergebnis haben. Es ist aus dem WF nicht auflösbar, ob Oberflächenwasser verwendet wird oder Grundwasser. Der hohe Wasserbedarf zum Wachstum von Pflanzen (siehe Tab. 1) führt auch zu einem bedeutend höheren WF einiger erneuerbarer Energieträger im Vergleich zu konventionellen Energieträgern (vgl. Gerbens-Leenes et al. 2009; siehe Tab. 2).

Neben den für die Produktion notwendigen direkten Wasserverbräuchen ist ein indirekter Verbrauch von Wasser als "Overhead" erfasst und im WF eines Produktes oder Zwischenproduktes enthalten. Dieser Overhead erfasst z.B. Trinkwasser von Personal in Betrieben oder Abwässer von Toiletten und wird in der Bilanz bei Wasseraufbereitung und -rückfluss Null. Dennoch werden auch bei der Produktion bzw. Verarbeitung von Produkten und

Packmitteln signifikanten Mengen Wasser verwendet und müssen aus den Ressourcen aktiviert werden. Die Ermittlung des WF kann einen Überblick über die Effizienz des Anbaus von Agrargütern in verschiedenen Regionen geben. Es sind auch komparative Studien von Produkten möglich.

Tab. 1: Wasser-Fußabdruck unterschiedlicher Agrarprodukte in m<sup>3</sup> Wasser je Tonne

Produkt	USA	Brasilien	Zimbabwe
Mais	308	664	3.363
Weizen	1.388	1360	1.133
Zuckerrohr	153	128	160
Zuckerrübe	88	-	-
Baumwolle	2.414	1710	6.359
Holz	397–1.081	214-233	-

Quelle: nach Gerbens-Leenes et al. 2009; van Oel/Hoekstra 2012

Tab. 2: Durchschnittlicher Wasser-Fußabdruck (WF) verschiedener Energieträger

Energieträger	Ø WF m³/GJ
Windenergie	0
Nuklearenergie	0.1
Gas	0.1
Kohle	0.2
Solarenergie	0.3

Energieträger	Ø WF m³/GJ
Erdöl	1.1
Wasserkraft	22
Biomasse Niederlande	24
Biomasse Brasilien	61
Biomasse Zimbabwe	143

Quelle: nach Gerbens-Leenes et al. 2009; Daten nach Gleick 1994, Shiklomanov 1999

## 2.2 CO<sub>2</sub>-Fußabdruck

Eine bereits länger bekannte Methode zur Beurteilung von Luftverunreinigungen ist der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck. Nach dem Bekanntwerden der Umweltwirkungen von Treibgasen wie z.B. FCKW und deren zunächst konsequenter Verringerung und dem wissenschaftlichen Nachweis des Wirkungsbeitrages anthropogener Treibhausgasemissionen durch das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC; vgl. IPCC 1990) wird 1997 das Kyoto Protocol abgestimmt (vgl. UN 1998), in dem sich die zunächst 39 Mitglieds-

staaten erstmals auf konkrete Emissionsziele zum Großteil mit geplanten Reduktionen des Ausstoßes einigen. Es werden sechs Treibhausgase bzw. Gasgruppen (Kohlenstoffdioxid, Methan, Distickstoffoxid, halogenierte Fluorkohlenwasserstoffe, Perfluorkohlenwasserstoffe und Schwefelhexafluorid) benannt, die fortan zu bilanzieren und zu überwachen sind. Die einheitliche Betrachtung soll anhand von CO2-Äquivalenten erfolgen, da CO2 den mit Abstand größten Teil der Luftemissionen einnimmt. Die Umrechnung in CO2-Äquivalente erfolgt durch Äquivalenzfaktoren, die nach der Infrarot-Strahlungserhöhung der Gase in der Atmosphäre sowie deren Lebensdauer fortwährend durch die Assessment-Berichte des IPCC angepasst werden. Für das Monitoring werden zu betrachtende Sektoren (Energie, industrielle Prozesse, Lösemittel und weiterer Hilfsmitteleinsatz, Landwirtschaft und Abfall) benannt, die in einer CO2-Bilanz zu berücksichtigen sind. Dementsprechend sind zahlreiche Prozesse dieser Sektoren analysiert und der zugehörige CO2-Ausstoß ermittelt worden, die in Form von Emmissionsfaktoren angegeben werden (vgl. USEPA 2014). In der Anwendung haben sich vier Nutzungsvarianten des CO2-Fußabdrucks entwickelt:

- Der gesellschaftliche bzw. organisationsbezogene CO<sub>2</sub>-Fußabdruck gibt den Ausstoß an Klimagasen an, der von einer Person, Personengruppe oder Regionen (Ländern) verursacht werden (DIN EN 14064);
- der Gebäude-CO<sub>2</sub>-Fußabdruck gibt den Ausstoß von Klimagasen durch Einrichtungen an (DIN EN ISO 50001);
- der Transport-CO<sub>2</sub>-Fußabdruck gibt den Ausstoß von Klimagasen für Transportwege und Transportvarianten an (DIN EN 16258);
- der Produkt-CO<sub>2</sub>-Fuβabdruck (Product Carbon Footprint, PCF) gibt den Ausstoß an Klimagasen an, der bei der Produktion eines Produktes verursacht wird (DIN EN 14067).

Für die Konsumgüterproduktion, vor allem in der Verpackungsentwicklung, sind auf Stoffebene der Transport- und der Produkt-CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (PCF) von Bedeutung, wobei dann bei der Erstellung des PCF auf Werte für Transportmittel zurückgegriffen wird. Für den PCF wird in der internationalen Norm DIN CEN ISO 14067 "Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung und Kommunikation" festgelegt, dass Rohstoffgewinnung, Produktion, Nutzung und Ende des Produktlebensweges in die Bilanz aufzunehmen sind.

### 2.3 Ökologischer Fußabdruck

Eine Methode mit dem Ziel, Emissionen mit Ökosystemleistungen zu vergleichen, ist der ökologische Fußabdruck nach Mathis Wackernagel und William Rees (vgl. Wackernagel/Rees 1997). Der ökologische Fußabdruck vergleicht den Bedarf an Landfläche auf Basis einer Bilanz verbrauchter Rohstoffe und vergleicht diesen mit der ökologischen Kapazität der Erde. Die Betrachtungsweise ist zunächst auf den Vergleich des Ressourcenverbrauchs von Regionen (vorrangig Länder) ausgelegt. Dazu wird der Verbrauch an Rohstoffen den sechs Flächenkategorien Ackerfläche, Gras-bzw. Weidefläche, Gewässer, Waldfläche, CO<sub>2</sub>-Aufnahme-Fläche, bebaute Fläche zugeordnet (vgl. Borucke et al. 2013). Die Aufnahmefläche für CO<sub>2</sub> beschreibt dabei die Größe der Fläche, die notwendig ist, die emittierte Menge CO<sub>2</sub> als Senke aufzunehmen. Der ökologische Fußabdruck der Produktion (EF<sub>P</sub>) wird danach durch

$$EF_p = \sum_{i} \frac{P_i}{Y_{m,i}} \cdot EQF_i$$

berechnet. P ist die Menge des Rohstoffes bzw. der Natur entnommener Produkte i (oder die Menge an emittierten CO<sub>2</sub>). Diese Menge wird auf den weltweiten, durchschnittlichen jährlichen Ertrag des Rohstoffes Y<sub>W,i</sub> bezogen und mit einem Äquivalenzfaktor EQF<sub>i</sub> multipliziert, der die sechs Flächenkategorien gewichtet und auf die Einheit des globalen Hektars (gha) harmonisiert. Für viele Handelsgüter ist mit Hilfe einer Extraktionsrate die aus der Biomasse gewonnene Menge des Gutes über ein Masseverhältnis zu ermitteln. Der Äquivalenzfaktor der drei Flächenkategorien Ackerfläche, Waldfläche und Gras- bzw. Weidefläche wird mit dem GAEZ-Modell (Global Agro-Ecological Zones, GAEZ) bestimmt. Dazu wird mit Hilfe von fünf Eignungsklassen von 0.9 bis 0.1 die Bioproduktivität von Flächenanteilen gewichtet, die jährlich vergeben und angepasst werden. Die restlichen Flächen werden durch Annahmen eingeordnet:

- Bebaute Fläche wird mit Ackerfläche gleichgesetzt, außer sie ist direkt auf dieser platziert;
- die CO<sub>2</sub>-Aufnahmefläche wird mit Waldfläche gleichgesetzt, da angenommen wird, dass überwiegend der Wald das anthropogene CO<sub>2</sub> aufnimmt;
- Wasserspeicher werden in ihrer Eignung gleich eins gesetzt, da sie die bioproduktive Fläche (mit durchschnittlicher Produktivität) bewässern können;

für marine Gebiete wird, aufgrund der Annahme, dass Fisch einen identischen kalorischen Wert wie Fleisch hat, der gleiche Wert wie für Weidefläche verwendet, Inlandwasserfläche wird mit der von mariner Wasserfläche gleichgesetzt.

Im Ergebnis wird für den Pro-Kopf-Verbrauch der Menschen unter Berücksichtigung der verbrauchten Rohstoffe ein Konsum-EF ermittelt und für Nationen mit der Anzahl der Einwohner multipliziert, um den EF eines Landes mit dessen ökologischer Kapazität zu vergleichen. Diese ist dann unter Berücksichtigung der konkreten zur Verfügung stehenden Flächen und deren Eignung bestimmbar. Import und Export werden durch den Konsum-EF berücksichtigt, indem der EF von Importen mit dem Produktions-EF addiert und der EF von Exporten davon subtrahiert wird. Für Produkte ist diese Methodik ebenfalls anwendbar und wird beispielsweise durch Mark A. J. Huijbregts, Stefanie Hellweg, Rolf Frischknecht, Konrad Hungerbühler und A. Jan Hendriks für Produktgruppen modifiziert angewendet (vgl. Huijbregts et al. 2008; siehe Abb. 1).

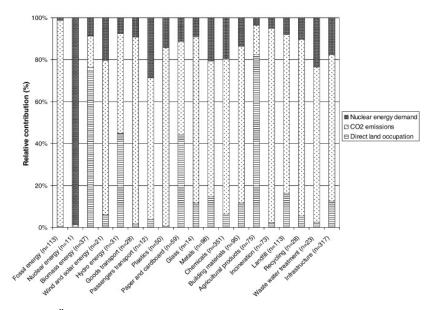


Abb. 1: Ökologischer Fußabdruck (links) und dessen Zusammensetzung (rechts) für unterschiedliche Produktgruppen

Quelle: nach Huijbregts et al. 2008

Der EF für das jeweilige Produkt setzt sich danach aus einem direkten Anteil, einem Energie bzw. CO<sub>2</sub> bezogenen Anteil und einem der nuklearen Energiegewinnung zugerechneten Anteil der Landnutzung zusammen. Zudem werden produktspezifische Erträge eingesetzt, die eine bessere Auflösung erlauben als der weltweite Durchschnitt.

Jeder Fußabdruck berücksichtigt einen bestimmten Aspekt der Einwirkungen des Menschen auf die Umwelt, jedoch können damit nicht die vielfältigen Schadensursachen für Ökosysteme abgebildet werden.

## 2.4 Ökobilanzierung

Wesentlich umfangreicher gibt die Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment, LCA) die Wirkungen auf die Umwelt wieder, indem neben Luftemissionen auch andere Schadstoffe bilanziert werden, die in die Umwelt entlassen werden. CO<sub>2</sub>-Emissionen, Wasser- und Landbedarf werden darin ebenso einbezogen wie die Wirkung anderer Schadstoffe auf Umwelt und Mensch. Die Ökobilanzierung ist nach DIN EN ISO 14040 "Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen" in vier grundlegende Phasen eingeteilt:

- (1) Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens;
- (2) Sachbilanzierung;
- (3) Wirkungsabschätzung;
- (4) Auswertung.

In Phase (1) wird der grundlegende Gegenstand festgelegt, der zunächst die Art der Ökobilanz bestimmt. Eine Ökobilanz kann die Umweltaspekte eines einzelnen Produktes beschreiben, mit dem Ziel, die wichtigsten Einflussgrößen festzustellen (deskriptiv). Es kann ein komparativer Ansatz verfolgt werden, der verschiedene Produkte miteinander vergleicht, und es kann ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt werden, der wirtschaftliche, technische und soziale Aspekte berücksichtigt. Darüber hinaus wird in Phase (1) das System mit seinen Systemgrenzen und eine funktionelle Einheit (z.B. 1 Tonne Packstoff oder eine bestimmte Anzahl Produkte) festgelegt. Ein System kann flexibel gestaltet werden und sich von der Rohstoffgewinnung bis zum produzierten Produkt Packstoff (z.B. Kunststoffgranulat) erstrecken (auch als "Cradle to Gate" LCA bezeichnet) oder bis zum Lebensende betrachtet werden ("Cradle to Grave" bei Verwertung, "Cradle to Cradle" bei Wiederbenutzung oder Recycling). Bei Prozessanalysen ist auch die Betrachtung eines Teilsystems einzeln (Gate to Gate) möglich.

In Phase (2) werden inventurmäßig in einer Sachbilanz (Life Cycle Inventory, LCI) für alle zugehörigen Teilsysteme die Elementarflüsse und Energieflüsse erfasst und generierte Schadstoffe festgestellt. Alle Daten werden auf die funktionelle Einheit bezogen, was die Ökobilanzierung von anderen Methoden abhebt und einen klaren Bezug schafft. In dieser Phase ist auch die Betrachtung von Koppelprodukten näher zu beschreiben, bei denen entweder mehrere Inputs in einer Stoffmischung zu behandeln sind oder mehrere Outputs mit unterschiedlichen Nutzungsmethoden vorliegen. Dazu werden Allokationsverfahren verwendet, die möglichst anhand physikalischer Größen eine Unterscheidung zulassen (z.B. Massenanteile). Die Daten werden gemessen bzw. auf der Basis allgemein anerkannter Richtwerte und Faktoren berechnet oder abgeschätzt. Für Abschätzungen sind entsprechende Grundlagen zu schildern. Für jedes Teilsystem, was nicht mit betrachtet wird, sind Abschneidekriterien festzulegen und in der Bilanz offenzulegen (z.B. ein Elementarstrom hat einen Masseanteil von weniger als 5% am gesamten Stoffstrom etc.). In Prozessen entstehende Nebenprodukte oder Nutzen werden als Gutschrift erfasst (z.B. Rezyklate als Gutschrift in Höhe des Aufwandes für ihre Herstellung in den entsprechenden Kategorien oder bei Verbrennung energetischer Wert als Gutschrift in der Energiebilanz).

In Phase (3) werden die kumulierten Daten Wirkungskategorien bzw. -indikatoren zugeordnet, die durch die Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) international in einer Empfehlung vereinheitlicht werden (siehe Tab. 3).

Es sind jedoch auch weitere Wirkungskategorien fallspezifisch wählbar, und es sind nach DIN EN ISO 14040 nicht notwendigerweise alle Wirkungskategorien zu ermitteln. Häufig mit ermittelt und mit angegeben wird der kumulierte Energieaufwand (KEA) nach VDI 4600 "Kumulierter Energieaufwand (KEA) – Begriffe, Berechnungsmethoden". In jede dieser Kriterien gehen verschiedene Schadstoffe ein und sind in Ihrer Wirkintensität zu gewichten. Die Gewichtung und Bestimmung eines einheitlichen Wertes auf Basis von Ersatzgrößen (Äquivalenten) wird als Aggregation bezeichnet. Häufig werden Teilaggregationen verwendet und auf eine Zusammenführung bzw. einen Vergleich der Wirkungskategorien (Vollaggregation) verzichtet, da eine Abwägung des quantitativen Umweltschadens Grenz- und Schwellenwerten mit bestimmten Auswirkungsintensitäten gegenübergestellt werden müssen. Ein Beispiel für die Teilaggregation sind Schwefeldioxidäquivalente für die Wirkungskategorie Versauerung, in welche unter anderem Chlorwasserstoff (HCl) mit 0,88, Stickstoffoxide (NO<sub>x</sub>) mit 0,7, Ammoniak (NH<sub>3</sub>) mit 1,88 und Fluorwasserstoffsäure (HF) mit 1,6 als Äguivalenzfaktoren umgerechnet werden, oder CO<sub>2</sub>-Äquivalente für den Treibhauseffekt, in den eine Vielzahl Verbindungen einfließen kann. Eine derartige Einschätzung wird in der Vollaggregation vorgenommen, die allerdings nach DIN EN ISO 14040 nur veröffentlicht werden darf, wenn auch Einzelkategorien kommuniziert und diskutiert werden. Die bisherigen Ansätze zur Vollaggregation haben ähnliche Gewichtungssysteme und können in schadensbasierte (z.B. ReCiPe, Eco-Indicator 99, EDIP2003, Impact 2002+, deutscher Punkteansatz des Umweltbundesamtes, vgl. Schmitz/Paulini 1999), politisch zielorientierte (z.B. UBP06) und monetarisierte (z.B. EPS) Ansätze unterschieden werden. Die Gewichtung darf durch ihren Einfluss auf die Entscheidungsfindung nicht durch Auftraggeber, sondern muss durch neutrale Parteien festgelegt werden. Ein weiterer Kontrollmechanismus, der die Neutra-

Tab. 3: Wirkungskategorien

Input-bezogene Kategorien	Output-bezogene Kategorien
Abiotische Ressourcen	Treibhauseffekt/Klimawandel
(Wasser, fossile Rohstoffe,	(CO <sub>2</sub> -Fußabdruck)
Mineralien)	Abbau stratosphärischen Ozons
Biotische Ressourcen	(meist in R11-Äquivalenten; Abbau des Ozons in der Stratosphäre vorrangig durch
(Agrargüter, Holz etc.)	Halogenradikale)
Naturraumbeanspruchung	Humantoxizität
	(Gesundheitsgefährdende Wirkung für Menschen, in verschiedene Kategorien unterteilbar z.B. respirative Effekte durch Feinstaub oder kanzerogene Wirkung durch Chemikalien, nach harmonisiertem Konsens-Modell USEtox (vgl. Hausschild et al. 2008) in comparative toxic units, CTUh)
	Ökotoxizität
	(Schadstoffe die Wachstum und Gesundheit von Pflanzen und Tieren beeinträchtigen nach USEtox in comparative toxic units, CTUe)
	Bildung von Photooxidantien (Sommersmog)
	(meist in Ethen-Äquivalenten, Bildung von bodennahen Spurengasen wie z.B. Ozon, die pflanzliche und tierische Gewebe schädigen und die Photosynthese hemmen)
	Versauerung
	(meist in SO2-Äquivalenten; Senkung des ph-Wertes terrestrisch: durch atmosphärischen Säureeintrag wie sauren Regen oder Ammoniumeintrag im Rahmen der Düngung, aquatisch: durch Aufnahme von CO2 in Ozeanen)
	Eutrophierung
	(meist in PO4³-Äquivalenten, Übersteigerter Nährstoffeintrag inkl. Sauerstoffzehrung und Wärm-eleitung durch die eine biotische Überaktivität von Algen etc. und damit ein Ungleichgewicht im Ökosystem erzeugt wird)
	Geruch, Lärm, Strahlung, Unfälle,

Quelle: nach de Haes et al. 1999

lität und Richtigkeit einer Ökobilanz sichern soll, ist eine unabhängige Begutachtung durch anerkannte wissenschaftliche Autoritäten, die als Phase (5) den vier Phasen der Ökobilanzierung angeschlossen werden kann.

Vergleichbar schwierig wie die Gewichtung ist die Einschätzung Input bezogener Kategorien, die theoretisch den jeweiligen Reserven bzw. Ökosystemleistungen gegenübergestellt werden müssen. Die Reserven bzw. Ökosystemleistungen sind jedoch nicht als gesicherte Werte zu betrachten, sondern werden mit teilweise beträchtlicher Unsicherheit abgeschätzt. Ökosystemleistungen sind von einer Vielzahl Bedingungen abhängig und unterliegen Schwankungen, die zudem mit Output-bezogenen Wirkungskategorien interagieren bzw. durch die entsprechenden Emissionen beeinträchtigt werden. In diesem Zusammenhang wurde 2010 ein Ansatz für die systematische Erfassung und ökonomische Bewertung der Ökosystemleistungen vorgestellt, der unter der Bezeichnung "Die Ökonomie von Ökosystemen und der Biodiversität" (TEEB) erste Beispiele für den monetären Wert von Ökosystemleistungen oder Vermeidungsleistungen gibt. Leistungen wie z.B. der Ertrag von Früchten durch die Bestäubungsleistung von Insekten werden als für den Menschen relevante Ökosystemleistung identifiziert. Ihr Wert wird durch den Marktwert der Agrargüter eingeschätzt. Für die Bestäubungsleistung der Insekten wird ein Wert in Höhe von 153 Mrd. US Dollar jährlich errechnet (vgl. Gallai et al. 2009). Auf dieser Basis kann eine Beeinträchtigung der Aktivität bzw. der Anzahl bestäubender Insekten (z.B. durch Pestizide) als Schaden monetär sicht- und vergleichbar gemacht werden. Auf Produktebene entwickelt sich auf Basis von cradle-to-gate Ökobilanzen mit der Environmental Product Declaration (EPD) eine produktspezifische Umwelterklärung. Durch das Unternehmen BASF wird aufsetzend auf der Ökobilanz ein ökonomischer Anteil hinzugefügt. Die Kosten für die Produktion der Produkte werden einem vollaggregierten Umweltindikator gegenübergestellt und beschreiben die Ökoeffizienz eines Systems aus Sicht der Produktion, ohne allerdings dabei die Kosten ins Verhältnis zu beispielsweise Vermeidungsleistungen o.ä. zu setzen.

Die Durchführung, Detaillierung und Ausrichtung sowie die Festlegung der Systemgrenzen sind nach DIN EN ISO 14040 mit einer Reihe von Freiheitsgraden möglich, die zu grundlegenden Schwankungspotenzialen führen. Die wichtigsten Kritikpunkte an der aktuelle Methodik und der Art deren Verwendung sind u.a. (vgl. Pawelzik et al. 2013):

Unsicherheit der Datenbasis (Nutzung von Durchschnittswerten aus Datenbanken, Alter von Daten, Messunsicherheit, Verfügbarkeit);

- indirekte Landnutzungsänderung wird nicht in der Bilanzierung berücksichtigt (z.B. Landumbruch, der nicht direkt mit der genutzten Fläche zu tun hat, sondern an anderer Stelle durch Verdrängung entsteht; gegebenenfalls Intensivierung der Landnutzung durch Düngemittel und Pestizide, um Erträge zu erhöhen);
- Degradation des Bodens (z.B. Erosion) wird nicht in ihren Effekten in der Bilanzierung berücksichtigt (z.B. chemische Degradation erfordert zusätzlichen Einsatz von Düngemitteln);
- die Nutzung von Wasser in der Produktion wird nur in Form von Wasserverschmutzungen berücksichtigt, nicht aber im Sinne der Beanspruchung der Wasserressourcen und ihrer Folgen bewertet;
- Allokation beim Auftreten von Nebenprodukten ist komplex und kann das Ergebnis signifikant beeinträchtigen;
- Gewichtungsfaktoren bei Aggregation werden teilweise unterschiedlich gesetzt und können zu gegensätzlichen Ergebnissen führen;
- Ressourcenknappheit wird nur bei Aggregation in einem bestimmten Ansatz berücksichtigt;
- die Herstellung und das Betriebsverhalten von Maschinen- und Anlagentechnik werden in der Regel nicht mit betrachtet;
- Effekte der globalen Marktsituation werden nicht einbezogen (Verlagerung von Produktionsstandorten bei Mehrverwendung bestimmter Rohstoffe und damit verbundene Veränderung der Produktionsbedingungen);
- temporäre Gültigkeit der Ökobilanz aufgrund ständiger Dynamik von Technologien und Wertschöpfungsketten.

Die Ökobilanz ist mit ihren Vor- und Nachteilen die am detailliertesten ausgearbeitete Methode spezifische Produkte und die davon ausgehenden Wirkungen auf die Umwelt einzuschätzen. Sie kann jedoch nicht zur Erarbeitung generalisierter Aussagen herangezogen werden. Dennoch ist der Bilanzansatz umfassend und fördert das Umdenken hin zu Lebenszyklen-Betrachtung und der Berücksichtigung von Kreislauffähigkeit.

Soziale Aspekte sowie die Art und Weise, wie Produktionsstandorte betrieben werden, können auf Unternehmensebene einbezogen werden. Unternehmen beginnen zunehmend, ihre Produktionsbedingungen und Einwirkung auf die Umwelt als Marketingwerkzeug zu verstehen und werden immer mehr auch durch Regulierungen gezwungen, diese offen zu legen und zu aktualisieren bzw. verbessern. Hierzu ist die Corporate Social Responsibility (CSR) ein Rahmenwerk, in dem sowohl Unternehmensstruktur, soziale, ökologische als auch ökonomische Aspekte bezogen auf eine Unternehmen und

seine Produktionsstandorte festgehalten und kommuniziert werden. Derartige Umwelterklärungen bilanzieren ebenfalls Emissionen und erfassen Daten zur Stoffnutzung der Betriebe und seines Personals sowie die Interaktion des Unternehmens mit den Ökosystemen seiner Standorte. Um derartige Anforderungen zu erfüllen, ist die Einführung eines Umweltmanagementsystems in den Unternehmen notwendig. Die Standardisierung und Zertifizierung des Inhaltes und der Anforderungen an eine Umwelterklärung sind bislang nicht einheitlich und werden durch verschiedene Rahmeninitiativen wie den UN Global Compact, die DIN EN ISO 14001 oder das Eco-Management and Audit Scheme (vgl. UGA 2012) geregelt. Diese Rahmenwerke fordern eine ständige, prüfbare Verbesserung der ökologischen Indikatoren. Ein weiterer sehr detaillierter und anspruchsvoller Berichterstattungsrahmen bzw. Standard wird durch sogenannte "Sustainability Reporting Guidelines" (vgl. GRI 2013) für die CSR-Erklärung vorgestellt.

## 3 Nachhaltigkeit am Beispiel Verpackung

Die Verpackung hat, aufgrund der ausgeprägten räumlichen Trennung von Produktion bzw. ihren arbeitsteiligen spezialisierten Schritten innerhalb von Wertschöpfungsketten und dem Konsum, zentrale Bedeutung für den globalen Handel erlangt. Auch unter den Entwicklungstendenzen der Weltbevölkerung, mit nach wie vor hohem Bevölkerungswachstum sowie zunehmender Urbanisierung ist die Verpackung das Schlüsselwerkzeug, die Versorgungssicherheit durch Vorratswirtschaft und die dazu notwendige ausgeprägte zeitliche Trennung zwischen Produktion und Konsumtion zu gewährleisten, gleichzeitig aber die Verluste durch Überbeanspruchung, Verderb oder gar Austritt von Gefahrenstoffen zu verhindern (vgl. Bleisch et al. 2011). Durch zunehmende Leistungsfähigkeit der Verpackungen wird eine Anpassung der Erzeugnisdistribution an demographische Entwicklungen wie beispielsweise die Verringerung der Haushaltsgrößen in Industriestaaten durch enger gefächerte Portionierungen ermöglicht.

Dennoch ist auch die Verwendung von Ressourcen für die Herstellung von Packmitteln nicht vernachlässigbar, sondern kann zur Verschärfung der Spannungen bei der Nutzung der Ressourcen beitragen. Zudem nimmt die Verpackung durch ihre Wirkung auf die Gestaltung von Wertschöpfungsketten indirekten Einfluss auf die Ressourcennutzung. Anfängliche Fehldimensionierungen von Verpackungen, eine zunächst noch nicht ausgeprägte Orientierung auf die Minimierung des eingesetzten Packmittels sowie die fehlende Verantwortlichkeit für Entsorgung und umweltorientierte Regulie-

rung führten zwischenzeitlich zur Verringerung der Akzeptanz bis hin zu einem Abfall-Image der Verpackung. Deutschland reagiert 1991 beispielgebend mit der Einführung der Verpackungsverordnung und leitet ein Umdenken im Umgang mit Verpackungen ein, die im Grunde ihre Produkte und die darin investierten Ressourcen schützt und seither zusätzlich selbst im Hinblick auf Ressourcen optimiert wird. Die Verpackungsverordnung nimmt die Hersteller von Konsumgütern in Bezug auf die Strategie der Verwertung nach dem Verbrauch in die Pflicht, was eine Verringerung der Packmittelmenge durch Minimierung des Materialeinsatzes zur Folge hat. Auf dieser Grundlage werden in Deutschland flächendeckend Rücknahme- oder Entsorgungssysteme in Verantwortung der Industrie eingerichtet. Ähnliche Systeme werden in Nachbarländern wie Österreich, den Niederlanden, Belgien eingeführt und münden in der Europäischen Richtlinie 94/62/EG über Verpackungen und Verpackungsabfälle. 1994 tritt als Zusatz zur Verpackungsverordnung das Kreislaufwirtschafts und Abfallgesetz (KrW/AbfG) in Kraft. Diese regulatorischen Schritte bewirken die Integration der Verwertung in die Entwicklung von Verpackungen und Verpackungsmaschinen und eine Ausrichtung der Verpackungstechnik auf effizienten Ressourceneinsatz. Weltweit sind jedoch die Regularien nicht auf vergleichbarem Stand. Es sind regional wesentliche Unterschiede in Bezug auf den Umgang mit Verpackungen nach Gebrauch der Produkte festzustellen, was durch andere gesellschaftliche Situationen (flächendeckende Armut, geringere Bildung) bedingt ist. Die Verpackung ist aber nicht mehr nur ein wichtiges Bindeglied zwischen Produktion und Verbraucher (vgl. Röhrig et al. 2010), sondern entwickelt sich im internationalen Wettbewerb vom notwendigen Übel zum Leistungsträger. Verpackungsmaterialien sind in modernen Verbundstrukturen Hochbarriereträger, teilweise aktiver Atmosphärenregulator, Schutz gegen mechanische Beanspruchungen bei minimalem Gewicht – also Leichtbauwerkstoff - Entnahme- und Wiederverschlussgarant und gleichzeitig dafür verantwortlich, möglichst geringe Ressourcen zu beanspruchen sowie die beanspruchten Ressourcen verwertbar zu halten.

Die Verpackung wird darüber hinaus im globalen Wettbewerb zu einem Instrument der Kommunikation und Vermarktung von Produkten, besonders bei Verkaufsverpackungen, die Einfluss auf den Konsumenten ausüben können (vgl. EHI 2008; FFI 2011). Nach der Association of European Cartonboard and Carton Manufacturers werden Verpackungen in der Bevölkerung nach Internet, Fernsehen und Radio als viertstärkstes Kommunikationsmedium wahrgenommen (vgl. PC/FFI 2012). Neben den Verkaufsargumenten am Point of Sale (PoS), wie beispielsweise Differenzierung oder Marken-

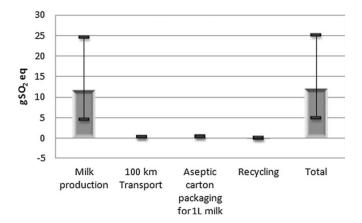
design, die im Markt inzwischen entscheidende Größen darstellen, und den etablierten Informationen zu Packungsinhalten, lassen sich durch die Verpackung auch Informationen zur Art des Packmittels, dessen Herkunft, seiner Zusammensetzung und damit auch zu den beanspruchten Ressourcen kommunizieren. Verbraucher sind vor allem in Industrieländern, aber auch in Regionen, in denen die Umwelt in kritischem Maße belastet ist, zunehmend umweltbewusst und durchaus bereit, höhere Preise zu zahlen, wenn Materialien eingesetzt werden, die recyclingfähig oder anderweitig umweltfreundlich sind (vgl. GfK 2010). Die Forderung nach minimalem Materialeinsatz bleibt erhalten, aber die Akzeptanz gegenüber Verpackungsmaterialien ist im Fall von naturfaserbasierten Materialien am höchsten (vgl. FFI 2011; GfK 2010). Der Trend zur Nutzung nachhaltiger Verpackungslösungen ist eine kontinuierlich zunehmende Anforderung an die Verpackungsbranche und beschreibt einen weiteren Wandel, der bei dem zur Disposition stehenden Stoffvolumen der Branche weitere Innovationen abverlangt. Der Gesamtumsatz der Verpackungsbranche betrug 2006 ca. 527 Mrd. Dollar, davon wurden 500 Mrd. durch Verpackungsmaterialien und 27 Mrd. durch Verpackungsmaschinen umgesetzt (vgl. Röhrig et al. 2010). Die Branche wächst seit 2000 jährlich kontinuierlich um ca. 4,2%. Bereits an diesen Zahlen wird die Bedeutung des Packstoffes deutlich, der inzwischen besonders bei der Primärverpackung zu großen Teilen durch petrochemisch synthetisierte Kunststoffe bestimmt wird. Die Umstellung der Verpackungsherstellung auf nachwachsende Rohstoffe, die zunächst in Nutzungskaskaden verwendet und anschließend zumindest verwertet oder im Idealfall direkt in einen Kreislauf intergiert werden können, ist als Notwendigkeit nicht nur durch den Verbraucher in Industrieländern akzeptiert und gewünscht, sondern wird durch die Politik zunehmend gefördert (vgl. BMELV 2013; EC 2012; EU 2011; OECD 2009) und kann in der Verpackungsindustrie dadurch als durchschlagendes Marketingargument genutzt werden. Dieser Wertewandel eröffnet die Chance, ökologische Gesichtspunkte mit den sonst wenig steuerbaren Marktdynamiken zu kombinieren.

Dennoch besteht in einer zunehmend umweltbewussteren Gesellschaft das Risiko einer Desensibilisierung, wenn die umweltbezogenen Leistungen und Wirkungen der Verpackung nicht vollständig und transparent kommuniziert werden. Eine Kommunikation durch die Verpackung am Verkaufsort ist bei der Komplexität der Wirkungen und der zu vermittelnden Informationsmenge bislang nicht möglich. Eine zusätzliche Kommunikation anhand von Ökobilanzen findet dagegen breitflächig Eingang in den Verpackungsmarkt und kann mit unterschiedlichen Strategien genutzt werden.

Deskriptive Ökobilanzen zeigen die wesentlichen Einflussgrößen in konkreten Wertschöpfungsketten auf und lassen die Beurteilung von Sensitivitäten zu. Am Beispiel von Milchverpackungen im spanischen Markt konnte gezeigt werden, dass die Produktion der Milch einen deutlich größeren Einfluss auf die Wirkungskategorien globales Erwärmungspotenzial und Versauerungspotenzial hat als ein 100 km langer Transport im 3,5 Tonnen LKW oder die Herstellung des Packmittels (vgl. Meneses et al. 2012; siehe Abb. 2). Gleichzeitig wird festgestellt, dass die Daten bei der Milchproduktion abhängig von den konkreten Bedingungen im Produktionsweg wesentliche Unterschiede in beiden Wirkungskategorien bewirken können. Der grundlegend höhere Einfluss bleibt jedoch erhalten.

Für die Verpackung bedeutet dies, dass die Schutzfunktion des Packmittels im Vordergrund steht, da ein Verlust des Gutes einen höheren Ressourcenverlust erzeugt als ein Mehreinsatz von Packmittel. Diese Erkenntnis trifft beispielsweise für die Verpackung von Tierprodukten (Fleisch, Milchprodukte etc.) zu, aber auch für Produkte höherer Wertschöpfung (z.B. Elektronikartikel), wie auch eine Studie von Helén Williams und Fredrik Wikström zeigt (vgl. Williams/Wikström 2011). Bei Produkten, die mit geringerem Aufwand produziert werden (pflanzliche Produkte wie z.B. Ketchup), haben hingegen der Einsatz des Packmittels und die verwendete Menge vergleichbaren Einfluss, und die Minimierung der Stoffmenge kann einen signifikanten Beitrag zur Verringerung ökologischen Indikatoren leisten (vgl. Williams/Wikström 2011). Sensitivitätenanalysen können auch die Wirkungen bei der Wahl der Transportlösung aufdecken. Bei einem Transport mit gleicher Entfernung wurde etwa am Beispiel von Klappschalen für unterschiedliche Kunststoffe gleichermaßen gezeigt, dass die Transportlösung einen wesentlichen Anteil haben kann und dass mit zunehmender Menge je Transportmittel der CO<sub>2</sub>-Fussabdruck signifikant abnimmt (vgl. Madival et al. 2009). Bei einem 28 Tonnen-LKW wird der CO<sub>2</sub>-Ausstoß danach bereits ca. 30% gegenüber einem 16 Tonnen LKW reduziert, und der Transport mittels Güterzügen verringert den Ausstoß nochmals auf einen Bruchteil.

Häufig werden jedoch auch komparative Studien verfolgt. Am Beispiel von Kunststoffen und dem Vergleich mit Biokunststoffen wird teilweise im Rahmen von Cradle-to-gate-Bilanzen nur die Materialherstellung bis zum Granulat betrachtet. Eine vollständige Verbesserung in allen Wirkungskategorien wird durch Biokunststoffe im Vergleich zu konventionellen Kunststoffen dabei meist nicht erzielt. Bei der Herstellung von Granulaten erzielt nach der zusammenfassenden Studie das in der Verpackungstechnik am häu-



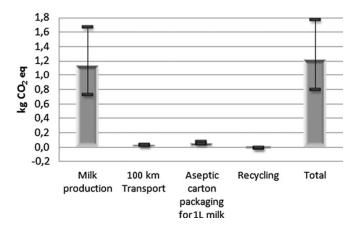


Abb. 2: Anteile von Milchherstellung, Transport, Verpackung und Recycling am CO<sub>2</sub>-Ausstoß (oben) und dem Versauerungspotenzial (unten) am Beispiel der Milchproduktion in Spanien

Ouelle: Meneses et al. 2012

figsten eingesetzte Biopolymer PLA<sup>1</sup> ohne Berücksichtigung von Additiven und Blendingpartnern nur in wenigen Wirkungskategorien gegenüber ausgewählten petrochemischen Kunststoffen Vorteile (vgl. Hottle et al. 2013). Leichte Vorteile werden beispielsweise in der Smogbildung und der Human-

<sup>1</sup> Polymilchsäure (Poly Lactic Acid, PLA).

wirkung der Luftemissionen gegenüber der PET-2 und PS-Herstellung gefunden. Beim Treibhauseffekt werden nur gegenüber PS<sup>3</sup> Vorteile erzielt. während PET, PE<sup>4</sup> (HD und LD) sowie PP<sup>5</sup> teilweise deutlich geringere Mengen Treibhausgasemissionen bei ihrer Herstellung verursachen. Die Ergebnisse weisen zwischen verschiedenen Studien meist große Schwankungen auf. Gründe dafür sind die Variation von Systemgrenzen und Annahmen z.B. in der Wahl von Transportmitteln oder dem Energiemix (vgl. (Hottle et al. 2013). Die Aussagen derartiger Cradle-to-Gate Bilanzen sind begrenzt, da die End-of-Life-Optionen nicht einbezogen werden. Dass diese Stufe des Lebenszyklus jedoch entscheidenden Einfluss hat, wurde ebenfalls am Beispiel der Klappschalen gezeigt (vgl. Madival et al. 2009). 100% Recycling ist dabei als überlegenes Verwertungsscenario in den Kategorien Treibhauseffekt und Energieverbrauch bezogen auf 1.000 Schalen dargestellt. Ebenfalls an Klappdeckelschalen wurde gezeigt, dass auch bei Einbeziehung der Verwertungsszenarien Biokunststoffe sowohl ökologische Vorals auch Nachteile gegenüber petrochemischen Kunststoffen aufweisen (vgl. Detzel/Krüger 2006; siehe Abb. 3).

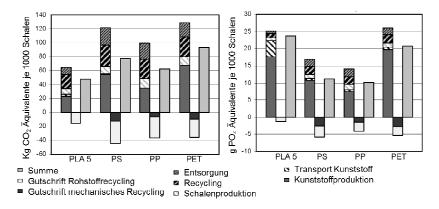


Abb. 3: Bilanzergebnisse am Beispiel von Klappdeckelschalen für unterschiedliche Materialien in den Wirkungskategorien CO<sub>2</sub>
Ausstoß (links) und terrestrischer Eutrophierung (rechts)

Quelle: Detzel/Krüger 2006

<sup>2</sup> Polyethylentherephthalat (PET).

<sup>3</sup> Polystyrol (PS).

<sup>4</sup> Polyethylen (High Density, HD; Low Density, LD).

<sup>5</sup> Polypropylen (PP).

Durch die Betrachtung kompletter Lebenszyklen werden mehr signifikante Einflüsse berücksichtigt, die Unsicherheiten, die durch Annahmen entstehen, nehmen jedoch weiter zu. Ein direkter und generalisierter Vergleich von Packstoffen ist mit Hilfe von Ökobilanzen nicht möglich, auch nicht, wenn Packmittel und Packgut festgelegt sind. Die Wirkungsindikatoren sind unter anderem von der jeweiligen technischen Ausstattung verschiedener Werke oder vom Aussehen der Wertschöpfungskette abhängig, die besonders bei verschiedenen Materialien sehr unterschiedlich gestaltet sein kann. Ein Vergleich von Packstoffen kann nur an einem genau spezifizierten Anwendungsfall unter Zugrundelegung gleichartiger Wertschöpfungsketten und Produktionsbedingungen Ansatzpunkte für die Verbesserung der ökologischen Einflüsse einer Verpackungslösung liefern.

# 4 Wege der Nutzung des Nachhaltigkeitsgedanken

Durch Einbeziehung ökonomischer Aspekte in den Gedanken der Nachhaltigkeit entsteht ein Drei-Säulen-Modell, in dem ökologische, soziale und ökonomische Nachhaltigkeit in ihrem Rang gleichsetzt werden (vgl. DBT 1998), wobei eine Gewichtung zugunsten der Ökologie nahe liegt, denn ohne Ökosystem kann die Menschheit nicht existieren, aber das Ökosystem ohne den Menschen durchaus. Dementsprechend bilden sich unterschiedliche Standpunkte zur Handhabung und Gewichtung der ökologischen Nachhaltigkeit in der Wirtschaft, die von strikter (Erhalt des kompletten Naturkapitals) bis sehr schwacher ökologischer Nachhaltigkeit (Substitution von Naturkapital auch durch Geld-Kapital) stufenweise unterteilt werden können (vgl. Diefenbacher 2001). Nachhaltige Entwicklungen sind durch drei grundlegende strategische Ansätze erreichbar (vgl. Huber 1994):

- Effizienz ist der Ansatz, unbeschränkte Bedürfnisse durch eine Optimierung des Verhältnisses von Aufwand und Nutzen zu erfüllen und setzt das Bewusstsein der ökologischen Problematik voraus.
- Suffizienz impliziert eine Verringerung des Ressourcenverbrauchs durch die Einschränkung der Ressourcenverwendung auf ein geringeres, im Idealfall das minimal notwendige Maß. Im Konsum bedeutet das den Verzicht an bestimmten Stellen (z.B. auf Luxusgüter) und erfordert gegebenenfalls einen Wertewandel, da dieser Verzicht in der Regel an Akzeptanzschwellen stößt (vgl. Carnau 2011).
- Konsistenz bezieht die Beschaffenheit von Stoff- und Energieströmen ein und bewertet ihre Vereinbarkeit mit Naturkreisläufen und der Assimilationsfähigkeit ihrer Emissionen durch Ökosysteme. Im Idealfall

komplementieren sich industrielle und natürliche Stoffströme und führen zu einer dauerhaften industriellen Ökologie (vgl. Carnau 2011).

Im globalen Wettbewerb der Konsumgüter liegt die Entscheidung über den Einsatz von Verpackungslösungen bei den Unternehmen und ist auch durch den hohen Kosteneinfluss der verwendeten Rohstoffe im Vergleich zu deren kurzem Lebenszyklus grundlegend vorrangig ökonomisch geprägt. Eine Einflussnahme kann politisch durch Regulierungen erfolgen oder aus dem Verhalten von Konsumenten und den damit verbundenen Absatzchancen resultieren. Dementsprechend ist vor allem bei Anwendern (Brand-Ownern) die Entwicklung von Verpackungen von einer Vermarktungsstrategie abhängig. Innerhalb dieser Strategie werden Marktanalysen und -studien sowie die erreichbaren oder in Aussicht stehenden Kosten für die Entwicklung und Implementierung einer neuen Verpackung gegenübergestellt und durch eine Risikobewertung eingeschätzt. Eine ökologisch günstigere Verpackungslösung wird also nur in Verbindung mit einem zumindest anhand von Indizien abschätzbaren materiellen Nutzen durchzusetzen sein. Dieser Nutzen kann durch "harte" Kriterien (Umsatzsteigerung, Steigerung von Marktanteilen) oder "weiche" Kriterien (Image, Reputation des Unternehmens) beurteilt werden.

In der Verpackungstechnik haben sich verschiedene Strategien entwickelt, um die ökologische Nachhaltigkeit als Bestandteil des Marketing von Unternehmen, Marke (Brand) oder Produkt und dessen Verpackung zu nutzen. Sie lassen sich nach dem Ort ihres Ansatzes in die Kategorien produktorientierte Strategien, technologieorientierte Strategien und Unternehmensstrukturstrategien unterteilen. Alle drei Ansätze stehen häufig in Interaktion und sind nicht vollständig voneinander entkoppelbar. Die Umstellung oder Neuerschließung von Technologien hat beispielsweise immer eine enge Verbindung zur Unternehmensstruktur, da entsprechendes Know-how erforderlich ist und in Form neuer Abteilungen oder Spezialisten allokiert werden muss.

Produktorientierte Strategien haben die stärkste Wirkung in Richtung des Konsumenten, da sie am Point of Sale (PoS) vermittelt werden können. Dazu gehören Materialreduktion, Materialsubstitution, Funktionsoptimierung, Funktionsintegration, Änderung der Wahrnehmung ("green appeal") und Greenwashing.

 Materialreduktion: Diese Maßnahme ist in den Bereich der Effizienz einzuordnen. Ein Beispiel ist hier die Verringerung der Dicke von Folien bei gleichbleibender Barrierefunktion, die durch ein lineares simultanes Recken der Folie verbessert werden kann und dementsprechend eine Verringerung der Dicke um ca. 50% zulässt (vgl. Langowski/Schönweitz 2006). Eine flächendeckende Anwendung der entsprechenden Folien ist dennoch nicht gelungen, da die Akzeptanz des Verbrauchers die Etablierung am Markt vor allem für Markenprodukte einen Wettbewerbsvorteil für Beutel mit dickeren Folien darstellt. Der Verbraucher ist nicht überzeugt von der Funktion der dünneren Folie bei Kontakt mit dieser.

- Materialsubstitution: Gemeint ist der Ersatz eines Packstoffes durch einen vermeintlich ökologisch günstigeren Packstoff, wie beispielsweise im Fall von "Drop-in" Biokunststoffen, deren Herstellung auf der Verwendung nachwachsender Rohstoffe basiert. Dabei ist zu beachten, dass eine generelle Präferenz von Packstoffen nicht festgelegt werden kann, sondern in jedem Anwendungsfall unterschiedliche Präferenzen entstehen können.
- Funktionsoptimierung: Sie verbindet beide vorher genannten Aspekte, indem die notwendigen Funktionen des Packstoffes innerhalb eines Verbundmaterials jeweils der Stoffkomponente zugeordnet werden, die diese am effizientesten erfüllt. Es entstehen in der Regel Mehrstoffsysteme, die den grundlegenden Ressourceneinsatz minimieren, jedoch die Verwertungsoptionen einschränken können. Ein Beispiel sind Verbundfolien, in denen dünne Sperrschichten aus EVOH oder anderen hochbarrierefähigen Materialien die Permeation von Gasen (z.B. O2) stark behindern und damit die notwendige Dicke der Folie minimieren.
- Funktionsintegration: Diese Methode führt zur Verringerung von Verpackungskomponenten, in dem eine die Funktionen der anderen mit übernimmt und ist demnach ein Suffizienzansatz. Ein Beispiel ist die Gruppierung von Primärverpackungen mit Hilfe von Verbindungsstegen, die eine Sammelverpackung ersetzen kann.
- Änderung der Wahrnehmung durch "Green-Appeal": Die Verpackung kann entweder durch ihr Design tatsächliche oder nur fiktive ökologische Vorteile vermitteln bzw. beim Verbraucher assoziieren. Durch die Aufrauhung der Oberfläche von Kunststoffbechern für Joghurt wird beispielsweise der Eindruck vermittelt, dass der Becher aus Karton besteht oder zumindest einen Kartonmantel trägt. Diese Strategie birgt die Gefahr der Desensibilisierung des Konsumenten und der Resignation, ökologische Werte tatsächlich ausmachen zu können.
- Greenwashing: Im Gegensatz zum Green Appeal werden hier nicht Assoziation erzeugt, sondern übersteigert offensiv ökologische Vorteile der

Verpackung kommuniziert, ohne gleichzeitige Nachteile, Rahmenbedingungen bzw. eingesetzte Methoden offen zu legen. Diese Strategie ist geprägt von Intransparenz und führt zu einer Reduktion des Vertrauens der Verbraucher gegenüber ökologischen Gesichtspunkten.

Der Kommunikation des ökologischen Mehrwertes kommt demnach eine wichtige Rolle zu, um differenzierende Fakten zu vermitteln. Kaufentscheidungen werden zu 70% am PoS getroffen (vgl. GfK 2009), und die Verpackung ist einer der stärksten Kommunikationskanäle (vgl. FFI 2012). Die Wirkung der Verpackung auf die Kaufentscheidung am PoS steht nur wenig dem Preis nach und ist in der Erinnerung, die für den wiederkehrenden Kauf entscheidend ist, höher eingestuft als der Preis (vgl. FFI 2012). Die Kommunikation der Nachhaltigkeit ist inzwischen ein wichtiger Teil des Markenkonzeptes, welches an der Erinnerung und Identifikation an bzw. mit Produkten ansetzt. Die Vermittlung von ökologischen Werten ist vor allem durch Kennzeichnung mittels "Öko-Labels" effektiv. Dabei sind Eigenlabels einzelner Unternehmen oder von Unternehmensgruppierungen sowie Fremdlabels, die durch neutrale Einrichtungen vergeben werden, zu unterscheiden. Dementsprechend entsteht eine Vielzahl von Kennzeichnungen (z.B. EU EcoLabel, BIO Siegel, Keimling, Blauer Engel etc.), denen nur teilweise standardisierte Prüfmethoden und zugehörige Zertifikate zugrunde liegen und die alle gemeinsam haben, dass der Verbraucher sie nicht kennt bzw. keine Kenntnis über Prüfkriterien und -methoden hat, ihnen nicht vertraut oder sich nicht die Zeit nimmt, diese am PoS zu bewerten. Zudem sind unter der Abkürzung Öko die Eigenschaften von Produkt und dessen Verpackung gemischt. Ein einheitliches und ausreichend umfassend informierendes Kennzeichen sowie eine entsprechende Methode, die direkt auf die Nachhaltigkeit von Verpackungslösungen abzielt und informiert, ist bislang nicht verfügbar. Entscheidend für die Akzeptanz und Kenntnis der Verbraucher ist u.a. die Bekanntheit, neutrale Vergabe, Standardisierung, Prozessorientierung, Freiwilligkeit und Transparenz zu den Kriterien der Vergabe und Kontrolle sowie die Einbeziehung von hinreichend umfassenden Informationen zu Umweltwirkungen (vgl. Eberle 2001). Eine andere Methode der Kommunikation von Nachhaltigkeitskriterien für Produkte ist die "Environmental Product Declaration" (EPD), die nicht am PoS wirken kann, aber durch Markenbildung indirekt am PoS vertreten ist. Der EPD liegt eine Ökobilanz zugrunde und es entsteht eine transparente Kommunikation. Der Entwurf von Produkten und ihren Verpackungen kann bereits im Entwurfsprozess berücksichtigt werden. In einem solchen integrierten Entwurfsprozess (ökologisches Produktdesign nach ISO 14062 "Umweltmanagement – Integration von Umweltaspekten in Produktdesign und -entwicklung") steht dann nicht das "Green Appeal" im Vordergrund, sondern die Berücksichtigung umweltrelevanter Aspekte (z.B. Materialwahl, Lebenszyklus und Herstellungsoptionen) schon in der frühen Entwurfsphase.

Technologieorientierte Strategien sind nicht vordergründig durch den Konsumenten wahrnehmbar und müssen zusätzlich kommuniziert werden (z.B. über Medien), können aber einen signifikanten Einfluss auf die Ökobilanz haben und sich in einer EPD auswirken. Nach dem Wirkort können innerbetriebliche oder außerbetriebliche Maßnahmen unterschieden werden. Innerbetriebliche Maßnahmen sind Weiterentwicklungen an bzw. Substitutionen von Verarbeitungstechnologien und -maschinen, die innerhalb des jeweiligen Unternehmens direkt umgesetzt werden, um eine effizientere Produktion zu ermöglichen. Änderungen am Produkt sind dabei nicht zwingend erforderlich. Beispielsweise kann bei Einsatz von Hochfrequenzsiegelverfahren gegenüber Wärmekontaktsiegelverfahren unter Umständen ein Großteil an Energie für einen Siegelvorgang eingespart werden. Ein anderes Beispiel ist der Einsatz eines zonalen Heizelementes zum Vorwärmen von Kunststoffen (vgl. Claus et al. 2015). Eine gezielt intensivere Vorwärmung in geometrischen Bereichen, in denen geringere Dehnungen im Thermoformprozess erzeugt werden, lässt eine gleichmäßiger Verteilung der Wanddicke zu und eröffnet die Möglichkeit, das Material effizienter einzusetzen. Außerbetriebliche Maßnahmen beziehen die vorgelagerten Stationen der Wertschöpfungskette mit ein und es wird auf Anbieter eingewirkt oder ein Anbieterwechsel vollzogen, um bestimmte technologische Merkmale am Produkt zu verankern.

Unternehmensstrukturstrategien sind geprägt durch die Entscheidungen von Unternehmen, an ihrer Ausstattung, Organisationsstruktur oder ihrem wettbewerblichen Verhalten Änderungen vorzunehmen, die dann entweder den Einfluss des Produktionsstandortes auf die Umwelt verringern oder die Ökobilanz ihrer Produkte verbessern bzw. im Idealfall beides. Die möglichen Maßnahmen können in drei Kategorien eingeteilt werden:

– Änderungen der Produktionsorganisation können auf die Ökobilanz der Produkte wesentlichen Einfluss nehmen, da Transportvorgänge und deren Anordnung großen Einfluss auf die Bilanzergebnisse von Verpackungen haben können (vgl. BMU 2007). Eine Verkürzung von Transportwegen innerhalb der Wertschöpfungskette kann beispielsweise durch die Anordnung von Produktionsschritten in regionaler Nähe oder die Funk-

- tionsintegration erreicht werden. Durch den Einsatz von Form-Füll- und Verschließmaschinen an Stelle der Herstellung geformter Packmittel bei Zulieferern und einem Transport dieser zum Markeneigner werden beispielsweise Transportwege eingespart.
- Investitionsmaßnahmen für zusätzliche Ausstattungen ergänzen die Produktion und unterstützen bei der Bereitstellung wichtiger Medien. Ein Beispiel kann hier sein, dass Unternehmen zur Stützung ihres Energieverbrauches eigene Kapazitäten erneuerbarer Energien installieren oder bei hohem Wasserbedarf direkt Wasseraufbereitungsanlagen betreiben.
- Die Organisation von Kompensationen ist eine weitere Methode, umweltbezogene Aspekte zu adressieren, kann jedoch häufig keinen adäquaten Ersatz für bereits erfolgte Beeinträchtigungen der Umwelt Kompensation leisten können. Beispielsweise werden den CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Herstellung eines Packmittels Projekte zur Aufforstung von Wäldern durch Verwendung eines Anteils am Packmittelpreis gegenübergestellt. Ein frisch angepflanzter Wald hat aber bei weitem nicht die CO<sub>2</sub>-Aufnahmekapazität wie ein bestehender Dauerwald (Bodenbildung, Baumalter).

Die Unternehmensstrukturstrategien sind durch den Verbraucher in der Regel nicht direkt sichtbar und müssen dementsprechend wirksam abseits des PoS kommuniziert werden, können aber einen signifikanten Beitrag zur Markenbildung und -entwicklung bestimmter Produkte beitragen. Das ökonomische Potenzial dieser Maßnahmen ist schwer zu erfassen. Jede Maßnahme erfordert Investitionen in die Entwicklung von Technologien, die Qualifizierung und Allokation von Fachpersonal sowie die Implementierung und kann durch höhere Marktanteile (erreicht durch Imagegewinn) wieder amortisiert und überkompensiert werden.

#### Literatur

- Bleisch, G.; Majschak, J.-P.; Weiß, U. (2011): Verpackungstechnische Prozesse. Lebensmittel-, Pharma-, Chemieindustrie. Hamburg
- BMELV Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2013): Politikstrategie Bioökonomie, Nachwachsende Ressourcen und biotechnologische Verfahren als Basis für Ernährung, Industrie und Energie. Berlin (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz)
- BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2007): Nachhaltigkeitsmanagement in Unternehmen. Von der Idee zur Praxis: Managementansätze zur

- Umsetzung von Corporate Social Responsibility und Corporate Sustainability. Berlin (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit)
- Borucke, M.; Moore, D.; Cranston, G.; Gracey, K.; Iha, K.; Larson, J.; Lazarus, E.; Morales, J. C.; Wackernagel, M.; Galli, A. (2013): Accounting for Demand and Supply of the Biosphere's Regenerative Capacity: The National Footprint Accounts' Underlying Methodology and Framework. In: Ecological Indicators, Vol. 24, January, pp. 518–533
- Carnau, P. (2011): Nachhaltigkeitsethik. Normativer Gestaltungsansatz f
  ür eine globale zukunftsf
  ähige Entwicklung in Theorie und Praxis. M
  ünchen
- Claus, R.; Stein, M.; Bach, S. (2015): Vorrichtung zum Beheizen von Vorformkörpern. Patentnr. DE 102014202302 B4
- DBT Deutscher Bundestag (1998): Abschlussbericht der Enquete-Kommission "Schutz des Menschen und der Umwelt – Ziele und Rahmenbedingungen einer nachhaltig zukunftsverträglichen Entwicklung". Konzept Nachhaltigkeit: Vom Leitbild zur Umsetzung. Berlin (Deutscher Bundestag)
- de Haes, H. A. U.; Jolliet, O.; Finnveden, G.; Hauschild, M.; Krewitt, W. Müller-Wenk, R. (1999): Best Available Practice Regarding Impact Categories and Category Indicators in Life Cycle Assessment. Background Document for the Second Working Group on Life Cycle Impact Assessment of SETAC-Europe (WIA-2). In: International Journal on Life Cycle Assessment, Vol. 4, Issue 2, pp. 66–74
- Demeney, P.; McNicoll, G. (2003): Encyclopedia of Population. New York
- Detzel, A.; Krüger, M. (2006): Life Cycle Assessment of PLA. A Comparison of Food Packaging Made from NatureWorks® PLA and Alternative Materials. Heidelberg
- Diefenbacher, H. (2001): Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Zum Verhältnis von Ethik und Ökonomie. Darmstadt
- Eberle, U. (2001): Das Nachhaltigkeitszeichen. Ein Instrument zur Umsetzung einer nachhaltigen Entwicklung? Dissertation. Gießen (Justus-Liebig-Universität)
- EC European Commission (2012): Innovating for Sustainable Growth: A Bioeconomy for Europe. Communication from the Comission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Brussels (European Commission)
- EHI (2008): Spannungsfeld Verpackung, Erwartungen, Trends und Konfliktfelder aus Sicht von Handel und Herstellern. Köln (EHI Retail Institute GmbH)
- EU European Union (2011): The European Bioeconomy in 2030. White Paper. Brussels (European Union, Eurpean Technology Platforms)
- FFI Fachverband Faltschachtel-Industrie (2011): FFI Studie Shopper 2011. Die Bedeutung von Verpackungen bei Kaufentscheidungen. Frankfurt am Main (Fachverband Faltschachtel-Industrie e.V.)
- FFI Fachverband Faltschachtel-Industrie (2012): Das kommunikative Potenzial der Verpackung im Vergleich mit anderen Medien. Frankfurt am Main (Fachverband Faltschachtel-Industrie e.V.)
- Gallai, N.; Salles, J.-M.; Settele, J.; Vaissière, B. (2009): Economic Valuation of the Vulnerability of World Agricultural Confronted to Pollinator Decline. In: Ecological Economics, Vol. 68, Issue 3, pp. 810–821

- Gerbens-Leenes, P. W.; Hoekstra, A. Y.; van der Meer, Th. (2009): The Water Footprint of Energy from Biomass. A Quantitative Assessment and Consequences of an Increasing Share of Bio-energy in Energy Supply. In: Ecological Economics, Vol. 68, Issue 4, pp. 1052–1060
- GfK Gesellschaft für Konsumforschung (2009): STORE EFFECT-Studie. Nürnberg (Gesellschaft für Konsumforschung)
- GfK Gesellschaft für Konsumforschung (2010): Packaging and Sustainability. Nachhaltige Verpackungen Was will der Verbraucher? Nürnberg (Gesellschaft für Konsumforschung)
- Gleick, P. H. (1994): Water and Energy. In: Annual Review of Energy and the Environment, Vol. 19, pp. 267–299
- GRI Global Reporting Initiative (2013): G4 Sustainability Reporting Guidelines. Reporting Principles and Standard Disclosures. Amsterdam (Global Reporting Initiative)
- Gustavsson, J.; Cederberg, Chr.; Sonesson, U. (2011): Global Food Losses and Food Waste. Rome (Food and Agriculture Organization of the United Nations)
- Hoekstra, A. Y.; Chapagain, A. K.; Aldaya, M. M.; Mekonnen, M. M. (2011): The Water Footprint Assessment Manual. Setting the Global Standard. London, Washington/D.C.
- Hottle, T.; Bilec, M.; Landis, A. (2013): Sustainability Assessments of Bio-based Polymers. In: Polymer Degradation and Stability, Vol. 98, Issue 9, pp. 1898–1907
- Huber, J. (1994): Nachhaltige Entwicklung durch Suffizienz, Effizienz und Konsistenz. In: Fritz, P.; Huber, J.; Levi, H. W. (Hg): Nachhaltigkeit in naturwissenschaftlicher und sozialwissenschaftlicher Perspektive. Stuttgart, S. 31–46
- Huijbregts, M. A. J.; Hellweg, St.; Frischknecht, R.; Hungerbühler, K.; Hendriks, A. J. (2008): Ecological Footprint Accounting in the Life Cycle Assessment of Products. In: Ecological Economics, Vol. 64, pp. 798–807
- IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change (1990): Climate Change. The IPCC Scientific Assessment (1990). First Assessment Report. Cambridge
- IWMI International Water Management Institute (2007): Water for Food, Water for Life. A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture. London, Colombo (International Water Management Institute)
- Kagemann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J. (2013): Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0. München (acatech, Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.)
- Kranert, M.; Hafner, G.; Barabosz, J.; Schuller, H.; Leverenz, D.; Kölbig, A.; Schneider, F.; Lebersorger, S.; Scherhaufer, S. (2012): Ermittlung der weggeworfenen Lebensmittelmengen und Vorschläge zur Verminderung der Wegwerfrate bei Lebensmitteln in Deutschland. Stuttgart (Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft)
- Langowski, H.; Schönweitz, C. (2006): Dickenreduziertes Folienmaterial Einsparungspotentiale und Verarbeitungseigenschaften. In: Tagungsband zur Tagung Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik (VVD). Dresden (Technische Universität), S. 481–500
- Madival, S.; Auras, R.; Signh, S. P.; Narayan, R. (2009): Assessment of the Environmental Profile of PLA, PET and PS Clamshell Containers Using LCA Methodology. In: Journal of Cleaner Production, Vol. 17, Issue 13, pp. 1183–1194
- Maslow, A. (1943): A Theory of Human Motivation. In: Psychological Review, Vol. 50, No. 4, pp. 370–396

- Maslow, A. (1971): The Farther Reaches of Human Nature. New York
- Meneses, M.; Pasqualino, J.; Castells, F. (2012): Environmental Assessment of the Milk Life Cycle. The Effect of Packaging Selection and the Variability of Milk Production Data. In: Journal of Environmental Management, Vol. 107, pp. 76–83
- OECD Organisation for Economic Co-operation and Development (2009): The Bioeconomy to 2030. Designing a Policy Agenda. Paris (OECD Publishing)
- Pawelzik, P.; Carus, M.; Hotchkiss, J.; Narayan, R.; Selke, S.; Wellisch, M.; Weiss, M.; Wicke, B.; Patel, M. K. (2013): Critical Aspects in the Life Cycle Assessment (LCA) of Bio-based Materials Reviewing Methodologies and Deriving Recommendations. In: Resource, Conservation and Recycling, Vol. 73, pp. 211–228
- PC/FFI ProCarton/Fachverband Faltschachtel-Industrie (2012): Verpackung: ein Medium mit hoher Durchschlagskraft. 23 Kommunikationskanäle im Vergleich. Frankfurt am Main (Association of European Cartonboard and Carton Manufacturers) (Pro Carton Studie)
- Röhrig, R.; Mis, K.; Wieschebrock, S. (2010): Die Verpackungsindustrie in Deutschland. Branchenreport Verpackungsindustrie Frankfurt am Main (IG Metall. Vorstand Wirtschaft, Technologie, Umwelt)
- Schmitz, St.; Paulini, I. (1999): Bewertung in Ökobilanzen. Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043 (Version '99). Berlin (Umweltbundesamt)
- Shiklomanov, I. (1999): World Water Resources. A New Appraisal and Assessment for the 21st Century. Prepared for the International Hydrological Programme. St. Petersburg (State Hydrological Institute)
- UGA Umweltgutachter-Ausschuss beim Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2012): In 10 Schritten zu EMAS. Leitfaden für Umweltschutzbeauftragte. Berlin (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit)
- UN United Nations (1998): Kyoto Protocol of the United Nations Framework Convention on Climate Change. New York (United Nations)
- UNDESA United Nations, Department of Economic and Social Affairs (2012): World Urbanisation Prospects. The 2011 Revision. New York (UNDESA, Population Division)
- UNESCO United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (2012): The Dynamics of Global Water Futures 2011–2050. Report on the Findings of Phase One of the UNESCO-World Water Assessment Programme Water Scenarios Project to 2050. Paris (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization)
- UNFPA United Nations Population Fund (2011): State of World Population 2011. New York (United Nations Population Fund)
- USEPA US Environmental Protection Agency (2014): Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories. Washington/D.C. (US Environmental Protection Agency)
- van Oel, P. R.; Hoekstra, A. Y. (2012): Towards Quantification of the Water Footprint of Paper. A First Estimate of its Consumptive Component. In: Water Resource Management, Vol. 26, pp. 733–749
- Wackernagel, M.; Rees, W. (1997): Unser ökologischer Fußabdruck. Wie der Mensch Einfluss auf die Umwelt nimmt. Basel u.a.O.

- WCED World Commission on Environment and Development (1987): Our Common Future,
   Chapter 2: Towards Sustainable Development. Annex to Document A/42/427 Development and International Co-operation: Environment. New York (World Commission on Environment and Development)
- Williams, H.; Wikström, F. (2011): Environmental Impact of Packaging and Food Losses in a Life Cycle Perspective. A Comparative Analysis of Five Food Items. In: Journal of Cleaner Production, Vol. 19, pp. 43–48
- WRI World Resource Institute (2005): Millenium Ecosystem Assessment, 2005. Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis. Washington/D.C. (World Resource Institute)

Norbert Mertzsch, Bernd Thomas

# Technologische Herausforderungen auf dem Weg zu einer nachhaltigen Energieversorgung

# 1 Vorbemerkungen

In der Jahrtausende währenden Entwicklung der Menschheit konnte der Mensch seit dem Beginn des Gebrauchs des Feuers bis zur Mitte des 18. Jahrhunderts im Wesentlichen nur auf Einkommensenergie zurückgreifen. Dabei spielte der nachwachsende Rohstoff Holz neben der Wasserkraft und der Windkraft die dominierende Rolle. Erst danach dominierte die Verwendung von Vermögensenergien wie Kohle und Erdöl.

Der Begriff der Nachhaltigkeit wurde erstmalig von Hans Carl von Carlowitz im Jahr 1713 im Sinne eines langfristig angelegten verantwortungsbewussten Umgangs mit einer Ressource – dem Holz – in seinem Werk "Silvicultura oeconomica" verwendet.

Den Nachhaltigkeitsbegriff auf die Energieversorgung angewendet kann nur bedeuten, dass die Vermögensenergien langfristig wieder durch Einkommensenergien abgelöst werden und diese bis dahin möglichst schonend genutzt werden. Gleichzeitig sind die Grenzen für die Nutzung der Einkommensenergien zu beachten.

In den nachfolgenden Ausführungen steht die technologische Seite der Energiewende im Focus. Es soll aber auch hier nochmals daran erinnert werden, dass die notwendige Reduzierung der Emissionen von Kohlenstoffdioxid bei der Bereitstellung von Energieträgern für Industrie und private Verbraucher eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe ist (vgl. Fleischer 2012). Von der Politik gesetzte Rahmenbedingungen für diesen Wandel sind damit mitentscheidend für Erfolg oder Misserfolg von technischen und technologischen Entwicklungen.

<sup>1</sup> Vgl. https://de.wikipedia.org/wiki/Nachhaltigkeit.

# 2 Entwicklungsziele in der Energieversorgung

## 2.1 Gegenwärtiger Stand

Deutschland ist zum gegenwärtigen Stand zur Deckung seines Energiebedarfs in großen Bereichen auf den Import von Primärenergieträgern angewiesen.<sup>2</sup> Das betrifft insbesondere Erdöl und Erdgas, aber auch Steinkohle und Kernenergie. Die Nutzung der heimischen Energieträger Steinkohle und Braunkohle ist seit Jahren rückläufig. Heimisches Erdöl und Erdgas sind vom Aufkommen her nur von untergeordneter Bedeutung. Eine zunehmende Rolle spielt im Bereich der Energieversorgung die Nutzung der Einkommensenergien, insbesondere die Windenergie und die Photovoltaik. Die Nutzung der Bioenergie hat demgegenüber bereits einen hohen Stand erreicht und dürfte kaum weiter ausgebaut werden können (siehe Tab. 1).

Beim Endenergieverbrauch dominieren Kraftstoffe, vor Gas und Strom. Fernwärme spielt in Deutschland nur eine geringe Rolle (siehe Tab. 2).

Tab. 1: Primärenergieverbrauch nach Energieträgern in Deutschland 2014

Energieträger	Anteil in %
Mineralöl	34,4
Steinkohle	13,1
Braunkohle	12,0
Erdgas, Erdölgas	20,4
Kernenergie	8,1
Wasser- und Windkraft	3,1
andere Erneuerbare	8,2
Außenhandelssaldo Strom	-0,9
Sonstige	1,7

Quelle: http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-undanalysen/Energiedaten/ energiegewinnung-energieverbrauch.html

<sup>2</sup> Vgl. http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-und-analysen/Energiedaten/energiegewinnung-energieverbrauch.html.

Tab. 2:	Endenergieverbrauch nach Energieträgern
	in Deutschland 2014

Energieträger	Anteil in %
Steinkohle	4,0
Braunkohle	1,0
Kraftstoff	29,6
Heizöl schwer	0,1
Heizöl leicht	8,0
Gas	24,3
Strom	21,2
Fernwärme	4,5
Sonstige	7,3

Quelle: http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten-undanalysen/Energiedaten/ energiegewinnung-energieverbrauch.html

# 2.2 Entwicklungsziele

Die Entwicklungsziele für die Energieversorgung ordnen sich dem zentralen Ziel der Klimapolitik Deutschlands unter. Dieses besteht in einer deutlichen Reduktion der Emission von Treibhausgasen. Gemäß Energiekonzept von 2010 soll bis 2050 im Vergleich zu 1990 eine Reduktion der Emissionen um 80 bis 95 Prozent erreicht werden. Darüber hinaus wird bis zum Ende des Jahrhundert eine Dekarbonisierung insbesondere der Energiewirtschaft angestrebt.

Um diese Ziele zu erreichen, ist eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz in allen Wirtschaftsbereichen notwendig. So soll der Primärenergieverbrauch bis 2050 gegenüber 2008 um 50% sinken. Für den Stromverbrauch ist bis 2050 gegenüber 2008 eine Reduzierung um 25% geplant. Unter dem Aspekt der Dekarbonisierung und der damit verbundenen Verknüpfung von Elektroenergie aus Einkommensenergie und deren weitere Nutzung in Bereichen von Wärmeversorgung und Verkehr dürfte diese Aussage nur für die 2008 existenten Verbraucher von Elektroenergie gelten.

Obwohl Elektroenergie insgesamt nur einen Anteil am Endenergieverbrauch von 21,2% hat, steht die Senkung der Emissionen in diesem Bereich

<sup>3</sup> Vgl. http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/nationale-klimapolitik/klimapolitik-der-bundesregierung/#c17574.

<sup>4</sup> Vgl. http://www.manager-magazin.de/unternehmen/energie/g7-staatslenker-beschliessen-dekarbonisierung-a-1037754.html.

derzeit im Mittelpunkt der Aufmerksamkeit. Für diesen Bereich ist der Einsatz von Einkommensenergien besonders geeignet. So lag im Jahr 2012 der Anteil der Einkommensenergien am gesamten Stromverbrauch bei 23,6 Prozent. Ihr Anteil am gesamten deutschen Endenergieverbrauch (EEV) aus Strom, Wärme und Kraftstoffen betrug im gleichen Jahr bereits 12,7 Prozent. Im Wärmemarkt lag der Anteil der Einkommensenergien im Jahr 2012 bei 10 Prozent; beim Kraftstoffverbrauch bei knapp 6 Prozent (siehe Tab. 3).

Tab. 3: Entwicklung der Verkehrsleistungen im Personenverkehr (Mrd. Pkm)

	2010	2030	2050
MIV + Bus	989	1.070	1.063
Bahn	100	116	116
Luft	194	345	420

Quelle: http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/UI-MKS/mks-kurzstudie-ee-im-verkehr.pdf? blob=publicationFile

Für den Verkehrsbereich strebt die Bundesregierung eine Reduzierung des Endenergiebedarfs bis 2050 um rund 40% gegenüber 2005 an (siehe Tab. 4).

Tab. 4: Entwicklung der Transportleistungen im Güterverkehr (Mrd. tkm)

	2010	2030	2050
Lkw	434	607	721
Bahn	110	154	196
Binnenschiff	62	77	87
Luft	11	19	23

 $\label{lem:pdf} Quelle: $$ http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/UI-MKS/mks-kurzstudie-ee-im-verkehr. $$ pdf?\_blob=publicationFile $$$ 

Dabei ist zu beachten, dass nach einer aktuellen Untersuchung zu Potenzialen und Entwicklungsperspektiven von Einkommensenergien im Bereich Verkehr davon ausgegangen wird, dass bis zum Jahr 2050 die Verkehrsleistungen noch deutlich zunehmen werden.

 $<sup>\</sup>label{lem:continuous} Vgl.\ http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/UI-MKS/mks-kurzstudie-ee-im-verkehr. \\ pdf?\_blob=publicationFile.$ 

Um den Energieverbrauch für die Wärmeversorgung von Gebäuden deutlich zu verringern, soll die jährliche Sanierungsrate von Gebäuden verdoppelt werden.

## 3 Technologische Herausforderungen

## 3.1 Energieeffizienz

Für die Erhöhung der Effizienz im Bereich Elektroenergieverbrauch gibt es viele Möglichkeiten. Im Industriebereich betrifft das z.B. alle Technologien, in denen Antriebe verwendet werden. Als Beispiele seien hier Druckluftsysteme, Pumpen oder Förderanlagen genannt. Im Haushalt betrifft das den Einsatz effizienter Geräte, wie Kühlschränke oder Waschmaschinen, aber auch die effiziente Nutzung von Elektrokochern und Herden bzw. den Verzicht auf den Stand-by von Geräten.

Problematisch für die Verbesserung der Effizienz elektrischer Geräte könnte deren zunehmende Vernetzung werden, da zu erwarten ist, dass dadurch viele Geräte eben nicht mehr vollständig ausgeschaltet werden, um die positiven Effekte der Vernetzung nutzen zu können, sondern im Stand-by-Betrieb verbleiben werden. Im Bereich der Beleuchtung ist ebenfalls eine deutliche Einsparung von Elektroenergie möglich. Dies wird vor allem durch den Ersatz von herkömmlichen Leuchtmitteln durch Energiesparlampen bzw. LED-Leuchten erreicht. Unter Nachhaltigkeitsaspekten problemlos sind diese neuen Leuchtmittel im Gegensatz zu gegenüber den für Mensch und Umwelt ungiftigen Glühlampen nicht. So enthalten die Energiesparlampen eine geringe Menge giftiges Quecksilber. Die aktuell hergestellten LED-Leuchten enthalten eine Reihe von Elementen, deren Gewinnung als problematisch anzusehen ist. Ein weiterer Ansatz zum Sparen von Elektroenergie bei der Beleuchtung ist, dass die Beleuchtung nur dann mit voller Leistung in Betrieb ist, wenn sie benötigt wird. Ansonsten wird die Lichtstärke gedimmt oder die Beleuchtung ausgeschalten. Damit könnte auch dem "Verlust der Nacht" zumindest teilweise begegnet werden.

Im Bereich der Wärmeversorgung ist eine wichtige Maßnahme zum Energiesparen die Wärmedämmung von Gebäuden. Diese Maßnahme sollte jedoch nicht für jedes Gebäude einzeln betrachtet und durchgeführt werden, sondern in ein Gesamtkonzept für die energetische Stadterneuerung einge-

<sup>6</sup> Vgl. http://www.dena.de/themen/die-energiewende-das-neue-system-gestalten/unter-strom-energieeffizienz-im-strombereich.html.

<sup>7</sup> Vgl. http://www.verlustdernacht.de/.

hen. Bei einem solchen Gesamtkonzept sind dann auch Maßnahmen zum Denkmalschutz mit zu koordinieren, damit unsere Städte ihr Gesicht nicht verlieren. Ein weiteres Problem ist, dass die derzeit genutzten Baustoffe zur Wärmedämmung nach dem Nutzungsende des Gebäudes vielfach als gefährliche Abfälle anfallen. Das kann auch durch Schadenswirkungen von Naturgewalten wie Hagel, die infolge des Klimawandels häufiger auftreten können, vor Nutzungsende des Gebäudes eintreten (vgl. Hauner 2011; Lateltin/Jordi 2008). Deshalb sollte die Entwicklung in Richtung wiederverwendbarer bzw. nachnutzbarer Materialien gehen. Als Beispiele dafür können Schaumglas oder Vakuumdämmelemente aus Metall (vgl. Willems 2003) dienen. Ein effektiver Einsatz dieser Materialien zur Wärmedämmung wird vor allem bei Gebäuden mit langem Nutzungszeitraum erreicht. Als Beispiele können historische Gebäude angesehen werden, deren Nutzung aus heutiger Sicht auch in Jahrhunderten noch zu erwarten ist.

Auch im Industriebereich sind für Maßnahmen der Wärmedämmung neue Materialien zu nutzen. Dazu wurden von verschiedenen Herstellern zum Beispiel Hochtemperaturdämmstoffe entwickelt.

Die Anstrengungen zur Energieeffizienz im Verkehrsbereich, für den ein weiterer Anstieg der Verkehrsleistungen prognostiziert wird, werden eine große Herausforderung werden. So sind auf der Fahrzeugseite alle Möglichkeiten auszuschöpfen, um sparsamere Fahrzeuge zum Einsatz zu bringen, ohne dass andere Emissionen erhöht werden. Unabhängig von den Verkehrsprognosen müssen alle Maßnahmen zur Stärkung des öffentlichen Personenverkehrs und zur Verlagerung von Güterverkehr von der Straße auf die Schiene ergriffen werden. Gerade in Randgebieten wurde der Schienenverkehr in den letzten Jahren leider zurückgefahren. Die geplante Schließung von Frachtbahnhöfen der Deutschen Bahn kann da nur als kontraproduktiv angesehen werden (vgl. z.B. Wüpper/Gellner 2016). Regional gibt es zur Verlagerung von Güterverkehr von der Straße auf die Schiene gute Ansätze, wobei hier noch Bemühungen um eine regionale Wertschöpfung hinzukommen. Die Umsetzung ist allerdings sehr kompliziert.

Noch wichtiger ist es jedoch, alle Möglichkeiten zur Vermeidung von Verkehr zu nutzen. Dazu zählen neben der Schaffung regionaler Wirtschaftskreise auch Maßnahmen der Siedlungspolitik, um Wohnen, Einkaufen und Arbeiten mit möglichst wenig bzw. möglichst effizientem Verkehr zu ermöglichen.

<sup>8</sup> Vgl. https://de.wikipedia.org/wiki/Schaumglas.

<sup>9</sup> Vgl. http://www.promat-hpi.com/de-de? ga=1.198259433.759844210.1457798208.

<sup>10</sup> Vgl. http://www.hub5312.de/.

# 3.2 Elektroenergie

Im Rahmen des Akademien-Projekts "Energiesysteme der Zukunft" (ESYS) wurde im November 2015 in der Stellungnahme "Flexibilisierungskonzepte für die Stromversorgung 2050, Stabilität im Zeitalter der erneuerbaren Energien" gezeigt, wie der Anteil der Einkommensenergie an der Erzeugung elektrischer Energie ohne negative Auswirkungen auf Stabilität und Versorgungssicherheit gesteigert werden kann. <sup>11</sup> Danach wird ein zukünftiges System für die Bereitstellung von Elektroenergie sehr flexibel sein müssen. Wird ein hoher Deckungsgrad durch Einkommensenergie angestrebt, sollte deren installierte Leistung höher sein als zur Deckung der Nachfrage nötig ist. Hinzu kämen Speicher und Rückverstromungs-Anlagen, insbesondere flexible Gaskraftwerke. Eine interessante Variante ist die Rückverstromung von gespeichertem Wasserstoff direkt in reversiblen Elektrolysezellen. <sup>12</sup>

Für den Ausbau der Einkommensenergien kommen vorrangig Windkraft und Photovoltaik zum Einsatz. Dabei haben sich inzwischen in der Bevölkerung regional bereits jetzt große Vorbehalte gegen den weiteren Ausbau der Windkraft entwickelt. <sup>13</sup> Lösungen zu finden, um diese Vorbehalte abzubauen und die Akzeptanz in der Bevölkerung für derartige Anlagen wieder herzustellen, ist vor allem eine wichtige regionalpolitische Aufgabe. Hinzu kommen die bereits in früheren Arbeiten aufgeworfenen Fragen zu Problemen der Einkommensenergien, die deren Nachhaltigkeitsgrenzen aufzeigen könnten (vgl. Fleck/Mertzsch 2012; Mertzsch 2011). Dazu zählen:

# – Windenergie:

- Auswirkungen auf die Vogelwelt;
- Auswirkungen von Schallemissionen von Offshore-Windparks auf Meerestiere (beim Bau und beim laufenden Betrieb);
- Einfluss auf das regionale Klima bei großen Windparks;
- Einfluss auf Stofftransporte bei globaler großflächiger Nutzung (z.B. Stofftransport aus der Sahara zum Amazonasgebiet);

## Photovoltaik:

- Flächenverbrauch landwirtschaftlicher Nutzfläche bei Freiflächenanlagen;
- Konkurrenz zur Solarthermie bei Dach- und Fassadenanlagen;

<sup>11</sup> Vgl. http://www.acatech.de/fileadmin/user\_upload/Baumstruktur\_nach\_Website/Acatech/root/de/Publikationen/Kooperationspublikationen/3Akad\_Stellungnahme\_Flexibilitaetskon zepte.pdf.

<sup>12</sup> Vgl. http://www.sunfire.de/wp-content/uploads/PM Boeing final.pdf.

<sup>13</sup> Vgl. z.B. http://www.vi-rettet-brandenburg.de/; http://www.windkraftgegner.de/.

#### - Biomasse:

Die Nutzung von landwirtschaftlich nutzbaren Flächen zur Gewinnung von Biomasse steht in Konkurrenz zur Nahrungsmittelgewinnung. Der Nahrungsmittelgewinnung muss Priorität eingeräumt werden.

Zum Ausgleich witterungsbedingter Schwankungen werden in ein solches Energiesystem verschiedene Typen von Speichern integriert werden müssen (vgl. Fleischer/Mertzsch 2014; Mertzsch 2014). Für kürzere Speicherzeiten sind vor allem elektrochemische Speicher geeignet. Es wird erwartet, dass dafür hauptsächlich die elektrochemischen Speicher (Batteriespeicher) der Elektrofahrzeuge und der in Haushalten vorhandenen Photovoltaikanlagen genutzt werden. Kurzzeitige Schwankungen bei der Bereitstellung der elektrischen Energie können auch durch Lastabsenkungen bzw. Abschaltung ausgewählter Verbraucher ausgeglichen werden. Als Langzeitspeicher für längere wind- und sonnenarme Phasen ("Dunkelflauten") kommen derzeit chemische Speicher in Betracht. Damit werden Überschüsse an elektrischer Energie durch Umwandlung in chemische Energie stofflich als Wasserstoff oder Methan (Power-to-Gas – PtG) gespeichert. Weiterhin ist die Nutzung von Untergrundspeichern (Porenspeicher oder Kavernenspeicher) vorgesehen. Während für die Untergrundspeicherung von Methan (Erdgas) Erfahrungen vorliegen, sind für die Untergrundspeicherung von Wasserstoff noch umfangreiche Forschungsarbeiten auszuführen. 14

Was die Nachhaltigkeit insbesondere von Kavernenspeicherung angeht, sind die Probleme der Entsorgung der Salzlaugen bei der Herstellung der Kavernen und der geologischen Stabilität zu betrachten. So gab es in den letzten Jahren verschiedentlich im Fernsehen Beiträge, in denen die Ansicht vertreten wurde, dass Untergrundspeicher unsicher sind und nur eine begrenzte Lebensdauer haben. <sup>15</sup> Sollten diese Aussagen seriös sein, ergeben sich neben Fragen zur sicheren Stilllegung dieser Speicher mögliche "Ewigkeitskosten" wie beim Ruhrbergbau <sup>16</sup> und Fragen nach einem ausreichenden Potenzial für Nachfolgespeicher. Damit könnte die entscheidende Frage bleiben: Was ist bei der Speicherproblematik für die Energiewende der richtige Weg?

<sup>14</sup> Vgl. https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/servlets/MCRFileNodeServlet/Document\_derivate\_00000108/Forschung%20zum%20Thema%20Energiespeicher.pdf;jsessionid=096118A1C FCD2BB09639962CE099CF72.

<sup>15</sup> Vgl. http://www.br.de/fernsehen/bayerisches-fernsehen/sendungen/faszination-wissen/fawierdgas-energiewende100.html.

<sup>16</sup> Vgl. http://www.spektrum.de/news/ewigkeitskosten-wasser-pumpen-bis-in-alle-ewigkeit-spektrum-de/1222444.

Da bisher weder der Ausbau der Elektroenergieerzeugung auf Basis Einkommensenergie eine sichere Versorgung mit Elektroenergie gestattet noch die Speicherproblematik geklärt ist, wird noch für eine längere Zeit eine Grundversorgung auf Basis von Vermögensenergie notwendig sein. Dass derzeit dafür Kraftwerke auf Kohlebasis wegen der billigen Kohleförderung ihren Weiterbetrieb sichern können, wohingegen die für diese Aufgabe besser geeigneten und hocheffizienten Gasturbinenkraftwerke bzw. GUD-Kraftwerke entsprechend dem heutigen Strommarktdesign nicht bzw. kaum noch im Einsatz sind, kann man sicher als politisches Regelungsversagen bezeichnen. Diese Grundlastkraftwerke müssten bis zu einer Mindestlast von ca. 30% der projektierten Leistung gedrosselt werden können, wenn viel Sonnen- und Windenergie im Netz sind (vgl. Tappe/Krüger 2015).

Im Rahmen der Energiewende werden Gefahren durch Vulkanausbrüche auf die Bereitstellung von Einkommensenergie (Problematik Jahr ohne Sommer) nicht diskutiert. Einzig in einem Beitrag von Thomas Krassmann wird auf mögliche Probleme hingewiesen (vgl. Krassmann 2011). Wenn man sich dieser Frage stellt, dürfte das großen Einfluss auf die vorzuhaltende Speichergröße, aber auch auf den Vorhalt weiterer Technologien haben. Denn bei einer weitgehenden Nutzung von Einkommensenergien zur Energieversorgung ist ein Verlust der Möglichkeit, schnell auf Vermögensenergien umzuschwenken, wahrscheinlich. Auch ein Grund dafür, bereits jetzt sparsam mit Vermögensenergie zu sein.

# 3.3 Wärmeenergie

Zu den technologischen Herausforderungen für eine nachhaltige Versorgung mit Wärmeenergie wurden bereits Ausführungen gemacht (vgl. Mertzsch/Jeremias 2015). Auch im Beitrag von Kerstin Becker und Ernst-Peter Jeremias wurde darauf eingegangen, weshalb hier der Vollständigkeit halber nur kurz auf die Probleme eingegangen werden soll.

Für die Einbindung von Einkommensenergie in die Wärmeversorgung bietet sich insbesondere die Solarthermie an. Dafür gibt es bereits viele Konzepte, doch die derzeitigen niedrigen Preise für fossile Energieträger behindern deren Umsetzung. Technologisch problematisch ist bei der Nutzung der Solarthermie die Sicherstellung der hygienischen Anforderungen für die Trinkwassererwärmung.

Die Nutzung von Bioenergie für die Wärmeversorgung kann über die Nutzung von Biogas bzw. Bioerdgas erfolgen oder durch die thermische

<sup>17</sup> Vgl. den Beitrag von Kerstin Becker und Ernst-Peter Jeremias in diesem Band.

Nutzung von Holz bzw. holzartigen Stoffen. Da auf land- und forstwirtschaftliche Flächen auch für die Nahrungsmittelproduktion die Bereitstellung von Holz für die stoffliche Nutzung sowie Aspekte des Naturschutzes zu berücksichtigen sind, ist der Einsatz von Bioenergie begrenzt.

Die Nutzung von Elektroenergie aus dem Bereich der Einkommensenergie kann insbesondere bei einem Überangebot an Elektroenergie als Maßnahme des Lastmanagements erfolgen (Power-to-Heat – PtH). Dabei kann die Elektroenergie in Elektrokesseln oder Wärmepumpenanlagen genutzt werden.

Die Nutzung der Tiefengeothermie ist unter den gegenwärtigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen auch unter der Einbeziehung von Förderprogrammen für die Wärmegewinnung/Wärmespeicherung nicht betriebswirtschaftlich darstellbar. Hier sind für die nächsten Jahre durch technologische Entwicklungen deutliche Kostensenkungen für Geothermiebohrungen notwendig. Ein weiteres Problem sind seismische Risiken. Diese sind für die weitere Verbreitung der Geothermienutzung weitestgehend auszuschließen.

#### 3.4 Verkehr

Aus technischer Sicht ist neben der Weiterentwicklung der Fahrzeuge in Richtung des sparsamen Energieverbrauchs auch der Betrieb der Fahrzeuge mit nachhaltigen Energieträgern/Kraftstoffen auf der Basis von Einkommensenergie zu ermöglichen. Das bedeutet, dass neben den bisher eingesetzten Verbrennungsmotoren zunehmend Elektromotore mit Batteriespeichern für Elektroenergie und Brennstoffzellen mit gespeichertem Wasserstoff als Antriebe genutzt werden (siehe Tab. 5).

Tab. 5: Wirkungsgrade unterschiedlicher Energieträger/ Kraftstoffe bezogen auf Pkw

	Wirkungsgrad in %
Elektroenergie	89
Wasserstoff	58
Methan	41
Benzin	35
Diesel	35

Quelle: http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/UI-MKS/mks-kurzstudie-ee-im-verkehr.pdf? blob=publicationFile

Die Quelle der hier aufgeführten Energieträger/Kraftstoffe sind Einkommensenergien. Nicht berücksichtigt sind die einzelnen Wirkungsgrade der vorangegangenen Wandlungsstufen und genau hier liegen gegenwärtig auch wichtige Entwicklungspotenziale. Unter Berücksichtigung der genannten Wirkungsgrade ist zu erwarten, dass besonders im Straßenverkehr der Einsatz von Elektroenergie deutlich zunehmen wird.

Die Nutzung von Wasserstoff im Straßenverkehr wird in Verbindung mit der Nutzung der Brennstoffzelle zu sehen sein. Wieweit sich diese Technologie durchsetzen wird, hängt sicherlich von der Entwicklung im Bereich der Reichweite von Batteriefahrzeugen ab und von den Kosten des Aufbaus einer Wasserstoffinfrastruktur. Synthetisches Methan (PtG) und Biomethan werden neben konventionellem Erdgas (gemeinsame Infrastruktur) im Straßenverkehr Anwendung finden.

Für Verbrennungsmotoren werden auch in Zukunft biobasierte Kraftstoffe, deren Verwendung aus bekannten Gründen begrenzt ist, zu Verfügung stehen. Neue Technologien könnten durchaus noch das Potenzial besitzen bisherige Abfälle effektiv zu Kraftstoffen umzuwandeln. Bei elektroenergiebasierten Kraftstoffen handelt es sich um aus Wasserstoff synthetisiertes Methan (Sabatier-Verfahren – PtG) sowie Benzin und Diesel nach der Fischer-Tropsch-Synthese (Power-to-Liquid – PtL). Auf Grund der geringen Wirkungsgrade werden diese Kraftstoffe sicher nur für spezielle Anwendungen genutzt werden können.

Ein weiterer Kraftstoff, der in die Betrachtungen für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) nicht einbezogen wurde, könnte Methanol sein (vgl. Offermanns/Bertau 2015). Der Wirkungsgrad wird vermutlich ebenfalls im Bereich von Benzin und Diesel, nach der Fischer-Tropsch-Synthese, liegen.

Im Bereich der Binnenschifffahrt ist der Einsatz von synthetischem Methan und Biomethan neben konventionellem Erdgas (gemeinsame Infrastruktur) als Flüssigerdgas (Liquefied Natural Gas, LNG) zu erwarten. Der Einsatz von LNG in diesem Bereich sollte beschleunigt werden, da er zusätzliche positive Effekte im Bereich Gewässerschutz besitzt. Methan könnte ebenso im Bereich des Wassersports und der Personenschifffahrt (als Compressed Natural Gas, CNG) verwendet werden (vgl. Mertzsch 2007).

In der Untersuchung für das BMVI wird für den Luftverkehr bis 2050 davon ausgegangen, dass eine deutliche Steigerung des Energieverbrauchs (bis knapp unter 40%) durch eine Zunahme des Luftverkehrs erfolgen wird. Als Treibstoff kommt weiterhin Kerosin in Frage. Sollte hier synthetisches Kerosin auf der Basis von Einkommensenergie eingesetzt werden, ist sicher-

lich ein beträchtlicher Zubau im Bereich der Windenergie und der Photovoltaik nötig. Zu dessen Größenordnung sind bisher keine Daten bekannt. Ob sich dieser in Deutschland realisieren lässt, ist fraglich.

Damit wird die in den neunziger Jahren des letzten Jahrhunderts angedachte Entwicklung von Flugzeugen mit Wasserstoffantrieb in den nächsten Jahrzehnten nicht zum Tragen kommen. <sup>18</sup> Dafür wird derzeit an der Entwicklung hybrid-elektrischer Antriebe für Flugzeuge gearbeitet. <sup>19</sup>

## 3.5 Bereitstellung und Recycling benötigter Materialien

Während für die Energiebereitstellung und -nutzung in früheren Jahrzehnten weitgehend Massenwerkstoffe genutzt wurden, werden zur effektiven Nutzung der Einkommensenergien zunehmend Hochleistungswerkstoffe eingesetzt. Das betrifft z.B. Verbundwerkstoffe für Windkraftanlagen, Werkstoffe für Generatoren und Elektromotoren, Solarzellen, Brennstoffzellen und Elektrolysezellen.

Die Bereitstellung der Ausgangsstoffe für diese Werksstoffe ist eine besondere Herausforderung. Zum einen sind diese wegen der zum Teil geringen Anreicherung in Erzen nur mit hohem Einsatz an Energie und Chemikalien zu gewinnen. Zum anderen ist das Niveau des Umweltschutzes in vielen Herkunftsländern gering. Dieser Umstand sichert zwar relativ günstige Rohstoffpreise, generiert aber dadurch neue Umweltprobleme in den betreffenden Regionen, die auch irgendwann einmal "bezahlt" werden müssen. Bessere Umweltstandards würden die Kosten für diese Rohstoffe deutlich ansteigen lassen, was die Verbreitung der Technologien zur Nutzung der Einkommensenergien erfahrungsgemäß erschweren würde.

Weiterhin fehlen bisher vielfach effektive Technologien zum Recycling z.B. von Dotierungselementen von Solarzellen oder Neodym aus Magneten. Aber auch Lithium, vorrangig in Akkumulatoren verwendet, ist nur begrenzt erschließbar. Schlussendlich bleibt nur eine vernünftige Lösung für die Zukunft: Die bisher praktizierte industrielle Produktion, deren Wachstum vor allem auf Ausbeutung vorhandener natürlicher Ressourcen beruht, muss analog dem Wandel in der Energiebereitstellung auf nachhaltige Verfahren zur Rohstoffbereitstellung, insbesondere das Recycling, transformiert wer-

<sup>18</sup> Vgl. http://www.zeit.de/1993/51/fliegen-ohne-klimaschaden.

<sup>19</sup> Vgl. http://www.heise.de/newsticker/meldung/Elektromobilitaet-Airbus-und-Siemens-wollen-gemeinsam-E-Flugzeuge-voranbringen-3164696.html.

<sup>20</sup> Vgl. http://www.engineering-igmetall.de/seltene-erden-schmutzige-rohstoffe-f%C3%BCr-gr%C3%BCne-technologie.

den. Vor allem hier stehen in den nächsten Jahren bzw. Jahrzehnten große Aufgaben an. 21

## 4 Zusammenfassung

Als Fazit bleibt, dass auf dem Weg zur nachhaltigen Energieversorgung mit Einkommensenergie noch sehr viele Probleme zu lösen sind, deren Realisierung langfristige Konzepte, zwischen Politik, Wirtschaft und Gesellschaft abgestimmt, braucht. Ob dabei die heute angedachten technischen Lösungen Bestand haben werden oder es zu völlig anderen Lösungen kommen muss, bleibt offen. Höchste Priorität ist unabhängig davon allen Maßnahmen, die zu einem sparsamen Energieverbrauch führen, einzuräumen.

Unter der Voraussetzung, dass bei Methan die Speicherproblematik langfristig beherrscht wird, scheinen aus gegenwärtiger Sicht die Forschungsund Entwicklungsarbeiten für PtG-Technologien zur mittel- und langfristigen Speicherung von Elektroenergie und zur Versorgung des Verkehrsbereiches erfolgversprechend zu sein. Sowohl die Elektrolyse zur Wasserstoffgewinnung als auch die anschließende katalytische Synthese zu Methan sollten deshalb mit hoher Priorität weiterentwickelt werden.

Interessant ist in diesem Zusammenhang die Frage nach der Bewertung der Wirtschaftlichkeit neuer Verfahren: Geschieht diese allein nach unternehmerischen Gesichtspunkten oder werden die für die Gesellschaft zukünftigen möglichen Kosten aus den Folgen der Klimaerwärmung mit betrachtet?

Hieraus wären eine durch die Politik darauf angepasste Förderpolitik für Kohlenstoffdioxidarme oder -freie Erzeugungstechnologien, zumindest in der Entwicklungs- und Einführungsphase, und im Gegenzug Sanktionierung starker Kohlendioxid-Emissionen ableitbar. Die bevorstehenden technologischen Entwicklungsarbeiten brauchen derartige unterstützende Regulatorien.

Neben den technischen Herausforderungen sind auch soziale Probleme zu beachten, denn die Kosten für die Energieversorgung werden vermutlich ansteigen. In Folge dessen werden sich auch die Kostenstrukturen aller Produkte und Dienstleistungen sowie die Nutzungskosten von Produkten deutlich verändern.

<sup>21</sup> Vgl. https://www.fona.de/mediathek/r3/pdf/131126 r3 Broschuere barrierefrei.pdf.

#### Literatur

- Fleck, U.; Mertzsch, N. (2012): Probleme beim Übergang zur Vollversorgung mit Erneuerbaren. In: Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V. (Hg.): 5. Jahrestagung 2012 "Energiewende Produktivkraftentwicklung und Gesellschaftsvertrag". Abstractbook. Berlin (Leibniz-Sozietät der Wissenschaften), S. 101
- Fleischer, L.-G. (2012): Die Energiewende ein komplexer gesellschaftlicher Transformationsprozess mit konkurrierenden Zielen, Prozessen und Strategien. In: Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin e.V. (Hg.): 5. Jahrestagung 2012 "Energiewende Produktivkraftentwicklung und Gesellschaftsvertrag". Abstractbook. Berlin (Leibniz-Sozietät der Wissenschaften), S. 19
- Fleischer, L.-G.; Mertzsch, N. (2014): Herausforderungen größer als erwartet. Die wissenschaftlichtechnische Komplexität der effektiven Speicherung großer Energiemengen stellt ein praktisches und theoretisches Kernproblem der Energiewende dar. In: ReSource Abfall Rohstoff Energie Fachzeitschrift für nachhaltiges Wirtschaften, Jg. 27, III. Quartal, S. 37–45
- Hauner, O. (2011): Herausforderung Klimawandel. Strategisches Management des Klimawandels aus der Sicht der deutschen Versicherungswirtschaft. Vortrag auf der 1. Summerschool "Klimaschutz und Klimafolgenanpassung" der TH Wildau (FH) im ehemaligen Kernkraftwerk Rheinsberg. Berlin (Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V.)
- Krassmann Th. (2011): Vulkanemissionen unterschätzte Gefahr für die deutsche Energieversorgung. URL: www.mineral-exploration.de/mepub/vulkanemissionen.pdf
- Lateltin, O.; Jordi, M. (2008): Hagel die unterschätzte Gefahr. In: Schadensprisma, Sonderheft zur Ausgabe 4/2008 der Zeitschrift für Schadensverhütung und Schadensforschung der öffentlichen Versicherer. URL: www.praever.ch/de/es/Publikationen/Documents/Schadenprisma\_d.pdf
- Mertzsch, N. (2007): Nutzung des Erdgasantriebes zur Verbesserung der Umweltfreundlichkeit des Wassertourismus bzw. Wassersports. VBIW Arbeitskreis "Umweltschutz – Erneuerbare Energien". 19.09. (unveröffentlicht)
- Mertzsch, N. (2011): Ambivalenzen erneuerbarer Energien. In: Banse, G.; Reher, E.-O. (Hg.):
   Ambivalenzen von Technologien Chancen, Gefahren, Missbrauch. Berlin, S. 143–152
   (Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät. Bd. 112)
- Mertzsch, N. (2014): Speicherung Erneuerbarer Energien Versuch eines Überblicks. In: Leibniz Online, Nr. 16. – URL: http://leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2014/01/mertzsch.pdf
- Mertzsch, N.; Jeremias, E.-P. (2015): Entwicklungstendenzen in der Wärmeversorgung. In: Banse, G.; Reher, E.-O. (Hg.): Technologiewandel in der Wissensgesellschaft – qualitative und quantitative Veränderungen –. Berlin, S. 125–132 (Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Bd. 122)
- Offermanns, H.; Bertau, M. (2015): Die Methanol-Ökonomie. URL: http://www.chemanager-online.com/themen/energie-umwelt/die-methanol-oekonomie
- Tappe, St.; Krüger, Th. (2015): Zusammenspiel konventioneller und erneuerbarer Stromerzeugung; Transformer Life Management Tagung 2015. URL: URL: http://corporate.

- vattenfall. de/newsroom/pressemeldungen/pressemeldungen-import/vattenfall-und-nexanstesten-weltweit-modernsten-strombegrenzer-in-boxberg/
- Willems, W. M. (2003): Zur Dauerhaftigkeit ausgewählter Vakuumdämmsysteme. VIP Bau 1. Fachtagung, Rostock-Warnemünde, 10.–11. Juli 2003. URL: http://www.vip-bau.de/pdf/1\_vip\_bau/p\_willems.pdf
- Wüpper, Th.; Gellner, T. (2016): 27 märkische Güterbahnhöfe stehen auf Grubes Streichliste. In: Märkische Allgemeine Zeitung, 19. Mai, S. 9

#### Gerhard Öhlmann

# Ausgewählte, innovative Effizienztechnologien auf Basis von Methan und Kohlenstoffdioxid

## 1 Einleitung

Weltweit wurden im Jahre 2009 ca. 68 Mrd. t an Rohstoffen eingesetzt. Das sind etwa zwei Drittel mehr als im Jahr 1990. Angesichts der Prognosen über die Entwicklung der Weltbevölkerung von heute etwa sechs Milliarden Menschen auf voraussichtlich etwa zehn Milliarden im Jahre 2050 lässt sich eine weitere Zunahme des Verbrauchs von Rohstoffen auf mehr als 140 Mrd. t vorhersehen (vgl. BR 2012, S. 56; UBA 2015). Diese in vertretbarer Größe zu halten, verlangt aus ökonomischen, ökologischen und sozialen Gründen vor allem in der Nutzung der Rohstoffressourcen eine nachhaltige Entwicklung, die technologisch hocheffizient ist, in besserem Einklang mit der Natur steht, aber auch eine höhere Genügsamkeit im Rohstoffverbrauch anstrebt. Darüber hinaus ist eine Erweiterung der Rohstoffbasis unumgänglich, besonders hinsichtlich der stofflichen Nutzung von Kohlenstoffträgern in Gestalt von Methan und CO<sub>2</sub> (vgl. BMBF 2015).

Im Mittelpunkt dieses Beitrages steht die nachhaltige Erweiterung der Rohstoffbasis für die chemische Stoffwandlung. Kurz- bis mittelfristig geht es dabei um die stoffliche Verwertung von Erdgas, langfristig aber auch um die zumindest partielle Rezyklisierung des Kohlendioxids. Die stoffliche Nutzung des CO<sub>2</sub> kann nach Aussage der "Europäischen Technologie Plattform für Nachhaltige Chemie" für die Industrie der Schlüssel sein für eine Reduzierung der Nutzung fossiler Rohstoffe (insbesondere des Erdöls), für die Verminderung der Abhängigkeit der EU von Importen fossiler Rohstoffe (> 90% bei Rohöl) sowie für eine Verbesserung der Sicherheit der Versorgung der EU mit Kohlenstoffverbindungen (vgl. BMBF 2015). Die stoffliche Nutzung des CO<sub>2</sub> ist erstens möglich durch den Einsatz als Baustein für chemische Synthesen durch Reduktion mit Wasserstoff oder Methan, davon soll hier nur die Rede sein, und zweitens als Baustein unter Beibehaltung der C=O- bzw. COO-Funktionalität.

148 Gerhard Öhlmann

Erdgas, dessen Hauptkomponente das Methan ist, kann trotz seines fossilen Charakters mit innovativer Technologie Rohstoff von Wasserstoff sein, ohne dass, wie in der herkömmlichen Technologie der Fall, in der Reaktion selbst CO<sub>2</sub> entsteht. Mit Hilfe dieser Technologie ließe sich die Zeit überbrücken, bis regenerativer Wasserstoff ausreichend wirtschaftlich zur Verfügung steht (vgl. KIT 2015).

Bei dieser Erweiterung der Rohstoffbasis der chemischen Industrie kommt der Katalyse eine herausragende Rolle zu, deren Bedeutung von der chemischen Industrie (hier nicht zuletzt von der BASF) erkannt ist und zu wichtigen Schlussfolgerungen auf dem Gebiet der Katalyseforschung geführt hat. So fand im Juli 2014 die Eröffnung des Gemeinschaftslabors BasCat des Exzellenzclusters UniCat der TU Berlin und der BASF SE statt (vgl. TUB 2014). Dabei handelt es sich um einen interdisziplinären Forschungsverbund, dessen zentrales Thema die Katalyse ist mit spezieller Ausrichtung auf die Erforschung der Grundlagen der heterogenen Katalyse für den Rohstoffwandel. Für die ersten fünf Jahre beträgt das finanzielle Gesamtvolumen des Gemeinschaftslabors 13 Mio. Euro, wovon ca. 50% von der BASF beigesteuert werden. Etwa 45 Arbeitsgruppen, die drei verschiedenen Forschungs-Areas zugeordnet sind, teilen sich diese Summe. Die Leitung wird von der BASF und der TU Berlin gemeinsam wahrgenommen (vgl. BASF 2014). Die BASF hat auch im gleichen Jahr den Vertrag mit der Universität Heidelberg über den Betrieb des "Catalysis Research Laboratory" bis zum Jahr 2017 verlängert. Die Aufgabe dieses Labors ist vor allem auf die homogene Katalyse fokussiert (Oxosynthese, C-H Bindungsaktivierung, phosgenfreier Weg zu Isocyanaten u.a.; vgl. BASF 2015).

# 2 Herkömmliche Wasserstoffproduktion

Gegenwärtig ist die Dampf-Methan-Reformierung das am meisten genutzte Verfahren zur Produktion von Wasserstoff (etwa 48% des weltweit produzierten Wasserstoffs; vgl. Abánades 2012). Mit einem Preis von 1,5 US\$/kg H₂ gehört es in großvolumigen Anlagen (≥ 10.000 Nm³/h) zugleich auch zu den Verfahren, die den Wasserstoff am billigsten produzieren, sofern das anfallende CO₂ nicht abgeschieden und unterirdisch deponiert wird (CCS-Verfahren).

Als Aktivphase der Katalysatoren kommt aus Kostengründen Nickel zur Anwendung. Edelmetalle der VIII. Gruppe sind deutlich aktiver, aber zu teuer. Im Wesentlichen sind es die folgenden drei reversiblen Reaktionen, durch die der Prozess charakterisiert ist, wobei die Reaktion (3) auch ohne die intermediäre CO-Bildung, also direkt, verläuft:

$$CH_4 + H_2O \leftrightarrow CO + 3H_2 \qquad \Delta H^{\circ}_{298} = 206 \text{ kJ/mol} \qquad (1)$$

$$CO + H2O \leftrightarrow CO2 + H2 \qquad \Delta H^{\circ}_{298} = -41 \text{kJ/mol}$$
 (2)

$$CH_4 + 2H_2O \leftrightarrow CO_2 + 4H_2 \qquad \Delta H^{\circ}_{298} = 165 \text{ kJ/mol}$$
 (3)

Die Reaktionen (1) und (3) sind sehr stark endotherm und ihr Verlauf verlangt daher sehr hohe Temperaturen (800 bis 1.000°C). Die Reaktion (2), bekannt als Wassergas-Shift-Reaktion, ist in geringem Maße exotherm. Ihr Gleichgewicht wird daher bei tieferen Temperaturen zugunsten der Wasserstoffbildung verschoben. Um möglichst hohe CO-Umsätze zu erreichen, werden im Anschluss an den Reformer (ein bis zwei) CO-Konvertierungs-Reaktoren niedriger Reaktionstemperatur angeschlossen (400 bis 200°C), in dem die CO-Konzentration im Gas in den Bereich von zehntel Prozenten (und darunter) herabgesetzt wird, vor allem um die Katalysatorvergiftung durch CO in den Folgeprozessen zu vermeiden. Aus Gründen der kompakteren Gestaltung des Reaktors wird der Prozess trotz der mit ihm verbundenen Zunahme des Gasvolumens bei höheren Drucken realisiert (30 bis 40 bar). Günstig auf den Umsatz des Methans wirkt sich eine Erhöhung des Dampf/Methan-Verhältnisses aus. Wegen des erhöhten Energieverbrauchs zur Verdampfung des Wassers wird aber in der Regel bei einem Verhältnis von Dampf/Methan nicht höher als drei gearbeitet (vgl. Beurden 2004).

Der Hauptnachteil des Verfahrens besteht in dem hohen Zwangsanfall von 0,34 mol CO<sub>2</sub> pro Mol Wasserstoff (vgl. Abánades 2012) und gilt natürlich besonders, wenn der Wasserstoff für die Reduktion von Kohlenstoffdioxid verwendet werden soll. Das bedeutet z.B., dass allein die weltweite Ammoniakindustrie durch diese Art der Wasserstoffgewinnung jährlich CO<sub>2</sub>-Emissionen von etwa 200 Mio. t verursacht. Die in Deutschland insgesamt (d.h. nicht nur mit Verfahren der Dampfreformierung von Methan) produzierte Menge Wasserstoff liegt bei etwa 19 Mrd. Nm³/a, was einem Anteil von etwa 4% der weltweiten Wasserstoffproduktion entspricht. Das Energieäquivalent dieser Menge beträgt 216 PJ/a, das waren im Jahre 2001 1,5% des gesamten Energieverbrauchs in Deutschland.

# 3 Spaltung von Methan in seine Elemente – Herstellung von Wasserstoff zur Produktion von Synthesegas aus CO<sub>2</sub>

Die Spaltung von Methan in seine Elemente Kohlenstoff und Wasserstoff,

$$CH_4 \rightarrow C_s + 2H_2$$
  $\Delta H_{298K} = +75.6 \text{ kJ/mol},$ 

mitunter auch als Methancracken oder Methan-Dekarbonisierung bezeichnet, ist ein seit längerem wissenschaftlich sowohl mit als auch ohne Kataly-

150 Gerhard Öhlmann

satoren, untersuchter Prozess, da die Reaktion selbst neben dem Wasserstoff nur *festen* Kohlenstoff liefert und infolgedessen CO<sub>2</sub> nur gebildet wird, sofern zur Erzeugung der notwendigen Prozesswärme für die endotherme Reaktion die Verbrennungswärme fossiler Energieträger verwendet wird (vgl. Steinberg 1996). Die CO<sub>2</sub>-Emission wird mit 0,05 Mol/Mol H<sub>2</sub> angegeben (vgl. Abanades 2012).

Die Hauptschwierigkeit der technischen Realisierung des Prozesses besteht in der Bildung des festen Kohlenstoffs, die sowohl zu Verstopfungen im Reaktorsystem wie auch, bei Verwendung von Katalysatoren, zu deren schneller Deaktivierung führt. Die Lösung dieses Problems durch ein innovatives Reaktorkonzept sollte die Möglichkeit schaffen, über die endotherme, umgekehrte Wassergas-Shift-Reaktion (Reverse Water Gas Shift, RWGS)

$$CO_2 + H_2 \leftrightarrow CO + H_2O$$
  $\Delta H^0 = 41 \text{ kJ/mol}$ 

den in der Methanspaltung erzeugten Wasserstoff für die Gewinnung von Kohlenstoffmonoxid aus CO<sub>2</sub> zu nutzen und damit ein neues, zweistufiges Synthesegasverfahren auf Basis von CO<sub>2</sub> zu entwickeln.

Der Gedanke zur Verwendung einer Blasensäule mit flüssigem Zinn als Reaktor für die Methanspaltung geht zurück auf Meyer Steinberg, der in einem Bericht für das US Department of Energy vom August 1995 zum Thema "Der Carnol-Prozess für die CO<sub>2</sub>-Verminderung von Kraftwerken und dem Transport-Sektor" vorschlug, das Konzept des Carnol-Verfahrens durch die Umstellung auf einen solchen Reaktor zu verbessern (vgl. Steinberg 1995).

Bei Georg A. Olah findet sich der Hinweis, dass der Carnol-Prozess im Brookhaven National Laboratory entwickelt wurde und jahrelang nicht für die Wasserstoffproduktion, sondern für die Produktion von Ruß genutzt wurde (vgl. Olah et al. 2006). Auch Olah hält – wie ehemals Steinberg – das Koppelprodukt, den festen Kohlenstoff, für vorteilhaft im Vergleich zum CO<sub>2</sub>-Zwangsanfall bei der Dampfreformierung von Methan, obwohl Walter Seifritz in seinen Bemerkungen zur angeblich leichteren Handhabung des festen Kohlenstoffs (z.B durch Deponierung in künstlichen Kohlestollen) im Vergleich zum CO<sub>2</sub> bereits in den neunziger Jahren des vorigen Jahrhunderts kritisch feststellte, mit welchen riesigen Mengen festen Kohlenstoffs man es zu tun haben würde, wollte man die schon heute weltweit produzierte Wasserstoffmenge vorrangig über die Methanspaltung gewinnen (vgl. Seifritz 2014).

In den vergangenen zwei Jahrzehnten wurde es immer klarer, dass Methanhydrat offenbar in viel größerem Umfang in größerer Tiefe im Meeresboden vorhanden ist, als man zunächst annahm. Mit dieser Erkenntnis verband sich die Hoffnung, durch die Förderung dieses in Eis eingeschlossenen Methans durch thermische Spaltung in seine Elemente Wasserstoff zu gewinnen und durch dessen energetische Nutzung in (Gas-)Kraftwerken eine neue, klimaverträgliche Energieversorgung mit großer Reichweite zu erschließen. Der elementar anfallende Kohlenstoff sollte nach diesem Konzept in ehemaligen Bergwerken und/oder Braunkohlen-Tagebauen eingelagert werden. Man sprach von einem Kohlenstoff-Moratorium, da der Kohlenstoff ja nicht für immer verloren wäre (vgl. Kreysa 2008, 2009).

Kehren wir zunächst zurück zum Prozess der Methanspaltung selbst.

Die BASF, Linde, Thyssenkrupp, die BASF Tochtergesellschaft HTE sowie die Wissenschaftspartner VDEh-Betriebsforschungsinstitut in Düsseldorf und die Technische Universität Dortmund erklärten im Juli 2013, gemeinsam den Prozess der Methanspaltung zu entwickeln. 1 Der Entscheidung zur Aufnahme dieser Arbeiten ging eine ökonomisch/ökologische Betrachtung voraus (vgl. Machhammer et al. 2015), die unter den gewählten Randbedingungen bei ähnlichen Kosten selbst für einen Strommix, wie er für 2030 erwartet wird, im Vergleich zu den herkömmlichen Verfahren (Methan-Dampf-Reformierung, Kohlevergasung) einen deutlich geringeren CO<sub>2</sub>-footprint (kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>) ausweist (vgl. BMBF 2014, S. 65). Allein für die Herstellung des Wasserstoffs nach diesem Verfahren wird im Vergleich mit den herkömmlichen Technologien mit einer um ca. 50% niedrigeren CO<sub>2</sub>-Emission gerechnet. Unter dem Titel "Feste und fluide Produkte aus Gas (FfPaG)" wurde das Projekt in die BMBF-Fördermaßnahme "Technologien für Nachhaltigkeit und Klimaschutz - Chemische Prozesse und stoffliche Nutzung von CO2" einbezogen und beginnend im 2. Halbjahr 2013 für drei Jahre mit insgesamt 9,2 Mio. Euro gefördert. Das Ziel des Projekts besteht in der Entwicklung eines Konzepts für ein Pilotsystem, das ein neues Verfahren zur Herstellung von flüssigen und festen Produkten aus einem Gas ermöglicht (vgl. BMBF 2014). Neben den bereits genannten Vorteilen spricht für dieses Verfahren, dass Erdgas noch viele Jahre in großen Mengen verfügbar sein wird, der Prozess rein thermischer Natur ist, also weder Sauerstoff- noch Wasserzusätze erfordert und neben dem Wasserstoff nur festen Kohlenstoff produziert, der Steinkohlenkoks potenziell zumindest

<sup>1</sup> Vgl. http://www.chemanager-online.com/news-opinions/nachrichten/basf-linde-und-thyssen krupp-entwickeln-neuen-synthesegas-prozess.

152 Gerhard Öhlmann

partiell in der Stahlindustrie substituieren kann. Da der Prozess bei hohen Temperaturen abläuft, lässt sich die Abwärme mit hohem Wirkungsgrad direkt in den Prozess zurückführen (vgl. BASF 2013). Ob diese Vorzüge in der industriellen Praxis wirksam werden, hängt vor allem von der Konstruktion und der Funktionsweise des Reaktors ab. Der Kohlenstoff darf sich nicht an den Reaktor- und Rohrwänden absetzen und zu Verstopfungen führen.

In den ersten Vorstellungen des Teams der branchenübergreifenden Forschungskooperation sollte analog dem in Norwegen entwickelten Kvaerner-Verfahren (Lichtbogenverfahren) die Methanpyrolyse in einem Plasmabrenner vorgenommen werden. Wegen des hohen Energieverbrauchs und der sehr hohen Temperaturen sind aber auch andere Reaktoren untersucht worden (vgl. Agar 2016). Dazu gehört das Konzept eines fluiden Wand-Strömungs-Reaktors, bei dem ein inertes Heizmedium (Ar, He oder N<sub>2</sub>) aus einem beheizten zylindrischem Gefäß durch eine poröse keramische, röhrenförmige Membran in das Innere dieses von Erdgas durchströmten Membran-Rohrs (der eigentliche Reaktor) eindringt und die auf diese Weise transportierte Wärmeenergie das Erdgas in homogener Gasphase spaltet und den festen Kohlenstoff mit dem Gas aus dem Reaktor hinaus trägt.

Eine weitere Reaktorvariante ist ein mit geschmolzenem Metall gefüllter Kapillar-Reaktor, durch den in kleinen Bläschen Erdgas strömt. In diesen aufsteigenden, feinen Bläschen wird das Methan gespalten. Die Bewegung der Gase bewirkt eine ständige Erneuerung der Oberfläche der Bläschen und die Austragung des gebildeten Kohlenstoffs aus dem flüssigen Metall. Die experimentellen Untersuchungen zu dieser Reaktor-Variante zeigen, dass die Anwendung geschmolzenen Metalls in dem Kapillar-Reaktor beherrschbar und machbar ist. Erste Experimente mit Methan bei 1.100°C und einer Leerrohrgeschwindigkeit von 0,122 ms<sup>-1</sup> belegen die Spaltung des Methans mit mittleren Umsätzen von 32% ohne Kohlenstoffablagerungen (vgl. Schulz/Agar 2015).

Die Untersuchungs-Ergebnisse an dem fluiden Wand-Strömungsreaktor zeigten bei Änderung von Temperatur, Verweilzeit und dem Verhältnis von Methan zu Inertgas, dass hohe Temperaturen (1.100°C) und relativ hohe Verweilzeiten unbedingt nötig sind. Eine weitere Möglichkeit zur Umsatzsteigerung besteht in der Erhöhung des Verhältnisses von Methan zu Inertgas. Bei einer Verweilzeit von 1,2 s und einem CH<sub>4</sub>: N<sub>2</sub>-Verhältnis von 1: 4 wurde ein Umsatz von 14% und bei einem Verhältnis von 1: 10 ein Umsatz von 33% erreicht. Offenbar verdankt sich diese Umsatzsteigerung dem erhöhten konvektiven Wärmeeintrag durch das Inertgas. Allerdings wird der

entstehende Kohlenstoff im Reaktorsystem abgelagert (vgl. Agar 2016). Somit hat der fluide Wandströmungs-Reaktor bisher noch nicht in vollem Umfang die gewünschte Wirkung, und weitere Untersuchungen zur Vermeidung der Kohlenstoffablagerungen sind notwendig. Die Ursache für ihre Bildung besteht offensichtlich in der Diffusion des Methans aus dem eigentlichen Reaktor in das beheizte Gefäß des Inertgases, in dem es dann reagiert, allerdings unter Ablagerung von Kohlenstoff. Die Untersuchung des Einflusses dieser Methandiffusion und seines Ausmaßes erklärt den beobachteten sinkenden Umsatz des Methans von etwa 50% auf unter 10% (vgl. Schulz/Agar 2015).

Die Verwendung des bei der Methanpyrolyse gebildeten Kohlenstoffs als potenzielles, zumindest partiell, Substitut für Steinkohlenkoks in der Eisenverhüttung setzt die Tauglichkeit des Kohlenstoffs für den Hochofenbetrieb voraus. Untersuchungen hierzu wurden und werden im VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH (BFI), Düsseldorf, durchgeführt:

"Die wesentlichsten Aufgaben des BFI in diesem Verbundprojekt sind die Spezifikation des Kohlenstoffs, die Formulierung und das Handling der festen Produkte sowie die Entwicklung eines neuartigen Heizungskonzeptes für den Pyrolysereaktor." (Hensmann 2013/14, S. 56)

Konkrete Ergebnisse hierzu sind bisher aber noch nicht veröffentlicht, es sei denn, sie haben Eingang gefunden in den Hauptvortrag des Projektkoordinators Dr.-Ing. Andreas Bode, den dieser laut Programm auf der 1. Jahrestagung der Fachgruppe Chemie und Energie Anfang Oktober in Jena gehalten haben müsste. Es sei daran erinnert, dass die Wirtschaftlichkeit der Methanpyrolyse stark abhängig ist von dem Marktwert des Kohlenstoffs. Die eindeutige Beantwortung der Frage nach der Tauglichkeit desselben im Hochofenprozess ist daher von großer Bedeutung.

Der durch die Methanpyrolyse mit deutlich geringerer CO<sub>2</sub>-Emission herstellbare Wasserstoff dient im Rahmen dieses Projektes der Aktivierung des in der Stahlindustrie anfallenden Kohlendioxids zur Herstellung von Synthesegas in der reversen Wassergas-Shift-Reaktion (RWGS). Allein die Menge des in der deutschen Eisen- und Stahlindustrie anfallenden Kohlendioxids betrug im Jahr 2012 57,8 Mio. t.

Die Reduktion des Kohlendioxids mit Wasserstoff (RWGS)

$$CO_2 + H_2 \leftrightarrow CO + H_2O$$
  $\Delta H_{298K} = 41,2kJ/mol$ 

<sup>2</sup> Vgl. www.gdch.de/energie2016.

154 Gerhard Öhlmann

ist endotherm und verläuft erst bei Temperaturen oberhalb 700°C ohne die Bildung von Methan als Nebenprodukt. Da sich der bei der Methanpyrolyse entstehende Wasserstoff etwa auf diesem Temperatur-Niveau befindet, reicht seine Wärmeenergie aus, um genügend hohe Umsätze des Kohlendioxids zu Kohlenmonoxid zu ermöglichen. Eine weitere Wärmezufuhr ist nicht erforderlich. Allerdings kann der für die konventionelle Tieftemperatur-Konvertierung industriell eingesetzte Cu/Zn-Katalysator in diesem Temperaturbereich nicht verwendet werden, da er nicht temperaturstabil genug ist (vgl. Schwab et al. 2015).

Bereits 2008 hatten chinesischen Autoren einen durch gemeinsame Fällung hergestellten Nickel/Cer-Katalysator beschrieben (2% Ni-CeO<sub>2</sub>), der den Autoren zufolge exzellente katalytische Leistung hinsichtlich Aktivität, Selektivität und Stabilität besitzen soll (vgl. Wang et al. 2008). Untersuchungen dergleichen Autoren erbrachten 2013 den Nachweis, dass die Methode der Herstellung des Ni-CeO<sub>2</sub> durch gemeinsame Fällung die besten Ergebnisse liefert. Anfang dieses Jahres gelang den Autoren die Herstellung eines mesoporösen Ni-CeO<sub>2</sub>-Katalysators, der eine feste Lösung von Ni in CeO<sub>2</sub> ist und eine noch höhere Stabilität aufweist (vgl. Liu et al. 2016).

## 4 Spaltung von Methan in seine Elemente in einer Flüssigmetall-Blasensäule

Offenbar weitgehend parallel und unabhängig von dem im Abschnitt 3 beschriebenen Projekt entwickelten das 2009 in Potsdam gegründete Institut für fortgeschrittene Nachhaltigkeitsstudien (IASS) und das Karlsruher Flüssigmetall-Labor (KALLA) im Karlsruher Institut für Technologie (KIT) gemeinsam die Grundlagen einer Technologie der rein thermischen Methanspaltung zur Erzeugung von Wasserstoff mit möglichst geringem Anfall von Kohlendioxid (vgl. gas for energy online 2015), denn der Übergang zur umfangreichen Nutzung CO2-freier Energiequellen wie die erneuerbaren Energien wird noch einige Zeit in Anspruch nehmen (vgl. Abánades 2012; Abánades et al. 2012). Die Arbeiten wurden in den Jahren 2011/2012 begonnen und fanden im Dezember 2015 ihren Abschluss als Laboruntersuchungen (vgl. Abánades et al. 2016). Ähnlich wie in Abschnitt 3 beschrieben, fällt auch hier CO2 nur an aus der Wärmezuführung zur Aufheizung des Reaktors, und das auch nur dann, wenn Methan als Heizgas verwendet wurde, was hier der Fall war (ca. 10% des Methandurchsatzes). Zur Anwendung kam ein neuer Reaktor auf Basis einer Flüssigmetall-Technologie. eine Blasensäule mit flüssigem Zinn. Dabei wird Methan am Boden eines zylindrischen Reaktors von 120 cm Länge durch ein einzelnes kleines (Durchmesser 1 mm) Loch in feinen Blasen in das flüssige Zinn eingeführt. Die Spaltung des Methans erfolgt in den Bläschen, während sie zur Oberfläche des flüssigen Metalls aufsteigen, wo sich der gebildete Kohlenstoff abscheidet, sobald die Bläschen platzen (vgl. gas for energy online 2015; Plevan et al. 2015). In den jüngsten Experimenten arbeitete der Labor-Reaktor ohne Unterbrechung zwei Wochen lang und produzierte Wasserstoff mit einem Umsatz des Methans von 78% bei 1.200°C.

Am 2. und 3. Dezember 2015 fand das abschließende Treffen zum Projekt "Experiment Design for the Application of Liquid Metal Technology to Methane Cracking" am KIT statt.

"Das Verfahren soll in einem neuen Konsortium unter maßgeblicher Beteiligung des KIT sowie der bisherigen wissenschaftlichen Partner mit dem Ziel weiterentwickelt werden, eine Skalierung bis hin zum Industrieprozesses zu ermöglichen "

Nach Einschätzung der Autoren hat das Verfahren wichtige Vorteile im Vergleich zur Dampfreformierung von Methan. Es ist als Einstufen-Prozess einfacher, benötigt keine Wasserdampfkonvertierung, wodurch die energetisch aufwändige Gasreinigung vereinfacht wird, der Anfall von CO<sub>2</sub> ist deutlich geringer, auch wenn die Heizung mit Methan erfolgt. Denkbar ist das Verfahren als Brückentechnologie bis zu höherer Reife der Wasserelektrolyse und größerer Anteile regenerativen Stroms. Darüber hinaus ermöglicht das Verfahren eine frühere Einbeziehung des CO<sub>2</sub> als Rohstoff.

Die bereits begonnene Arbeit im Zusammenhang mit der Maßstabsvergrößerung ist auf die weitere Verbesserung der Reaktorkonstruktion sowie die Optimierung der Arbeitsbedingungen gerichtet, die vor allem die Erhöhung der Produktionsgeschwindigkeit des Wasserstoffs zum Ziel hat (vgl. Abánades et al. 2016).

# 5 Hüttengase als Ressource für Chemieprodukte.

Deutschland ist der größte Stahlproduzent der Europäischen Union (2015: 42,7 Mio. t) und steht an siebenter Stelle in der Welt. Hauptmitbewerber auf dem Weltmarkt ist seit einigen Jahren China. Unter den Megatrends, die von großem Einfluss auf den Druck zu innovativen Veränderungen in der Stahlindustrie sind, verlangen vor allem die Rechtsnormen zum Schutze des Klimas und der Umwelt sowie der indirekte Zwang zur Verminderung der

<sup>3</sup> Vgl. www.kit.edu/b3/english/16206.php.

156 Gerhard Öhlmann

CO<sub>2</sub>-Emissionen eine ständige Weiterentwicklung der Materialien und Verfahren.<sup>4</sup>

Im Rahmen der Strategiedebatte um die "Positionierung von Thyssenkrupp als diversifizierter Industriekonzern" ging es auch um die stoffliche Nutzung der Hüttengase, die bisher zur Erzeugung von Strom zur Deckung des Bedarfs der eigenen Produktionsanlagen genutzt wurden, die im Ergebnis ihrer Verbrennung aber zur Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Emission der Eisen- und Stahlproduktion beitragen.

Thyssenkrupp initiierte zu diesem Zweck das Projekt Carbon2Chem, dessen Ziel es ist, Prozessgase aus der Stahlproduktion in chemische Grundstoffe umzuwandeln. Das BMBF beteiligt sich mit 60 Mio. Euro Fördermitteln. Das Projekt ist langfristig angelegt und zunächst für zehn Jahre geplant. Weitere 16 Partner aus Forschung und Entwicklung, einschließlich der Grundlagenforschung, sowie Partner aus verschiedenen Industriebranchen beteiligen sich daran. Alle Partner stehen vor großen Aufgaben, deren Lösung aber durch die enge Zusammenarbeit von Experten der verschiedensten wissenschaftlichen und technischen Disziplinen begünstigt wird (vgl. Schlögl 2016).

Die Schwierigkeiten beginnen schon bei der Analyse der Gaszusammensetzung, die sich qualitativ und quantitativ im Anlagenbetrieb ändern kann. Insbesondere gilt das für die Spurenkomponenten, die eine besondere Gefahr für die Katalysatoren der nachgelagerten Prozesse darstellen können (siehe Tab. 1).

Die Reinigung der Gase und die Mischung der Gasströme im notwendigen Verhältnis ist deshalb eine Aufgabe, die nicht von konstanten Bedingungen ausgehen kann, sondern sich der Dynamik der Prozesse anpassen

	Kokereigas	Hochofengas	Konverter
Tab. 1: Bestandteile der	unterschiedliche	en Hüttengase im	Stahlwerk

	Kokereigas	Hochofengas	Konvertergas
Stickstoff (N2)	5 %	49 %	14 %
Wasserstoff (H <sub>2</sub> )	61 %	4 %	4 %
Kohlenmonoxid (CO)	6 %	25 %	65 %
Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> )	2 %	23 %	17 %
Sonstiges (auch Spurenelemente)	26 %	> 0	>0

Quelle: BMBF 2016 (nach Angaben der Thyssenkrupp AG)

<sup>4</sup> Vgl. www.boersen-zeitung.de/ajax/bzpro artikel.php?objt id=201.

muss. Die für die Synthesegasherstellung wichtigen Komponenten sind Kohlenmonoxid, Kohlendioxid und Wasserstoff, der aber nicht ausreicht und deshalb zusätzlich auf gesondertem Wege erzeugt und dem Synthesegas im notwendigen Verhältnis zugemischt werden muss. Für die kurz- bis mittelfristige Lösung der Wasserstoffproduktion, die, wie wir im Abschnitt 3 bereits sahen, zumindest CO<sub>2</sub>-emissionsarm sein muss, wäre das Verfahren der Methanpyrolyse geeignet, wenn es denn rechtzeitig entwickelt sein wird und technisch realisiert werden kann.

In diesem Fall aber geht es um eine langfristige, nachhaltige, von der Nutzung fossiler Energieträger unabhängigen Lösung, also kann der Wasserstoff nur elektrolytisch aus Wasser gewonnen werden. Der Strom für die Elektrolyse muss also aus erneuerbaren Quellen stammen. Besonders vorteilhaft wäre es, wenn sich dafür der Stromüberschuss verwenden ließe, der immer dann anfällt, wenn die Bedingungen für die Entstehung des Stroms aus Wind- und Photovoltaik-Anlagen besonders günstig sind (vgl. BMBF 2016). Um das zu ermöglichen, benötigt man Elektrolyseanlagen, die sich schnell dem veränderlichen Stromangebot anpassen können, oder aber man muss bei Überangebot den Strom speichern. Offenbar sollen beide Wege innerhalb des Projektes untersucht werden. Für den Weg der Strom-Speicherung arbeitet Thyssenkrupp an der Weiterentwicklung der Redox-Flow-Batterien (vgl. Thyssenkrupp 2016). Entwickelt wird außerdem ein Elektrolyse-System, dessen Kapitalkosten 3,5- bis 6-mal geringer sein sollen als bei anderen Lösungen.<sup>5</sup> Über die Art der aus den gereinigten Hüttengasen zu produzierenden Basischemikalien gibt es offenbar noch keine endgültigen Entscheidungen. Zunächst ist an Methanol und ausgehend davon an höhere Alkohole gedacht und nicht zuletzt auch an den synthetischen Kraftstoff OME1 (Oxymethylenether; als ungiftiger und flüssiger C1-Dieselkraftstoff; vgl. Maus et al. 2014). Auch die Herstellung von Kunststoffen und Düngemitteln liegt im Bereich der Möglichkeiten. Obwohl für die genannten Basisprodukte Verfahren im industriellen Maßstab bekannt sind, besteht erheblicher Forschungsbedarf durch die Spezifik der Kopplung der chemischen Prozesse mit den Prozessen der Hütten- und Stahlindustrie und der Wasserstofferzeugung sowie die Nutzung erneuerbaren Stroms. Dies gilt insbesondere für die Katalysatoren dieser Prozesse. Auch andere, bisher nicht industriell genutzte Reaktionspfade sind zu berücksichtigen.

Aber selbst wenn es gelingt, das Stromangebot aus erneuerbaren Quellen von natürlichen Schwankungen unabhängig zu machen, bleibt dennoch

<sup>5</sup> Vgl. https://www.thyssenkrupp.com/de/unternehmen/innovation/technologien-fuer-die-energiewende/wasserelektrolyse.html.

158 Gerhard Öhlmann

das für die industrielle Katalyse grundsätzliche Problem, die Formierung der katalytisch aktiven Oberfläche unter Einwirkung des Reaktionsmediums zu verstehen und die Dynamik dieses Prozesses für den katalytischen Prozess und Veränderungen des Reaktionsmediums nutzbar zu machen. Eine nicht zu unterschätzende Anzahl von zu lösenden Problemen, zum Teil von grundsätzlicher Bedeutung, wartet also auf alle Partner dieses Projektes und die mit ihm verbundenen Risiken sind nicht gering.

Für die deutsche Eisen- und Stahlindustrie ist die Lösung des Problems der deutlichen Verminderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen auch ein Problem ihrer Wettbewerbsfähigkeit auf den internationalen Märkten. Umso sorgfältiger ist zu prüfen, ob die von der EU geplanten Gebührenerhöhungen für die Emissionszertifikate von CO<sub>2</sub> dieses konkrete Projekt nicht grundsätzlich gefährden könnten (vgl. Hiesinger 2016).

# 6 Ethylen aus Methan – katalytische, oxidative Methan-Kupplung (OCM)

Ethylen ist eines der bedeutendsten, großvolumigen chemischen Zwischenprodukte. Global werden jährlich mehr als 140 Millionen Tonnen Ethylen produziert, überwiegend durch Pyrolyse von Leichtbenzin. Die Rohstoffbasis seiner industriellen Produktion effizient zu erweitern ist deshalb ein Anliegen von großer wirtschaftlicher Relevanz.

Dies gelingt auf Basis von Methan und ist eine der Reaktionen von dessen direkter Aktivierung. Die Methankupplung zu Ethylen erfolgt prinzipiell unter Zugabe von Sauerstoff nach folgender Reaktionsgleichung:

$$2CH_4 + O_2 \rightarrow C_2H_4 + H_2O$$
  $\Delta H_{298K} = -280,3 \text{ kJ/mol}$ 

Die Reaktion ist exotherm und wird seit den frühen achtziger Jahren untersucht (vgl. Keller/Bhasin 1982). Die verwendeten Katalysatoren hatten aber leider eine viel zu kurze Lebensdauer. Charakteristisch waren hohe Selektivitäten bei geringen Methanumsätzen und geringe Selektivitäten bei hohen Umsätzen. An eine technische Anwendung war also zunächst nicht zu denken. Die Ursache dieses Verhaltens wurde letztlich in der zu hohen Reaktionstemperatur (> 800°C) gesehen. Bei diesen Temperaturen verläuft die Reaktion als heterogen-homogener Prozess, wobei der überwiegend homogene Reaktionsanteil in der sehr schnell ablaufenden Totaloxidation der primär heterogen gebildeten Methylradikale besteht. Das Ziel der weiteren Katalysator-Entwicklung bestand deshalb vor allem in der Senkung der Reaktionstemperatur bei möglichst erhöhter katalytischer Aktivität. Darüber hin-

aus wurde die Reaktion bei geringem (2 bar) Überdruck durchgeführt, möglicherweise um die bimolekulare Rekombination der Methylradikale zu begünstigen.

Vor einigen Jahren gelang der US-Firma Siluria Technologies die Entwicklung eines unikalen Katalysators auf Basis von Nanodrähten. Bei der Firma handelt es sich um ein relativ junges Unternehmen mit Sitz in San Francisco, das auf die Produktion von Kraftstoffen und anderen Chemieprodukten spezialisiert ist. Die Firma hat in den Jahren 2013 bis 2015 umfassende Patente zur Herstellung und Anwendung dieser Nanokatalysatoren angemeldet und erteilt bekommen (vgl. ST 2013, 2015). Nach umfassender Prüfung der Pilotergebnisse der Siluria Technologies entschloss sich die Linde AG im Juni 2014 zur Gründung einer Ethylentechnologie-Partnerschaft mit der Siluria Technologies (vgl. Linde 2014). Anfang April 2015 erfolgte dann die Inbetriebnahme einer Demonstrationsanlage am Standort der Fa. Braskem in La Porte, Texas, USA, die nun schon ein Jahr erfolgreich arbeitet und bisher 18 Testfahrten absolvierte, deren Ziel in der Reproduktion kundenspezifischer kommerzieller Betriebsbedingungen bestand. Untersucht wurden verschiedene Temperaturen, Drücke, Strömungsgeschwindigkeiten und Zusammensetzungen des Einsatzproduktes.<sup>6</sup> Linde Engineering und Siluria Technologies arbeiten mit vereinten Kräften, um diese Durchbruchstechnologie auf den Markt zu bringen. Die Siluria hat neben dem OM-Prozess auch den Prozess der Umwandlung des Ethylens in flüssige Kohlenwasserstoffe (Kraftstoffe) entwickelt und denkt daran, beide Verfahren auch gemeinsam zu vermarkten.

Schlüssel zum Erfolg ist vor allem die neuartige Templat-Technologie für Nanodraht-Strukturen. Leider ist die genaue Zusammensetzung der Nanodraht-Katalysatoren nicht bekannt (internes Firmenwissen). Manches lässt sich aber aus dem Patent der Siluria über die Herstellung der Nanodrähte verstehen: Zu einer Lösung eines polymeren Templats werden mindestens ein Metallion und mindestens ein Anion zugegeben. Dies geschieht unter Bedingungen, die Keimbildung und Keimwachstum von Nanodrähten, bestehend aus Metallsalzen  $(M_m X_n Z_p)$ , auf dem Templat ermöglichen. Wahlweise können diese Nanodrähte in Metalloxid-Nanodrähte  $(M_x O_y)$ , Metalloxy-Hydroxide  $(M_x O_y O H_z)$ , Metall-Oxycarbonate  $(M_x O_y (CO_3)_z)$ , Metallcarbonate  $(M_x (CO_3)_y)$  oder einer Kombination beider umgewandelt werden. Es bedeuten: M metallisches Element der 1. bis 7. Gruppe sowie Lanthaniden und Actiniden, X z.B. Hydroxid, Karbonat, Bikarbonat, Phos-

<sup>6</sup> Vgl. http://www.printthis.clickability.com/pt/cpt?expire=&title=Siluria+A.

160 Gerhard Öhlmann

phat, Hydrogenphosphat, Sulfat, Nitrat oder Oxalat, Z ist Sauerstoff, m, n, x und y sind Zahlen zwischen 1 und 100 (p ist eine Zahl zwischen 0 und 100). Als Polymer-Template können z.B. Polyvinylpyrrolidon, Polycaprolacton oder Polyethylenglykol und andere mehr eingesetzt werden. Als Beispiele für die nach dieser Methode hergestellten Nanodraht-Katalysatoren und deren Leistungsvermögen seien hier Katalysatoren genannt, die aus La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oder La<sub>3</sub>NdO<sub>6</sub> mit 1 bis 4 Dotierungselementen aus der Reihe Eu, Na, Sr, Tm, Zr, Ca, Mg, Sm, W, La, K, Ba, Zn und Li bestehen. Ihre katalytische Testung in der OCM-Reaktion ergab für jeden von ihnen mehr als 10% C<sub>2</sub>-Ausbeute bei einer Selektivität von mehr als 50% und CH<sub>4</sub>-Umsätzen von mehr als 20% bei Temperaturen von  $\leq$  650°C und Drücken zwischen 1 und 10 bar. Es kann davon ausgegangen werden, dass das nicht die optimalen Leistungsparameter sind.

## 7 Schlussbemerkungen

Die chemische Industrie beginnt sich dem Problem des beginnenden Rohstoffwandels zu stellen. Unbedingte Voraussetzung für das Gelingen dieses Wandels ist die enge, branchenübergreifende Zusammenarbeit der Unternehmen des produzierenden Gewerbes unter Einbeziehung von Einrichtungen der angewandten Forschung bis hin zur Grundlagenforschung. In diesem Sinne vorbildlich erscheint dem Autor die Initiative der deutschen Stahlindustrie, auf die im Beitrag eingegangen wurde.

Langfristig gesehen kann die allmähliche Schließung des Kohlenstoffkreislaufs durch die zunehmende Rezyklisierung des Kohlendioxids sich günstig auf das Klima auswirken. Die Verbreiterung der Rohstoffbasis für die stoffwandelnde Industrie um Methan und Kohlendioxid stellt hohe Anforderungen an die Katalyse auch wegen der großen Stabilität beider Verbindungen, die höhere Reaktionstemperaturen erforderlich macht. Neue Methoden der Synthese, der Charakterisierung, der Modellierung und Berechnung von Katalysatoren ermöglichen der Katalyse eine Schlüsselrolle in der erfolgreichen Lösung der damit verbundenen Probleme.

#### Literatur

Abánades A.; Rubbia, C.; Salmieri, D. (2012): Technological Challenges for Industrial Development of Hydrogen Production based on Methane Cracking. In: Energy, Vol. 46, Issue 1, pp. 359–363

- Abánades, A. (2012): The Challenge of Hydrogen Production for the Transition to a CO<sub>2</sub>-free Economy. In: Agronomy Research, Vol. 10, Special Issue 1, pp. 11–16
- Abánades, A.; Rathnam, R. K.; Geißler, T.; Heinzel, A.; Mehravaran, K.; Müller, G.; Plevan, M.; Rubbia, C.; Salmieri, D.; Stoppel, L.; Stückrad, St.; Weisenburger, A.; Wenninger, H.; Wetzel, Th. (2016): Development of Methane Decarbonisation Based on Liquid Metal Technology for CO<sub>2</sub>-free Production of Hydrogen. In: International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 41, Issue 19, pp. 8159–8167
- Agar, D. W. (2016): Abschlussbericht zum F\u00f6rderprojekt Methanpyrolyse zur Wasserstofferzeugung ohne CO<sub>2</sub>-Emissionen. Projektantrag DFG 2016. TU Dortmund
- BASF (2013): News Release "Research Cooperation Develops Innovative Technology for Environmentally Sustainable Syngas Production from Carbon Dioxide and Hydrogen". 02. July. – URL: https://www.basf.com/en/company/news-and-media/news-releases/2013/07/p-13-351.html
- BASF (2014): Eröffnung des neuen BasCat-Labors an der TU Berlin. 09. Juli. URL: http://www.chemanager-online.com/news-opinions/unternehmen/basf
- BASF (2015): BASF und Universität Heidelberg verlängern Forschungskooperation. URL: http://www.chemanager-online.com
- Beurden, P. van (2004): On the Catalytic Aspects of Steam-methane Reforming. A Literature Survey. In: ECN Report ECN-1--04-003
- BMBF Bundesministerium für Bildung und Forschung (2014): Broschüre zur 4<sup>th</sup> Status Conference "Technologies for Sustainability and Climate Protection Chemical Processes and Use of CO<sub>2</sub>". Vortrag Bode "FfPaG Gas to Liquids and Solids", S. 65. URL: www.chemieundco2.de
- BMBF Bundesministerium für Bildung und Forschung (2015): Bekanntmachung des BMBF Richtlinie zur Förderung von "CO<sub>2</sub>Plus Stoffliche Nutzung von CO<sub>2</sub> zur Verbreiterung der Rohstoffbasis". URL: https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung.php? B=1055
- BMBF Bundesministerium für Bildung und Forschung (2016): Was macht die Forschung? URL: https://www.google.de/search?q=BMBF%2C+Herausforderung+"Carbon2Chem"++Wasmacht+die+Forschung%3F&ie=utf
- BR Bundesregierung (2012): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. URL: http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\_BMU/Pools/Broschueren/progress\_broschuere\_de\_bf.pdf
- Gas for energy online (2015): Trade and Industry, 27.11.2015, Technology to produce hydrogen from methane without carbon dioxide emissions
- Hensmann, M. (2013/14): Innovative Technologie zur umweltschonenden Herstellung von Synthesegas aus Kohlendioxid und Wasserstoff. In: Tätigkeitsbericht VDEh Betriebs-Forschungszentrum GmbH. Düsseldorf, S. 55–56. – URL: http://www.bfi.de/de/Aktuelles/ BFI-TB2014.pdf
- Hiesinger, H. (2016): Grußwort "Carbon2Chem: Branchenübergreifende Innovation für Klimaschutz und Energiewende". Gehalten am 27. Juni 2016 anlässlich des Projektstarts von Carbon2Chem. URL: https://www.thyssenkrupp.com/media/c2c/presse/27\_06\_16\_state ment hiesinger.pdf

162 Gerhard Öhlmann

Keller, G. E.; Bhasin, M. M. (1982): Synthesis of Ethylene via Oxidative Coupling of Methane. I. Determination of Active Catalysts. In: Journal of Catalysis, Vol. 73, pp. 9–19

- KIT Karlsruher Institut für Technologie (2015): Press Release 139/2015, November "Crack it! Energy from a Fossil Fuel without Carbon Dioxide", IASS and KIT Develop a Technology to Produce Hydrogen from Methane without Carbon Dioxid Emissions. In: KIT News-Archiv 2015. URL: http://www.kit.edu/b3/english/16206.php
- Kreysa, G. (2008): Methan Chance für eine klimaverträgliche Energieversorgung. In: Chemie Ingenieur Technik, Nr. 7, S. 901–908
- Kreysa, G. (2009): Climate Protection by an Alternative Use of Methane The Carbon Moratorium. In: Chem Sus Chem, Vol. 2, Issue 1 (January), pp. 49–55
- Linde AG (2014): Nachricht vom 02.06.2014, The Linde Group, Linde AG "Siluria Technologies und Linde gründen Ethylentechnologie-Partnerschaft". URL:http://www.dgap.de/dgap/News/corporate/linde-siluria-technologies-und-linde-...ID=804338
- Liu, H.; Zhao, C.; Wang, L. (2016): Mesoporous Ni-CeO2 Catalyst with Enhanced Selectivity and Stability for Reverse Water-Gas Shift Reaction. In: Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 49, No. 2, pp. 161–165
- Machhammer, O.; Bode, A.; Hormuth, W. (2015): Ökonomisch/ökologische Betrachtung zur Herstellung von Wasserstoff in Großanlagen. In: Chemie Ingenieur Technik, Jg. 87, Nr. 4, S. 409–418
- Maus, W.; Jacob, E.; Härtl, M.; Seidenspinner, P.; Wachtmeister, G. (2014): Synthetische Kraftstoffe – OME1: Ein potenziell nachhaltig hergestellter Dieselkraftstoff. In: 35. Internationales Wiener Motorensymposium. Düsseldorf, S. 325–347 (Fortschritts-Berichte VDI Reihe 12, Nr. 777, Bd. 1)
- Olah, G. A.; Goeppert, A.; Surya Prakash, G. K. (2006): Beyond Oil and Gas: The Methanol Economy. Weinheim
- Plevan, M.; Geißler, T.; Abánades, A.; Mehravaran, K.; Rathnam, R. K.; Rubbia, C.; Salmieri, D.; Stoppel, L.; Stückrad, S.; Wetzel, Th. (2015): Thermal cracking of Methane in a Liquid Metal Bubble Column Reactor. Experiments and Kinetic Analysis. In: International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 40, Issue 25, pp. 8020–8033
- Schlögl, R. (2016): Max-Planck-Direktor Robert Schlögl zum Start des Projektes Carbon2 Chem. Max-Planck-Gesellschaft, 27. Juni 2016. – URL: https://www.mpg.de/carbon2 chem?print=yes
- Schulz, I.; Agar, D. W. (2015): Decarbonisation of Fossil Energy via Methane Pyrolysis Using Two Reactor Concepts: Fluid Wall Flow Reactor and Molten Metal Capillary Reactor. In: International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 40, Issue 35, pp. 11422–11427
- Schwab, E.; Milanov, A.; Schunk, St. A.; Behrens, A.; Schödel, N. (2015): Dry Reforming and Reverse Water Gas Shift: Alternatives for Syngas Production? In: Chemie Ingenieur Technik, Jg. 87, Nr. 4, S. 347–353
- Seifritz, W. (2014): Letter to Editor, Comments on "Thermal cracking of methane into hydrogen for a CO<sub>2</sub>-free utilization of natural gas" by A. Abánades, C. Rubbia and D. Salmieri, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, pp. 8491–8496. In: International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 39, Issue 1, p. 645
- ST Siluria Technologies, Inc. (2013): San Francisco, CA (US), US 2013/0158322 A1, Nyce et al. "Polymer Templated Nanowire Catalysts". June 20

- ST Siluria Technologies, Inc. (2015): San Francisco, CA (US), US 8,962,517 B2, Zurcher et al. "Nanowire Catalysts and Methods for their use and Preparation". February 24
- Steinberg, M. (1995): Informal Report. The Carnol Process for CO<sub>2</sub> Mitigation From Power Plants and the Transportation Sector. Brookhaven National Laboratory, Upton, NY, p.7, December 1995. – URL: www.osti.gov/scitech/servlets/purl/219293
- Steinberg, M. (1996): Production of Hydrogen and Methanol from Natural Gas with reduced CO<sub>2</sub> Emission. In: Proceedings of the 11<sup>th</sup> World Energy Conference (WHEC), Vol. 1, pp. 499–510
- Thyssenkrupp AG (2016): Redox-Flow: Speicher für erneuerbare Energie. URL: https://www.thyssenkrupp.com/de/unternehmen/innovation/technologien-fuer-die-energiewende/redox-flow-batterien.html
- TUB Technische Universität Berlin (2014): Medieninformation Nr. 140/2014 vom 09.07. "Forschen für den Rohstoffwandel: BasCat Labor an der TU Berlin eröffnet". – URL: http://www.pressestelle.tu-berlin.de/menue/tub\_medien/publikationen/medieninformationen/2014/juli\_2014/medieninformation\_nr\_1402014/UBA – Umweltbundesamt (2015): Gesamtwirtschaftliche Ziele und Indikatoren zur Rohstoffinanspruchnahme. Studie. Dessau-Roßlau
- Wang, L.; Zhang, S.; Liu, Y (2008): Reverse Water Gas shift Reaction over Co-precipitated Ni-CeO<sub>2</sub> Catalysts. In: Journal of Rare Earths. The Journal of the Chinese Society of Rare Earths, Vol. 26, Issue 1, pp. 66–70

# Perspektivische Beiträge atomarer und nuklearer Prozesse zu einer künftigen kohlenstofffreien Energiewirtschaft

## 1 Einleitung

Das Thema dieses Symposiums ist der vielseitige Zusammenhang zwischen Technikentwicklung und Nachhaltigkeit. Insbesondere im Interesse der Nachhaltigkeit der weltweiten Entwicklung hat die 21. UN-Klimakonferenz in Paris im Dezember 2015 das Ziel beschlossen, die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C, möglichst auf 1,5°C, zu begrenzen. Dazu müssen die Nettotreibhausgas-Emissionen weltweit zwischen 2045 und 2060 auf Null zurückgefahren werden. Erreichbar ist das Ziel nur mit einer konsequenten Klimaschutzpolitik, in deren Zentrum die Vermeidung oder drastische Reduzierung der Verbrennung von Kohlenstoff aus fossilen Energieträgern steht – ein gravierendes Beispiel für die tiefgreifenden Forderungen, welche das Gebot der Nachhaltigkeit an die Technikentwicklung stellt.

Die Bewertung der Technologieeinwirkungen aus dem Blickfeld der Nachhaltigkeit unterliegt dem Spannungsfeld der drei Dimensionen – ökonomische, ökologische und soziale Bewertung. Damit sind nicht nur Verfügbarkeit von Ressourcen, technische Machbarkeit und ökonomische Rentabilität dafür entscheidend, ob eine technologische Entwicklung den Kriterien der Nachhaltigkeit gerecht wird, vielmehr spielen im Zeitalter der weltweiten Kommunikation und Vernetzung auch öffentliche Akzeptanz und politische Durchsetzbarkeit eine zunehmende Rolle. Dies kann zu entscheidenden Veränderungen bei der Bewertung technologischer Prozesse im Hinblick auf deren Nachhaltigkeit führen.

Der vorliegende Beitrag betrifft einige Aspekte der Frage, ob atomare und nukleare Prozesse langfristig aus Sicht dieses Spannungsfeldes eine tragende Rolle bei der Dekarbonisierung der Energiewirtschaft und damit für die Erreichung der gestellten Klimaschutzziele spielen können.

<sup>1</sup> Vgl. https://de.wikipedia.org/wiki/UN-Klimakonferenz in Paris 2015.

Zahlreiche industriell entwickelte Länder sehen auch in Zukunft die Nutzung von Kernenergie auf der Basis von Kernspaltung als unverzichtbare Technologie zur Reduzierung der Nutzung fossiler Energieträger. Deutschland und andere Staaten setzen vor allem auf den Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energieträger, nehmen die aus deren Volatilität resultierenden Schwierigkeiten in Kauf, um die radiologischen Risiken aus der Kernspaltung zu vermeiden. Im Folgenden wird der aktuelle Stand bei der weltweiten Nutzung der Technologie der Kernspaltung kurz angesprochen, mit einigen Zahlen belegt und deren Perspektiven aus Sicht ihrer Nachhaltigkeit diskutiert. Im Mittelpunkt des Beitrags steht die mögliche künftige Rolle der Fusionstechnologie in diesem Zusammenhang: Auf der 5. Jahreskonferenz der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften 2012 zum Thema "Energiewende - Produktivkraftentwicklung und Gesellschaftsvertrag" wurde u.a. die Frage aufgegriffen, ob Kernfusion die Bedarfslücke bei Elektroenergie im 21. Jahrhundert umweltverträglich schließen kann (vgl. Seeliger 2014). Der vorliegende Beitrag beleuchtet diese Frage erneut anhand der jüngsten Fortschritte der Fusionsforschung an den weltweit führenden Anlagen zur Magnet- und Trägheitshalterung von Fusionsplasmen. Kurz gestreift werden abschließend neuere Entwicklungen zur Energiefreisetzung in ultra-dichten Wasserstoffkondensaten an Metalloberflächen, über die in jüngster Zeit in der Fachpresse berichtet wird. Dieses soll als ein Beispiel dafür dienen, dass im Ergebnis aktueller naturwissenschaftlicher Forschung neuartige Prozesse ins Blickfeld der energetischen Nutzung gelangen könnten, welche nach wissenschaftlicher Validierung die Frage nach der Perspektive der Nutzung nuklearer Prozesse völlig neu beantworten.

# 2 Welche Perspektiven hat die Kernspaltungstechnologie?

Die hohe Wahrscheinlichkeit der Kernspaltung des natürlichen Isotops <sup>235</sup>U sowie des künstlich erzeugten Isotops <sup>239</sup>Pu durch thermische Neutronen ermöglichte die weltweit rasante Entwicklung der Kernenergietechnik auf der Basis von thermischen Reaktoren, so dass innerhalb weniger Jahrzehnte der Anteil der Kernenergie an der weltweiten Erzeugung von Elektroenergie bis auf 16 Prozent anstieg. Mit zunehmendem Umfang der Nutzung der Spalttechnologie rückten auch deren Risiken und Gefahren ins Bewusstsein der Öffentlichkeit, was in Deutschland schließlich zur Entscheidung über den Ausstieg aus der Atomenergie führte. Eine erhebliche Beschleunigung dieser Entwicklung erfolgte bekanntlich als Folge der Reaktorkatastrophen in Tschernobyl (1986) und Fukushima (2011). Gleichwohl kann festgestellt

werden, dass die technologischen Möglichkeiten der Kernspaltung, auch im Sinne der Minderung ihrer Gefahren und Risiken, längst noch nicht ausgeschöpft sind, so dass heute zahlreiche Staaten – ausdrücklich auch mit Verweis auf die eingangs genannten anspruchsvollen Klimaziele – die Nutzung der Kernspaltungstechnologie auch künftig als unabdingbar ansehen. Kernenergie wird derzeit weltweit in 31 Ländern genutzt (siehe Tab. 1).

Der Tabelle 2 ist der langfristige Trend der Nutzung von Kernenergie seit 1995 zu entnehmen. In diesem Zeitraum ist die verfügbare elektrische Leistung annähernd konstant geblieben, ebenso wie die Anzahl der Reaktoren.

Infolge der schnellen Entwicklung der Nutzung anderer Energiequellen<sup>2</sup> ist der Anteil von Kernenergie an der weltweiten Elektroenergieerzeugung allerdings derzeit bereits auf etwa 10 Prozent gesunken. Der Anteil unterschiedlicher Reaktortypen geht aus den Daten in Tabelle 3 hervor. Es dominieren nach wie vor die traditionellen Reaktortypen PWR und BWR, trotz jahrzehntelanger Entwicklung spielen Schnelle Brutreaktoren nach wie vor hinsichtlich der Produktion von Elektroenergie eine untergeordnete Rolle.

Verfügbarkeit: Im Zeitraum von 2012 bis 2014 waren weltweit 445 Reaktoren im Einsatz, mit einer durchschnittlichen Verfügbarkeit von 74,6 Prozent. Bei den deutschen KKW lag dieser wirtschaftlich wichtige Parameter bei 89,4 Prozent. Der Anteil ungeplanter Verluste an der Verfügbarkeit betrug in Deutschland nur 3,3 Prozent – Beleg eines guten technischen Standes der Anlagen.

Abschaltung: Im März 2016 befanden sich 157 Reaktoren mit 61.395 MW Leistung im Zustand der dauerhaften Abschaltung, darunter 28 in Deutschland, 16 in Japan, 33 in den USA und 30 in Großbritannien.

Lebensalter: Das Alter der gegenwärtig betriebenen Reaktoren liegt im weiten Bereich von 0 bis zu 47 Jahren, mit einem ansteigenden Mittelwert! Allein in der Lebensalterspanne 30 bis 40 Jahre befinden sich 206 Reaktoren, die in den kommenden 10 bis 20 Jahren zu ersetzen wären, soll die Zahl in Betrieb befindlicher Anlagen konstant gehalten werden.

Neubau: Die derzeit im Bau befindlichen Reaktoren sind in Tabelle 4 aufgelistet. Es ist nach Jahren der Stagnation in jüngster Zeit erneut eine steigende Aktivität beim Bau neuer KKW zu beobachten. Angesichts der "Lebensalters-Struktur" der in Betrieb befindlichen Anlagen ist jedoch festzustellen, dass gegenwärtiger Bau und bisherige Planungen bei weitem nicht

<sup>1</sup> Darunter befinden sich allerdings auch Energieträger auf Kohlenstoff-Basis!

Tab. 1: Weltweit in Betrieb befindliche Reaktoren und deren elektrische Nettoleistung

Staat	Anzahl Reaktoren	Nettoleistung /MW/	KE-Anteil /%/
USA	99	99.185	19,6
Frankreich	58	63.130	76,9
Japan	43	40.290	0
Russland	35	25.443	18,6
China	31	26.635	2,4
Südkorea	25	23.133	30,4
Indien	21	5.308	3,5
Kanada	19	13.500	16,8
Ukraine	15	13.107	49,4
Großbritannien	15	8 883	17,2
Schweden	10	9.648	41,5
Deutschland	8	10.799	15,8
Spanien	7	7.121	20,4
Belgien	7	5.913	47,5
Taiwan	6	5.052	18,9
Tschechien	6	3.930	35,8
Schweiz	5	3.333	37,9
Slowakei	4	1.814	56,8
Ungarn	4	1.889	53,6
Finnland	4	2.752	34,6
Pakistan	3	690	4,3
Argentinien	3	1.632	4
Brasilien	2	1.884	2,9
Mexiko	2	1.440	5,6
Südafrika	2	1.860	6,2
Rumänien	2	1.300	18,5
Bulgarien	2	1.926	33,6
Iran	1	915	1,5
Armenien	1	375	30,7
Niederlande	1	482	4
Slowenien	1	688	37,2
Insgesamt	442	384.057	

Quelle: nach IAEA 2016 (Stand März 2016)

reichen werden, um den Anteil der Kernenergie an der Elektroenergie auf dem gegenwärtigen Stand zu halten.

Neuentwicklungen: Hingewiesen werden soll hier auf die Entwicklung von inhärent sicheren Kernreaktoren der 4. Generation, den Plutonium-freien Thorium-Brennstoffzyklus oder die Entwicklung von Beschleunigeranlagen zur Transmutation von Transuranen. Ohne im vorliegenden Beitrag auf diese aktuellen Richtungen der Kernenergietechnik eingehen zu können, soll hier lediglich festgestellt werden, dass die wissenschaftlich-technischen Potenzen der Kernspaltungstechnik bei weitem noch nicht ausgeschöpft sind.

Tab. 2: Langfristiger Trend der weltweiten Kernenergienutzung seit 1995

Jahr	Anzahl Reaktoren in Betrieb	el. Nettoleistung Jahresende in GW	Auslastungsgrad in %	prod. Elektroenergie in TWh
1995	436	341,4	74,6	2.190,9
2000	438	344,9	80,6	2.443,9
2005	443	368,1	82,1	2.626,3
2010	442	375,3	80,5	2.629,8
2014	439	376,3	73,3	2.410,4

Quelle: nach IAEA 2016 (Stand 13. März 2016)

Tab. 3: Anteil verschiedener Reaktortypen an der Nettoleistung

Reaktortyp <sup>a</sup>	Anzahl	Nettoleistung (in MW)
PWR	283	265.020
BWR	78	75.208
PHWR	49	24.592
LWGR	15	10.219
GCR	14	7.685
FBR	3	1.369
insgesamt	442	384.093

a – *Erläuterung*: PWR – Druckwasserreaktor; BWR – Siedewasserreaktor; PHWR – Druck-Schwerwasser-Reaktor; LWGR – Graphit moderierter Leichtwasserreaktor; GCR – Graphit moderiert, Gas gekühlt; FBR – Schneller Brüter

Quelle: nach IAEA 2016 (Stand 13. März 2016)

Tab 4: Weltweit im Bau befindliche Reaktoren und deren elektrische Nettoleistung

Staat	Anzahl Reaktoren	Nettoleistung (in MW)
China	24	24.128
Russland	8	6.582
Indien	6	3.907
USA	5	5.633
VA Emirate	4	5.380
Südkorea	3	4.020
Taiwan	2	2.600
Japan	2	1.325
Ukraine	2	1.900
Weißrussland	2	2.218
Slowakei	2	880
Pakistan	2	630
Frankreich	1	1.630
Brasilien	1	1.245
Finnland	1	1.600
Argentinien	1	25
Insgesamt	66	63.703

Quelle: nach IAEA 2016 (Stand März 2016)

Versucht man im Sinne der Zielstellung dieses Symposiums die Frage nach der Perspektive der Kernenergietechnik auf Basis von Kernspaltung im Hinblick auf Nachhaltigkeit und Klimaschutz zu beantworten, so fällt die Antwort ambivalent aus: Einerseits besitzt diese Energiequelle nach wie vor das Potenzial für gewaltige Einsparungen von CO<sub>2</sub>-Emissionen, auch in der Zukunft. Andererseits führen die ungelösten Probleme bei der Endlagerung radioaktiver Abfälle, die großflächige Gefährdung der Umwelt und Lebensbedingungen bei Havarie sowie die potenzielle Anfälligkeit gegen terroristische Anschläge dazu, dass die Bedeutung der sozialen und politischen Dimension der Nachhaltigkeit in einer zunehmenden Zahl von Staaten und Regionen wächst und damit die Vorbehalte gegen die Nutzung der Kernspaltung weiter ansteigen. Hinzu kommt, dass im Laufe kommender Entwicklungen von Elektroenergiespeichern mit größeren Kapazitäten, verbesserter Verfügbarkeit und günstigeren ökonomischen Parametern die Nachteile der volatilen Energiequellen Windkraft und Solarenergie immer stärker ausgeglichen

werden können. Eine außerordentliche Konzentration von personellen und finanziellen Mitteln für die Implementierung einer neuen Reaktorgeneration oder innovativer Reaktorkonzepte, die vergleichbar wäre mit dem Boom der Kernenergie in den 1960er und 1970er Jahren, ist derzeit weltweit nicht erkennbar. So ist in diesem ambivalenten Umfeld, ungeachtet des weiteren Betriebs vorhandener und der Inbetriebnahme bereits geplanter Kernkraftwerke, am ehesten zu erwarten, dass die Kernspaltungstechnologie noch längere Zeit die Rolle einer wichtigen Brückentechnologie spielen wird, jedoch mit langsam abnehmendem Anteil an der weltweiten Elektroenergieerzeugung.

# 3 Einige Fortschritte und Herausforderungen der Fusionsforschung

## 3.1 Fusionsanlagen mit Magnethalterung

#### TOKAMAK ITER

Nunmehr seit fünf Jahrzehnten wird der Einschluss des heißen DT-Plasmas im Magnetfeld einer geschlossenen Torusspule als Weg zum Fusionsreaktor verfolgt. Infolge der prinzipiellen Inhomogenität des Torus-Magnetfeldes ist zur Plasmahalterung zusätzlich ein magnetisches Poloidalfeld erforderlich, erzeugt durch den induzierten Stromfluss im Plasma – das TOKAMAK-Prinzip. Es hat einen Nachteil: Den Phasen des Plasmaaufbaus und Anstiegs des poloidalen Magnetfeldes muss zwangsläufig eine Pause zur Rückkehr in den Ausgangszustand folgen – der Betrieb ist zwangsläufig gepulst.

Bis heute wird das TOKAMAK-Prinzip von vielen Plasmaforschern nach wie vor als aussichtsreichstes Verfahren zur Realisierung der großtechnischen, gesteuerten Kernfusion gesehen. Entsprechend groß waren die Erwartungen, als Anfang der 1990er Jahre mit der Schaffung einer auf diesem Prinzip beruhenden und international getragenen Demonstrationsanlage zum Nachweis der Nettoenergieproduktion, das TOKAMAK-Projekt ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), begonnen wurde. Heute wird das Projekt wissenschaftlich, industriell und finanziell getragen von den sieben Partnern EU, USA, Russland, Japan, Indien, China und Südkorea. Schritt für Schritt werden seitdem die für die Realisierung des Projektes erforderlichen Komponenten, welche technischen Anforderungen und Belastungen in bisher nicht bekannter Art und Stärke genügen müssen, entwickelt, geplant, gefertigt und schließlich getestet. Nach erfolgter Standortwahl in Saint Paul-lez-Durance bei Cadarache im Jahr 2006 hat dort 2010

der Bau der eigentlichen Anlage begonnen.<sup>3</sup> Die gewaltigen Dimensionen dieser Anlage werden anhand einiger Zahlen in Tabelle 5 verdeutlicht.

Tab. 5: Einige Parameter der TOKAMAK-Anlage ITER

Komponente	Parameter	Größe/Gewicht
Gesamte Maschine	Gewicht	23.000 t
	Höhe	60 m
Vakuumkammer	Volumen	840 m <sup>3</sup>
	Hauptradius	6,2 m
	Gewicht	8.000 t
	Druck	10 <sup>-6</sup> bar
Cryostat	Volumen	16.000 m <sup>3</sup>
Plasma	Temperatur	150 Mill. Kelvin
	Druck	10 <sup>-6</sup> Normaldruck
	Strom	15 MA
	Brennstoffmasse	0,1 1 g
	Brenndauer	8 min
Magnet	Temperatur	4 K (-269°C)
	Supraleiterstränge Nb3Sn	100.000 km
	Gespeicherte Energie	51 GJ
	Feldstärke	5,3 Tesla
Leistungsbilanz	Leistungsaufnahme	50 MW
	Ausgangsleistung	500 MW

Quelle: nach http://www.iter.org

Welche Fortschritte wurden in den vergangenen drei Jahren, seit dem Bericht auf der Jahreskonferenz der Leibniz-Sozietät im Jahr 2012 (vgl. Seeliger 2014) erzielt:

- Zielstellungen: Die wesentlichen Zielstellungen sind unverändert geblieben, das heißt
  - Freisetzung von 500 MW Leistung, bei einer Eingangsleistung von 50 MW (Q > 10);
  - Demonstration des Zusammenspiels aller Technologien, die auch für ein künftiges Demonstrations-Fusionskraftwerk erforderlich sind, ein-

<sup>2</sup> Vgl. http://www.iter.org.

- schließlich der Möglichkeit des Studiums des Plasmas und der erforderlichen Technologien, wie Heizung, Steuerung, Kryotechnik, ferngesteuerte Instandhaltung u.a.;
- Realisierung eines Deuterium-Tritium Plasmas, in welchem die Fusionsreaktion infolge der inneren Erhitzung durch Reaktionsprodukte aufrechterhalten wird ("Burning Plasma").
- Planungen: Software-Pakete ermöglichen eine durchgängige 3D-Simulation aller Komponenten, Teilsysteme und Aggregate und die Koordinierung des Designs tausender Komponenten, die für das Fusionsexperiment erforderlich sind. Nur dadurch ist die Detailfülle beherrschbar, werden alle Entwürfe des Designs geprüft, Design und Möglichkeiten des Zusammenbaus getestet, d.h. die Optimierung des Aufbaus und technische Abläufe der späteren Instandhaltung.
- Technologieentwicklungen: Die außerordentlich umfangreichen und vielseitigen Technologieentwicklungen erfolgen nach dem Prinzip, dass alle Partner gleichberechtigt zu wissenschaftlichen und technischen Entwicklungen beitragen und gemeinsam die Komponenten des ITER bauen. Die Verteilung der Aufgabenbereiche unter den teilnehmenden Partnern ist Tabelle 6 zu entnehmen. Sie zeigt eine weit verzweigte weltweite Kooperation, bei der Entwicklungen teilweise parallel laufen, eng ineinander greifen und aufeinander aufbauen müssen. Dieses komplexe und komplizierte Geschehen ist derzeit voll entfaltet, zahlreiche Komponenten befinden sich in einer fortgeschrittenen Entwicklungsphase bzw. bereits in der Fertigung.

Tab. 6: Beteiligung der ITER-Partner am Bau von Hauptkomponenten

	EU	Russland	USA	Japan	China	Korea	Indien
Solenoid			Х	Х			
Kryostat					Х		Х
Magnetspulen	х	Х	х	Х	Х	Х	
Divertoren	х	Х		Х			
Kühlung			Х				Х
Plasmagefäß	х	Х			Х	Х	
Heizsystem	х	Х	Х	Х			Х
Vakuumkammer	х	Х				Х	Х
Wärmeschild						Х	

Quelle: nach Sonnabend 2016a

Baufortschritt: Seit 2010 läuft auf dem 42 Hektar großen ITER-Gelände das Baugeschehen. Die Fertigungshalle ist errichtet. In diesem erfolgen die Vormontage von Teilen des Plasmagefäßes und der supraleitenden Spulen. Das Plasmagefäß ruht auf einer starken Bodenplatte mit 500 anti-seismischen Federungen. Gegenwärtig wächst die Betonhülle, die später das Vakuumgefäß des Fusionsexperiments ITER umgibt, das unterste der sieben Stockwerke wird gerade fertiggestellt. Erst nach Aufbau des Plasmagefäßes wird das siebenstöckige ITER-Gebäude endgültig fertiggestellt. Daneben entstanden oder entstehen zahlreiche kleinere Gebäude: Cleaning Facility, Kryotechnik, Büro- und Empfangsgebäude und Gebäude für das Wickeln der Spulen, die bereits seit 2012 fertiggestellt wurden.

- Zeitplan: Die Projektrealisierung weist große Verzögerungen auf. Der ursprüngliche Zeitplan (Stand 2006) sah die erste Plasmazündung für 2016 vor. Nach mehreren nachfolgenden Verzögerungen, wird die Inbetriebnahme mit Wasserstoffplasma aktuell für das Jahr 2025 prognostiziert und die angestrebte Demonstration einer annähernd zehnfachen Energieausbeute mit DT-Plasma ab 2030, mit einer Brenndauer des Plasmas von 8 Minuten, als Zielstellung festgelegt. Nach einer Lernphase am ITER und Übergang zum Test von Komponenten für DEMO soll die Anlage außer Betrieb genommen werden, aus heutiger Sicht ist das gegen 2040 zu erwarten. An der Planung und Design der DEMO-Anlage soll bereits parallel zu den ITER-Experimenten ab 2028 gearbeitet werden, so dass ab 2035 bis 2045 das Demonstrationskraftwerk aufgebaut und ab 2050 in Betrieb genommen werden könnte. Soweit der derzeitige Zeitplan. Bis zum Jahr 2050 soll also die Produktion von Elektroenergie in einem Demonstrationskraftwerk erreicht sein. Diese Prognose ist teilweise spekulativ – da nicht alle technischen und politischen Probleme in den kommenden Jahrzehnten bekannt sein können. Andererseits kann erst mit Betrieb des Demonstrationskraftwerkes die Frage nach der ökonomische Konkurrenzfähigkeit gegenüber alternativen Verfahren der Elektroenergieerzeugung beantwortet werden.
- Organisation und Kosten: Die Kosten des Vorhabens sind immens und deren Prognosen stetig steigend, gegenwärtig werden sie mit 13 bis 17 Milliarden Euro allein für die EU angegeben. Immer wieder ist es bisher infolge des Preisanstiegs für Rohstoffe und Dienstleistungen, bedingt durch die komplexe internationale Organisations- und Entscheidungsstruktur, wegen partieller Interessen einzelner Partner oder technischer Probleme zu Verzögerungen und Abschmelzungen an den Zielstellun-

gen gekommen. Eine Evaluation im Jahr 2014 zeigte Fehlentwicklungen beim Management auf und führte zur Neubesetzung der Position des Generaldirektors (vgl. Sonnabend 2016a).

Trotz aller genannten Einschränkungen und finanziellen Unsicherheiten ist aus heutiger Sicht ITER das "Flaggschiff", mit dem sich die Erwartung auf die Beherrschung der gesteuerten Kernfusion und ihre Nutzung zur Produktion von Elektroenergie in der Zukunft in erster Linie verbindet. Wie ist diese Entwicklung aus Sicht ihrer Nachhaltigkeit zu bewerten?

- Die DT-Fusion nutzt als Rohstoffe Wasser (Deuterium) und Gestein (Lithium), die auf der Erde praktisch unbegrenzt verfügbar und nachhaltig zu gewinnen sind. Theoretisch können aus der Fusion von einem Gramm Deuterium und Tritium 90 MWh Energie freigesetzt werden, das entspricht der Verbrennung von elf Tonnen Kohle (vgl. HELM 2006).
- Bei der DT-Fusion entstehen keine langlebigen Transurane und Spaltprodukte. Damit entfällt das Problem der notwendigen Endlagerung der Abfälle über tausende Jahre. Gleichwohl entsteht durch die Neutronenstrahlung in den Strukturen des Reaktors aus Reaktionen vom Typ (n,2n), (n,p), (n,α), (n,γ) u.a. Radioaktivität, die jedoch durch wesentlich kürzere Halbwertszeiten charakterisiert ist. Weiterhin wird als ein Brennstoffnuklid des Plasmas aus dem Element Lithium in einer Brutzone um das Plasma das radioaktive Tritium erzeugt. Beide Arten von Radioaktivität sind jedoch einfacher zu handhaben und aus Sicht der Nachhaltigkeit wesentlich weniger belastet als die Radioaktivität in Brennstoffen von Spaltungsreaktoren.
- Im DT-Fusionsreaktor entsteht in wesentlich geringerem Umfang und nur für kürzere Zeiträume Nachwärme aus dem Zerfall der o.g. Radionuklide. Die Kühlung nach Abschaltung der Plasmaprozesse ist daher einfacher, gefährliche Prozesse wie die Kernschmelze können durch geeignete Materialien praktisch vollkommen ausgeschlossen werden. Der Reaktor lässt sich zu jedem Zeitpunkt sicher abschalten, es gibt keine Kritikalität, der Reaktor kann also auch nicht spontan überkritisch werden.
- Selbst bei schwersten Havarien könnten keine so weiträumigen Umweltgefährdungen entstehen, wie dies beim GAU eines Kernspaltungsreaktors der Fall ist, flüchtige Radionuklide wie <sup>137</sup>Cs und <sup>90</sup>Sr treten im Inventar eines Fusionsreaktors nicht oder nur marginal auf.
- Ein DT-Fusionsreaktor wäre gegenüber terroristischen Angriffen leichter zu schützen und sie würden im schlimmsten Fall vergleichsweise geringere Auswirkungen auf die Umwelt haben.

Ungeachtet aller genannten Vorteile bleibt die Bewertung der Nachhaltigkeit der Fusionstechnologie in ihrer ökonomischen, ökologischen und sozialen Dimension nicht trivial und wird erst mit deren Test in einer Demonstrationsanlage endgültig zu beantworten sein. Dies gilt auch für andere Fusionskonzepte, insbesondere solange sie Tritium als Brennstoff und energiefreisetzende Reaktionen verwenden, in denen Neutronen entstehen.

#### STELLARATOR Wendelstein 7-X

Theoretisch können auch bestimmte stationäre Magnetfelder einen dauerhaften Plasmaeinschluss ermöglichen: Es existieren rechnerisch Magnetfeld-konfigurationen, bei denen die Teilchen im Plasma beim Umlauf unterschiedlich orientierte stationäre Magnetfelder in der Weise durchlaufen, dass ihr stabiler Einschluss für längere Zeit gewährleisten ist. Das darauf beruhende Verfahren erhielt die Bezeichnung STELLARATOR-Prinzip. Es handelt sich dabei um sehr komplizierte, unregelmäßige Magnetfeldstrukturen, deren gerätetechnische Umsetzung sich als äußerst anspruchsvoll erweist (vgl. Klinger/Kemnitz 2015).

Die Montage der auf diesem Prinzip beruhenden Anlage Wendelstein 7-X begann im April 2005 am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP), Teilinstitut Greifswald. <sup>4</sup> Die wesentlichen Parameter dieser Anlage können Tabelle 7 entnommen werden.

Ein Ring aus 50 supraleitenden, etwa 3,5 Meter hohen Magnetspulen ist das Kernstück der Anlage. Ihre speziellen Formen sind das Ergebnis ausgefeilter Optimierungsrechnungen. Die Spulen sind auf ein stählernes Plasmagefäß montiert und von einer ringförmigen Stahlhülle als Vakuumgefäß umschlossen. Die Spulen werden mit flüssigem Helium auf Supraleitungstemperatur gekühlt. Der von ihnen erzeugte Magnetfeldkäfig hält im Inneren des Plasmagefäßes das 30 Kubikmeter füllende ultradünne Plasma. Die Komplexität der Strukturen von Wendelstein 7-X ist in der Darstellung einer Computersimulation in Abbildung 1 zu erkennen.

Der Betriebsstart erfolgte am 10. Dezember 2015, seitdem hat Wendelstein 7-X bis März 2016 mehr als 300 Entladungen mit dem Edelgas Helium erzeugt und diese vor allem zum Reinigen des Plasmagefäßes genutzt. Das erste Wasserstoff-Plasma, gezündet am 3. Februar 2016, markiert den Beginn des wissenschaftlichen Experimentierbetriebs an Wendelstein 7-X. Die ver-

<sup>3</sup> Vgl. www.ipp.mpg.de/ippcms/de/for/projekte/w7x/.

Tab. 7: Angestrebte Technische Daten von Wendelstein 7-X

mittlerer großer Radius des Plasmas	5,5 m
mittlerer kleiner Radius des Plasmas	0,53 m
Plasmavolumen	30 m <sup>2</sup>
Masse des Plasmas	5–30 mg
Plasmadichte	bis 1,5 · 10 <sup>20</sup> Teilchen / m <sup>3</sup>
Temperatur der Elektronen	150 Millionen K
Temperatur der Ionen	50 Millionen K
Einschlussdauer (Langpuls-Betrieb)	30 min
Volumen des Plasmagefäßes	≈ 50 m <sup>3</sup>
Vakuumgefäß	Durchmesser: 16 m; Höhe: 5 m
Magnetfeldstärke auf der Achse	3 Tesla
Plasmaheizung (Langpuls-Betrieb)	10 MW Mikrowellen + max. 10 MW Neutralteilchen

Quelle: nach www.ipp.mpg.de/ippcms/de/for/projekte/w7x/

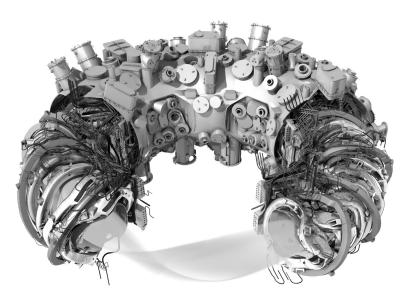


Abb. 1: Computermodell eines Querschnitts durch den Kern der STELLARATOR-Anlage Wendelstein 7-X

Quelle: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik

öffentlichten ersten Ergebnisse besagen, dass Plasmatemperaturen von 80 Millionen K und eine Brenndauer des Plasmas von 0,25 Sekunden erreicht wurden (vgl. WEND 2016). Bis September 2016 konnte die Brenndauer des Plasmas bis auf 6 Sekunden und die Temperatur der Plasmaelektronen bis auf 100 Millionen K, bei einer Ionentemperatur von 10 Millionen K, gesteigert werden (vgl. Sonnabend 2016b). In der nun laufende Phase bis Mitte 2017 wird die Anlage weiter ertüchtigt, indem die Wärme ableitenden Platten im Vakuumgefäß aus Cu-Cr-Zr-Legierung mit Kacheln aus Kohlenstoff bedeckt werden, um höhere Heizleistungen zu erlauben. So sollen schrittweise die Zielparameter zu erreichen sein, insbesondere eine Brenndauer des Plasmas von 30 Minuten bei einer Ionentemperatur von 100 Millionen Kelvin. Erst nach einer längeren Experimentierphase mit Wasserstoff sollen durch Beimischungen von Deuterium Betriebserfahrungen mit dem schweren Wasserstoffisotop gewonnen werden, die für die Extrapolation auf den DT-Betrieb in einer nachfolgenden DEMO-Anlage von Bedeutung sind. Durch die Deuterium-Beimischungen wird Wendelstein 7-X zu einer nuklearen Anlage, da erstmals in geringem Umfang DD-Reaktionen stattfinden und somit Neutronen freigesetzt werden.

Die von Bund, Land und EU getragenen Investitionskosten für Wendelstein 7-X beliefen sich auf 370 Millionen Euro. Die Bauteile fertigten Firmen in ganz Europa; Aufträge im Wert von weit über 70 Millionen gingen an Unternehmen in der Region. Zahlreiche Forschungseinrichtungen im Inund Ausland waren am Aufbau der Anlage beteiligt. So trug im Rahmen der Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren das Karlsruher Institut für Technologie die Verantwortung für die Mikrowellen-Plasmaheizung; das Forschungszentrum Jülich baut Messgeräte und fertigte die aufwändigen Verbindungen der supraleitenden Magnetspulen. Den Einbau übernahmen Spezialisten der Polnischen Akademie der Wissenschaften in Kraków. Die US-amerikanischen Fusionsinstitute in Princeton, Oak Ridge und Los Alamos trugen u.a. mit magnetischen Zusatzspulen und Messgeräten zur Ausrüstung von Wendelstein 7-X bei.

Erweist sich das STELLARATOR-Prinzip als geeignet für die Halterung des heißen Plasmas und die sichere Beherrschung von Turbulenzen, so öffnet sich hier eine Perspektive für die Magnethalterung alternativ zum TOKAMAK-Prinzip. Bei positiver Antwort auf viele plasmaphysikalische Fragen dieses Einschlusstyps mit Hilfe von Wendelstein 7-X könnten nachfolgend die nächsten beiden Etappen – nukleare Demonstrationsanlage und

<sup>4</sup> Vgl. www.ipp.mpg.de/ippcms/de/for/projekte/w7x/.

DEMO-Kraftwerk – folgen, parallel oder gegebenenfalls auch als eine Alternative zum TOKAMAK.

Hinsichtlich der Bewertung seiner Nachhaltigkeit gilt für einen künftigen Reaktor nach dem STELLARATOR-Prinzip Gleiches, wie für den TO-KAMAK-Reaktor: Er würde zahlreiche Vorteile gegenüber Kernspaltungsreaktoren aufweisen. Bestehen bleiben dagegen auch beim STELLARATOR die bereits genannten prinzipiellen Nachteile der DT-Reaktion.

# 3.2 Fusion mit Inertialhalterung

#### Laserfusion NIF

Beim konzentrischem Beschuss eines DT-Pellets mit zahlreichen intensiven Laserstrahlen kommt es infolge der starken Erhitzung des Materials zur Verdampfung (Ablation) der Oberflächenschicht. Der Rückstoßimpuls der abgelösten Teilchen komprimiert und erhitzt das Pellet, so dass sich in diesem kurzzeitig Fusionsbedingungen gemäß Lawson-Kriterium einstellen – dies ist das Prinzip der Laserfusion (vgl. Nuckolls et al. 1972). Infolge der Trägheit der massebehafteten Deuterium- und Tritiumionen bleibt das heiße Plasma für kurze Zeit auf kleinstem Raum konzentriert, die ausreicht, um einen Teil dieser Ionen zu Helium zu verschmelzen, daher spricht man vom Trägheitseinschluss oder Inertialhalterung des Plasmas.

Der Weg zur Auslösung der Fusion in DT-Pellets mittels Laserkompression wird ebenfalls seit Jahrzehnten verfolgt, insbesondere in den USA, Frankreich und Japan, auch in China laufen intensive Arbeiten zur Laserfusion. Die gewaltige Steigerung der Laserleistung bei Gewährleistung höchster optischer Präzision markiert den bisher erreichten Fortschritt.

Die vordere Front der Entwicklung wird durch die Anlage NIF (National Ignition Facility) im Lawrence Livermore Laboratory präsentiert, die im Jahr 2009 in Betrieb ging und an der im Jahr 2012 das Erreichen eines Laserimpulses von 15 Nanosekunden Dauer und einer Leistung von 1,89 Megajoule, verteilt auf 192 Strahllinien, berichtet wurde (vgl. LLNL 2012). Diese transportieren die Energie in die evakuierte Targetkammer, in deren Zentrum sich der Fusionsbrennstoff, ein Gemisch aus Deuterium und Tritium als dünne, gefrorene Schicht auf einer zwei Millimeter Kunststoffkapsel befindet, die mittig in einem kleinen vergoldeten Metallzylinder platziert ist. Die Laserstrahlen treten durch die Stirnflächen des Zylinders, an der Brennstoff-Kapsel vorbei (indirect drive), auf die innere Oberfläche des Gold-Zylinders, auf der sie absorbiert werden und das Metall so stark erhitzen, dass der Innenraum des Zylinders sich mit intensiver Röntgenstrahlung

(Hohlraumstrahlung) füllt. In diesem Strahlungsfeld verwandelt sich die Oberfläche der Kapsel in ein schnell expandierendes Plasma. Der Rückstoß der Expansion beschleunigt die Kugelschale auf eine Geschwindigkeit von einigen hundert km/s nach innen. Bei symmetrischer Kompression werden im Zentrum des Pellets Temperaturen von 50 bis 100 Millionen Kelvin und eine extrem hohe Dichte erzielt, mit dem Ziel, die Zündschwelle für eine selbsterhaltende Fusionsreaktion zu übertreffen. Dann würde die Fusionszone innerhalb von etwa zehn Picosekunden von innen nach außen wandern, etwa die Hälfte des DT-Materials verschmelzen und dabei mehr Energie freisetzen, als zur Zündung benötigt.

Die Erwartung, dass mit der verfügbaren Laserenergie von 1,8 MJ die Zündung erreicht wird, haben sich bisher jedoch nicht erfüllt. Die gegenwärtigen Arbeiten am NIF orientieren drauf, eine höhere Dichte bei der Kompression zu erreichen. Damit soll die Absorption der Alphateilchen aus der DT-Reaktion im Bereich des "Hot-Spot" erreicht werden – ein wesentlicher Prozess für die Auslösung einer selbsterhaltenden Fusionsreaktion. Weitere Verbesserungen sind gegenwärtig auf Struktur und Material der Brennstoffkapseln und der Hohlraum-Zylinder gerichtet. Auf diesem Wege wurde im Februar 2016 über Einzelereignisse berichtet, bei denen etwa 5 x 10<sup>15</sup> DT-Neutronen freigesetzt wurden, das entspricht einer Neutronenenergie von mehr als 8 kJ – beachtlich, aber noch weit entfernt von der Einschussenergie 1,8 MJ!

Ein neuerdings verfolgter Ansatz bei den Experimenten trägt die Bezeichnung "Schnelle Zündung" (Fast Ignition, FI). Bisher wurde das Ziel verfolgt, im Zentrum des Pellets gleichzeitig höchste Temperatur und höchste Kompression zu erreichen, um die Zündschwelle zu überschreiten – der sogenannte "Hot-Spot"-Ansatz (HS). Beim FI-Ansatz werden Kompression und Zündphase getrennt herbeigeführt, indem zu der bisher üblichen Kompression und Erhitzung ein hochintensiver, extrem kurzer Laserimpuls in die Pellet-Oberfläche eingeschossen wird, welcher durch zusätzliche Erhitzung quasi den Zündfunken für die Auslösung der Fusion liefert. Das DT-Pellet wird also zunächst durch Laser zu höchster Dichte komprimiert und danach wird der komprimierte Kern durch weitere Energiezufuhr gezündet. Bei dieser Art der Zündung sind die Anforderungen an Druck und Dichte geringer als bei zentraler HS-Kompression. Dieser Weg verspricht außerdem günstigere Werte für das Verhältnis von aufgewandter zu freigesetzter

<sup>5</sup> Vgl. https://de.wikipedia.org/wiki/National Ignition Facility.

<sup>6</sup> https://lasers.llnl.gov/science.

Energie. Experimentelle Ergebnisse, welche die Vorteile dieser Methode bestätigen, bleiben abzuwarten.

Ein weiterer neuer Ansatz für die Experimente besteht darin, das Target in ein starkes Magnetfeld einzubetten, welches geladene Teilchen in der Nähe des Hot-Spot hält und den Wärmetransport vom Target hinweg bremst, was das Erreichen der Zündschwelle erleichtern soll. Dieser Ansatz basiert auf dem ursprünglich am Argonne National Laboratory entwickelten Konzept der "Magnetized Target Fusion" (MTF), welches im nächsten Punkt näher beschrieben wird. Eine Weiterentwicklung dieses Konzepts, Magnetized Linear Inertial Fusion genannt, war im Rahmen des Programms an der Z-Maschine im Sandia National Laboratory entstanden und erfolgreich getestet worden. Es soll in nächster Zeit auch im Rahmen des NIF eingesetzt werden, um bei der Laserfusion die Zündschwelle zu erreichen.

Erst wenn die Zündung gelingt, sind die Voraussetzung für den Beginn der eigentlichen, sehr schwierigen Reaktorentwicklung gegeben – mit periodischen kurzen Wärme- und Strahlungsimpulsen höchster Leistung, Nettoenergieproduktion und Brutmantel zur Gewinnung der Tritium-Brennstoffs sowie hinreichend großer Wiederholfrequenz der Fusionsimpulse. Auch auf diesem Wege sind noch immense technologische Probleme zu überwinden, die insbesondere aus der Verknüpfung von höchster optischer Präzision mit der periodischen Freisetzung enormer thermischer und nuklearer Impulsleistung verbunden sind. Die Zerstörung der Strukturen in unmittelbarer Nähe des Pellets infolge der enormen Energiefreisetzung bei der Zündung ist dabei nur ein Problem. Der Zeithorizont für die Lösung der Probleme ist noch unbestimmt, er könnte bei günstiger Entwicklung jedoch auch kürzer als beim Demonstrationskraftwerk auf TOKAMAK-Basis sein. Die bisherigen Kosten für dieses Projekt wurden bereits im Jahr 2012 mit 3,5 Milliarden US \$ angegeben und liegen kumulativ derzeit deutlich über diesem Wert.

# Röntgenfusion Z-Maschine

Auf der Suche nach einer alternativen Lösung, im Vergleich zur Kompression mittels Laser, entstand das Prinzip der Trägheitsfusion von DT-Pellets mittels Röntgenstrahlung. Genutzt wird dabei der sogenannte Pinch-Effekt, nach dem beim Stromfluss durch eine Plasmaschnur das entstehende Magnetfeld zur Einschnürung und extrem starken Erhitzung des Plasmas führt.

Die Technologie zur Kompression von DT-Pellets mittels kurzzeitigen intensiven Röntgenimpulsen wurde in der sogenannten Z-Machine im San-

dia Laboratory in Albuquerque entwickelt. Das Herzstück der Anlage befindet sich in einem Metallzylinder mit 32 Meter Durchmesser und sechs Meter Höhe, zu dem 36 radial angeordnete Kupferleiter mit jeweils einem Meter Durchmesser hinführen. Durch diese radialen Leiter wird ein sehr kurzer (< 100 ns) Stromimpuls mit einer Stromstärke bis zu 20 Millionen Ampere aus Kondensatorbatterien in das Zentrum der Anlage geleitet. Im Zentrum befindet sich eine Vakuumkammer, auf deren Achse wiederum der Z-Pinch angeordnet ist. Letzterer besteht aus einer zylindrischen Anordnung von 300 dünnen Wolframdrähten (Durchmesser 10 µm, Länge 20 cm), die parallel zur Zylinderachse aufgespannt sind. Im Zentrum des Z-Pinch befindet sich die etwa zwei Millimeter große Plastikkugel mit D+T-Gemisch, welche zur Fusion gebracht werden soll. Zur Zündung wird der gewaltige Stromimpuls durch die dünnen Wolframdrähte geschickt, was zu deren augenblicklicher Umwandlung in ein extrem heißes Plasma führt. Der Stromfluss durch das Wolfram-Plasma erzeugt ein sehr starkes Magnetfeld, welches das Plasma komprimiert und weiter erhitzt (das ist der Pinch-Effekt). Die vom Pinch emittierte Strahlung führt zur Erhitzung und infolge der weitgehenden Ionisation der Metallatome zur Ausbildung eines kurzen Röntgenblitzes mit bis zu 290 TW Leistung. Der durch die Röntgenstrahlung ausgeübte Strahlungsdruck erhitzt und komprimiert die Kapsel im Zentrum mit dem Ziel, die Zündung der DT-Fusion auszulösen. Die Zeit zur erneuten Aufladung der Kondensatoren beträgt einige Minuten. Die Z-Maschine stellt bisher die Anlage mit der weltweit größten elektrischen Impulsleistung und mit der größten Röntgen-Impulsleistung dar.

Durch die bereits 2003 erzielte Leistung von 120 TW im Röntgenimpuls stieg die Teilchendichte im Pellet auf das zweihundertfache, die Temperatur auf weit über 100 Millionen Kelvin. Im Jahr 2006 wurden sogar Temperaturen bis zu 2 Milliarden Kelvin berichtet. Dennoch war das Niveau von "Break-even" damit nicht erreicht. Es wurden keine neuen Ergebnisse über den derzeitigen Stand der Röntgenfusion an der Z-Maschine gemeldet, obgleich diverse andere Forschungsprojekte an der Anlage weiter betrieben werden. Die kurzzeitige und exakt gleichzeitige Bereitstellung von gewaltiger Stromleistung zur Verdampfung der Metallfäden und Zerstörung der Strukturen in der Nähe des Z-Pinch wird auch bei einer Reaktorentwicklung nach diesem Prinzip ebenfalls enorme technologische Probleme mit sich bringen. Die zeitliche Prognose für das Erreichen der Zündbedingung ist derzeit extern kaum möglich, sie liegt vermutlich noch hinter der Laserfusion,

<sup>7</sup> Vgl. http://www.sandia.gov/z-machine/.

<sup>8</sup> Vgl. http://www.sandia.gov/z-machine/.

schnellere Entwicklungen in Zukunft sind jedoch nicht ausgeschlossen, wenn das Projekt weiter verfolgt wird.

## 3.3 Magnetized Target Fusion

Die Magnetized Target Fusion (MTF) ist eine Form der Fusion, die hinsichtlich Zeit- und Dichteskalen zwischen Magnethalterung (Magnetic Confined Fusion, MCF) und Trägheitsfusion (Inertial Confined Fusion, ICF) angesiedelt ist. Sie besteht aus zwei Stufen:

- Formierung eines warmen (200 eV), magnetisierten, von der Wand entfernten Plasmas:
- (2) nachfolgende quasi-adiabatische Kompression durch eine implodierende treibende Kraft, wie beispielsweise ein magnetisch getriebener Liner, bis zur Zündung.

MTF stellt faktisch ein Hybrid dar zwischen der Magnethalterung und der Inertialhalterung. Diese Kombination verspricht die Umgehung einiger Schwierigkeiten, mit denen die Fusion mit Magnethalterung und die Laserfusion konfrontiert sind und darüber hinaus kleinere und bedeutend kostengünstigere Lösungen für Reaktoranlagen (zum Vergleich typischer Parameter siehe Tab. 8). Während bei der MCF mit Plasmen sehr geringer Dichte gearbeitet werden muss und bei der ICF mit extrem gekühlten Proben und höchster Zeitschärfe, gestattet MTF wesentlich günstigere Ausgangsbedingungen für das Erreichen der Zündung. In der MTF bietet das Magnetfeld zusätzlich den Vorteil der Verringerung thermischer Verluste aus dem Plasma in die Wand. Ein bei relativ geringer Temperatur und geringer Dichte magnetisch gehaltenes Plasma wird zu thermonuklearen Bedingungen komprimiert, wobei es sich um eine relativ zur Laserfusion langsamere Kompression handelt und eine geringerer Peakdichte ausreichend ist. Bei der MTF sind weder supraleitende Magneten noch Leistungslaser erforderlich. Ebenso wie MCF und ICF orientiert MTF bisher meist auf die Realisierung der DT-Fusion (vgl. Siemon et al. 1997).

Die auf diesem Prinzip basierende Plasmaanlage FRX-1 ist am Los Alamos National Laboratory seit 2001 in Betrieb. Mit D- und T-Ionen beladene Plasmaringe (sogenannte Spheromaks) werden durch äußere Feldeinwirkung insgesamt komprimiert, wodurch Magnetfeldstärke, Dichte, Druck und Temperatur im Inneren des Plasmas bis zum Erreichen von Fusionsbedingungen steigen sollen.

und ICF			
Parameter	MCF	MTF	ICF
Startdichte in cm <sup>-3</sup>	10 <sup>14</sup>	10 <sup>17</sup>	10 <sup>21</sup>
Starttemperatur in keV	10	10 <sup>-1</sup>	(kryogen)
Pulsung in s	10 <sup>3</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-9</sup>

10 MJ, 50 MA

Impulsleistung

1,8 MJ

Laserimpuls (NIF)

Tab. 8: Vergleich typischer Parameter der MTF mit denen von MCF

>150 MW, 25 MA,

stationär (ITER)

Eigene Darstellung

Treiberleistung bzw. -energie

Eine Weiterentwicklung wird derzeit an der Anlage FRX-L im Los Alamos National Laboratory (LANL) gearbeitet: Das Plasma wird in einer Quarzröhre mit 10,5 Zentimeter Durchmesser formiert, aus deren offenem Ausgang das Plasma in einem Liner aus Aluminium überführt wird, in dem das Plasma durch Magnetfelder bis zu einer Dichte von etwa 10<sup>19</sup> cm<sup>-3</sup> komprimiert wird, wobei die Plasmatemperatur auf 5 bis 10 keV ansteigt und das Magnetfeld stark ansteigt. Durch die Verwendung eines Magnetfeldes zur Reduzierung der Energieverluste an die Wand kann die Zeitskala für Trägheitsfusion verlängert werden, so dass eine kostengünstigere Elektrotechnik (anstelle teurer Laser) zum Betreiben verwendet werden kann. Elektrische Impulstechnik wird verwendet, um einen Metallzylinder, der um das vorformierte Targetplasma angeordnet ist, implodieren zu lassen. Das reduziert das notwendige Kompressionsverhältnis zehn- bis zwanzigfach. Solche Kompressionen sind bereits in hydrodynamischen Experimenten erreicht worden. Am Ende der Brennphase, nachdem das Metall in Richtung der Achse kollabiert ist, entsteht theoretisch ein Jet aus heißem, geschmolzenem Metall, welcher axial in beiden Richtungen aus dem Liner ausgestoßen wird. Mit der FRX-L Anlage im LANL wurde bisher erreicht eine Dichte von  $5 \times 10^{18}$  cm<sup>-3</sup> sowie eine DD-Ausbeute von  $10^{15}$  Neutronen pro Schuss. Ziel ist eine Dichte von  $10^{19}$  cm<sup>-3</sup> bei einer Dauer von mehr als 1  $\mu$ s (vgl. Slough 2015).

Es gibt auch für diese Technologie schwer zu überwindende Hürden: Die Formierung eines ausreichend langlebigen Plasmabündels als Target mit einer Lebensdauer von etwa 10 us, das Zusammenspiel zwischen der Formierung der Plasmabündel und nachfolgender Implosion, die Symmetrie der Implosion, die Vermeidung eines Gemisches aus Metall- und Wasserstoff-Ionen bei der Kompression, Minimierung der Transportverluste des Plasmas an den Wänden u.a. Trotz der Vereinfachung im Vergleich zu den vorgenannten Verfahren ist auch das MTF-Prinzip noch nicht zu einem energieerzeugenden Reaktor umgesetzt worden, obgleich seit längerer Zeit an dem Verfahren gearbeitet wird. Daher ist auch für dieses Verfahren bisher noch keine Prognose über den Zeitrahmen bis zur Einführung in die Praxis der Erzeugung von Elektroenergie möglich.

## 3.3 Zu einigen privaten Fusionsreaktorprojekten

## Schockwellenfusion

Das Konzept der Schock- oder Stoßwellenkompression, auf Basis des MTF-Prinzips, wird vom kanadischen Unternehmen General Fusion vorangetrieben. Hochbeladene DT-Plasmaringe (Spheromaks) werden von zwei Seiten in eine Reaktionskammer eingeschossen und in dieser beim Verschmelzen einer konzentrischen, mechanischen Stoßwelle ausgesetzt, welche das Plasma bis zu Zündung komprimiert und erhitzt. Die Stoßwelle wird durch 200 mechanische Kolben erzeugt, welche gleichzeitig eine Stoßwelle in einer Kugel (Durchmesser zwei Meter) aus geschmolzenem Li-Pb-Gemisch auslöst, in deren Zentrum sich die Reaktionskammer befindet. Um höchste Kompression zu erreichen, ist extreme Präzision der digital gesteuerten Kolbenimpulse erforderlich. Das Li-Pb-Gemisch dient gleichzeitig mehreren Aufgaben: Ausbreitungsmedium für die konzentrische Stoßwelle, Neutronenmultiplikator über Pb(n,2n)-Reaktionen, T-Brüten aus Lithium und Strahlenschutz.

Das Verfahren verspricht erhebliche Kostenvorteile im Vergleich zur Laserfusion, da während des Impulses keine Struktur zerstört wird. Damit scheint auch eine hohe Schussfrequenz erreichbar. Für die Implementierung sind bei General Fusion drei Phasen vorgesehen:

- (1) Bau einer kleinen Maschine, welche die Machbarkeit demonstriert; diese wurde bereits vorgestellt;
- (2) Konstruktion eines experimentellen Reaktors, der den Break-even erreichen soll;
- (3) Bau eines kostengünstigen Generators mit 100 MW elektrischer Nettoleistung, bei Kosten um 500 Millionen US \$.

Inwieweit dieses Prinzip tatsächlich großtechnisch realisiert und der angekündigte Zeitplan eingehalten werden kann, bleibt allerdings abzuwarten (vgl. Laberge 2008; Richardson et al. 2013). Der Vizepräsident von General Fusion, Michael Delage, hat den Entwicklungsstand folgendermaßen beschrieben: Die Firma hat die geforderte hohe Präzision der Server-Steuerung

eines Kolbens demonstriert, indem eine Zeitschärfe innerhalb von 8 µs erreicht wurde. An einer anderen Anlage mit einem Kolben der erforderlichen Größe wurde die akustische Wellenausbreitung in einer Li-Pb-Schmelze untersucht. Der erste Plasmainjektor ist vor einem Jahr in Betrieb gegangen (vgl. Boyle 2016). Mehrfach wurde über erfolgreiche Akquisition von Risikokapital berichtet, beispielsweise über eine Investition in Höhe von 19,5 Millionen US \$ durch den Gründer von Amazon, Jeff Bezos.

Das angestrebte Konzept ist im Vergleich zur MCF und ICF wesentlich einfacher und kompakter. Vorteile sind insbesondere, dass weder eine riesige Vakuumanlage noch umfangreiche Kältetechnik für die Kühlung benötigt werden (außerhalb der kompakten Plasmainjektoren), Strahlenschäden an der Wand zwischen Plasmakammer und Blanket keine Rolle spielen und für Abschirmung, T-Brüten und Wärmeauskopplung standardmäßiges Knowhow aus der Kerntechnik verwendet werden kann. Die Stromerzeugung soll auf herkömmlichem Weg über Dampferzeuger und -turbine erfolgen. Dennoch gibt es auch für dieses Fusionskonzept noch sehr schwierige Probleme zu lösen: stabile Formierung, Transport und Verschmelzung der Spheromaks mit ausreichend hoher Ionen-Beladung im Zentrum einer Reaktionskammer, welche als Wirbel in der schnell rotierenden Li-Pb-Schmelze gebildet werden soll, sowie die Erreichung ausreichend hoher Kompression durch höchste Präzision der Kolbenmechanik. Das sind nur die gravierenden Probleme.

Beim gegenwärtigen Entwicklungsstand ist auch für diese Technologie eine zuverlässige zeitliche Prognose über deren Nutzung noch nicht möglich, allerdings könnte dieser Weg bei erfolgreicher Entwicklung zu wesentlich schnelleren und kostengünstigeren Lösungen führen als MCF und ICF.

## Helion Energy

In Seattle (USA) wird seit Jahren ein durch David Kirtley initiiertes Projekt verfolgt, mit dem auf der finanziellen Grundlage von Risikokapital die neutronenfreie Reaktion

$$D + He-3 \rightarrow He-4 + p + 18,3 \text{ MeV}$$

sowie die direkte Konversion der geladenen Fusionsprodukte in Elektroenergie realisiert werden soll. Dieses Verfahren wäre allerdings nicht vollständig neutronenfrei, da bei den Plasmaprozessen auch DD-Reaktionen und sekundäre Reaktionen mit den entstehenden Tritonen stattfinden können, in denen ebenfalls Neutronen produziert werden, insgesamt allerdings bedeutend weniger als in Reaktoren auf Basis der DT-Reaktion und mit wesentlich geringerer kinetischer Energie.

Bei diesem Verfahren werden zwei Plasmabündel mit dem Ionengemisch aus D<sup>+</sup> und He-3<sup>+</sup> beschleunigt und zur Kollision in eine Reaktionskammer gebracht, in der mittels elektro-magnetischer Felder das Plasma weiter komprimiert und zur Zündung gebracht wird, wobei die erforderlichen Temperaturen allerdings bei weit über 100 Millionen Kelvin liegen müssen, um eine Zündung zu erreichen.

In erheblichem Umfang (über 100 Millionen US \$) wurde dafür Risiko-kapital eingebracht. Es existieren Versuchsanlagen (vgl. Boyle 2016). Die Demonstration soll in einigen Jahren und die Markteinführung bis 2022 erfolgen. Eine unabhängige Bewertung dieser Zeitprognose ist nicht möglich. Im Hinblick auf das Thema dieses Symposiums bleibt festzustellen, dass einerseits die Vorteile hinsichtlich seiner Nachhaltigkeit dieses Verfahrens wegen der geringeren entstehenden Radioaktivität und der direkten Konversion in Elektroenergie (Vermeidung der Verluste der herkömmlichen Energietechnik über Dampferzeugung) evident sind, andererseits sich aber auch Nachteile wegen der aufwendigen Beschaffung des He-3 Brennstoffes ergeben.

## Tri Alpha Energy

Ein anderes, ebenfalls revolutionierendes Konzept zur Freisetzung von Fusionsenergie wird seit 1997 in Kalifornien (USA) in der Firma Tri Alpha Energy <sup>10</sup> durch ein Team um Norman Rostoker (vgl. Rostoker et al. 1997) verfolgt und beruht auf der neutronenfreien Reaktion

$$p + B-11 \rightarrow 3 \text{ x He-4} + 8,68 \text{ MeV},$$

die allerdings zur Erreichung der Zündung Plasmatemperaturen um 3 Milliarden Kelvin erfordert. Hinzu kommt, dass in diesem Konzept ebenfalls eine direkte Konversion der Bewegungsenergie der entstehenden geladenen Alphateilchen in Elektroenergie vorgesehen ist, wodurch konventionelle Stromerzeugung entfallen soll (vgl. Grant 2013).

Bei diesem Verfahren sollen ebenfalls zwei Plasmabündel aus Protonen und Borionen formiert und aufeinander geschossen werden, mittels Linearbeschleuniger, d.h. mit stark erhöhter kinetischer Energie. In der Reaktionskammer werden durch komplizierte elektromagnetische Prozesse und Anla-

<sup>9</sup> Vgl. http//trialphaenergy.com/.

genkomponenten Kompression, Zündung und Extraktion der erzeugten Energie erreicht. Dies ist stark vereinfacht das Konzept, welches in zahlreichen Publikationen, Patentanmeldungen und Konferenzberichten bisher bekannt wurde. Es existieren auch Versuchsanlagen, so die neuste Version "C-2U".

Auch wenn der Weg zum angestrebten Ziel noch sehr weit und dessen Erreichbarkeit ungewiss ist, wurde bereits in erheblichen Umfang Risikokapital dafür bereitgestellt. So wurde u.a. über eine Investition in Höhe von 100 Millionen US \$ in dieses Projekt durch den Microsoft-Mitbegründer Paul Allan berichtet. Eine zeitliche Prognose über die Einführung dieser Technologie erscheint derzeit noch verfrüht. Dennoch kann darauf hingewiesen werden, dass bei einer künftigen Realisierung dieser Weg im Hinblick auf seine Nachhaltigkeit sehr beträchtliche Vorteile gegenüber allen Anlagen mit Nutzung der DT-Fusion besteht, da kerntechnische Aspekte (induzierte Radioaktivität, Strahlenschutz, radioaktive Abfallentsorgung) weitgehend entfallen würden und darüber hinaus ein vergleichsweise kostengünstiges Verfahren der Erzeugung des wertvollen He-4, quasi als Abfallprodukt der Energieerzeugung, verfügbar wäre.

#### 4 Energiegewinnung auf Basis neuer atomarer Prozesse

Die im Abschnitt 3 dargestellten Verfahren und Anlagen basieren auf gut bekannten und vielfach untersuchten elementaren Kernreaktionsprozessen, jeweils zwischen zwei leichten Kernen. Daneben tauchen in wissenschaftlichen Medien der vergangenen Jahre immer wieder Hinweise auf neuartige Wechselwirkungsprozesse auf, die nach Aussagen der entsprechenden Autoren zur Energiefreisetzung genutzt werden könnten. Die Mechanismen solcher Prozesse sind allerdings bisher nicht oder noch nicht vollständig geklärt. Insofern gilt die wissenschaftliche Grundlage für diese Konzepte bisher als nicht validiert. Der Umfang dieses Beitrages lässt eine detailliertere Vorstellung solcher Ansätze nicht zu. Nachfolgend soll nur ein Beispiel für derartige Ansätze zeigen, dass die Energiegewinnung auf Basis atomarer und nuklearer Prozesse hinsichtlich der infrage kommenden elementaren physikalischen Prozesse kein endgültig abgeschlossenes, sondern ein sich immer noch dynamisch entwickelndes Gebiet ist.

## Laserfusion von ultra-dichtem Deuterium

In einer ganzen Reihe von Publikationen der schwedischen Gruppe von Leif Holmlid wird das Konzept verfolgt, laserinduzierte Fusion zwischen Deute-

ronen an kondensiertem Wasserstoff herbeizuführen (vgl. Badiel et al. 2009, 2010a, 2010b; Holmlid 2013, 2014; Holmlid/Olafsson 2014, 2015). Mithilfe katalytischer Prozesse und bei hoher Temperatur soll angeblich ein Gasstrahl im Vakuum aus Wasserstoff/Deuterium in hoch-angeregte Rydberg-Zustände übergehen und beim Auftreffen auf gekühlte Metalloberflächen in die theoretisch vorhergesagten ultra-dichten Zustände von Protium bzw. Deuterium kondensieren (vgl. Winterberg 2010), die längere Zeit an der Metalloberfläche erhalten bleiben und dort mit Laserstrahlen zur Fusion gebracht werden können. Der kürzeste H-H-Abstand in diesem Kondensat soll angeblich nur bei 3,7 pm und der D-D-Abstand bei 2,3 pm liegen. Bei dieser extrem hohen Dichte reichen um mehrere Größenordnungen geringere Laserenergien, im Vergleich zur herkömmlichen Laserfusion, für die Zündung. Die Bestätigung durch unabhängige Experimente und damit die wissenschaftliche Validierung stehen allerdings noch aus. Würde dieser Ansatz sich bestätigen, bedeutete dies auch hinsichtlich der Nachhaltigkeit der atomaren Energiegewinnung eine neue Qualität mit entsprechend großer Perspektive.

## 5 Schlussfolgerungen

Eine Bewertung der künftigen Energieerzeugung auf atomarer und nuklearer Basis aus der Sicht ihrer ökonomischen, ökologischen und sozialen Nachhaltigkeit – damit ihrer langfristigen Perspektiven – ist außerordentlich komplex und derzeit noch nicht abschließend möglich.

Technologisch weitgehend ausgereift ist die Kernspaltungstechnologie auf Basis thermischer Reaktoren, die schon bisher einen erheblichen Beitrag zur Vermeidung von Kohlendioxid-Freisetzung bei der Erzeugung von Elektroenergie liefert. Andererseits fällt die ökologische und soziale Bewertung ihrer Nachhaltigkeit – wegen der Entstehung langlebiger Radionuklide, Freisetzung von Nachwärme, Restrisiko von Havarien u.a. Gründen – eher negativ aus. Dies erschwert und verzögert auch die Weiterentwicklung und Einführung neuer, verbesserter Reaktorkonzepte. Ungeachtet der zahlreichen gegenwärtig weltweit geplanten oder im Bau befindlichen neuen Reaktorprojekte kann voraussichtlich der gegenwärtige Anteil der Kernenergie auf Basis von Kernspaltung an der weltweiten Produktion von Elektroenergie künftig kaum gehalten werden. Vor allem aus Gründen der sozialen Dimension der Nachhaltigkeit ist daher die langfristige Rolle der Kernspaltungstechnik – obgleich in ihrem technologischen Entwicklungspotenzial längst noch nicht ausgeschöpft - vermutlich eher als Brückentechnologie für die kommenden Jahrzehnte zu sehen.

190 Dieter Seeliger

Seit Jahrzehnten wird an der Alternative Kernfusion geforscht und entwickelt, mit der wesentliche Nachteile der Kernspaltungstechnik vermieden oder zumindest stark reduziert werden könnten. Dabei steht bisher die DT-Fusion in Anlagen mit Magnet- oder Trägheitshalterung des Plasmas im Mittelpunkt, an deren führenden, staatlich finanzierten Projekten in den vergangenen Jahren beträchtliche Fortschritte erzielt wurden, ohne allerdings bisher die Freisetzung von Nettoenergie erreichen zu können. Gelingt dieser Schritt, wird die Bewertung der Nachhaltigkeit aus ökonomischer, ökologischer und sozialer Sicht in den Mittelpunkt des Interesses der Gesellschaft treten. Die bisherige Zeitplanung lässt nicht erwarten, dass noch in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts Elektroenergie auf kommerzieller Basis auf dieser Grundlage erfolgen kann. Spürbare Beiträge zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen können anhand des derzeitigen Entwicklungsstandes und begründeter Prognosen folglich erst in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts erwartet werden. Entscheidungen darüber, ob an diesen Konzepten im Interesse der langfristigen Energieversorgung weiter entwickelt wird, werden allerdings wahrscheinlich bereits wesentlich früher fallen, abhängig von den in den nächsten fünf bis zehn Jahren erreichten Fortschritten an diesen Anlagen einerseits und den im gleichen Zeitraum erreichten Fortschritten bei der Bewältigung von Problemen der erneuerbaren Energien (einige Stichworte: leistungsfähige Energiespeicher, ökonomischer Energietransport über große Entfernungen, Steuerung komplexer Systeme mit dezentraler Energieerzeugung). Beide Richtungen der künftigen Erzeugung von Elektroenergie werden sich mit dem zunehmenden Druck ihrer Bewertung aus der Sicht aller Dimensionen der Nachhaltigkeit auseinandersetzen müssen, wobei ein Vergleich nicht durchgängig zu Ungunsten der Fusion ausfallen dürfte.

Parallel gibt es eine wachsende Zahl von privat finanzierten Forschungsund Entwicklungsprojekten, in denen modifizierte Wirkmechanismen und teilweise andere (neutronenfreie) Reaktionstypen zum Einsatz gebracht werden. Kommen diese Richtungen zum Tragen, so könnten Fusionsreaktoren eine wesentlich günstigere Bewertung ihrer Nachhaltigkeit erreichen. Zuverlässige Prognosen sind jedoch schwierig, da eine unabhängige, realistische Einschätzung des erreichten Entwicklungsstandes kaum möglich erscheint.

Wiederholt wurden in der Fachwelt neue Ideen, Konzepte, Theorien und Experimente vorgestellt, welche neue Wege aufzeigen, auf denen es gelingen soll, aus Wasserstoff Energiemengen durch atomare und nukleare Prozesse freizusetzen, die weit über das Maß chemischer Umwandlungen hinaus gehen. Es wird weltweit über zahlreiche Firmengründungen auf Basis solcher Konzepte mit Hilfe von Risikokapital berichtet. Ein Beispiel dieser Art wurde

kurz vorgestellt: Untersuchungen zur Laserfusion von ultra-dichtem Deuterium einer schwedischen Forschergruppe. Diese Versuche unterliegen derzeit dem Prozess der Klärung ihres Mechanismus, der gesicherten Reproduzierbarkeit, Verifizierung und unabhängigen Bestätigung durch die Fachwelt. Endgültige Schlussfolgerungen sind daher verfrüht.

Auch wenn die eingangs gestellte Frage heute nicht abschließend beantwortet werden kann, bleibt die Vision erhalten: Die gewaltigen Vorteile einer durch Menschen steuerbaren, praktisch unerschöpflichen Energiequelle auf Basis von Wasserstoff, welche allen Kriterien der Nachhaltigkeit genügt, rechtfertigen den immensen Aufwand für deren Erforschung und technologische Entwicklung, selbst wenn diese erst für künftige Generationen verfügbar sein würde. Es bleibt viel in Bewegung auf diesem Gebiet im Spannungsfeld zwischen technischer Entwicklung und der Bewertung ihrer ökonomischen, ökologischen und sozialen Nachhaltigkeit, so dass auch schnellere Ergebnisse bei der praktischen Implementierung nicht auszuschließen sind.

#### Literatur

- Badiel, S.; Andersson, P. U.; Holmlid, L. (2009): Fusion Reactions in High-density Hydrogen. A Fastroute to Small-scale Fusion? In: International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 34, pp. 487–495
- Badiel, S.; Andersson, P. U.; Holmlid, L. (2010a): Laser-driven Nuclear Fusion D+D in Ultradense Deuterium. MeV Particles Formed without Ignition. In: Laser and Particle Beams, Vol. 28, pp. 313–317
- Badiel, S.; Andersson, P. U.; Holmlid, L. (2010b): Production of Ultra-dense Deuterium, a Compact Future Fusion Fue. In: Applied Physics Letters, Vol. 96, pp. 124103
- Boyle, A. (2016): Nuclear Fusion Gets Boost from Private-sector Start-ups. In: Science News, Vol. 189, No. 3, p. 18
- Grant, A. (2013): Proton-boron Nuclear Fusion Returns to Spotlight. In: Science News, Vol. 184, No. 2, p. 8
- HELM (2006): Helmholtz-Gemeinschaft "Kernfusion". Hg. v. Forschungszentrum Jülich, Forschungszentrum Karlsruhe, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik. Berlin (Helmholtz-Gemeinschaft)/München (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik)
- Holmlid, L. (2013): Excitation Levels in Ultra-dense Hydrogen p(-1) and d(-1) Clusters. Structure of Spin-based Rydberg Matter. In: International Journal of Mass Spectrometry, Vol. 352, pp. 01–08
- Holmlid, L.; Olafsson, S. (2015): Spontaneous Ejection of High-energy Particles from Ultradense Deuterium D(0). In: International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 40, Issue 33, pp. 10559–10567

192 Dieter Seeliger

Holmlid, L.; Olafsson, F. (2014): Heat Generation above Break-even from Laser-induced Fusion in Ultra-dense Deuterium. Intense Ionizing Radiation from Laser-induced Processes in Ultra-dense Deuterium D(-1). In: International Journal of Modern Physics, E – Nuclear Physics, Vol. 23, Issue 9, p. 1450050

- Holmlid, L. (2014): Ultra-Dense Hydrogen H(-1) as the Cause of Instabilities in Laser Compression-Based Nuclear Fusion. In: Journal of Fusion Energy, Vol. 33, Issue 4, pp. 348–350
- IAEA (2016): Power Reactor Information System. Nuclear Power Reactors in the World Vienna (IAEA) (Reference Data Series 2, 2015 Edition). URL: http://www.iaea.org/pris
- Klinger, Th.; Kemnitz, B. (2015): Fusion von Wasserstoff Sonnenenergie der Zukunft oder ewiger Traum? In: Naturwissenschaftliche Rundschau, Jg. 68, H. 10, S. 503–508
- Laberge, M. (2008): An Acoustically Driven Magnetized Target Fusion Reactor. In: Journal of Fusion Energy, Vol. 27, June, p. 65
- LLNL Lawrence Livermore National Laboratory (2012): NIC Team Fires First 500-Terawatt Shot on NIF. URL: http://lasers.llnl.gov/newsroom/project\_status/index.php
- Nuckolls, J.; Wood, L.; Thiessen A.; Zimmermann, G. (1972): Laser Compression of Matter to Superhigh Densities. Thermonuclear Applications. In: Nature, Vol. 239, pp. 139–142
- Richardson, D.; Froese, A.; Suponitsky, V.; Reynolds, M.; Plant, D. (2013): Progress Towards Acoustic Magnetized Target Fusion: An Update on the R&D Program at General Fusion. In: Proceedings of the 34th Annual Conference of the Canadian Nuclear Society, Toronto, Ontario, June 9–12. Toronto
- Rostoker, N.; Binderbauer, M. W.; Monkhorst, H. J. (1997): Colliding Beam Fusion Reactor. In: Science; American Association for the Advancement of Science, Vol. 278, Issue 5342, pp. 1419–1422
- Seeliger, D. (2014): Kann Kernfusion die Bedarfslücke bei Elektroenergie im 21. Jahrhundert umweltverträglich schließen? In: Banse, G.; Fleischer, L.-G. (Hg.): Energiewende – Produktivkraftentwicklung und Gesellschaftsvertrag. Berlin, S. 147–164 (Abhandlungen der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften, Bd. 31)
- Siemon, R. E.; Lindemuth, I. R.; Schoenberg, K. F. (1997): Why Magnetized Target Fusion Offers a Low-Cost Development Path for Fusion Energy. URL: http://fusionenergy.lanl.gov/Documents/MTF/Why MTF/Why-MTF-comments.html
- Slough, J. (2015): Inductively Driven 3D Liner Compression of a Magnetized Plasma to Megabar Energy Densities. Technical Report. Washington, D.C., February 1 (U.S. Department of Energy, Office of Science)
- Sonnabend, K. (2016a): Von der Vision zur Fusion. In: Physik Journal, Jg. 15, März, S. 25–29
- Sonnabend, K. (2016b): Mit Kohlenstoff zu optimierten Plasmen. In: Physik Journal, Jg. 15, August/September, S. 11
- WEND (2016): Wendelstein 7-X Newsletter, Nr. 12, April
- Winterberg, F. (2010): Ultra-dense Deuterium and Cold Fusion. Physics Letters, A, Vol. 374, Issue 27, pp. 2766–2771

# Ulf Holzendorf, Benjamin Apelojg

## Erziehung zum nachhaltigen Konsum – Aufgaben von Schule?!

In diesem Beitrag wird der grundsätzlichen Frage, was denn nun der Begriff des nachhaltigen Konsums genau beinhaltet, und daran anschließend die Frage, ob und wieweit Schüler zu diesem Konsumverhalten erzogen werden können, nachgegangen. Der Beitrag gliedert sich in zwei Teile. Im ersten Teil wird kurz auf verschiedene Perspektiven, die mit dem Konzept der Bildung zur nachhaltigen Entwicklung (BNE) verbunden sind, und deren Konsequenzen für eine Erziehung zum nachhaltigen Konsum hingewiesen, sowie vorgestellt, wie BNE mittlerweile in Brandenburg und Berlin verankert ist. Im zweiten Teil wird versucht, trotz der Schwierigkeiten, die mit dem Konzept der BNE in Verbindung gebracht werden können, einen Vorschlag für die Umsetzung in der Schule am Beispiel der Plastiktüte zu geben, um dann ein kurzes Fazit zu ziehen.

# 1 Perspektiven einer Bildung für nachhaltige Entwicklung

Im Folgenden wird anhand von drei Perspektiven aufgezeigt, warum die Erziehung zum nachhaltigen Konsum mehr Fragen als klare Leitlinien für den Unterricht aufwirft. Zuerst wird auf die grundsätzlichen Ziele der BNE, deren Verankerung in den Lehrplänen in Berlin und Brandenburg und die verschiedenen Funktionen einer BNE eingegangen. Darauf aufbauend wird die Frage gestellt, inwieweit die "praktische Philosophie" bei der Ausgestaltung der Erziehung zum nachhaltigen Konsum hilfreich sein kann. Abschließend soll diskutiert werden, welche ökonomische Perspektive einer BNE zugrunde gelegt werden kann.

#### 1.1 Ziele und Funktionen einer BNE

Erstens kann man betrachten, wie die Forderung einer nachhaltigen Bildung, vom Weltgipfel 2002, in den Beschlüssen der einzelnen Länder und der Kultusministerkonferenz angenommen wurde. Laut Beschluss der KMK ist es das Ziel,

"das Konzept der BNE in den Schulen zu verankern. BNE dient dazu, dass Schülerinnen und Schüler Kompetenzen für eine nachhaltige Entwicklung erwerben. Dabei geht es darum, Probleme nicht-nachhaltiger Entwicklung erkennen und bewerten zu können und Wissen über nachhaltige Entwicklung anzuwenden. BNE gibt Empfehlungen für die Gewinnung von Kompetenzen zur Gestaltung offener Zukünfte. Nachhaltige Entwicklung verbindet umweltgerechte Lösungen mit wirtschaftlicher Leistungsfähigkeit und sozialer Gerechtigkeit. Sie berücksichtigt dabei eine demokratische Politikgestaltung und globale sowie kulturelle Aspekte." (KMK/DUK 2007, S. 3)

Im Jahr 2012 wurde von der Kultusminister-Konferenz (KMK) in Auftrag gegeben zu untersuchen, inwieweit diese Zielsetzung in den Lehrplänen und Bildungsplänen der einzelnen Bundesländer umgesetzt wurde.

In Berlin ist in allen Rahmenlehrplänen (Grundschule, Sekundarschule und Gymnasium) der Begriff "nachhaltige Entwicklung" zu finden:

"In den fachbezogenen Ausführungen der einzelnen Rahmenlehrpläne ist nachhaltiges Denken und Handeln immer wieder zentrales Thema des Unterrichts. Die Verankerungen werden hier exemplarisch für die Fächer Geografie und Biologie (Sek I und Sek II) genannt." (KMK 2012, S. 18)

"Unter der Zielsetzung, die Erde durch eine nachhaltige und umweltbewusste Entwicklung zu bewahren, befassen sich die Schülerinnen und Schüler im Geografieunterricht besonders mit der Lösung lokaler, regionaler und globaler Probleme, sie erarbeiten exemplarisch Strategien der nachhaltigen Entwicklung, die sie ihrem eigenen Handeln und Engagement zugrunde legen können." (KMK 2012, S. 18f.)

Weitere Bezüge zur BNE finden sich u.a. im Hinblick auf den Klimawandel und die Globalisierung.

Für Brandenburg wurde zum damaligen Zeitpunkt festgelegt, die BNE als zentrales Element für die Überarbeitung der Rahmenlehrpläne 2016 aufzunehmen. Dies wurde mittlerweile vollzogen. So bildet Nachhaltigkeit ein Basiskonzept im neuen gemeinsamen Rahmenlehrplan für das Fach Wirtschaft-Arbeit-Technik in Berlin und Brandenburg.

Will man die grundsätzlichen Ziele einer BNE umsetzen, bedarf es der Klärung, welche Funktionen eine BNE erfüllen sollte. Christine Künzli David und Ruth Kauffmann-Hayoz fassen die Funktionen wie folgt zusammen:

"Bildung – konkretisiertes Ziel der Idee Nachhaltigkeit:

Es soll sichergestellt sein, dass alle gegenwärtig wie künftig lebenden Menschen ihr Recht auf Bildung (auf allen Stufen) wahrnehmen können. Bildung stellt also in diesem Sinne eines der konkretisierten (soziokulturellen) Ziele Nachhaltiger Entwicklung dar.

Bildung – Politiksektor bzw. Institution, der bzw. die die Ziele Nachhaltiger Entwicklung umsetzen soll:

Der Politiksektor Bildung und die Schulen als Institutionen sind, wie auch alle anderen Sektoren und gesellschaftlichen Institutionen, aufgerufen, einen Beitrag zu einer Nachhaltigen Entwicklung zu leisten. In diesem Sinne wird Bildung als Teil der menschlichen Gesellschaft verstanden, den es im Hinblick auf die Realisierung einer Nachhaltigen Entwicklung zu verändern gilt.

Bildung – Vermittlung von Kompetenzen:

Im Kontext von Nachhaltiger Entwicklung müssen drei verschiedene Funktionen der Kompetenzvermittlung unterschieden werden:

- Bildung als Maβnahme zur Realisierung konkretisierter Ziele einer Nachhaltigen Entwicklung: Bildung kann als Instrument eingesetzt werden, um der Bevölkerung generell und bestimmten Gruppen von Menschen (z.B. bestimmten Berufsgruppen) Kenntnisse und Fähigkeiten zu vermitteln, die sie zur Erreichung von konkretisierten Zielen einer Nachhaltigen Bildung für eine Nachhaltige Entwicklung benötigen. Die Fähigkeiten, die es gemäß dieser Funktion zu vermitteln gilt, leiten sich somit aus den konkretisierten Zielen Nachhaltiger Entwicklung her. In diesem Sinn ist Bildung ein Instrument, das dazu dienen soll, eine Nachhaltige Entwicklung generell und bestimmte konkretisierte Ziele einer Nachhaltigen Entwicklung im Speziellen zu verwirklichen.
- Vermittlung von Kulturtechniken als Voraussetzung für Nachhaltige Entwicklung: Kulturtechniken wie Lesen und Schreiben sind eine Voraussetzung dafür, dass die Menschen überhaupt an Entscheidungsprozessen im Hinblick auf eine Nachhaltige Entwicklung partizipieren können. In diesem Sinne ist Bildung eine notwendige (jedoch nicht hinreichende) Voraussetzung, die es erst möglich macht, einer wichtigen Anforderung im Zusammenhang mit der Idee der Nachhaltigkeit, derjenigen nach Partizipation, nachzukommen.
- Vermittlung spezifischer Kompetenzen für eine Nachhaltige Entwicklung:
  Bildung soll die Menschen dazu befähigen, an den spezifischen Prozessen, die im Hinblick auf die Konkretisierung und Weiterentwicklung der regulativen Idee der Nachhaltigkeit notwendig sind, mitzuwirken und dabei den Anforderungen gerecht zu werden, die sich aus der Idee der Nachhaltigkeit ergeben" (Künzli David/Kauffmann-Hayoz 2008, S. 12f.).

Die hier dargestellten Funktionen sind aus Sicht von Künzli David und Kauffmann-Hayoz nicht unabhängig voneinander. Auf Basis der großen Heterogenität bestehender Ideen und Konzepte und der fehlenden Trennschärfe plädieren die Autoren, sich auf die Funktion *Vermittlung von Kompetenzen* zu beschränken. In diesem Sinne ist es nicht das Ziel der BNE, die Gesellschaft zu verbessern oder den Lebensstil der Menschen zu lenken,

sondern Menschen zu befähigen, eine nachhaltige Entwicklung mitzugestalten (vgl. Künzli David/Kauffmann-Hayoz 2008, S. 14). Inka Bormann spricht von Praktiken der "Selbstvergewisserung durch inhaltliche Akzentuierung: Thematisierung von Nachhaltigkeit im Bildungsbereich" (Bormann 2013, S. 278). So wurden Prinzipien der Nachhaltigkeit entwickelt oder Konzepte starker und schwacher Nachhaltigkeit diskutiert. Bormann verweist ebenso darauf, dass vor allem technische Lösungen als gesellschaftlich anschlussfähig gesehen wurden und weniger Veränderungen, die auf eine individuelle Verhaltensänderung und Lebensführung abzielten.

Zusammenfassend lässt sich so sagen, dass es neben einer gewissen Unbestimmtheit des Nachhaltigkeitsbegriffes an sich eine Vielzahl von Funktionen gibt, welche unterschiedliche Zielsetzungen verfolgen. Man kann zwar davon ausgehen, dass man sich weitestgehend einig darüber ist, Ressourcen und die Umwelt schonen zu wollen. Wie dies aber gelehrt und gelernt werden soll, ist eine Frage der Perspektive und hängt von den unterschiedlichen Zielen ab, die man mit einer BNE in Verbindung bringen kann. So ist es unserer Meinung nach unklar, inwieweit ein Schüler lernen soll, beispielsweise politische Entscheidungen oder seinen eigenen Konsum kritisch zu hinterfragen, ohne auf einen Referenzrahmen zurückgreifen zu können, welcher wiederum nicht moralisierend sein darf. Außerdem soll keine direkte Beeinflussung der Lebensführung herbeigeführt werden. Dies scheint insbesondere im Hinblick darauf paradox, dass der Kompetenzbegriff vor allem darauf abzielt, Probleme in unterschiedlichen Situationen lösen zu können.

## 1.2 Die praktische Philosophie als Leitlinie einer BNE

Bemüht man nun die "praktische Philosophie" in ihrer normativen Lesart als eine Ethik vom richtigen und guten Handeln (vgl. Schlegel-Matthies 2013), führt dies hinsichtlich der Frage nach der Erziehung zum nachhaltigen Konsum auch nicht zu mehr Klarheit.

Allgemein ist die Beantwortung

"der Frage nach dem *guten Leben* die Aufgabe der Haushaltswirtschaft: Wie können und wie sollen Menschen in Haushalten leben, um Lebensqualität für sich und andere zu sichern?" (Schlegel-Matthies 2013, S. 61)

In diesem Sinne sind beispielsweise die Bildungsziele des REVIS-Referenzrahmens der Verbraucher-Bildung<sup>1</sup> sowie andere Konzepte der Haushalts-

<sup>1</sup> Vgl. http://www.evb-online.de/evb\_revis.php.

wissenschaft auch normativ geprägt. Diese Normen zu bestimmen und festzulegen kann beispielsweise eine Aufgabe der Konsumethik sein. Laut Harald Lemke ist nicht der grundsätzliche Verzicht, wie er von vielen Konsumkritikern gefordert wird, ethisch verantwortlich, sondern den Versuch zu unternehmen zu bestimmen, was ein besseres oder schlechteres Konsumleben ist (vgl. Lemke 2013, S. 20f.). Wobei weniger Konsum grundsätzlich von Lemke als richtig angesehen wird. Lemke verdeutlicht in seinem Beitrag, dass dem Konsumenten eine wichtige Rolle zukommt, wenn es um die Frage geht, welche Produkte entwickelt, produziert und vertrieben werden. Man kann dies als sogenannte wachsende "Konsumentensouveränität" bezeichnen. Aus seiner Sicht verhält sich derjenige, der seinen Konsum nicht ändert, vorsätzlich unethisch und verschärft die Krise (vgl. Lemke 2013, S. 29). So wie Karl Marx sich einst mit der Bedeutung des Kapitals auseinandergesetzt hat, könne man die nächsten zwanzig Jahre die Rolle des Konsums untersuchen. Andere Autoren (etwa Kathrin Hartmann und Johannes Reidel) stellen hingegen mehr die Verantwortung der Politik in den Vordergrund und sprechen von einem "Greenwashing" der Unternehmen (vgl. Hartmann 2013, S. 14ff.; vgl. auch Reidel 2013), wie beispielsweise die REWE-Handelsgruppe mit ihrem Siegel Pro Planet.

Wer trägt nun die Verantwortung dafür, dass unsere Welt sauberer, gesünder oder, wie wir lernen sollen, nachhaltiger wird? Der Konsument? Der Bürger? Die Politik? Oder die Unternehmen? Angela Häußler und Christine Küster stellen zu Recht fest, dass unser Konsumverhalten durch unsere Lebensstile geprägt wird und gerade die Konsummuster der Schüler abhängig von den jeweiligen Lebensstilen der Familien sind (vgl. Häußler/Küster 2013). Hinzu kommt nach Marcel Hunecke der Prozess der Sinnreflexion, also inwieweit man die eigene Sinnkonstruktion nutzen kann, um die eigene Wertehierarchie zugunsten von Nachhaltigkeit zu verschieben (vgl. Hunecke 2016, S. 100). Demnach existieren sehr unterschiedliche Vorstellungen von Werten und Vorstellungen darüber, was bezüglich nachhaltigen Verhaltens wünschenswert und machbar ist und was nicht. Zum Beispiel sollte die Frage, ob Bioprodukte grundsätzlich als nachhaltig angesehen werden, kritisch hinterfragt oder einfach aufgrund der höheren Preise abgelehnt werden.

Zieht man Immanuel Kants Metapher vom Gärtner als Erzieher heran, wird die Problematik, welche mit der Konsumethik verbunden ist, noch deutlicher. Nach Kant bedeutet Erziehen ein beschütztes Wachsen lassen. Dies kann einerseits als Entwicklung zur Selbständigkeit und andererseits als ein Vorgeben der Richtung wie beim Beschneiden von Rosen interpretiert werden. Nur welche Richtung soll vorgegeben werden, wenn es um eine Erzie-

hung zum nachhaltigen Konsum geht? Die Richtung einer wachsenden Konsumentensouveränität, bei der man das eigene Handeln ständig und permanent kritisch hinterfragt? Oder die der Verantwortung, bei der die Politik einsehen sollte, dass wir Menschen so sind, wie wir sind und deshalb strenge Regeln der Lebensführung benötigen? Oder die Perspektive, dass die Konzerne Schuld haben und endlich etwas dagegen unternommen werden muss? Aus den genannten Gründen ist eine Grenzziehung zwischen nicht-moralisierender, mit dem Zeigefinger deutender Pädagogik und einer Förderung kritischen selbstreflexiven Denkens für den Bereich des nachhaltigen Konsums sehr schwierig. Häußler und Küster zeigen anhand mehrerer Beispiele, wie schnell man im Rahmen einer BNE in die moralisierende Falle tappen kann (vgl. Häußler/Küster 2013).

## 1.3 Die ökonomische Perspektive

Das Konzept der Nachhaltigkeit ist eng mit der Frage verbunden, wie ökonomische, ökologische und soziale Prozesse organisiert werden können und sollten, um beispielsweise unsere Umwelt und Ressourcen zu schonen. In Bezug auf die Ökonomie bedeutet dies zu klären, wie und in welcher Form ökonomische Prozesse organisiert werden sollten, um Nachhaltigkeit zu fördern. Dies betrifft die grundsätzliche Organisation der Wirtschaft, beispielsweise als freie Marktwirtschaft, als soziale Marktwirtschaft oder als eine Form des Staatskapitalismus, wie er in China betrieben wird. Ebenso kann Nachhaltigkeit in globale, nationale und regionale Wirtschaftsstrukturen integriert werden. Zwei gegensätzliche Pole möchten wir kurz vorstellen. Zum einen die Vertreter einer Postwachstumsökonomie und zum anderen die Vertreter einer freien Marktwirtschaft mit sozialer und ökologischer Verantwortung.

Vertreter der Idee einer Postwachstumsökonomie und Subsistenzwirtschaft wenden sich radikal von einer Strategie des "Weiter so" – aber bitte ökologisch vertretbar – ab (vgl. Paech 2012; Røpke 2010). Eine Überflussgesellschaft, welche sich ausschließlich am quantitativen Wachstum orientiert, erzeuge eine Spirale niemals enden wollender Bedürfnisse. Konsum als Glücksbringer (vgl. Bauman 2009)? Eine quantitative Ausrichtung führe, so die Meinung vieler Autoren, zwangsläufig in eine globale Umweltkatastrophe, welche nur zu stoppen sei durch

"nichts Geringeres als eine umfassende Umwälzung der herrschenden kulturellen Muster, wenn man den Zusammenbruch der menschlichen Zivilisation verhindern will." (Antoni-Komar 2014, S. 5)

Um den Zusammenbruch zu verhindern, soll vermehrt auf Selbstversorgung (Stichwort: urban gardening), Gemeinschaftsnutzung und Nutzungsdauerverlängerung (Stichwort: repair Cafe) gesetzt werden. Vertreter einer solchen Perspektive werden sich mit der folgenden Definition von Nachhaltigkeit kaum zufriedengeben: Nachhaltige Entwicklung ist eine

"Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, daß künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können." (Hauff 1987, S. 46)

Dies insbesondere, da diese Definition der Wachstumshypothese folgt und eben nicht, wie von den Postwachstumsökonomen gefordert, eine deutliche Wachstumsrücknahme zum Ziel hat.

Folgt man hingegen der Idee, soziale und freie Marktwirtschaften und globalen internationalen Handel als Motor moderner Gesellschaften und wachsenden Wohlstands zu sehen, ist nur wenig Platz für "Postwachstumsgesellschaften", und die eben genannte Definition wird als "Common Sense" akzeptiert. Vielmehr wird das Konzept der Nachhaltigkeit vorwiegend durch zwei Prinzipien in die bestehenden Systeme ökonomischen Handelns integriert. Zum einen durch das Prinzip der Effizienz. Dies heißt den erforderlichen Input an Energie und Material pro Leistungseinheit zu minimieren. Beispielsweise bietet das Passivhaus den gleichen Komfort, verbraucht aber deutlich weniger Energie. Zum anderen setzt das Prinzip der ökologischen Konsistenz am industriellen Stoffwechsel an. Die materiellen Kreisläufe sollen geschlossen werden, alle Teile hergestellter Produkte wiederverwertet und -verwendet werden: "Was biologisch abbaubar ist, zerfällt nach seiner Nutzung buchstäblich zu neuer Nahrung für die Ökologie" (Paech 2012, S. 134). Die Realität kann mit dieser Traumwelt einer ständig wachsenden Ökonomie bei gleichzeitiger Ressourcen- und Umweltschonung leider nicht mithalten. Die globale Erderwärmung nimmt weiterhin dramatisch zu, insbesondere, weil auch weiterhin der globale CO2-Ausstoß zunimmt (vgl. Paech 2012, S. 134). Off-Shore-Windparks sind mit vielfältigen Folgen für die Umwelt verbunden, u.a. ein Vogelsterben in den Windrädern oder irritierte und strandende Wale. Ein weiteres Beispiel ist die zunehmende Anzahl an Elektroautos, und die damit verbundene Frage, wie die Akkus in Zukunft entsorgt werden sollen, ist weitestgehend ungeklärt.

Welche der beiden vorgestellten Leitideen ist nun diejenige, welche man bei der Erziehung zum nachhaltigen Konsum heranziehen sollte. Schließlich besteht doch ein gewisser Unterschied darin, ob ich in Zukunft auf den Konsum von Fleisch gänzlich verzichten soll (wie immer mehr Vegetarier fordern) oder ob ich mir, sofern es mein Portemonnaie hergibt, das Fleisch beim Bio-Fleischer kaufe.

Es bleibt also die Frage, ob es ihn nun gibt, den richtigen Konsum in einer falschen Welt, oder eben nicht. Der Versuch, eben diese Frage zu beantworten, ist gleichzeitig die Falle, in die wir als Lehrende tappen können und an deren Ende doch wieder eine Moralisierung von Konsumverantwortung stehen könnte. Ein nicht wirklicher, aber kleiner Ausweg könnte lauten, genau diese Fallen zu thematisieren. Auf diese Weise kann dem Ziel Rechnung getragen werden, junge Menschen dabei zu unterstützen, mündige, kritische und selbstreflektierende Mitglieder einer Gesellschaft zu werden, in welcher nicht der eine dem anderen den schwarzen Peter zuschiebt, sondern alle gemeinsam, trotz der beschriebenen Widersprüche, daran arbeiten, unsere Welt zu erhalten und lebenswert zu gestalten und somit verantwortlich zu handeln.

Es geht um den eben beschriebenen Konsumenten, der nicht nur aktiv konsumiert, sondern auch bewerten sollte. Was ist damit gemeint? Nehmen wir dazu einen Beitrag aus einer Zeitung. Hier wirbt eine Hausbaufirma mit dem Begriff der Nachhaltigkeit, ohne ihn richtig zu beschreiben:

### Nachhaltigkeit im eigenen Haus

"In Zeiten von Klimawandel. Erderwärmung und Ressourcenmangel steigt der Bedarf an ökologischen Wohnkonzepten. Wie eine aktuelle Studie der TU Darmstadt beweist, überzeugen Häuser aus Mauerwerk durch ihre nachhaltigkeitsrelevanten Eigenschaften: Mauersteine bestehen aus natürlichen Stoffen wie Sand, Kalk, Ton und Wasser. Zudem stammen die Rohstoffe aus der näheren Umgebung und stehen als natürliche Bestandteile des Bodens in nahezu unbegrenzter Menge zur Verfügung. Von diesen Materialien selbst gehen keinerlei Schadstoffe aus." (Blickpunkt 2016, S. 10)

Nachhaltigkeit wird hier nur sehr oberflächlich als Begriff verwendet. Es wird nur eine Säule der Nachhaltigkeit bedient und beworben. Mit undifferenzierten Aussagen wird versucht, Überzeugungsarbeit zu leisten, um sich für diese Bauart zu entscheiden. Dabei ist es schlichtweg falsch, diese Materialien als unbegrenzte Ressource darzustellen. Wir wissen, dass Bausand heutzutage teilweise aus dem Meer gewonnen wird und dadurch verschiedene küstennahe Nachfolgeschäden entstehen. Ist "Nachhaltigkeit" also nur noch eine Floskel, um werbewirksam zu sein?

In verschiedenen anderen Bereichen finden wir ähnliche Erscheinungen im Umgang mit dem Begriff "Nachhaltigkeit". Deshalb erscheint es uns wichtig, diesen Begriff in den Bildungskanon aufzunehmen, um Schülerinnen und Schüler zumindest annähernd mit ihm vertraut zu machen. Dies nicht nur im Sinne der Nachhaltigkeit, sondern auch im Sinne der Verbraucher, die letztlich am "Point of Sale" die Kaufentscheidung als informierte Konsumenten treffen müssen, täglich, unabhängig von der Ware, die am Markt angeboten und abgekauft wird.

Betrachtet man Nachhaltigkeit, dominiert sehr häufig die Perspektive der Umwelt. Die Umwelt ist die Natur und damit das Andere, das mich als soziales Wesen nur indirekt tangiert. Bei der Unterscheidung zwischen Gesellschaft und Umwelt fällt der Selbstbezug meistens aus. Folglich wird die Frage, welchen Beitrag kann ich selbst zur Nachhaltigkeit leisten, nur am Rande gestellt. Die durch Nachhaltigkeit angeregten Reflexionen der Umweltbedingungen schlagen sich häufig nicht auf das alltägliche Handeln nieder. Politisch-gesellschaftliches Handeln durch Gesetze und Verordnungen sind ein gut gemeintes Mittel zum Zweck. Eine durchgreifende Veränderung des Alltagsbewusstseins bedarf eines langen Atems oder reglementierender Sanktionen. René John sagte hierzu:

"Es lässt sich durchaus feststellen, dass der Alltag von umweltaffinem Handeln geprägt ist. Energie und Wasser sparen, das sind maßgebliche Verbrauchsweisen, ebenfalls nahm der Konsum von Biolebensmitteln seit der Jahrtausendwende zu." (John 2013, S. 117f.)

Verhaltensweisen von Konsumenten bestimmen über die Säule "Umwelt" den Nachhaltigkeitsgedanken. Hält man am Konsumentenmuster fest, dann kann davon ausgegangen werden, dass es heute immer mehr Konsumenten gibt, die lebensstilabhängig ihre Entscheidungen treffen. So stehen sowohl der "Soziale Konsum" als auch der genügsame Konsum im Fokus des bewusst handelnden Konsumenten (siehe Abb. 1).

"Alltagsroutinen im Kaufverhalten und in der Nutzung von Produkten und Geräten – Diese vielfach unbewussten Routinen reduzieren die Komplexität der alltäglich zu treffenden Entscheidungen. Sie führen aber auch dazu, dass routinierte Verhaltensweisen wie die Nutzung des Pkws im Alltag oder Ernährungsvorlieben schwer zu beeinflussen und zu verändern sind. Insgesamt wird das private Konsumverhalten durch äußerst vielfältige und komplexe Einflussfaktoren geprägt und getrieben. Sie reichen von technologischen Innovationen, infrastrukturellen und materiellen Gegebenheiten, ökonomischen und rechtlichen Rahmenbedingungen bis hin zu Alltagsroutinen und Versorgungsstrukturen, Identitätskonzepten und Symbolisierungen sowie gesellschaftlichen und sozialen Entwicklungen." (Weller 2008, S. 44)

Die Nutzenbilanz der eigenen Entscheidungen ist durch das Dilemma zwischen Egoismus und Verantwortung geprägt. Wertetheorien beeinflussen das eigene Konsumverhalten und damit den Nachhaltigkeitsgedanken in seinen drei Dimensionen. Eine Bewertung von Nachhaltigkeit erfolgt somit in einem Referenzrahmen, der gesellschaftlich etablierte ökologische, soziale und ökonomische Kriterien und Ziele aufeinander bezieht.

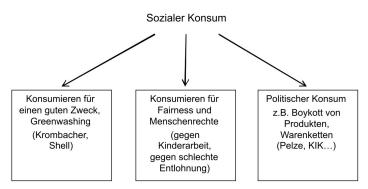


Abb. 1: Sozialer Konsum

Eigene Darstellung

So werden durch einen "genügsamen Konsum" alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit berücksichtigt (siehe Abb. 2).

# Genügsamer Konsum: maßvoll, nicht übertrieben, zwanglos, besonnen



#### Abb. 2: Genügsamer Konsum

- → Dilemma zwischen Egoismus und Verantwortung (Nutzenbilanz)
- → Wertetheorie beeinflusst das Konsumverhalten
- → Konsumniveau selbst definieren

Eigene Darstellung

Die Konsumentscheidung "Freiwilliger Verzicht" kann Verschiedenes bedeuten, z.B. Verzicht auf Fleisch, Verzicht auf teure Markenware, Verzicht auf einen Pkw oder Verzicht auf eine Kunststofftragetasche. Es ist eine Entscheidung für ökologische Aspekte – Schutz und Einsparung von Ressourcen. Sie trägt dazu bei, den eigenen Geldbeutel zu schonen und stärkt den sozialen Werteanspruch an die Person selbst und die Gesellschaft.

Ebensolche Aspekte werden beim "Kollaborativen Konsum" gesehen. Prominente Beispiele sind das Carsharing, Co-Housing oder Urban Gardening. Die gesamte Sharing-Bewegung spart Ressourcen in jeglicher Hinsicht. Geteilt wird Vieles zum Vorteil für jeden Einzelnen. Auch das Aufkommen neuer Akteurskonstellationen von Erzeugern und Konsumenten wie Verbrauchermärkte, die grüne Kiste oder Energiegenossenschaften stellen neue soziale Innovationen dar.

Der "Schuldenfrei Konsum" hat verschiedene Aspekte: Zum einen betrachtet dieser die monetäre Schuldenfreiheit und zum anderen die soziale Seite der Schuldenfreiheit.

Zum persönlichen Handlungsschema des Einzelnen im Umgang mit seinem Nachhaltigkeitsanspruch gehören u.a. das Nichtwissen, die geringe Bewertung der eigenen Möglichkeiten, die Abschiebung der Verantwortung auf Politik und Staat: "Dabei ist jedoch zu bedenken, dass Verhalten nicht uneingeschränkt bewusst gesteuert wird" (Fischer 2013, S. 80). Vielmehr wird ein bestimmtes Verhalten ausgeübt, wenn es subjektiv sinnvoll bewertet wird, reale Umsetzungsmöglichkeiten bestehen und darüber hinaus ein sozialer Handlungsdruck wahrgenommen wird (vgl. Fischer 2013; vgl. Abb. 3).

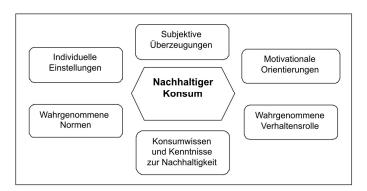


Abb. 3: Nachhaltiger Konsum Quelle: in Anlehnung an Fischer 2013

Welche Chance haben wir, ein solches persönliches Handlungsschema auszuprägen? Erinnern wir uns einmal ca. 25 Jahre zurück: Die westliche Welt hat mit ihren Einkaufstempeln geglänzt. Eine Plastiktüte hat schnell alles geschluckt, was eingekauft wurde. Keiner konnte durch die Tüte schauen. Ganz anders als wir es gewohnt waren. Nylonbeutel und Netz prägten unseren Einkaufsalltag. Durchsichtig – keine Frage, aber schädlich für die Umwelt? Bestimmt nicht.

Wie sieht heute unser Einkaufsverhalten aus? Der Supermarkt, der Biomarkt, selbst der Frischemarkt bietet biologisch erzeugte Produkte, die wir gerne kaufen. Der Abtransport des Einkaufs erfolgt heute im Wesentlichen durch die verschiedenen Arten von Kunststofftüten. Die Verschmutzung von Land und Weltmeer sind die ursächlichen Folgen bei unsachgemäßer Entsorgung. Sollen das die negativen Auswirkungen der technischen Innovation der Erfindung des Kunststoffes sein? Auch hier gilt wie bei allen Innovationsgedanken: Wie wird mit dem technischen Potenzial umgegangen? Wie wird sich die Welt durch technische Innovation verändern? Es handelt sich hierbei um eine philosophische Fragestellung, die es seit der Entstehung von Technik gibt. Verpackt werden dann zwei Gurken in einer Plastiktüte, fünf Tomaten in einer weiteren kleinen Tüte, die Kartoffeln in einer etwas stabileren. Wehren wir uns dagegen oder nehmen wir es als angenehme Routine hin?

# 2 Unterrichtsideen zur Bildung für eine nachhaltige Entwicklung

# 2.1 Bildung als Motor beim Nachhaltigkeitsgedanken

In einem Projekt, das wir innerhalb einer Masterarbeit in der Lehreinheit Wirtschaft-Arbeit-Technik der Universität Potsdam realisiert haben, ist die Plastiktüte zum Gegenstand von Unterricht geworden. Die Zielstellung bestand darin, Schülerinnen und Schüler für den Nachhaltigkeitsgedanken zu sensibilisieren und ihn aus verschiedenen Perspektiven zu betrachten.

Den historischen Einstieg in die Thematik bot die technische Entwicklung der Erfindung und Entwicklung des Kunststoffes. Egal wohin man blickt, ist man heutzutage überall von Kunststoff umgeben: Kleidung besteht teilweise aus Kunstfasern, Kabel sind mit Kunststoff isoliert, Klebstoffe und Leime beinhalten ihn ebenfalls, man könnte diese Liste nahezu endlos fortsetzen. Die heutige Welt ist nur noch schwer vorstellbar ohne dieses Material. Kunststoff ist zu einem innovativen Substitutionswerkstoff geworden.

Die organische Chemie blieb der Wissenschaft bis zum Jahr 1828 verschlossen. Erst als Friedrich Wöhler Harnstoff aus zwei anorganischen Stoffen synthetisierte, begann der Siegeszug der organischen Chemie. Dies nahm dem Aberglauben, dass es einer Lebenskraft "vis vitalis" bedarf, um organische Substanzen zu erschaffen, seine Kraft. Nun gab es eine rasante Entwicklung, wie die nachfolgende Zusammenstellung deutlich macht (vgl. Bockelmann/Knobloch 2015):

- 1828 Friedrich Wöhler Harnstoffsynthese
- 1839 Charles Goodyear entdeckt, dass sich Latex in stabil elastisches Gummi verwandeln lässt
- 1840 Robert Thompson erfand den Gummireifen für Fahrzeuge
- 1870 Wesley Hyatt lässt das Herstellungsverfahren für Zelluloid patentieren (Experimente mit Kampfer als Weichmacher)
- 1888 John Boyd Dunlop Erfinder des Luftreifens
- 1907 Leo Baekeland entwickelte den ersten rein synthetischen Kunststoff. "Bakelit"
- 1933 von Eric Fawcett und Reginald Gibson erste industrielle Synthese des Polyethylens
- 1939 großtechnische Produktion des Polyethylens

Der Siegeszug der Kunststoffe hatte begonnen. Um eine Entsorgung machte man sich keine oder nur wenige Gedanken. Erst mit der Massenproduktion entstand der gesellschaftliche Druck einer Wiederverwertbarkeit oder fachlichen Entsorgung von Kunststoffen.

# 2.2 Die Entsorgungsproblematik am Beispiel der Ozeanverschmutzung der Weltmeere

Oft sind kostspielige Entsorgungsaufwendungen oder auch nur unzureichende Sorglosigkeit die Ursache für die Verschmutzung der Weltmeere. Heute schwimmen laut Schätzungen des WWF Deutschland in jedem Quadratkilometer der Meere 46.000 Teile Plastikmüll. Unvorstellbar ist, dass die Müllteppiche vom Weltraum aus zu erkennen sind. Die Abfälle an der Meeresoberfläche bilden dabei nur die Spitze des Eisbergs. Rund 70 Prozent des Mülls sinken auf den Meeresgrund, 15 Prozent gelangen zurück an Land. Fälschlicherweise halten Schildkröten Plastiktüten für Quallen und Fische verwechseln die Kleinstteilchen des Plastiks mit Plankton. Aber auch Vögel verenden qualvoll durch diese Verwechslung. Oft verheddern sich die Flügel der Vögel in Plastikteilchen und sie sterben.

Durch Fische, die die Mikropartikel oder Plastikgiftstoffe fressen, gelangen diese letztendlich auch in die menschliche Nahrungskette. Circa drei Viertel des Meeresmülls bestehen aus Plastik. Nicht nur für die Meeressäuger und Vögel ist Plastik gefährlich, sondern auch für uns Menschen. Plastik ist ein wachsendes Problem, denn bis es sich völlig zersetzt hat, können 350 bis 400 Jahre vergehen. Dies ist ein langer Prozess, da es zunächst in immer kleinere und kleinere Partikel zerfällt (vgl. Probst o.J.).

## 2.3 Verpackungsmüll als Bildungsgedanke

Für die Schule stellt sich die Frage, wie diese Fakten in der Bildungsarbeit genutzt werden können und welche persönlichen Konsequenzen gezogen werden sollten, um Verpackungsmüll zu vermeiden und einen Beitrag zur Nachhaltigkeit zu leisten.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass nachhaltiger Konsum ein wichtiges und aktuelles Thema in der Verbraucherbildung ist. Fest verankert in REVIS (Reform der Ernährungs- und Verbraucherbildung in Schulen) werden die Bildungsziele zum nachhaltigen Konsum formuliert. Den Studien von Clemens Discherl und Stefanie Höll (vgl. Discherl/Höll 2011) sowie von Claus Tully und Wolfgang Krug (vgl. Tully/Krug 2011) ist zu entnehmen, dass Jugendliche ethischen Problemstellungen gegenüber durchaus aufgeschlossen sind. Es interessiert sie, ihre Rolle als Akteure in der Konsumgesellschaft zu reflektieren und die Auswirkungen ihres eigenen Konsumverhaltens zu reflektieren.

Am Beispiel des Themas "Vermeidung von Plastikmüll" zeigt sich die Schwierigkeit bei der Umsetzung deutlich. Die alltäglichen Konsummuster der Schülerinnen und Schüler bzw. ihrer Familien sind fest eingebettet in die jeweiligen Lebensstile mit deren Verhaltensmustern. Daraus ergibt sich eine breite Vielfalt in den Alltagserfahrungen, Einstellungen und Zugängen sowohl zum Konsum als auch zur Nachhaltigkeit. Um einen Ansatz für den unterrichtlichen Zugang zu bekommen, wurde als Einstieg eine Befragung in verschiedenen Supermärkten zu den Verpackungsgewohnheiten von Konsumenten durchgeführt. In der Auswertung der Ergebnisse können folgende Schlussfolgerungen herausgestellt werden:

These 1: Je älter der Konsument ist, desto eher werden Stoffbeutel zum Einkaufen mitgebracht.

Diese Hypothese kann nicht bestätigt werden. Bei den 41- bis 65-Jährigen bringen 45,99% einen Stoffbeutel zum Einkaufen mit, bei den über 66-Jährigen sind es nur 35,04% – sie bringen laut der Ergebnisse Plastiktüten mit.

These 2: Je jünger der Konsument ist, desto eher werden Tragetaschen gekauft.

Es hat sich gezeigt, dass die Hypothese nicht bestätigt werden kann. Die ältere Generation neigt eher als die jüngere Generation dazu, Tragetaschen zu kaufen.

These 3: Spontankäufe sind ausschlaggebend für den Kauf von Tüten.

Diese Hypothese kann bestätigt werden. Spontaneinkäufe verleiten die Konsumenten zum Kauf von Tüten. 49,3% der Befragten gaben einen Spontaneinkauf als Grund für den Kauf einer Tüte an.

These 4: Je älter die Menschen sind, desto höher ausgeprägt ist das Nachhaltigkeitsbewusstsein.

Auch diese Hypothese kann bestätigt werden. Zählt man die Werte von "ausgeprägt" der Altersklassen 41 bis 65 und über 66 Jahre zusammen, so kommen beide Altersklassen auf 91,3%.

These 5: Frauen haben ein höheres Nachhaltigkeitsbewusstsein als Männer. Bei Betrachtung der Daten ergeben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen Männern und Frauen beim Nachhaltigkeitsbewusstsein. 11,5% der Männer gaben an, ein sehr ausgeprägtes Nachhaltigkeitsbewusstsein zu haben, bei den Frauen waren es 18,7%.

Im weiteren Verlauf wurden die Schülerinnen und Schüler dazu angehalten, eine Recherche zu politischen Entscheidungsträgern und einem Vergleich zu anderen Ländern im Umgang mit der Plastiktüte zu erstellen.

# 2.4 Entscheidungen der Politik

Die EU Richtlinie 2015/720 bezieht sich konkret auf die Reduzierung leichter Kunststofftragetaschen (vgl. EGH 2015). Bis 2025 soll jeder Europäer im Schnitt nur noch 40 Beutel pro Jahr verbrauchen, lautet das Hauptziel der Richtlinie. Umsetzungsstrategien fehlen jedoch weitestgehend. Mit dem 1. April 2016 trat die Plastiktüte in die mediale Öffentlichkeit, da sich Deutschland zur Einführung eines Entgeltes entschlossen hat. Seit diesem Datum dürfen die Plastiktüten mit einem Entgelt versehen werden. Einige Geschäfte und Ketten sind dabei, diese Richtlinie dadurch umzusetzen, dass Tragetaschen mit einer Wandstärke, die größer als 15 Mikrometer ist, bezahlt werden müssen. Ein monetärer Zwang, der zur Einsparung beitragen kann. Zumindest ein Ansatz, der auch schulisch zu diskutieren ist.

#### 2.5 Wie machen es andere Länder?

Einem Beitrag der "Märkischen Allgemeinen Zeitung" kann man Folgendes entnehmen (vgl. Reimann 2016):

*Italien:* Reine Plastiktüten sind seit 2011 verboten. Für 15 Cent erhält man eine Tüte aus Papier oder aus biologisch abbaubaren Materialien.

Frankreich: Ab 1. Juli 2016 sind Einwegplastiktüten verboten. Erst 2017 verschwinden auch die Obst- und Gemüsetüten.

*Großbritannien:* Seit Oktober 2015 wird eine Gebühr von 5 Pence (ca. 6 bis 7 Cent) erhoben. Jedoch nur in großen Geschäften, nicht am Kiosk.

*Norwegen:* Die Norweger benutzen Plastiktüten bei fast jedem Einkauf, obwohl eine Gebühr von 10 Cent zu entrichten ist. Jedes Jahr werden eine Milliarde Tüten gebraucht.

*USA:* In den meisten Teilen des Landes sind die Tüten kostenlos. Es gibt fast nichts, was nicht in Tüten verpackt ist.

*Indien:* Schmucktüten zieren die Wände. Viele werden als Mülltüten wieder verwendet. Eine Gebühr wird nur in einzelnen Bundesstaaten erhoben.

China: Hier sind Plastiktüten seit 2008 kostenpflichtig. Wenn Geschäfte erwischt werden, dass Tüten kostenfrei abgegeben werden, drohen empfindliche Geldstrafen, die bis zu 10.000 Yuan betragen (umgerechnet bis zu 1.370 Euro). Dennoch leidet China weiter unter der Umweltverschmutzung durch Plastiktüten

Die von der Stiftung Naturschutz Berlin ins Leben gerufene Aktion "Berlin tüt was!", die u.a. von den Grünen und dem Schauspieler Hannes Jaennicke, der zugleich als Schirmherr der Aktion fungiert, unterstützt wird, ist ein erster Schritt in die richtige Richtung. In Berlin wechseln täglich ca. 710.000 Einwegplastiktüten ihre Besitzer. Sie kommen für durchschnittlich 25 Minuten zum Einsatz, was ungefähr 30.000 Tüten in der Stunde bedeutet. Da Plastiktüten aus der endlichen Ressource Erdöl hergestellt werden und Plastik ca. 400 Jahre braucht, um sich zu zersetzen, sind Alternativen gefragter denn je. Um den Berliner Tagesverbrauch an Plastiktüten zu stillen, bedarf es 43 Tonnen Rohöl. Die Aktion "Berlin tüt was!" ruft die Verbraucher auf, einen Beitrag für die Umwelt zu leisten und weitestgehend auf Plastiktüten zu verzichten, dazu verwendet sie den Slogan:

"Machen Sie mit! Setzen Sie ein Zeichen gegen die Plastiktütenflut! Nutzen Sie für Ihren Einkauf Mehrfach-Tragebeutel! Lassen Sie sich nicht länger eintüten!" (SfN o.J.)

Nach Beendigung der Recherchetätigkeit konnten die Schüler motiviert in die Stationsarbeit eintreten.

#### 2.6 Schülerinnen und Schüler bei der Stationsarbeit

Die erstellte Handreichung, entstanden im Rahmen einer Masterarbeit durch die Studentinnen Catharina Bockelmann und Marina Knobloch mit der Thematik "Zur Vermeidung des Plastikmülls und einer möglichen schulischen Umsetzung", bildete die Grundlage für den unterrichtlichen Stationsbetrieb (vgl. Bockelmann/Knobloch 2015).

In dieser Lehrerhandreichung sind verschiedene Stationsvorschläge entstanden, die Schüler dazu zu inspirieren, sich mit der Vermeidung von Plastiktüten auseinanderzusetzten. In der Diskussion wurde der Nachhaltigkeitsaspekt in unterschiedlichen Facetten betrachtet (siehe Abb. 4).



Abb. 4: Wohin mit dem Müll

Quelle: Bockelmann/Knobloch 2015, Titelbild

Die Schülerinnen und Schüler wurden durch vier Stationen begleitet, die, didaktisch aufbereitet, mit verschiedensten Aufgaben versehen und unterschiedlichen Problemstellungen untersetzt waren. Die Stationen nannten sich:

- 1. Die EU Station
- 2. Station Produktion und Entsorgung
- 3. Station Umwelt
- 4. Station Versuche

Ein ausgewähltes Beispiel aus der EU Station repräsentiert die grundsätzliche Vorgehensweise der Stationsarbeit.

Aufgabe 1: Irland hat sich für die Variante der Besteuerung entschieden und konnte somit den Verbrauch von 328 auf 18 Plastiktüten pro Bürger und Jahr verringern. Auch außerhalb von Europa werden Maßnahmen zur Vermeidung von Plastikmüll ergriffen. In Bangladesch sind Plastiktüten komplett verboten. – Welche Maßnahme findest du besser? Plastiktüten komplett zu verbieten oder eine Abgabensteuer zu erheben? Begründe deine Meinung in mindestens 5 Sätzen.

Besonders interessant erschien die Station 4, in der durch Reißfestigkeitsversuche nachgewiesen wurde, dass der Jutebeutel die meisten Lasten tragen kann und am häufigsten wiederverwendet werden konnte. Die finanziellen Mehraufwendungen waren also schnell ausgeglichen.

Im Ergebnis der Unterrichtseinheit waren die Schülerinnen und Schüler in der Lage, eine Bewertung ihres eigenen Umweltverhaltens einzuordnen, sie konnten bewerten, dass die Nutzung von Mehrwegmaterialien ökonomischer als die von Einwegmaterialien ist und dass mit ihrer vermehrten Nutzung das Leben der Menschen in anderen Ländern verbessert wird.

Nachhaltigkeit als Bildungsgedanke hat durch den Stationsbetrieb dazu beigetragen, Schüler für die Problematik zu sensibilisieren. Allerdings sind die Wirkmechanismen, aufgrund der in diesem Artikel beschriebenen Vielfältigkeit unterschiedlicher Ansätze nachhaltiger Bildung und Faktoren die für das Konsumentenverhalten verantwortlich sind, mit Vorsicht zu genießen. Unabhängig davon sind Unterrichtskonzepte, welche an unserer Lebenswelt ansetzen und zum Nachdenken anregen, ein wichtiger Bestandteil einer Bildung für nachhaltige Entwicklung.

Die Bildung und Erziehung in diesem Problemfeld wird zu einem Leitgedanken des Bildungsanliegens als Querschnittaufgabe von Unterricht. Der WAT-Unterricht übernimmt eine zentrale Stellung, um sich dieser Aufgabe anzunehmen. Wie problematisch und widersprüchlich die inhaltliche Gestaltung von Unterricht ist, hat dieser Beitrag gezeigt.

#### Literatur

Antoni-Komar, I. (2014): Postwachstumsökonomie und urbane Subsistenz – Alternativen für eine zukunftsfähige Gesellschaft? In: Haushalt in Bildung & Forschung, Jg. 3, H. 2, S. 3–14 Bauman. Z. (2009): Leben als Konsum. Hamburg

- Blickpunkt (2016): Blickpunkt Potsdam/Werder, Jg. 26, KW 11. URL: http://epaper.blickpunkt-brandenburg.de/data/4/5/11207/13491/1116 1 BP Potsdam.pdf [23.06.16]
- Bockelmann, C.; Knobloch, M. (2015): Die Plastiktüte ein "schwergewichtiges" Problem unserer Gesellschaft. Erstellung einer Lehrerhandreichung zur Reduzierung des Plastikmülls am Beispiel der Plastiktüte. Masterarbeit. Potsdam (Lehreinheit WAT der Universität Potsdam)
- Bormann, I. (2013): Bildung für nachhaltige Entwicklung als Praxis sozialer Innovationen. In: Rückert-John, J. (Hg.): Soziale Innovation und Nachhaltigkeit. Wiesbaden, S. 269–288
- Discherl, C.; Höll, St. (2011): Ethischer Konsum bei Jugendlichen Chance für eine Verbraucherwende? In: Landinfo. Informationen für die Landwirtschaftsverwaltung, Jg. 13, H. 6, S. 41–43
- EGH Europäischer Gerichtshof (Hg.) (2015): Richtlinie (EU) 2015/720 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2015 zur Änderung der Richtlinie 94/62/EG betreffend die Verringerung des Verbrauchs von leichten Kunststofftragetaschen. m URL: http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A32015L0720 [09.05.2016]
- Fischer, A. (2013): Kompetenzentwicklung im Kontext von Ethik und Konsum. In: Haushalt in Bildung & Forschung, Jg. 2, H. 02, S. 80–81
- Hartmann, K. (2013): Politik statt Einkaufswagen. In: Haushalt in Bildung & Forschung, Jg. 2, H. 2, S. 14–19
- Hauff, V. (Hg.) (1987): Unsere gemeinsame Zukunft. Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung. Greven
- Häußler, A.; Küster, Chr. (2013): Vorsicht Falle! Oder: Gibt es den ethisch korrekten Weg zur Vermittlung von Konsumkompetenz? In: Haushalt in Bildung & Forschung, Jg. 2, H. 2, S. 86–97
- Hunecke, M. (2016): Mal eben die Welt retten. In: Report Psychologie, Jg. 41, H. 3, S. 98-101
- John, R. (2013): Alltägliche Nachhaltigkeit. Zur Innovation von Praktiken. In: Rückert-John, J. (Hg.): Soziale Innovation und Nachhaltigkeit. Wiesbaden, S. 103–132
- KMK Kultusministerkonferenz (2012): Zur Situation und zu Perspektiven der Bildung für nachhaltige Entwicklung. Bericht der Kultusministerkonferenz. – URL: http://www.kmk. org/fileadmin/Dateien/veroeffentlichungen\_beschluesse/2012/2012\_12\_13-Bericht-BNE-2012.pdf [15.04.2016
- KMK Kultusministerkonferenz; DUK Deutsche UNESCO-Kommission (2007): Bildung für nachhaltige Entwicklung in der Schule. Empfehlung der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland (KMK) und der Deutschen UNESCO-Kommission (DUK). URL: http://www.kmk.org/fileadmin/Dateien/veroeffent lichungen\_beschluesse/2007/2007\_06\_15\_Bildung\_f\_nachh\_Entwicklung.pdf [15.04.2016]
- Künzli David, Chr.; Kaufmann-Hayoz, R. (2008): Bildung für eine nachhaltige Entwicklung Konzeptionelle Grundlagen, didaktische Ausgestaltung und Umsetzung. In: Umweltpsychologie, Jg. 12, H. 2, S. 9–28
- Lemke, H. (2013): Konsumethik zwischen politischer Ökonomie und Commonismus. In: Haushalt in Bildung & Forschung, Jg. 2, H. 2, S. 20–32
- Paech, N. (2012): Vom grünen Wachstumsmythos zur Postwachstumsökonomie. In: Welzer, H.; Wiegandt, K. (Hg.): Perspektiven einer nachhaltigen Entwicklung. Frankfurt am Main, S. 131–151

- Probst, St. (o.J.): Das kann kein Meer mehr schlucken. Unsere Ozeane versinken im Plastikmüll. URL: http://www.wwf.de/themen-projekte/meere-kuesten/unsere-ozeane-versinken-im-plas tikmuell/ [09.06.201616
- Reidel, J. (2013): Zur Ethik des Konsums. Konsumentenverantwortung als Lösung globaler Probleme? In: Haushalt in Bildung & Forschung, Jg. 2, H. 2, S. 86–97
- Reimann, E. (2016): Die Plastiktüte ist weltweit auf dem Rückzug. In: Märkische Allgemeine Zeitung, 30. März, S. 9
- Røpke, I. (2010): Konsum. Der Kern des Wachstumsmotors. In: Seidl, I.; Zahrnt, A. (Hg.): Postwachstumsgesellschaft. Konzepte für die Zukunft. Marburg, S. 103–116
- Schlegel-Matthies, K. (2013): Ethik, Konsumentenverantwortung und Verbraucherbildung im Spannungsfeld. In: Haushalt in Bildung & Forschung, Jg. 2, H. 2, S. 61–70
- SfN Stiftung für Naturschutz Berlin (o.J.): Berlin tüt was. Die Aktion. URL: http://berlin tuetwas.de/aktion/ [09.05.16]
- Tully, C.; Krug, W. (2011): Konsum im Jugendalter. Umweltfaktoren, Nachhaltigkeit, Kommerzialisierung. Schwalbach
- Weller, I. (2008): Konsum im Wandel in Richtung Nachhaltigkeit? Forschungsergebnisse und Perspektiven In: Lange, H. (Hg.): Nachhaltigkeit als radikaler Wandel. Wiesbaden, S. 43– 69

# Nachhaltigkeit als Basiskonzept in der Curriculum-Entwicklung?

Mit diesem Beitrag soll auf einer vorwiegend fachwissenschaftlich angelegten Konferenz die pädagogische Dimension des Leitbildes der Nachhaltigkeit weiter vertieft werden. Benjamin Apelojg und Ulf Holzendorf haben in ihrem Beitrag bereits auf Positionen der Kultusministerkonferenz zu einer Bildung für Nachhaltige Entwicklung (BNE) und ihre orientierende Funktion im Prozess von Bildung und Erziehung von Kindern und Jugendlichen verwiesen. Darauf soll hier nicht mehr eingegangen werden, es geht vielmehr um spezielle Probleme zur Verankerung dieses Leitbildes in staatlichen Bildungsplänen der Bundesländer.

Dabei knüpfen wir an die Veranstaltung des Leibniz-Plenums am 29. Januar 2015 an, auf der Fragen der Bildung und Bildungspolitik thematisiert wurden. Ausgehend von PISA2000, der Internationalen Schulleistungsstudie der OECD, konnten Probleme und Reformansätze in deutschen und internationalen Bildungssystemen aufgezeigt werden (vgl. Jakupec/Meier 2015).

Aktuelle Bildungsfragen bestimmten auch die Jahrestagung 2015 der Leibniz-Sozietät in Potsdam. Hier ging es um das erste länderverbindende einheitliche Rahmenlehrplanwerk für Berlin/Brandenburg, dessen Entwurfsfassung einer eingehenden Analyse und Kritik unterzogen wurde (vgl. Meier/Banse 2015). Anhand dieses Rahmenlehrplans soll nachstehend ausgehend von generellen Tendenzen der Curriculum-Entwicklung "Nachhaltigkeit" als Basiskonzept beleuchtet und sollen Folgerungen für die weitere Arbeit aufgezeigt werden.

# 1 Syllabus – Lehrplan – Curriculum

Institutionell gestaltete Lehr-Lernprozesse erhielten von je her durch Bildungspläne ihre grundsätzliche Orientierung. Die Anlage dieser Pläne folgte im Grunde auch immer der vorherrschenden Auffassung von den Prozessen des Lehrens und Lernens und vom Bildungsverständnis (vgl. Meier 2012).

<sup>1</sup> Vgl. den Beitrag von Benjamin Apelojg und Ulf Holzendorf in diesem Band.

Bei einem eher an materialer Bildung orientierten Bildungsverständnis und einer dominant vorherrschenden behavioristischen Lerntheorie waren Bildungspläne als Syllabi angelegt, d.h. es waren reine Stoffpläne, die Lehrinhalte nach Stufen oder Klassen zeitlich geordnet zusammenfassten. In der weiteren bildungspolitischen Entwicklung wurden diese Syllabi durch Lehrpläne abgelöst. In diesen wurden nicht nur Unterrichtsinhalte aufgezählt, sondern vor allem Lernziele ausgewiesen und Festlegungen für die Lernerfolgskontrolle getroffen. Grundsätzlich wurden Lernprozesse stärker in den Fokus der Überlegungen genommen. Allerdings gehen die Vorstellungen darüber, welche Funktion Lehrpläne im Prozess der Bildungsprozessgestaltung einnehmen, nach wie vor weit auseinander.

Besonders deutlich wird dies nach der politischen Wende im Land Brandenburg. Mit Blick auf die hohe Verbindlichkeit der Lehrpläne in der DDR wurden zunächst vorläufige Rahmenpläne vom zuständigen Bildungsministerium erlassen. Der Plan hatte nur "orientierenden" Charakter. Der Begriff "Erziehung" wurde strikt vermieden. Die Offenheit der Pläne wirkte sich offensichtlich nicht gerade positiv auf den Prozess der Persönlichkeitsentwicklung der Schülerinnen und Schüler aus. In der Folge wurden in der nächsten Generation dann schon "Rahmenlehrpläne" vom Bildungsministerium verabschiedet.

Auf der Basis der Rahmenpläne oder Rahmenlehrpläne sollten die Lehrkräfte "schulinterne Curricula" als Instrumente der Qualitätsentwicklung und -sicherung entwickeln. Womit ein weiterer unscharfer Begriff in die Diskussion gebracht wird. Der Begriff Curriculum wurde allerdings schon Ende der 1960er Jahre in der BRD aus den USA reimportiert. Wir sprechen von einem Re-Import, weil der Begriff Curriculum im Grunde auch im deutschsprachigen Raum eine sehr lange Geschichte hat. Bereits in der Antike wurde der Plan einer systematischen Unterweisung mit "Curriculum" bezeichnet. Während der Begriff "Curriculum" im englischen Sprachraum durchgehend erhalten blieb, sprach man in Deutschland in Ost und West zumindest bis Ende der 60er Jahre eher einheitlich von einem Lehrplan.

In Verbindung mit einer umfangreichen Revision traditioneller Lehrpläne im Rahmen von Reformbewegungen in der BRD – ausgelöst durch Saul B. Robinsohn – wurde der Begriff dann wieder belebt. Nach Robinsohn sollte ein Curriculum eine möglichst präzise Regelung nicht nur von Lernzielen und Lerninhalten, sondern auch von Lernprozessen und der Lern-

<sup>1</sup> Der Begriff "Syllabus" wird im englischsprachigen Raum auch heute noch verwendet. Allerdings wird damit der Lehrplan eines einzelnen Kurses bezeichnet, während Curriculum auf das Lehr-Lern-Angebot eines Schulsystems oder auch nur eines Faches bezogen wird.

organisation umfassen (vgl. Robinsohn 1967). Dieser Reimport brachte aber weitgehende konzeptionelle Änderungen mit sich: Curriculum wurde vorerst als eine bildungspolitische Aussage und weiterhin dann als ein Indikator der Realisierung der erwünschten Bildungspolitik angesehen. In der Praxis aber wurde der Begriff "Curriculum" noch weitgehender, über die bildungspolitischen Ziele hinweg, in verschiedensten Formen durch Programmaktionen der Bildungssysteme angewandt. "Curriculum" wurde somit ein immer unschärferer Begriff. Heute werden die Begriffe Lehrplan und Curriculum auch häufig synonym verwendet.

## 2 Wissenschafts- versus Situationsorientierung

Auch bezüglich der Konzepte zur Curriculum-Entwicklung sind mindestens zwei grundlegende Herangehensweisen zu unterscheiden: ein eher disziplinorientierter Ansatz einerseits und ein situativer Ansatz andererseits. Der disziplinorientierte Ansatz hat ein "wissenschaftlich fundiertes" Curriculum zum Ziel. Dazu soll das Schulfach entsprechend der Systematik der Bezugswissenschaft(en) strukturiert werden. Die Inhaltsauswahl folgt einer dominant fachwissenschaftlichen Orientierung. Ein derartiger Ansatz war in der DDR dominant und wurde in der früheren BRD vor allem für die gymnasiale Bildung angewendet. Der situative Ansatz dagegen geht von der pädagogischen Kategorie "Betroffenheit der Lernenden" aus und fordert ein an Lebenssituationen anknüpfendes, problemorientiertes Vorgehen, unabhängig von fachwissenschaftlichen Grenzen.

Der Deutsche Bildungsrat in der früheren BRD begründete 1970 den Vorrang des Prinzips der Wissenschaftsorientierung für die Lehrpläne aller Schularten und Schulstufen, für die Unterrichtsorganisation und die Methoden des Lehrens und Lernens wie folgt:

"Die Bedingungen des Lebens in der modernen Gesellschaft erfordern, dass die Lehr- und Lernprozesse wissenschaftsorientiert sind. Das bedeutet nicht, dass der Unterricht auf wissenschaftliche Tätigkeit oder gar auf Forschung abzielen sollte; es bedeutet auch nicht, dass die Schule unmittelbar die Wissenschaften vermitteln sollte [...] Wissenschaftsorientierung der Bildung bedeutet, dass die Bildungsgegenstände, gleich ob sie dem Bereich der Natur, der Technik, der Sprache, der Politik, der Religion, der Kunst oder der Wirtschaft angehören, in ihrer Bedingtheit und Bestimmtheit durch die Wissenschaften erkannt und entsprechend vermittelt werden. Der Lernende soll in abgestuften Graden in die Lage versetzt werden, sich eben diese Wissenschaftsbestimmtheit bewusst zu machen und sie kritisch in den eigenen Lebensvollzug aufzunehmen. – Die Wis-

senschaftsorientiertheit von Lerngegenstand und Lernmethode gilt für den Unterricht auf jeder Altersstufe." (Zit. nach Klafki 1985, S. 163)

Vielfach wurde (und wird) Wissenschaftsorientierung als "Abbildung der Bezugsdisziplin in der Schule" missverstanden. Ein solches Verständnis griff aus verschiedenen Gründen allerdings zu kurz, denn

- fachwissenschaftliche Theorien und Modelle sind somit häufig zu abstrakt für die Lernenden:
- fachwissenschaftliche Systematik berücksichtigt eben nicht die Komplexität von realen Lebenssituationen;
- Unterricht muss stets auch den Lernenden in seiner konkreten Lebenssituation in den Blick nehmen und Bezüge zu seiner Lebenswelt aufzeigen, um Interesse und Motivation zu wecken und "Lernen fürs Leben" zu ermöglichen.

Vor allem Robinsohn akzentuierte die Idee der Lebensvorbereitung der Jugendlichen durch die Schule. Die Relevanz von Bildungsgegenständen kann sich nach seiner Auffassung auch aus "Analysen von spezifischen gesellschaftlichen, auch beruflichen Verwendungssituationen und Bedürfnissen" ergeben (Robinsohn 1967, S. 48). Der Autor ging davon aus,

"dass in der Erziehung Ausstattung zur Bewältigung von Lebenssituationen geleistet wird; dass diese Ausstattung geschieht, indem gewisse Qualifikationen und eine gewisse >Disponibilität< durch die Aneignung von Kenntnissen, Einsichten, Haltungen und Fertigkeiten erworben werden; und dass eben die Curricula – und im engeren Sinne – ausgewählte Bildungsinhalte zur Vermittlung derartiger Qualifikationen bestimmt sind." (Robinsohn 1967, S. 45)

Die Curriculumforschung hat daher nach seiner Auffassung die Aufgabe, zukünftige Situationen und in ihnen geforderte Funktionen, die zu ihrer Bewältigung notwendigen Qualifikationen und die Bildungsinhalte und Gegenstände, durch welche diese Qualifikationen bewirkt werden soll, zu identifizieren.

Für die Auswahl von Bildungsinhalten schlägt Robinsohn folgende drei Kriterien vor:

- (1) die "Bedeutung eines Gegenstandes im Gefüge der Wissenschaft",
- (2) die "Leistung eines Gegenstandes für Weltverstehen, d.h. für die Orientierung innerhalb einer Kultur und für die Interpretation ihrer Phänomene" und
- (3) "die Funktion eines Gegenstandes in spezifischen Verwendungssituationen des privaten und öffentlichen Lebens" (Robinsohn1967, S. 47).

Curriculum-Entwickler, die vom situativen Ansatz ausgehen, begründen dies mit dem Vorrang des Prinzips der Orientierung an den Lernenden. Sie gehen von aktuellen und zukünftigen Lebenssituationen der Lernenden aus und bestimmen die Gegenstände und Inhalte des Unterrichts auf der Basis von Kriterien, wie subjektive Betroffenheit, Problemgehalt, Gegenwartsbedeutung, Zugänglichkeit. Dabei nutzen sie das Prinzip der Exemplarität, um der Vielfalt und dem raschen Wandel von Lebenssituationen zu entsprechen. Mit dem exemplarischen Vorgehen verbinden sie dann auch die Erwartung, dass die Lernenden Transferfähigkeiten entwickeln und so in der Lage sind, ihr Wissen und Können auf ähnliche Sachverhalte anzuwenden.

Kritisiert werden solche Konzepte mit folgenden Argumenten:

- Das Ausgehen von der Lebenswelt führt für die Lernenden zu einer unüberschaubaren Komplexität. Der Ansatz steht in der Gefahr des Subjektivismus und der Simplifizierung komplexer Zusammenhänge.
- Die Analyse von Lebenssituationen ist ohne Rückgriff auf Fachwissenschaften nicht möglich: Die Fachwissenschaften liefern Analysemethoden und Erklärungsmuster.
- Die Prognose zukünftiger Lebenssituationen und ihrer Anforderungen an die Lernenden ist problematisch und ohne Rückgriff auf die Forschungen der Fachwissenschaften noch spekulativer.

Wenngleich beide Ansätze immer wieder gegenübergestellt werden, haben die Arbeiten des bildungstheoretischen Didaktikers Wolfgang Klafki eine nachvollziehbare Grundposition herausgestellt: Es geht bei beiden Ansätzen nicht um entweder/oder, sondern um Verbindung von Wissenschafts- und Schülerorientierung!

"Die didaktisch zentrale Frage lautet dann für den Unterricht: Inwiefern sind wissenschaftliche Erkenntnisse notwendig, um diese Lebenswelt durchschaubar, verstehbar und den sich entwickelnden Menschen in ihr urteilsfähig, kritikfähig, handlungsfähig werden zu lassen? [...] Lehrer müssen sich [...] als Vertreter einer eigenständigen, nämlich didaktisch akzentuierten Aufgabe verstehen: Sie sollen nicht Einzelwissenschaften vereinfacht in die Schule übersetzen, sondern Wissenschaft unter didaktischen Fragestellungen nach ihrem Leistungspotential für Lebensprobleme und nach ihren Grenzen befragen." (Klafki 1985, S. 168)

Die nachstehende Tabelle 1 soll die neue Qualität von Curricula im Vergleich von Lehrplänen kennzeichnen.

Tab. 1: Lehrplan versus Curriculum

Lehrplan		Curriculum	
•	festgeschriebenes Ergebnis einer Phase im Prozess der Planung von Lehr- bzw. Lernvorgängen	•	gerichtet auf gesamten Planungsprozess von der Legitimation bis zur Evaluation
•	Funktion: Vereinheitlichung von Bildung in seinem jeweiligen Gültigkeitsbereich	•	bezogen auf sämtliche Dimensionen von Lernprozes- sen, auf Lernziele, Lerninhalte, Lernverfahren, Lern- mittel und institutionelle Lernorganisation
•	Aussagen über verbindliche Lernziele und -inhalte Ausgangspunkt aller systematischen Unterrichts- planung	•	legt den Prozess der Legitimierung und Bestimmung von Zielsetzungen von Lernvorgängen offen
•	kompromissartiger Konsens gesellschaftlicher Interessengruppen bei Vermittlerrolle des Staates	•	bezeichnet einen permanenten Prozess mit dem Zwang zu ständiger Revision

#### Eigene Darstellung

Wir fassen ein Curriculum als ein System für die Gestaltung von Lehr-Lernprozessen auf. Dieses System beinhaltet

- eine klare Beschreibung des Outputs von Aneignungsprozessen in Form von Kompetenzen und Standards;
- Aneignungsgegenstände, die für das Erreichen der Kompetenzen relevant sind;
- Methoden in Form von Mitteln und Wegen zu Zielerreichung;
- Situationen zur Gruppierung von Inhalten und Methoden;
- Strategien, wie auch Hinweise auf die Planung von Situationen;
- Aussagen zur Evaluation, zur Diagnose der Ausgangslage sowie Messung des Lehr- und Lernerfolgs mit objektivierten Verfahren (vgl. Meier/ Jakupec 2010).

# 3 Aktuelle Tendenzen der Curriculum-Entwicklung

In der Curriculum-Entwicklung haben sich in den vergangenen Jahren vor allem im europäischen, aber auch asiatischen Raum deutliche Veränderungen ergeben (vgl. Meier 2012; Meier/Jakupec 2010).

Übereinstimmend wird in entwickelten Ländern und demokratisch verfassten Gesellschaften davon ausgegangen, dass Curricula dazu dienen, Stabilität und Kontinuität von Aneignungsprozessen zu sichern, Lehr-Lernprozesse zu steuern und gleichzeitig auch Freiräume zu schaffen. Darüber hinaus sollen sie hinreichende Systematik und Ordnung gewährleisten und dabei aber auch Möglichkeiten des fächerübergreifenden Lernens bieten. Weiterhin geht es darum, die Evaluation zu erleichtern, um Erfolge bzw. Misserfolge zu ermitteln und die Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Die Wege zur Verwirklichung

dieser Ziele sind überaus vielfältig. Generalisierend lassen sich die folgenden stabilen Tendenzen herausstellen:

1. Trend-Kompetenzorientierung: Curricula gehen zunehmend stärker vom Kompetenzansatz aus, um so die allseitige Persönlichkeitsentwicklung zu akzentuieren. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass der Kompetenzbegriff überaus vielfältig gebraucht wird. Generalisierend kann jedoch davon ausgegangen werden, dass Kompetenzen als allgemeine Dispositionen von Menschen zur Bewältigung bestimmter lebensweltlicher Anforderungen verstanden werden können. Kompetenz ist "Bewältigungskönnen", sind die Fähigkeiten und die Bereitschaft eines Menschen zum eigenverantwortlichen Handeln, um sein berufliches, persönliches und auch gesellschaftliches Leben verantwortlich zu führen und seine Umwelt mitzugestalten. Hohe Akzeptanz findet vor allem auch in der deutschen bildungspolitischen Diskussion die Definition von Franz Weinert, der Kompetenzen charakterisiert als

"die bei Individuen verfügbaren oder durch sie erlernten kognitiven Fähigkeiten und Fertigkeiten, um bestimmte Probleme zu lösen, sowie die damit verbundenen motivationalen, volitionalen und sozialen Bereitschaften und Fähigkeiten, um die Problemlösungen in variablen Situationen erfolgreich und verantwortungsvoll nutzen zu können." (Weinert 2001, S. 27f.)

Die Differenzierung von verschiedenen Kompetenzbereichen ist international überaus vielfältig, wobei auch noch sehr differenzierte Kompetenzmodelle zu Grunde gelegt werden (vgl. Theuerkauf et al. 2009).

2. Trend-klares Bildungsverständnis: Grundlagen für die Erarbeitung von Kompetenzen und Bildungsstandards müssen ein klares Bildungsverständnis und Menschenbild sein. Bildung ist ein sprachlich, kulturell und historisch bedingter Begriff mit einer sehr komplexen Bedeutung. Eine präzise, oder besser noch einheitliche Definition des Bildungsbegriffs zu finden, erweist sich daher als äußerst schwierig. Je nach Ausrichtung und Interessenlage variieren die Ansichten darüber, was unter "Bildung" verstanden werden sollte, erheblich (vgl. Meier/Van Cuong 2014). Das Wort Bildung selbst ist ein typisch deutsches Wort, es steht in spezifischer Beziehung zu "Erziehung" und Sozialisation. Diese in der deutschen Sprache unterschiedlich belegten Begriffe sind im Englischen wie auch im Französischen als "education" zusammengefasst. Bildung darf nicht als enzyklopädisches Wissen aufgefasst werden. Vielmehr gefragt sind die Synthese und die Integration des Wissens. Es kommt auf das Verstehen von Bedeutungs- und Sinnzusammenhängen an. Bildung schließt Wertungen für die Lebens- und Handlungsorientierung ein.

3. Trend-weiter Lernbegriff: In enger Beziehung zum Kompetenzansatz steht der Übergang zu einem weiten Lernbegriff in der Curriculum-Entwicklung. Bereits in den neunzehnhundertsiebziger Jahren war der Übergang zu einem weiten Stoffbegriff zu verzeichnen. Sachwissen wurde mehr und mehr durch Methoden- und Verfahrenswissen ergänzt. Hoch entwickelte Gesellschaften erfordern mehr. Die Informations- oder Wissensgesellschaft bewältigen, verlangt heute nach Teamfähigkeit und einer solide entwickelten Ich-Bildung. Deshalb umfasst der weite Lernbegriff folgende Elemente:

- inhaltlich-fachliches Lernen;
- methodisch-strategisches Lernen;
- sozial-kommunikatives Lernen:
- selbsterfahrendes- und selbstbeurteilendes Lernen.

4. Trend von Inputs zu Outputs: In den letzten fünfzehn Jahren hat sich in vielen Ländern dieser Welt ein paradigmatischer Wechsel in der Steuerung im Bildungssystem vollzogen. Steuerung meint hier inhaltliche und/oder strukturelle Vorgaben im Vorfeld didaktisch-organisatorischer Fragestellungen, um Bildung zu lenken. Legt man Unterricht in einem ökonomischen Verständnis als einen schulischen Produktions- bzw. Wertschöpfungsprozess aus, bestehend aus einer Input-, Prozess- und Output-Phase, so kann man feststellen, dass in vielen Ländern – so auch in Deutschland – lange Zeit darauf vertraut wurde, dass sich die Qualität schulischer Lernprozesse quasi automatisch durch eine Inputsteuerung (in Form von Lehrplänen, Rahmenund Prüfungsrichtlinien) regulieren und damit zum angestrebten Output (Leistungen der Schulen, Lernergebnisse der Schüler) führen würde. Eine explizite, national oder gar international vergleichbare Überprüfung des Lern-/Bildungserfolgs fand nicht statt. Erst im Zuge der forcierten deutschen Beteiligung an internationalen Schulleistungstests und der damit einhergehenden Implementierung "output-orientierter Standards" wurde ein Paradigmenwechsel in der Systemsteuerung im Sinne einer Verschiebung von einer Input- zu einer Output-Steuerung initiiert. Die traditionell eher offen gehaltenen Lehrpläne unterbreiteten zwar auf Stoffeinheiten und Jahrgänge bezogene detaillierte Inhalts- bzw. Themenangebote, enthielten aber relativ wenig Aussagen über die zentralen Kompetenzen und Aufgaben der Fächer und vor allem zu wenig über die Leistungen der Schule, nämlich über die Qualität der erwarteten Ergebnisse. Im Unterschied dazu setzen output-orientierte Instrumente auf das qualitative Beschreiben von wesentlichen Leistungen der Schule, gewissermaßen auf die Resultate von Bildungsprozessen, d.h. auf den erwarteten konkreten Lernerfolg. Der Staat setzt die grundlegenden Ziele in Form von Anforderungen mit der Option, deren Einhaltung und Umsetzung zu garantieren und dies auch zu überprüfen. Generell gehen die Überlegungen dahin, Standards für die anzustrebenden Resultate von Aneignungsprozessen eindeutiger zu definieren. Standards konkretisieren somit die festgelegten fachspezifischen und fächerübergreifenden Kompetenzen (siehe Tab. 2).

Statt durch detaillierte Regelungen und Richtlinien wird die Qualität des Bildungssystems vor allem durch die Definition von Zielen und einer Überprüfung des Zielerreichungsgrades gesichert. Der Formulierung verbindlicher Standards sowie deren Evaluation wird in output-orientierten Systemen, die sich bei internationalen Schulleistungsstudien als erfolgreicher erwiesen, eine zentrale Steuerungsfunktion beigemessen.

Tab. 2: Input- und Output-Orientierung im Vergleich

Input-Orientierung		Output-Orientierung
Regulierung durch administrativ-planerische Vorgaben (detaillierte Regelungen bzgl. Ressourcen, Rahmenbedingungen)	$\leftrightarrow$	Regulierung durch Formulierung und Evaluation verbind- licher Standards
Curriculare und organisationale Orientierung an Inhalten: Was müssen die Teilnehmer eines Bildungsganges lernen?	$\leftrightarrow$	Curriculare und organisationale Orientierung an Kompetenzen/Lernergebnissen fachlicher und überfachlicher Art: Was müssen die Absolventen eines Bildungsganges können?
Orientierung am Lehrprozess (Lehrende)	$\leftrightarrow$	Orientierung am Lernprozess (Lernende)

Eigene Darstellung

- 5. Trend-Standardisierung: Bildungsstandards benennen Ziele für die pädagogische Arbeit, ausgedrückt als erwünschte Lernergebnisse der Schülerinnen und Schüler. Damit konkretisieren Standards den Bildungsauftrag, den allgemeinbildende bzw. berufsbildende Schulen zu erfüllen haben. Bildungsstandards umfassen in der Regel drei Kernelemente:
- Bildungsziele,
- Kompetenzmodelle und
- Aufgabenstellungen/Testverfahren.

Diese Elemente wirken wie folgt zusammen: Bildungsstandards im allgemeinbildenden Bereich folgen allgemeinen Bildungszielen, die, in Form von zu vermittelnden Fähigkeiten, Fertigkeiten und Wissensinhalten sowie zu fördernden Interessen, Einstellungen und Werthaltungen, den gesellschaftlichen Anspruch von Schule widerspiegeln. Der Vorbereitung auf praktische

Lebensanforderungen in Beruf, Alltag und Gesellschaft kommt dabei eine ebenso große Bedeutung zu, wie der individuellen Persönlichkeitsentwicklung. Im Hinblick auf ihre pädagogische Umsetzung müssen diese generellen Zielvorstellungen konkretisiert werden. Im Gegensatz zu Lehrplänen und Rahmenrichtlinien, die zur Operationalisierung der übergeordneten Ziele auf Listen von Lerninhalten und Lehrstoffen zurückgreifen, rekurrieren Bildungsstandards auf sogenannte Kompetenzanforderungen, die festlegen, über welche Kompetenzen – bezogen auf einen bestimmten Gegenstandsbereich (eine Domäne, ein Fach oder einen Lernbereich) – ein Schüler bis zu einer bestimmten Jahrgangsstufe verfügen soll (siehe Abb. 1).

Diese Anforderungen werden in Kompetenzmodellen systematisch strukturiert. Dabei werden innerhalb einer Domäne Kompetenzdimensionen unterschieden, auf denen wiederum unterschiedlich anspruchsvolle Niveaustufen differenziert werden. Um die tatsächlichen Lernergebnisse und damit das Erreichen der Standards empirisch überprüfen zu können, werden auf einer dritten Ebene, ausgehend von den Kompetenzbeschreibungen, entsprechende Aufgabenstellungen bzw. Testverfahren entwickelt, deren Ergebnisse rückgekoppelt und zur Überprüfung der Qualität des Gesamtsystems genutzt werden.

6 Trend-Kerncurricula: In enger Beziehung zur Bestimmung von Mindeststandards für institutionalisierte Bildungsprozesse steht die Entwicklung von Kerncurricula. Diese Curricula sollen zur Konsolidierung fachbezogener Kernfachbereiche führen. Diese Kernfachbereiche beinhalten klar definierte Wissensstrukturen, kognitive Strategien, übertragbare Fertigkeiten (Schlüsselqualifikationen), Problemlösungsstrategien und klare Bezüge zur Anwendung erworbenen Wissens und Könnens. Kerncurricula stellen schließlich einen Weg dar, um die Balance zwischen offenen und geschlossenen Curricula zu erreichen. Derartige Curricula können Leistungsstandards und Methoden ihrer Bewertung verbindlich fixieren und so Notwendiges regeln. Andererseits schaffen sie Freiräume für regionale, institutionelle, personale Bedingungen.

Die aktuellen Tendenzen zusammenfassend kann konstatiert werden: Wandel ist bedeutender Teil der Curriculum Dynamik. Dieser muss untersucht und aktualisiert werden, um konkrete Lehr- und Lernziele zu erreichen. Um Änderungen gerecht zu werden, ist es notwendig, die neuen Probleme im Sinne der zeitgenössischen und pro-aktiven Konzeptionen der Problemlösungen durch lebenslanges Lernen, zukunftsweisendes Wissen und Aktualisierung des Begreifens der sozialen, politischen, ökonomischen, kulturellen und

persönlichen Welt zu verwirklichen. Zunehmend wird Curriculum-Entwicklung und das Curriculum selbst als ein Problemlösungsverfahren unter Bezugnahme auf Ressourcen und Bedürfnissen angesehen. Dadurch sind die kontemporären Curriculum Tendenzen eine Reflektion und ein Produkt der Gesellschaft

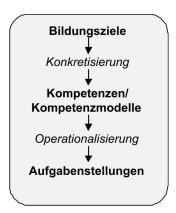


Abb. 1: Prozess der Curriculum-Entwicklung

Eigene Darstellung

Eine klar zu bestimmende Tendenz ist der Übergang von der Inputsteuerung zur Output-Orientierung. In diesem Kontext steht vor allem auch die Diskussion um Kompetenzen. Darüber hinaus zeigen die ganz aktuellen Entwicklungen im Bestreben um eine Konzentration auf das Wesentliche die Bestimmung von *Basiskonzepten als eine weitere Tendenz in der Curriculum-Entwicklung*, die mit der Erarbeitung eines gemeinsamen Rahmenlehrplanes für Berlin/Brandenburg erstmals zu Anwendung kommt. Als Basiskonzept versteht man in der Curriculum-Entwicklung die strukturierte Vernetzung aufeinander bezogener Begriffe, Theorien und erklärender Modellvorstellungen, die sich aus der Systematik eines Faches zur Beschreibung elementarer Prozesse und Phänomene historisch als relevant herausgebildet haben.

Dieser Ansatz ist nicht unbedingt neu und in englischsprachigen Ländern seit mehreren Jahren aktuell. Aber auch im Rahmen der Lehrplanentwicklung in der DDR wurden im Rahmen von Lehrplanreformen Anfang der achtziger Jahre mit den sogenannten Leitlinien ähnliche Absichten verfolgt. Leitlinien waren einerseits strukturierende und orientierende Elemente für die Stoffanordnung (Inhaltsleitlinien) und Orientierungen für die didak-

tisch-methodische Gestaltung des Unterrichts (Prozesslinien) (vgl. Meier 1985). Diese Leitlinien wurden allerdings stark auf das Handeln der Lehrkräfte ausgerichtet.

## 4 Basiskonzept Nachhaltigkeit

"Basiskonzepte", "Fundamentale Konzepte" und "Große Ideen" (die Termini werden international nicht einheitlich verwendet) sind inzwischen zu grundlegenden Elementen in der Curriculum-Entwicklung geworden und dienen vor allem der Konzentration auf das Wesentliche.

Sie strukturieren einerseits die Vielfalt der Details, zugleich schaffen sie Ordnung und Übersicht. Darüber hinaus erschließen sie Sinn und Bedeutung, indem sie helfen, Unterrichtsinhalte im engen Zusammenhang mit dem Gesamtkonzept des Lernens zu sehen. Somit wird das Erkennen und Verstehen von Zusammenhängen erleichtert. Zum anderen kommt es bei Auswahl, Anordnung und Akzentuierung der Inhalte darauf an, sich an fundamentalen Ideen des Unterrichtsfaches oder Lernfeldes zu orientieren. Sie sollen für das jetzige wie für das zukünftige Handeln von gleichbleibend großer Bedeutung sein. Ein "Fundamentales Konzept" (von lateinisch *concipere* "erfassen") beschreibt eine Menge von einzelnen Aneignungsgegenständen durch die Benennung jeweils gleich ausgeprägter Eigenschaften oder Beziehungen.

Ein Basiskonzept kann somit als ein Denk-, Handlungs-, Beschreibungsoder Erklärungsschema verstanden werden, das

- in verschiedenen Gebieten vielfältig anwendbar und erkennbar ist (Horizontalkriterium);
- auf jedem intellektuellen Niveau aufgezeigt und vermittelt werden kann (Vertikalkriterium);
- in den historischen Entwicklungen des Bereichs (der Domäne) deutlich wahrnehmbar ist und längerfristig relevant bleibt (Zeitkriterium);
- einen Bezug zu Sprache und Denken des Alltags und der Lebenswelt besitzt (Sinn- bzw. Relevanzkriterium; vgl. Schwill 1993, S. 31).

"Große Ideen" reichen oft im curricularen Verständnis über einzelne Begriffe, Fakten Prinzipien und Denkweisen hinaus, um größere Zusammenhänge, Prinzipien und Prozesse zu fokussieren. "Große Ideen" sind das breite, wichtige Verständnis, welches die Lernenden behalten sollten, lange nachdem sie viele Details von etwas vergaßen, dass sie einst lernten.

Obwohl es auch im Bereich der Technik verschiedene Ansätze zu Konzepten in der technischen Bildung gibt, kann ein breiter Konsens über die

Notwendigkeit, Technologiekonzepte zu lehren und sich nicht nur auf Entwicklung von Können zu konzentrieren, konstatiert werden (vgl. De Vries/Tamir 1997).

Die Bedeutung konzeptuellen Wissens besteht darin, dass es von konkreten Erfahrungen absieht und stattdessen deren Merkmale und Kennzeichen kategorisiert (vgl. Anderson 1989, S. 153ff.). Konzepte erlauben das Abrufen von bedeutungs- und wahrnehmungsbezogenen Wissensinhalten aus dem Gedächtnis. Ihr Erwerb ist ein grundlegendes Ziel der Aneignung von Wissen im Unterricht, auch unter der oben beschriebenen Perspektive der Anschlussfähigkeit.

Ein Blick in internationale Curricula zeigt unterschiedliche Positionen. Wir nennen einzelne Basiskonzepte in Bezug auf die jeweiligen Curricula.

- USA: Zielkonflikte (Kompromisse), Ressourcen, Systeme, Prozesse, Optimierung, Steuerung und Anforderungen (vgl. ITEA 2000);
- Kanada (Curriculum Grades 11/12): Ästhetik, Steuerung, Ökologische Nachhaltigkeit, Ergonomie, Konstruktion und Fertigung, Zweck/Funktion (Finalität), Innovation, Stoff/Material, Mechanismus/Getriebe/Maschine, Leistung und Energie, Systeme und Wechselwirkung, Sicherheit, Struktur (vgl. Hill 1997).

Ein Basiskonzept im Rahmen der arbeitsorientierten bzw. naturwissenschaftlich-technischen Bildung wird mit "Nachhaltigkeit" beschrieben. Beispielsweise betont der einheitliche Rahmenlehrplan für Berlin und Brandenburg für das Fach Wirtschaft-Arbeit-Technik Nachhaltigkeit als ein normatives Konzept. Das normative Konzept "Nachhaltigkeit" hat das Ziel,

"den Ausgleich von wirtschaftlicher Entwicklung, ökologischer Tragfähigkeit und sozialer Verträglichkeit als Prozess zu gestalten. Nachhaltigkeit erfordert Planungen, welche die Kriterien des Nachhaltigkeits-Konzeptes einbeziehen und Analysen der Folgen von Produktion, Dienstleisten und Konsum, Infrastrukturen, Märkten, internationaler Arbeitsteilung sowie von technischen/technologischen Entwicklungen berücksichtigen." (RLP 2015, S. 8)

Zugleich orientiert der Rahmenlehrplan darauf, dass die Basiskonzepte anhand von exemplarischen inhaltlichen Schwerpunkten in das Bewusstsein der Schülerinnen und Schülern gerückt werden. Solche Schwerpunkte sind

- Produzieren und Dienstleisten: Planungen, Prozesse, Folgen;
- Schonung von Ressourcen;
- Folgen des Konsumverhaltens Verbraucherverhalten.

Auf exemplarische Beispiele aus der Unterrichtspraxis gehen Benjamin Apelojg und Ulf Holzendorf im Kontext der Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) ein.<sup>3</sup>

Bildung für nachhaltige Entwicklung soll Kindern, Jugendlichen und Erwachsenen nachhaltiges Denken und Handeln ermöglichen. Sie soll Menschen befähigen und über die Bewertung von Umweltveränderungen motivieren, sich an einer gesellschaftlichen Entwicklung zu beteiligen, die die Lebensqualität der jetzt lebenden Menschen einander angleicht und die Entfaltungsmöglichkeiten zukünftiger Generationen nicht einschränkt. Die Lernenden werden in die Lage versetzt, sinnvolle Handlungsentscheidungen zu treffen, indem sie die Konsequenzen für künftige Generationen oder das Leben in anderen Weltregionen berücksichtigen. Zur Verwirklichung nachhaltiger Entwicklungsprozesse wurde das Konzept der Gestaltungskompetenz erarbeitet. Damit wird die Fähigkeit bezeichnet, Wissen über nachhaltige Entwicklung anwenden und Probleme nicht nachhaltiger Entwicklung erkennen zu können.

#### 5 Fazit

In den letzten fünfzehn Jahren wurden vielfältige konzeptuelle Veränderungen vorgenommen und zahlreiche Maßnahmen eingeleitet, um Qualität und Wirksamkeit von Bildungsprozessen und -institutionen zu erhöhen. Curricula nehmen in diesem Kontext eine relativ zentrale Rolle ein. Verschiedene Tendenzen der Curriculum-Entwicklung haben sich verfestigt und tragen offensichtlich auch zu einer Verbesserung der Unterrichtsqualität bei.

Die Arbeit mit Basiskonzepten stellt die aktuellste Entwicklungslinie dar. Basiskonzepte im Rahmen der arbeitsorientierten technisch-ökonomischen Bildung sind System – Entwicklung – Nachhaltigkeit. Nachhaltigkeit ist ein Basiskonzept umfassender Gerechtigkeit, sowohl zwischen den heute lebenden Menschen als auch zwischen diesen und zukünftigen Generationen unter globaler Perspektive sowie der Bewahrung natürlicher Lebensgrundlagen.

Bezüglich der Arbeit mit Basiskonzepten im Allgemeinen und dem Basiskonzept der Nachhaltigkeit im Besonderen liegen noch keine schulpraktischen Erfahrungen vor. Die Schulpraxis wird zeigen, inwieweit es Lehrkräften gelingt, mittels Basiskonzepten eine Konzentration auf das Wesentliche in Lehr-Lernprozessen zu erreichen und so zu mehr *Nachhaltigkeit* im Bildungsprozess unserer Kinder und Jugendlichen zu sichern.

<sup>2</sup> Vgl. den Beitrag von Benjamin Apeloig und Ulf Holzendorf in diesem Band.

#### Literatur

- Anderson, J. R. (1989): Kognitive Psychologie. Eine Einführung (2. Aufl.). Heidelberg
- De Vries, M. J.; Tamir, E. (1997): Shaping Concepts of Technology. What Concepts and How to Shape them? In: International Journal of Technology and Design Education, Vol. 7, No. 1–2, pp. 27–65
- Hill, A. M. (1997): Reconstructions in Technology Education. In: Journal of Technology and Design Education, Vol. 7, No. 1–2, pp. 33–51
- ITEA International Technology Education Association (2000): Standards for Technological Literacy: Content for the Study of Technology, Reston, VA (ITEA)
- Jakupec, V.; Meier, B. (2015): PISA Shocks, After Shocks and Misconceptions. In: Leibniz Online. Zeitschrift der Leibniz-Sozietät e.V., Nr. 17. URL: http://www.leibnizsozietaet.de/wp-content/uploads/2015/02/JakupecMeier.pdf
- Klafki, W. (1985): Neue Studien zur Bildungstheorie und Didaktik. Weinheim
- Meier, B. (1985): Ausgewählte Fragen der Lehrplanentwicklung im Polytechnischen Unterricht Ziele, Funktionen und Linienführung im Werkunterricht der Mittelstufe. Potsdam (unveröffentlicht)
- Meier, B. (2012): Wirtschaft und Technik unterrichten lernen. München
- Meier, B.; Banse, G. (Hg.) (2015): Allgemeinbildung und Curriculumentwicklung. Herausforderungen an das Fach Wirtschaft Arbeit Technik. Frankfurt am Main u.a.O. (Gesellschaft und Erziehung. Historische und systematische Perspektiven, Bd. 15)
- Meier, B.; Jakupec, V. (2010): Curriculum. In: Meier, R.; Janßen, A. (Hg.): Coach-Ausbildung ein strategisches Curriculum. Sternfels, S. 281–298
- Meier, B.; Van Cuong, N. (2014): Lí luận dạy học hiện đại [Moderne Didaktik]. Hanoi (Vietnam)
- RLP Einheitlicher Rahmenlehrplan Berlin/Brandenburg, Teil C WAT (2015). URL:http://bildungsserver.berlin-brandenburg.de/rlp-online/c-faecher/w-a-t/kompetenzentwicklung [17.06.2016]
- Robinsohn, S. B. (1967): Bildungsreform als Revision des Curriculum. Neuwied
- Schwill, A. (1993): Fundamentale Ideen der Informatik. In: Zentralblatt für Didaktik der Mathematik, Jg. 25, H. 1, S. 20–31.– URL: http://www.informatikdidaktik.de/Forschung/Schriften/ZDM.pdf
- Theuerkauf, W. E.; Meschenmoser, H.; Meier, B. (Hg.) (2009): Qualität Technischer Bildung Kompetenzmodelle und Kompetenzdiagnostik. Berlin
- Weinert, F. (2001): Vergleichende Leistungsmessung in Schulen eine umstrittene Selbstverständlichkeit. In: Weinert, F. (Hg.): Leistungsmessungen in Schulen. Weinheim/Basel, S. 17–31

## Ernst-Otto Reher †

#### Schlusswort

Herzlichen Dank an den Laudator Gerhard Banse und an alle Kollegen, die mich würdigend in ihrem Beitrag erwähnt haben.

Dieses siebente Symposium machte deutlich, wie Technologie und Nachhaltigkeit eng miteinander verbunden sind. Durch Technologie ist es möglich geworden, den Prozess der nachhaltigen Entwicklung aktiv zu beeinflussen. Ökonomie spielte schon immer eine entscheidende Rolle in den Technikwissenschaften, in der Ausbildung von Ingenieren und in anderen Tätigkeitsfeldern. Jeder Prozess wurde nach ökonomischen Gesichtspunkten getestet und auf den Prüfstand existierender Lösungen gestellt. Fiel der Test negativ aus, mussten Einsparungsmaßnahmen gesucht werden. Auf diese Weise wurden technologische Lösungen ökonomisch optimiert.

Heute reicht das nicht mehr aus: Dazu kamen die Ökologie und das Soziale, das zusammengefasst unter dem Begriff der Nachhaltigkeit Beachtung findet. Diese Komplexität der Betrachtungen wird durch das Nachhaltigkeitsdreieck zum symbolischen Ausdruck gebracht. Erst bei gleichwertiger Betrachtung und Realisierung aller drei Komponenten kann von Nachhaltigkeit gesprochen werden. Diese Einsichten und ihre Umsetzung in Aus- und Weiterbildung sowie in der Ingenieur-Praxis entsprechen der heutigen Zeit. Das Symposium hat hierzu überzeugende Beispiele geliefert. Eine technologische Lösung wird nach ökonomischen, ökologischen und sozialen Gesichtspunkten geprüft und dann als nachhaltige technologische Lösung anerkannt

Gerhard Banse und ich denken, dass wir unseren Symposiums-Zyklus, alle zwei Jahre, fortsetzen sollten. Vorschläge für weitere Themen könnten sein: Probleme der Ingenieurausbildung in der Zeit der Digitalisierung 4.0, Erkenntnismethoden in den Technikwissenschaften, die Rolle der TGZ's für Innovationen u.v.m.

Das Symposium ist beendet.

## **Autorinnen und Autoren**

Benjamin Apelojg; Dr. rer. pol.; Mitglied der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin; Universität Potsdam, Professur für Technologie und berufliche Orientierung, Lehreinheit für Wirtschaft-Arbeit-Technik, Karl-Liebknecht-Straße 24–25, 14476 Potsdam; apelojg@unipotsdam.de

Dietrich Balzer; Professor Dr.-Ing. habil.; Mitglied der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin; Kurfürstenstraße 9, 16515 Friedrichsthal; ludmila.balzer@prosysgmbh.de

Gerhard Banse; Professor Dr. sc. phil. Professor e.h.; Präsident der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin; Theodorstraße 13, 12623 Berlin; gerhard.banse@partner.kit.edu/praesident@leibnizsozietaet.de

Kerstin Becker; Dipl.-Ing.; tetra ingenieure GmbH, Rosa-Luxemburg-Straße 30, 16816 Neuruppin; becker@tetra-ingenieure.de

Johannes Briesovsky; Professor Dr.-Ing. habil.; BB ResoPuls Ingenieurbüro, Ruhrweg 9, 06217 Merseburg; briesovsky@resopuls.com

Marek Hauptmann; Dr.-Ing.; Technische Universität Dresden, Professur für Verarbeitungsmaschinen und Verarbeitungstechnik, 01062 Dresden; marek.hauptmann@tu-dresden.de

*Ulf Holzendorf*; Dr. rer. nat.; Universität Potsdam, Professur für Technologie und berufliche Orientierung, Lehreinheit für Wirtschaft-Arbeit-Technik, Karl-Liebknecht-Straße 24–25, 14476 Potsdam; holzdorf@uni-potsdam.de

Ernst-Peter Jeremias; Dr.-Ing.; tetra ingenieure GmbH, Rosa-Luxemburg-Straße 30, 16816 Neuruppin; jeremias@tetra-ingenieure.de

*Christian Kohlert*; Professor h. c. Dr.-Ing.; Mitglied der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin; Rotsteinerstraße 14, 56414 Oberahr; c.kohlert@kpfilms.com

Jens-Peter Majschak; Professor Dr.-Ing.; Mitglied der Sächsischen Akademie der Wissenschaften zu Leipzig; Technische Universität Dresden, Professur für Verarbeitungsmaschinen und Verarbeitungstechnik, 01062 Dresden; jens-peter.majschak@tu-dresden.de

Bernd Meier; Professor Dr. paed. habil.; Vizepräsident der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin; Universität Potsdam, Professur für Technologie und berufliche Orientierung, Lehreinheit für Wirtschaft-Arbeit-Technik, Karl-Liebknecht-Straße 24–25, 14476 Potsdam; meierbe@uni-potsdam.de

Norbert Mertzsch; Dr. rer. nat.; Menzer Straße 39, 16831 Rheinsberg; mertzsch@t-online.de

Gerhard Öhlmann; Professor Dr. rer. nat. habil.; Mitglied der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin; Nikolaikirchplatz 5, 10178 Berlin; goehlmann@t-online.de

Ernst-Otto Reher †; Professor Dr. sc. techn. Professor h.c. Dr. h.c.; Mitglied der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin

*Dieter Seeliger*; Professor Dr. rer. nat. habil.; Mitglied der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin; Stresemannplatz 6, 01309 Dresden; dieterseeliger@web.de

Bernd Thomas; Dr.-Ing.; bhthomas@gmx.de