

Sehr geehrte Leserinnen und Leser,

mit dem vorliegenden Band halten Sie ein neues Format, das Aspekten der Forschungsprogrammatis des Zentrums für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung (ZeHS) gewidmet ist, in der Hand. Damit soll der Auftakt für eine Schriftenreihe zur internen und externen Kommunikation der Entwicklung der Arbeitsgegenstände des ZeHS und deren Einbindung in Systemzusammenhänge



gesetzt werden. Vorgesehen sind weitere Ausgaben in zunächst unregelmäßigen zeitlichen Abständen bereits während der Bauzeit des ZeHS. Seit vergangenem Jahr können Sie über die Homepage der Technischen Universität Bergakademie Freiberg (TU BAF) Internetauftritte des ZeHS in deutscher und englischer Sprache verfolgen. Im Laufe der nächsten Jahre sind im Zusammenhang mit dem ZeHS weitere Kommunikationsinstrumente, so die Etablierung einer internationalen englischsprachigen Fachzeitschrift und zugeordneter Fachtagungen geplant. Neben einzelnen Gastbeiträgen wurden für den Startpunkt des vorliegenden Bandes zunächst Mitglieder des Vorstands des ZeHS und Leiter eingeschlossener Struktureinheiten um Beiträge gebeten. Ich hoffe, dass Sie Gefallen an diesem Format finden und die Herausgeber somit in der nächsten Zeit Arbeiten aus einem breiten Autorenkreis erreichen. Denkbar erscheint mir in diesem Zusammenhang auch die Aufbereitung der Inhalte einschlägiger Projekt- oder Graduierungsarbeiten für eine Publikation in diesem Rahmen. Als Anreiz und für eine dauerhafte Etablierung wurde auf die Vergabe einer ISSN Wert gelegt. Entsprechend wünsche ich Ihnen bei der Lektüre viel Freude und Inspiration und freue mich auf Ihre Manuskripte und Anregungen.

Mit herzlichem Glückauf

A handwritten signature in blue ink that reads "Dirk C. Meyer". The signature is written in a cursive, flowing style.

Prof. Dr. Dirk C. Meyer

Direktor des ZeHS und des Instituts für Experimentelle Physik

Schriften zum Zentrum für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung (ZeHS)

an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg

Heft 1 – 2017

Inhalt

Industrielle Energie- und Kraftwirtschaft: Herausforderungen
der Energiewende und essentielle Beiträge zu deren Gelingen

(B. Minderjahn)

4

Ein Forschungsneubau in Freiberg für 41,5 Mio. Euro –
Zentrum für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung (ZeHS)

(D. C. Meyer, T. Lemser)

6

Einige Splitter zur architektonischen Umsetzung des Forschungsbaus

(D. C. Meyer, T. Lemser)

11

Gesetzliche und marktpolitische Rahmenbedingungen für die Umsetzung
der Forschungsprogrammatik des Zentrums für effiziente Hochtemperatur-
Stoffwandlung (ZeHS)

(D. C. Meyer, T. Lemser)

13

Entwicklungstendenzen in Gießereien mit Bezug
auf eine klimagerechte Energie- und Materialeffizienzsteigerung

(G. Wolf, C. Dommaschk)

21

Entwicklungstendenzen im Bereich der Stahlherstellung
und anderer metallurgischer Prozesse

(O. Volkova, T. Dubberstein)

27

Virtualisierung von Hochtemperaturprozessen für neue,
ressourcenschonende Technologien

(A. Richter, B. Meyer)

35

Feuerfeste Verbundwerkstoffe für Hochtemperaturanwendungen

(C. G. Aneziris, N. Brachhold)

41

Technologiemanagement und Systemanalyse

(M. Höck)

52

Schließung von Stoffkreisläufen

(H. Gutte, H.-G. Jäckel, A. Brumme, D. Rübhelke, B. Meyer)

73

Elektrifizierung maßgeblicher Bereiche der Syntheseverfahren
und -umgebung im Bereich der Grundstoffindustrie

(D. C. Meyer, T. Lemser)

79

Anforderungen im Rahmen der Energiewende
und der Zielsetzung für ein treibhausgasneutrales Deutschland
im Bereich der Chemischen Industrie

(D. C. Meyer, T. Lemser)

86

Industrielle Energie- und Kraftwirtschaft: Herausforderungen der Energiewende und essentielle Beiträge zu deren Gelingen

Barbara Minderjahn (Geschäftsführerin des Verbands der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft e.V.)

Die Energiewende ist in Deutschland vor allem eine Stromwende. Der bereits zuvor existierende Trend, vor allem durch den Ausbau erneuerbarer Energien im Stromsektor Treibhausgasemissionen einsparen zu wollen, wurde durch den von der Bundesregierung beschlossenen Atomausstieg noch zusätzlich befeuert. Für den bundesweiten Primärenergieverbrauch spielen erneuerbare Energien mit einem Anteil von 12 Prozent aber bis heute nur eine marginale Rolle.

Die Bundesregierung wendet ihre Aufmerksamkeit daher – vor allem unter dem Stichwort Sektorkopplung – zunehmend anderen Sektoren zu. In dem Ende Juni bekannt gewordenen Entwurf für einen Klimaschutzplan 2050 des Bundesumweltministeriums (BMUB) heißt es beispielsweise, dass die Vermeidung energiebedingter Emissionen „insbesondere durch eine Elektrifizierungsstrategie der Sektoren Verkehr, Gebäude und Industrie zusammen mit einem Ausbau der erneuerbaren Energien bei der Stromerzeugung gelingen“ soll. Je weiter Deutschland mit der Umsetzung dieses Vorhabens vorankomme, umso größer soll laut Vorschlag des BMUB zudem die Interaktion zwischen den Sektoren Energiewirtschaft, Verkehr, Gebäude und Industrie werden. Die Bundesregierung will diese Entwicklung aktiv gestalten.

Wie diese Überlegungen weiträumig in die Tat umgesetzt werden sollen, ist jedoch nicht klar. Hierfür gibt es heute höchstens erste Hinweise und Denkansätze. Betrachten wir ein Beispiel: Der Wärmesektor ist in Deutschland für mehr als die Hälfte des Endenergieverbrauchs verantwortlich, wobei die Industrie mit etwa 580 Gigawattstunden gut 36 Prozent des Wärmebedarfs repräsentiert. Etwa 475 Gigawattstunden davon lassen sich auf industrielle Produktionsprozesse zurückführen, die häufig hohe Temperaturen erfordern. Diese lassen sich auf absehbare Zeit aber weder über Strom noch über die Nutzung erneuerbarer Energien bei der Wärmeerzeugung realisieren.

In diesem Feld braucht es also noch eine ganze Reihe von innovativen Entwicklungen bevor sich die Industrie an diesem Teil der Energiewende beteiligen können. In einem anderen Bereich, der im Rahmen der Energiewende zunehmend an Bedeutung gewinnt, ist sie jedoch bereits seit Jahren aktiv: der Bereitstellung industrieller Flexibilität im Energiemarkt.

Zahlreiche Industrieunternehmen beteiligen sich schon heute am Regelenergiemarkt, direkt oder über Dienstleister. Für das Gelingen der Energiewende ist dies von nicht zu unterschätzender Bedeutung. Denn abschaltbare Lasten sind zu einem wichtigen Instrument für die Übertragungsnetzbetreiber geworden, um die deutschen Stromnetze in Zeiten starker fluktuierender Einspeisung stabil zu halten. Diverse Pilotprojekte befassen sich daher mit den weiteren Potentialen und der zukünftigen Vermarktung verschiebbarer Lasten.

Es gibt also auch genügend Beispiele, die zeigen: Industrie- und Gewerbeunternehmen investieren und forschen hierzulande und sind somit – entgegen landläufiger

Meinungen – in vielerlei Hinsicht ein wesentlicher Teil der Lösung und nicht Gegner der Energiewende. So haben sich die Ausgaben für Umwelt- und Klimaschutz im produzierenden Gewerbe in den letzten zehn Jahren auf über 7,5 Milliarden Euro vervierfacht. Neben den Bemühungen um die Flexibilisierung des Energiebedarfs in den Unternehmen gehören hierbei auch die Entkopplung von Produktion und Treibhausgasausstoß, der schonende Einsatz von Ressourcen oder die Steigerung der Effizienz zu den alltäglichen Herausforderungen, denen die Unternehmen begegnen.

Bei allem Engagement für das Gelingen der Energiewende darf jedoch nicht vergessen werden, dass für die Unternehmen vor allem der internationale Wettbewerb im Fokus steht. So gilt es, Aufträge zeitgemäß zu erfüllen, auf Qualitätsvorstellungen der Kunden einzugehen und dabei den Kostenrahmen nicht zu sprengen. Die zunehmenden Anforderungen des sich wandelnden Energiemarktes sollten dabei eigentlich nur eine Begleiterscheinung darstellen. Sie rücken vor dem Hintergrund der politischen Agenda jedoch zunehmend in den Vordergrund – vor allem, weil sie mit einem hohen Kostenaufwand verbunden sind.

Je weiter die Energiewende voranschreitet, desto wichtiger wird es daher, allen Beteiligten immer wieder deutlich zu machen, dass der Weg zum Erfolg nur über marktwirtschaftliche Spielregeln, die effizientesten Umsetzungsstrukturen und eine berechenbare Politik führt. Nur so kann in den Unternehmen aus Industrie und Gewerbe Planungssicherheit für eingesetztes Kapital und für die langfristige Entwicklung von Geschäftsfeldern erreicht werden. Und nur so ist es möglich, dass die Unternehmen in die Lage versetzt werden, neue Technologien, Prozesse und Ansätze – wie Sie unter anderem auch in diesem Heft thematisiert werden – zu erforschen und letztlich auf breiter Basis einzusetzen.

Ein Forschungsneubau in Freiberg für 41,5 Mio. Euro – Zentrum für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung (ZeHS)

Prof. Dr. Dirk C. Meyer (Direktor des ZeHS und des Instituts für Experimentelle Physik),
Ass. iur. Theresa Lemser (Referentin)

Der folgende Artikel basiert auf einem Beitrag veröffentlicht in der Zeitschrift ACAMONTA 2015

Im Zeitraum 2012 bis 2015 beteiligte sich die TU Bergakademie Freiberg (TU BAF) mit einem Antrag für ein Zentrum für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung (ZeHS) am Wettbewerb um eine Förderempfehlung für Forschungs(neu)bauten an Hochschulen gemäß Art. 91b GG. Nach erfolgreicher Verteidigung vor dem Wissenschaftsrat und der Bestätigung durch die Gemeinsame Wissenschaftskonferenz des Bundes und der Länder stehen der Universität in den Jahren 2016 bis 2020 41,5 Mio. Euro zur Finanzierung der Baukosten und für die Beschaffung ausgewählter Großgeräte zur Verfügung.

Im Rahmen eines bundesweiten Wettbewerbs soll für die Absicherung exzellenter und national bedeutsamer Forschungsprogramme an Hochschulen deren bauliche Infrastruktur mit einem Gesamtvolumen in Höhe von knapp 367 Mio. Euro bis 2020 gefördert werden. Es geht dabei darum, den Gebäude- und Ausrüstungspark der Hochschulen – eine der wesentlichen Prämissen für dauerhaft erfolgreiches Mithalten im nationalen und internationalen Vergleich – zu komplettieren und zu modernisieren. Die Förderung der Vorhaben unterliegt strengen Kriterien. Wichtigste Voraussetzungen sind, dass sich diese durch einen herausragenden wissenschaftlichen Anspruch auszeichnen und die Forschungsprogrammatische von überregionaler und/oder nationaler Bedeutung ist. Zum mehrstufigen Antragsverfahren gehörten die Vorlage einer Antragsskizze wie auch eines umfangreichen Vollantrags beim Wissenschaftsrat, wobei der TU BAF in allen Schritten volle Unterstützung durch das Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst (SMWK) zuteilwurde. Eine wichtige Rolle für die Auswahlentscheidung zugunsten unserer Universität spielte die am 4. März 2015 von Prof. Dirk C. Meyer, dem Sprecher und Gründungsdirektor des ZeHS und federführenden Verfasser der Antragsdokumente, erfolgreich absolvierte Verteidigung des Vorhabens vor Vertretern des Wissenschaftsrates in Bonn. Am 24. April 2015 veröffentlichte der Wissenschaftsrat seine Förderempfehlung zugunsten des ZeHS, in der er der von der TU BAF dargelegten Forschungsprogrammatische eine sehr hohe nationale Bedeutung zusprach, da diese einen technologisch und wirtschaftlich markanten Beitrag zur Problematik der Energiewende verheißt¹. Schließlich bestätigte die Gemeinsame Wissenschaftskonferenz von Bund und Ländern diese Empfehlung am 19. Juni 2015. Eine wichtige Basis für die Forschungsprogrammatische bilden an der TU BAF u. a. die bereits etablierten Sonderforschungsbereiche der Deutschen Forschungsgemein-

¹ Empfehlungen zur Förderung von Forschungsbauten (2016), Drs. 4548-15, S. 58 ff.

schaft (DFG) und mehrere durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung sowie den Freistaat Sachsen finanzierte Verbundforschungsvorhaben. In vorderster Linie sind dies die DFG-Sonderforschungsbereiche 920 Multifunktionale Filter für die Metallschmelzefiltration – ein Beitrag zu Zero Defect Materials (Sprecher: Prof. Christos Aneziris) bzw. 799 TRIP-Matrix-Composite (Sprecher: Prof. Horst Biermann), das Innovationskompetenzzentrum Virtuelle Hochtemperatur-Konversionsprozesse – VIRTUHCON (Sprecher: Prof. Bernd Meyer) sowie der Spitzentechnologiecluster ADDE des Freistaates Sachsen (Sprecher: Prof. David Rafaja).

Bündelung vorhandener Kompetenzen

Mit der Etablierung des ZeHS folgt die TU BAF ihrer im Hochschulentwicklungsplan 2020 deklarierten Absicht, Forschung und Lehre über die gesamte Wertschöpfungskette enger zu vernetzen. Dabei wird deren lückenlose Knüpfung angestrebt – ausgehend von Forschungsaktivitäten zur Theorieentwicklung über den Laborversuch, Testläufe in Technikums- und Pilotversuchsanlagen bis hin zur Großversuchstechnik, und das in einer für die industrielle Nutzung erforderlichen skalenmäßigen Auslegung. Der konzipierte Forschungsneubau wird die strukturelle Bündelung der an der TU BAF in den Bereichen Hochtemperatur(HT)-Prozesse und -Materialien in einzigartiger Weise vertretenen Kompetenzen ermöglichen. Die HT-Stoffwandlung umfasst dabei alle Prozesse, die bei Temperaturen oberhalb von 500°C ablaufen. Der Fokus des ZeHS liegt auf der Entwicklung innovativer, ressourcen- und energieeffizienter Technologien in Bereichen der Grundstoffindustrie, wobei Prozess- und Materialanforderungen – namentlich in der chemischen Industrie, der Metallurgie sowie der Keramik-, Glas- und Baustoffindustrie – im Kontext betrachtet werden, so dass die Ergebnisse dann auch auf andere Branchen übertragbar sein dürften.

Maßgebliche Beiträge zur Energiewende

In seiner o.g. Empfehlung zur Förderung des Vorhabens unterstreicht der Wissenschaftsrat die herausragende strategische Bedeutung einer Steigerung der Ressourcen- und Energieeffizienz im Zusammenhang mit der Energiewende. Hierbei kommen der flexibleren Nutzung erneuerbarer Ressourcen und der Schaffung geschlossener Stoff- und Energiekreisläufe sowie der Ausrichtung von Industrieprozessen auf zeit-

lich fluktuierende Angebote an Überschussenergie – insbesondere aus der Solar- und Windkraftbranche – unter Einbezug der Energiespeicherung

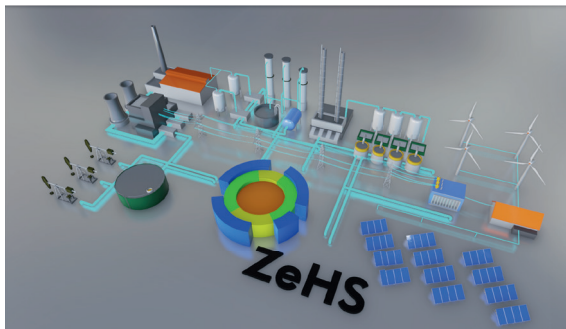


Abb. 1: Einbindung der Forschungsprogrammatis des ZeHS in den systemischen Gesamtzusammenhang von Stoff- und Energiekreisläufen

Quelle: Cinector GmbH

besondere Bedeutung zu. Dabei stehen die Anforderungen an die Prozesse und die jeweils involvierten Materialien im unmittelbaren Zusammenhang. Die zu durchlaufenden Entwicklungs- und Prozessketten erstrecken sich von den Grundlagenrecherchen bis hin zu den Anwendungen in industrieskalierten Pilotanlagen. Das ZeHS soll im Ergebnis dazu beitragen, dass die ressourcen- und energieintensive Grundstoffindustrie am Standort Deutschland verbleibt; strategisch werden auch Neuansiedlungen angestrebt.

Strukturelle Kennzeichen

Das ZeHS ist als Fokus für interdisziplinäre Arbeitsfelder der Forschungsprogrammatische aller Professuren der TU BAF gegenüber offen, womit deren Mitarbeiter die mit dem Forschungsgebäude dann verfügbare Infrastruktur sowie auch die Zentrallabore kooperativ in Nutzung nehmen können. Die beteiligten Professuren verbleiben an ihren Instituten, um die Verflechtung mit den Fakultäten zu erhalten. Die gewachsene Forschungsinfrastruktur der Bergakademie wird durch das Prozess- und Materialtechnikum des ZeHS abgerundet. Zur Umsetzung der Forschungsprogrammatische des ZeHS wurde eine gleichnamige Zentrale Einrichtung gegründet. In ihre Zuständigkeit eingeschlossen ist die Unterstützung von Aufgaben in Lehre und Weiterbildung. Das Rektorat verabschiedete nach Anhörung des Senats eine entsprechende Ordnung, die Einzelheiten zur Struktur und zur Arbeitsweise des Zentrums regelt.

Teilbereiche Hochtemperaturprozesse und Hochtemperaturmaterialien

Die Forschungsschwerpunkte des ZeHS werden durch die zwei komplementären Kompetenzzentren „HT-Prozesse – Vom Mechanismus zur Anwendung“ sowie „HT-Materialien – Vom Material zum Bauteil“ repräsentiert. Sie sollen die wissenschaftlichen Entwicklungslinien des ZeHS kooperativ bearbeiten. Beide bestehen aus jeweils mehreren Arbeitsgruppen; spezifische Quervernetzungen sind vorgesehen und unverzichtbar. Die projektierte Gliederung des Forschungsbaus sieht vor: ein gemeinsames Büro- und Laborgebäude sowie zwei Hallen für das Prozess- und Materialtechnikum als infrastrukturelle Basen für die Bearbeitung fachübergreifender wissenschaftlicher Fragestellungen. Im Kompetenzzentrum HT-Prozesse werden die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des ZeHS zu neuen Technologien für effiziente HT-Prozesse bis hin zu chemischen HT-Prozess-Reaktoren und allgemein HT-Prozess-Anlagen gebündelt, die für die Erzeugung der meisten industriellen Grundma-

terelle Basen für die Bearbeitung fachübergreifender wissenschaftlicher Fragestellungen. Im Kompetenzzentrum HT-Prozesse werden die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des ZeHS zu neuen Technologien für effiziente HT-Prozesse bis hin zu chemischen HT-Prozess-Reaktoren und allgemein HT-Prozess-Anlagen gebündelt, die für die Erzeugung der meisten industriellen Grundma-

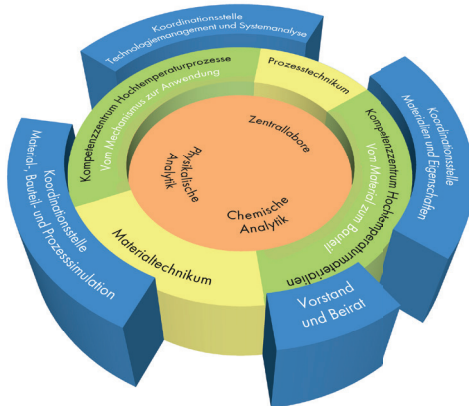


Abb. 2: Teilbereiche des ZeHS
Quelle: Cinector GmbH

terialien (z. B. Metalle, Keramik, Glas und Basischemikalien) von essenzieller Bedeutung sind. Generell soll und muss die HT-Prozesstechnik dahingehend weiterentwickelt werden, dass deren Ressourceneffizienz unter Erhöhung der Energiedichte entscheidend gesteigert werden kann. Mittel- bis langfristig soll die zzt. schon prominente Expertise zu chemischen Reaktoren und Öfen der Thermoprozesstechnik mit dem Ziel, ein umfassendes Stoff-, Prozess-, Material und Modellierungswissen der beteiligten Fachdisziplinen für eine neue Generation von HT-Prozessen bereitzustellen, zusammengeführt werden. Im Kompetenzzentrum HT-Materialien werden auch die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten des ZeHS für synthetische feuerfeste Materialien gebündelt. Diese sind die Voraussetzung für den Aufbau der Prozessumgebung bei allen wichtigen HT-Prozessen. Die Forschungsprogrammatik des Kompetenzzentrums HT-Materialien überwölbt das ausgesprochen breite Spektrum von Anforderungen bezüglich der Eigenschaften der HT-Materialien, bei denen es gelingen sollte, ihre Belastungsgrenzen deutlich auszuweiten und neue Anwendungsfelder für sie zu erschließen. Die Kategorie der HT-Materialien ist – außer durch hohe Schmelztemperaturen – durch enorme, auch das dynamische Verhalten bestimmende mechanische Festigkeitsanforderungen charakterisiert – und das im gesamten Temperaturbereich in allen in Betracht kommenden Einsatzfeldern. Es ist vorgesehen, alle Einzelproblematiken – angefangen von denen der Ressourcenverfügbarkeit über technologische Fragen, etwa zur Fügetechnik, bis hin zum Recycling in geschlossener Form abzubilden.

Koordinationsstellen

Die beiden Kompetenzzentren bestimmen zusammen mit drei Koordinationsstellen die fachliche Gliederung des ZeHS. Die Koordinationsstellen „Materialien und Eigenschaften“, „Material-, Bauteil- und Prozesssimulation“ sowie „Technologiemanagement und Systemanalyse“ koordinieren einerseits die methodischen Kompetenzen sowie die Geräteinfrastruktur innerhalb des ZeHS, insbesondere für die geplanten Zentrallabore Physikalische und Chemische Analytik. Dabei begleiten sie Verbundforschungsvorhaben mittels betriebswirtschaftlicher Methoden. Sie fungieren andererseits als Schnittstellen für die Integration der an diversen Instituten der TU BAF erarbeiteten Kompetenzen auf den Gebieten der Materialanalytik, Synthese, Modellierung, Simulation wie auch in den Wirtschaftswissenschaften und fördern fakultätsübergreifend den interdisziplinären Austausch. Die Koordinationsstelle „Technologiemanagement und Systemanalyse“ hat neben ihrer Verantwortlichkeit für Planung, Durchführung und Kontrolle der Entwicklung ressourcen- und energieeffizienter HT-Prozesse auch Aufgaben im Innovationsmanagement und beim Wissenstransfer zu erfüllen. Daneben sind die Koordinationsstellen auch Ansprechpartner für Kontakte zwischen dem ZeHS und externen wissenschaftlichen Einrichtungen sowie für den Wissenstransfer in das Feld der industriellen Anwendungen.

Prozess- und Materialtechnika

Darüber hinaus sollen zwei Hallen für ein Prozess- und für ein Materialtechnikum als kooperativ nutzbare Infrastrukturen gebaut werden. Auf Basis der Großgeräte im Pro-

zess- bzw. im Materialtechnikum kann die Forschungsinfrastruktur der TU BAF zu geschlossenen Ketten formiert werden. Das Prozesstechnikum wird sich dabei in ein Synthese- und in ein Ofentechnikum gliedern sowie ein Korrosions- und Nitrierlabor mit jeweils passenden Geräten und Versuchsständen umfassen. Im Materialtechnikum soll der Hauptstrang einer pulvermetallurgischen Fertigungslinie für HT-Materialien bzw. refraktäre Verbundwerkstoffe angelegt werden.

Ausbau der Studienangebote

Die TU BAF plant im Zusammenhang mit der Forschungsprogrammstruktur des ZeHS die Einrichtung einschlägiger interdisziplinärer Bachelor- und (internationaler) Masterstudiengänge. Damit sollen die internationale Verankerung des ZeHS im Bereich der Lehre sowie die Entwicklung profilierten wissenschaftlichen Nachwuchses gewährleistet werden.

Bauliche Realisierung

Der Forschungsneubau soll in den Jahren 2016 bis 2020 zentral auf dem Campus der TU BAF errichtet werden. Die Gesamtkosten von 41,51 Mio. € lassen sich in Baukosten (28,67 Mio. €), Kosten für die Anschaffung von Großgeräten (9,75 Mio. €) und Kosten für die Erstausrüstung (3,09 Mio. €) gliedern. Das Gebäude soll eine Gesamtfläche von 6.011 m² aufweisen, die u. a. Büroräumen, Laborflächen, Versuchshallen und einem Computerpool Platz bietet. Im Zusammenhang mit der anteiligen Übernahme der Finanzierung durch den Freistaat Sachsen, die Hälfte der Baukosten betreffend, wurde durch das Sächsische Staatsministerium für Finanzen mit Datum vom 27. Mai 2015 bereits der Planungsauftrag an das SMWK erteilt. Die organisatorische Verantwortung für die inhaltliche Planung, Nutzung und den Betrieb des Forschungsneubaus liegt beim Direktor/Sprecher und beim Vorstand des ZeHS. Der Forschungsneubau schafft Raum für bis zu 145 wissenschaftliche und 33 weitere Mitarbeiter.



Abb. 3: Entwürfe für den Forschungsneubau des ZeHS
Quelle: Cinector GmbH



Abb. 4: Im März 2017 wurde bereits mit den Vorbereitungen des Baufeldes für das ZeHS begonnen.
Quelle: Sven Jachalke

Einige Splitter zur architektonischen Umsetzung des Forschungsbaus

Prof. Dr. Dirk C. Meyer (Direktor des ZeHS und des Instituts für Experimentelle Physik),
Ass. iur. Theresa Lemser (Referentin)

Violettes Mineral... so beschrieb das „BauNetz“ – eine deutschsprachige Online-Publikation, die täglich aus der internationalen Architekturwelt berichtet – den Entwurf für den Forschungsbau des Zentrums für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung (ZeHS) von Heinle, Wischer und Partner, Freie Architekten aus Dresden.

Die Architekten bewarben sich im Januar 2016 um die Planung des Vorhabens und konnten sich in der zweiten Phase des Verhandlungsverfahrens im Wettbewerb durchsetzen. Die Entscheidung für diesen Entwurf wurde vom Auftraggeber Sächsisches Immobilien- und Baumanagement Niederlassung Chemnitz unter anderem damit begründet, dass er den städtebaulichen Leitgedanken eines „Wissenschaftskorridors“ berücksichtige. Hinzu wurde die Unterteilung des Raumprogrammes in Labor, Versuchshalle und Büro, durch die kurze Wege und Aufweitungen an hochfrequentierten Bereichen und damit die optimale die Nutzung des ZeHS als Forschungs- und Austauschort für alle Fakultäten der Hochschule ermöglicht werden, hervorgehoben.

Das zu errichtende ZeHS befindet sich nördlich des Stadtzentrums von Freiberg auf dem Campus der TU Bergakademie Freiberg (TU BAF) und bildet einen Bestandteil des „Wissenschaftskorridors“. Vorteilhaft ist die unmittelbare Nähe zur Neuen Mensa sowie dem neuen Bibliotheks- und Hörsaalzentrum, etwa für die Ausrichtung von Konferenzen zu Forschungsgegenständen des ZeHS.

Das Gebäude des ZeHS soll aus einem Büroteil, welcher über vier Geschosse verfügt, bestehen, an den sich zweigeschossige Laborspangen anschließen, die einen Innenhof umsäumen und im zusätzlichen Kellergeschoss über die erforderlichen Technikflächen verfügen.

Die beiden Labortrakte werden von Technikumshallen begrenzt, wobei eine inhaltliche Zuordnung zu den beiden Bereichen „Prozesse“ und „Materialien“ planerisch zugrunde gelegt wird. Vorgesehen ist die Nutzung durch Arbeitsgruppen aller Fakultäten der TU BAF, wobei eine infrastrukturelle Bündelung der Kompetenzen der Universität im Bereich der Hochtemperaturprozesse und -materialien und deren Ausbau und Arrondierung ermöglicht wird.

Das Gesamtgebäude ist in Bezug auf seine Geschosse differenziert abgestuft und fügt sich damit in den städtebaulichen Maßstab sowie den Konturverlauf der Umgebung ein. Der Neubau folgt der fußläufigen Verbindung von Campus und Altstadt und erhält seinen Haupteingang an dieser.



Abb. 1: Entwurfsansicht des Treppenhauses des ZeHS
Quelle: Heinle, Wischer und Partner, Freie Architekten

Durch die Aufnahme der vorgegebenen Materialität für die Fassaden im Außenbereich und die Assoziation eines aufgespaltenen Minerals für die gegensätzliche Innenhofgestaltung wird das Gebäude in Freiberg verortet. Das Ansinnen, den Innenhof des ZeHS einem Kristall vergleichbar zu gestalten, regte einen Kommentator im Forum des „BauNetz“ dazu an, den Entwurf als ein Anknüpfen an die vom Architekten Bruno Taut (1880-1938) versuchte „alpine Architektur“, in der dieser sich der Verschmelzung von Architektur und Natur widmete, zu sehen. Bruno Taut hatte im Jahr 1919 eine Reihe kristallartiger Bauten, mit denen er die Alpen in eine fantastisch-expressionistische Kunstlandschaft verwandeln wollte, entworfen. Bekannt wurde er vor allem durch Großsiedlungen in Berlin im Stile des Neuen Bauens, einer Bewegung in Architektur und Städtebau in Deutschland in der Zeit vor dem 1. Weltkrieg bis in jene der Weimarer Republik.



Abb. 2: Entwurf zur Außenansicht des ZeHS
 Quelle: Heine, Wischer und Partner, Freie Architekten

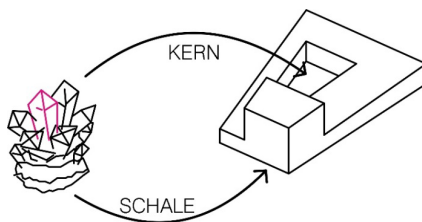


Abb. 3: Die Grundidee eines aufgeschlagenen Minerals, das von einer äußeren Schale umschlossen ist, prägt den Entwurf
 Quelle: Heine, Wischer und Partner, Freie Architekten

Gesetzliche und marktpolitische Rahmenbedingungen für die Umsetzung der Forschungsprogrammatik des Zentrums für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung (ZeHS)

Prof. Dr. Dirk C. Meyer (Direktor des ZeHS und des Instituts für Experimentelle Physik),
Ass. iur. Theresa Lemser (Referentin)

Kurzfassung

Die im Rahmen der Forschungsprogrammatik des ZeHS angestrebte Flexibilisierung, Elektrifizierung und weitgehende Dekarbonisierung der Hochtemperaturprozesse der Grundstoffindustrie und die Schließung von Energie- und Stoffkreisläufen werden durch weltweite Abkommen, europäische Regelungen sowie ein weitgehendes nationales Energierecht und marktpolitische Elemente bestimmt. Der nationale Rahmen ist durch die Implikationen der Energiewende maßgeblich geprägt. Die nachfolgende Darstellung zielt darauf, ein Übersichtsbild zum Gesamtzusammenhang und der Dynamik zu skizzieren und für das ZeHS bedeutsame Entwicklungen sichtbar zu machen. Die zusammengefassten Informationen stützen sich auf umfangreiche Quellen ab, wobei für den vorgesehenen Gebrauch und Entwicklungsstand auf Zitationen verzichtet wird.

Einleitung

Dank des stetigen Anstiegs der Wind- und Solarenergieerzeugung wurde der Anteil an Erneuerbaren Energien (EE) am Bruttostromverbrauch bereits jetzt erheblich gesteigert. Es sind allerdings noch enorme technologische und gesellschaftliche Herausforderungen zu bewältigen, um die komplexen Ziele der Energiewende zu erreichen. Dies betrifft insbesondere die Bereiche der Stromspeicherung, der Errichtung intelligenter Energienetze sowie der Nutzung von EE-Überschüssen in großtechnischen Prozessen, um dort die fossilen Energieträger durch erneuerbare Quellen zu substituieren. Dies bedeutet auch, klassische Prozesse in der Grundstoffindustrie durch grundlegend neue



Abb.: EE-Anlagen
Quelle: Sven Jachalke

Verfahren, die eine flexible Einkopplung von EE-Strom ermöglichen, zu ersetzen. Daneben gilt es, die Versorgungssicherheit zu gewährleisten, die u.a. dadurch gefährdet werden kann, dass Ungleichgewichte in der Stromerzeugung und -abnahme aus EE auch zukünftig noch durch Stromerzeugung mittels fossiler Brennstoffe zu überbrücken sind, welche wiederum größtenteils unwirtschaftlich und reduziert worden ist.

Während die Energieerzeugung in der Vergangenheit kaum speziell geregelt war, nahm das Umweltbewusstsein in Politik und Gesellschaft seit den 1990er Jahren zu und führte schließlich zur Verabschiedung wichtiger Regelwerke wie dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) und dem Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG). Die Klimaschutzdiskussion erzielte mit dem Kyoto-Protokoll aus dem Jahr 1997 einen wichtigen Fortschritt.

Aus Verbrauchersicht spielen eine preisgünstige, sichere Energieversorgung und -dienstleistung eine zentrale Rolle. Im privaten Bereich erstrecken sich Anforderungen bis hin zur Gestaltung von Sozialtarifen. Die gerechte Verteilung der mit der Energiewende verbundenen hohen Kosten ist immer wieder Gegenstand der öffentlichen Diskussion. Die Möglichkeit der Begrenzung der Zahlung der EE-Umlage (§§ 63 EEG ff.) durch stromintensive deutsche Industrien wird von Privatkunden zum Teil als ungerecht empfunden. Jedoch steht neben der Forderung nach sicherer und preisgünstiger Versorgung insbesondere im Segment der energieintensiven Industrien (EI) auch die Standort- und Wettbewerbssicherheit im Zentrum. Gerade ein Alleingang Deutschlands in der Energiewende verursacht wirtschaftliche Nachteile für nationale Industrien, die sich in Konkurrenz zu anderen Wirtschaftsnationen sehen.

Begründet durch die Vielfalt der im Rahmen der Energiepolitik berührten Themenbereiche, die von der Umwelt- bis zur Sozialpolitik reichen, ist das Energierecht nicht nur national und international gegliedert und mit anderen Rechtsgebieten besonders stark verzahnt, sondern jeweils ein Spiegel aktueller energiepolitischer Kompromisse. Auf dem Hintergrund der Energiewende besteht nicht nur das Erfordernis, die Abwanderung der EI aus Deutschland zu verhindern, vielmehr besteht Konsens, dass der erforderliche Umbau nur unter Einbeziehung ihrer Potenziale gelingen kann. Dabei erfasst das Attribut „energieintensiv“ sowohl strom- als auch brennstoffintensive Anteile, was bereits auf den Zusammenhang mit der angestrebten Schließung von Energie- und Stoffkreisläufen hinweist.

Energieintensive Industrien

In zahlreichen Regelwerken wird der Begriff der EI zur Kategorisierung herangezogen, wobei die Auslegung in Teilen differiert. Häufig wird der Anteil der Energiekosten an der Bruttowertschöpfung oder am Produktionswert zugrunde gelegt (gemäß Art. 17 Abs. 1a der Richtlinie 2003/96/EG (EU-Energiesteuerrichtlinie) handelt es sich um einen „energieintensiven Betrieb“, wenn sich entweder die Energie- und Strombeschaffungskosten auf mindestens 3,0 % des Produktionswertes belaufen oder die zu entrichtende nationale Energiesteuer mindestens 0,5 % des Mehrwertes beträgt); das EEG sieht im Rahmen der Besonderen Ausgleichsregelung (§§ 63 ff. EEG) Begrenzungen der EEG-Umlage für Strom vor, wenn die Stromkostenintensität in Abhängigkeit der jeweiligen Branche eine bestimmte Höhe betragen hat (§ 64 Abs. 1 EEG).

Neben der Bereitstellung wichtiger Grundstoffe der für den Ausbau der EE erforderlichen und allgemein energieeffizienten Materialien sind die EI insgesamt wichtiger Bestandteil der Wertschöpfungsketten in Deutschland. Dies steht im Widerspruch

zur Belastung der EI durch die Kosten der Förderung des Ausbaus der EE. Durch das nationale EEG und die damit festgelegte, jährlich steigende Umlage, sowie weitere politisch beeinflussbare Belastungen liegen die Industriestrompreise in Deutschland derzeit im europäischen Vergleich mit an der Spitze. Durch den CO₂-Emissionshandel im Rahmen der EU gibt es im weltweiten Vergleich zusätzliche Belastungen, da die Kosten für CO₂-Emissionzertifikate durch den Energieerzeuger auf den Strompreis umgelegt werden. Als Richtwert kann angenommen werden, dass die Industriestrompreise in Deutschland etwa doppelt so hoch wie in den USA sind.

Insgesamt ist für den Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen EI im Rahmen der Energiewende die Gestaltung der Energiepreise von essentieller Bedeutung. Zugleich bestehen für die deutsche EI aber auch besondere Chancen und Möglichkeiten zur Nutzung der Eigenheiten des verstärkten Ausbaus des Anteils der EE an der Stromerzeugung sowie für die Schließung von Energie- und Stoffkreisläufen, die vordergründig durch umweltpolitische Zielsetzungen angetrieben wird. Dies betrifft an erster Stelle die Bereitstellung zeitlich flexibler Lasten für die Netzstabilisierung und die Wandlung temporär vorhandenen Überschussstroms der EE in chemische Energieträger sowie dessen Einsatz in stromintensiven Produktionsprozessen. Zusätzlich bestehen Anreize für die Elektrifizierung von Prozessen, welche die erforderliche Wärme bisher aus fossilen Brennstoffen erhalten, sowie für die Entwicklung vollkommen neuer Geschäftsfelder.

Säulen der Energiewende

Die Energiewende in Deutschland zielt mit einem systemischen Ansatz auf eine umwelt- und ressourcenschonende und energieeffiziente Volkswirtschaft unter Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit und des allgemeinen Wohlstandsniveaus.

Die erste Säule betrifft den Ausbau der EE für eine klimaverträgliche und von fossilen Brennstoffen unabhängige Versorgung. Hierbei ist das EEG das zentrale Steuer- und Förderinstrument für die Implementierung der EE in den Markt und die Begrenzung der Kostenentwicklung. Die zweite Säule zielt auf die Steigerung der Energieeffizienz. Im Rahmen vielfältiger Ansätze kommt dabei der drastischen Senkung des Primärenergieverbrauchs besondere Bedeutung zu. In diesem Zusammenhang werden die Strategien für das Handeln durch den Nationalen Aktionsplan Energieeffizienz (NAPE) festgelegt.

Untersetzungen finden sich zu beiden Säulen durch spezifische Untergliederungen in die Bereiche Strom, Wärme und Verkehr. Für Prognosen wird allgemein davon ausgegangen, dass der Ausbau der EE unter den Bedingungen langfristig steigender Brennstoff- und CO₂-Zertifikatspreise erfolgen muss. Der Zusammenhang führt zur Einführung der EE zu geringeren Grenzkosten in den Strommarkt, was bei konsequentem Ausbau zu sinkenden Börsenstrompreisen führt. Der Industriestrompreis wird jedoch ansteigen, da der im Zusammenhang erforderliche Ausbau der Stromnetze steigende Netzentgelte nach sich zieht und die Stromgestehungskosten höher liegen.

Insgesamt impliziert die Energiewende so einen grundlegenden Umbau der Energiewirtschaft mit maßgeblichen direkten und indirekten Auswirkungen auf die EI. Ohne weitere strukturelle Änderungen und technologische Innovationen würde dies erhebliche Kostensteigerungen und den Verlust der Wettbewerbsfähigkeit bedingen.

Ziele der Energiewende und gesetzliche Grundlagen

Hinsichtlich des Ausbaus des Anteils der EE wurde bereits auf rechtliche Grundlagen, Steuerinstrumentarien und den Zusammenhang mit dem erforderlichen Netzausbau hingewiesen (EEG, EEG-Umlage, NABEG).

Bezüglich der festgeschriebenen Anhebung der Bereitstellung des Wärme- und Kältebedarfs von Gebäuden durch EE erfolgten Regelungen im Rahmen des Erneuerbare-Energien-Wärmegesetzes (EEWärmeG). So bestimmt das EEWärmeG u.a. die Pflicht der Eigentümer von Gebäuden zur anteiligen Nutzung erneuerbarer Energien zur Deckung des Wärme- und Kältebedarfs. Ferner trifft es Regelungen zum Ausbau von Fern- und Nahwärmeversorgungsnetzen. Die Nutzungspflicht von EE für Neubauten nach dem EEWärmeG für den Wärme- bzw. Kältebedarf kann auch durch Ersatzmaßnahmen erfüllt werden, § 7 EEWärmeG. Beispiele sind die Nutzung technischer Abwärme oder von Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen (in diesem Zusammenhang ist das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) von besonderer Relevanz). Die Umsetzung des EEWärmeG wie auch der Forderung des Biokraftstoffquotengesetzes (BioKraftQuG), welches eine jährliche Reduzierung der durch den Kraftstoffverbrauch emittierten Treibhausgase vorsieht, erfordert erhöhte Investitionskosten. Das gleiche trifft für die Forderungen nach Steigerung der Energieeffizienz zu. Dort regelt die Energieeinsparverordnung (EnEV) auf Grundlage des Energieeinsparungsgesetzes (EnEG) die Reduzierung des Wärmebedarfs von Gebäuden. Die Senkung des Energieverbrauchs im Verkehrssektor und die Einführung einer beträchtlichen Zahl von Elektrofahrzeugen werden durch das Elektromobilitätsgesetz (EmoG) gefördert, welches Maßnahmen zur Bevorzugung der Teilnahme elektrisch betriebener Fahrzeuge am Straßenverkehr ermöglicht. Die auf beiden Säulen der Energiewende liegende Zielsetzung der Senkung der Treibhausgasemissionen wurde bereits im Zusammenhang mit dem EU-Emissionsrechtehandel kurz adressiert. Der nationale rechtliche Rahmen ist durch das Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz (TEHG) beschrieben. Die Zuteilung handelbarer Berechtigungen für Unternehmen mit hohen CO₂-Emissionen erfolgt nach Maßgabe des Zuteilungsgesetzes (ZuG); kostenlose Zertifikate werden über den Zeitraum von Handelsperioden zugeteilt. Grundlage für die aktuelle Situation ist die Zuteilungsverordnung 2020 (ZuV 2020). Für den rechtssicheren, effizienten und umweltverträglichen Ausbau des Übertragungsnetzes bildet das Netzausbaubeschleunigungsgesetz (NABEG) die Grundlage. Die Finanzierung der Aufwendungen der Übertragungsnetzbetreiber geschieht über die Weitergabe durch Nutzungsentgelte im Rahmen des Energiewirtschaftsgesetzes (EnWG) an die Endabnehmer. Im Falle des Stromnetzes wird dies durch die Stromnetzentgeltverordnung (StromNEV), welche die Festlegung individueller Netzentgelte vorsieht, was für die stromintensive Industrie von besonderer Relevanz ist, geregelt.

Auf der Vermeidung von Systemverlusten beruhende Energieeffizienzsteigerungen sind für die Akteure der EI von essentieller Bedeutung, zumal diese die Kostenseite und ihre Wettbewerbsfähigkeit seit jeher im Blick haben müssen. Dies findet einen Niederschlag auch im Rahmen der Klimapolitik und -gesetzgebung. Auf europäischer Ebene gibt die Energieeffizienz-Richtlinie 2012/27/EU einen Rahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in den Mitgliedstaaten. Gemäß Art. 2 Nr. 4 der Energieeffizienz-Richtlinie (RL 2012/27/EU) versteht man unter Energieeffizienz das Verhältnis von Ertrag an Leistung, Dienstleistungen, Waren oder Energie zum Energieeinsatz. Eine Energieeffizienzverbesserung liegt gemäß Art. 2 Nr. 6 der Richtlinie in der Steigerung der Energieeffizienz durch technische, wirtschaftliche und/oder Verhaltensänderungen. Abgezielt wird auf die Intensivierung der Anstrengungen der Mitgliedsstaaten für eine effizientere Energienutzung in allen Phasen der Versorgungskette, womit sich der Bogen von der Energieumwandlung und -verteilung bis zum Endverbrauch erstreckt. Für die weitere Gewährung des Spitzensteuerausgleichs für die Unternehmen stellt die Einhaltung von Effizienzzielen die Voraussetzung dar. So sieht die Vereinbarung zwischen der Bundesregierung und der deutschen Wirtschaft zur Steigerung der Energieeffizienz (BAnz AT 16.10.2012 B1) vor, dass die Unternehmen des Produzierenden Gewerbes jährliche Effizienzsteigerungen in der Größe von ~1,3 % erreichen müssen. Weitere Regelungen sehen Steuerentlastungen für Unternehmen vor, die Energie- bzw. Umweltmanagementsysteme betreiben, vgl. § 10 Abs. 3 Stromsteuergesetz (StromStG), § 55 Abs. 4 Energiesteuergesetz (EnergieStG). Dafür ist die Darstellung des Energieeinsatzes in jeglicher vorhandenen Art bzw. Methode der Anwendung gefordert. Das Spektrum schließt damit beispielsweise Lüftung, Beleuchtung, Heizung, Transport, Kommunikation und ganze Produktionslinien ein. Ziel ist es, den Fluss der Energiemengen im zeitlichen Ablauf vollständig zu erfassen und so Energieeinsparpotenziale im Gesamtzusammenhang, auch mit weiteren Akteuren, zu identifizieren. Damit werden Trends zur Erfassung der Abläufe zu einer Virtuellen Fabrik und ihre Integration in das System anderer Akteure unterstützt.

Industrielle Flexibilitäten

Die durch die Erhöhung des Anteils der EE-bedingten erheblichen saisonalen, tageszeitlichen und witterungsbedingten Schwankungen des Stromangebots implizieren neue Anforderungen an das Netzmanagement zur Gewährleistung der Stabilität. Neben der Zwischenspeicherung von Strom aus zeitlichen Überschüssen der EE kommt dem Ausbau der Flexibilität der Verbraucher besondere Bedeutung zu. Dies bedeutet, dass die betrieblichen Abläufe in möglichst großem Umfang derart gestaltet werden, dass mit flexiblen Lastwechseln auf die Angebotssituation reagiert werden kann. Beispiele für flexible Lasten sind die Erzeugung von Druckluft oder Prozesswärme und -kälte sowie deren Speicherung. Zusätzlich gewinnt auf diesem Hintergrund die zeitlich anpassbare Eigenerzeugung von elektrischer Energie sowie Prozesswärme und -dampf durch die EI an Stellenwert.

Derzeit besteht mit der Strompreiskompensation für einen beschränkten Kreis von Unternehmen (überwiegend aus dem Bereich der Grundstoffindustrie/ EI), die auf-

grund ihrer stromintensiven Produktionsprozesse ein erhebliches Risiko der Verlagerung ins Ausland aufweisen, noch eine staatliche Beihilfe¹. Die für die Flexibilisierung erforderliche Anpassung der betrieblichen Abläufe wird durch die Entwicklung dynamischer Strompreissysteme flankiert, um die Voraussetzungen für eine zukünftige, laufende Anpassung an die Lage im Energiesystem zu schaffen. Neben einer möglichen Senkung von Energiekosten für die Produktion besteht im Zusammenhang für die El die Option der Generierung zusätzlicher Einnahmen durch den Verkauf von Potenzialen zur Lastverschiebung.

Die Rahmenbedingungen für eine Lastflexibilisierung zur Stabilisierung des Stromnetzes sind mit der Verordnung zu abschaltbaren Lasten (AbLaV) seit dem Jahr 2013 gegeben. Diese bezieht sich auf Lasten von Verbrauchseinrichtungen, die ihre Leistung auf Anforderung der Übertragungsnetzbetreiber reduzieren können. Die Lasten können nach Vereinbarung unverzüglich (sofort abschaltbare Lasten) oder 15 Minuten (schnell abschaltbare Lasten) ferngesteuert vom Übertragungsnetzbetreiber abgeschaltet werden. Die Bereitstellung der Flexibilität wird mit einem Leistungs- und bei Abruf mit einem Arbeitspreis vergütet. Dieses Verfahren ist für die stromintensiven Hochtemperatur-Prozesse der Grundstoffindustrie von großer Relevanz. Querschnittsanwendungen, z.B. für Lüftungsanlagen und Kältebedarf, sind als schaltbare Lasten prädestiniert, wobei das große Potenzial durch die Flexibilisierung der eigentlichen Grundprozesse erschlossen werden soll. Zusätzlich kann auch die Bereitstellung kleinerer flexibler Lasten in der Größe von 500 kW auf dem Regulenergiemarkt weitere Erlöse generieren.

Zu den Instrumenten für die Ausgestaltung des Regulenergiemarktes für die Gewährleistung der Netzstabilität gehört auch das Gesetz zur Weiterentwicklung des Strommarktes, welches am 30.07.2016 in Kraft getreten ist. Dieses soll den Strommarkt zugunsten der erneuerbaren Energien weiterentwickeln und zugleich mehr Versorgungssicherheit gewährleisten. Zum anderen soll durch Preissignale jederzeit der Einsatz vorhandener Kapazitäten zur richtigen Zeit und im erforderlichen Umfang gewährleistet werden². Es handelt sich dabei um ein Mantelgesetz, das strommarktbezogene Gesetze und Verordnungen, wie etwa das EnWG, das EEG oder die StromNEV, ändert. So legt beispielsweise der neue § 13e EnWG fest, dass die Übertragungsnetzbetreiber eine Kapazitätsreserve für den Fall vorhalten müssen, dass Angebot und Nachfrage auf den deutschen Strommärkten nicht vollständig ausgeglichen werden können.

Einen weiteren Baustein bildet das Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende (GeDiEw). Dieses trägt den durch den Umbau der Energiesysteme bedingten erhöhten Anforderungen an die einzusetzenden Mess- und Kommunikationstechnologien und Datenverarbeitungssysteme Rechnung, indem es beispielsweise Regelungen zur

¹ Grundlage hierfür ist die vom damaligen Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie erlassene Richtlinie für Beihilfen für Unternehmen in Sektoren bzw. Teilsektoren, bei denen angenommen wird, dass angesichts der mit den EU-ETS-Zertifikaten verbundenen Kosten, die auf den Strompreis abgewälzt werden, ein erhebliches Risiko der Verlagerung von CO₂-Emissionen besteht (Beihilfen für indirekte CO₂-Kosten (BANz AT 06.08.2013 B2).

² BT-Drs. 18/7317, S. 1.

Ausstattung von Messstellen, der Ausgestaltung des Messbetriebs oder den Einsatz intelligenter Messsysteme trifft³.

Aktuelle Situation

Die derzeitigen Planungsverhältnisse, insbesondere infolge laufender Gesetzesnovellierungen, neuer Auflagen und Veränderungen in den Abgaben bedingen Unsicherheiten. Langfristige Prognosen sind aufgrund der (markt-)politischen Implikationen, die beispielsweise durch Regierungswechsel schnell variieren können, was die für die Unternehmen notwendigen Investitionsentscheidungen erschwert, nur vage. Insbesondere für Akteure mit Mutterkonzernen oder Standorten im Ausland ist zu beobachten, dass aktuell der Vorrang für Investitionen außerhalb Deutschlands liegt. Derzeit national getätigte Investitionen im Bereich der EI zielen überwiegend auf Effizienzmaßnahmen zur Reduktion des Kostendrucks und zur Erfüllung staatlicher Anforderungen, um weiterhin von Ausgleichsregelungen Gebrauch machen zu können. Die Flexibilisierung des Strombezugs sowie eine Teilnahme am Regelenergiemarkt durch das Zuschalten flexibler Lasten sind grundsätzlich als praktikable Möglichkeiten anerkannt. Im Zuge der Energiewende aufgetretene Vergünstigungen der Nettoenergiepreise können als für die EI positiv eingeschätzt werden; für die Realisierung sind jedoch angepasste Beschaffungsmanagementstrukturen erforderlich. Das im Zusammenhang mit der Umsetzung der Energiewende geschaffene Innovationspotenzial und auch die Möglichkeit neuer Geschäftsmodelle über die EE-Branche hinaus sind positiv zu bewerten.

Insgesamt ist die Erlangung der Überschaubarkeit der gesamten Regelwerke, auch über die Zeit hinweg problematisch. Dies stellt insbesondere für kleinere Unternehmen eine besondere Herausforderung dar. Damit gewinnt die Arbeit der Verbände und Netzwerke für die Beratung und Unterstützung der Unternehmen im Zusammenhang mit dem dynamischen Prozess des Ausbaus der gesetzlichen Rahmenbedingungen und marktpolitischen Impulssetzungen im Zuge der Energiewende zusätzlich an Gewicht. Für das ZeHS kann eine Partnerschaft mit dem Verband der Industriellen Energie- und Kraftwirtschaft (VIK) ein laufendes Monitoring für die gezielte Anpassung der Technologieentwicklungen zum Vorteil beider Seiten ermöglichen.

³ BT-Drs. 18/7555, S. 1.

Weiterführende Literatur

- Mitto, L.: Energierecht, 2013.
- Stuhlmacher, G./ Stappert, H./ Schoon, H./ Jansen, G.: Grundriss zum Energierecht – Der rechtliche Rahmen für die Energiewirtschaft, 2. Aufl., 2015.
- Stäsche, Uta, Entwicklungen des Klimaschutzrechts und der Klimaschutzpolitik 2015/2016, Internationale und europäische Ebene, EnWZ 7/ 2016, S. 303 ff.
- Stäsche, Uta, Entwicklungen des Klimaschutzrechts und der Klimaschutzpolitik 2014/2015, Bund, Bundesländer und Kommunen, EnWZ 8/ 2015, S. 354 ff.
- Kahl, Wolfgang/ Bews, James: Rechtsfragen der Energiewende – Teil 1, Juristische Ausbildung 2014 (10), S. 1004 ff.

Entwicklungstendenzen in Gießereien mit Bezug auf eine klimagerechte Energie- und Materialeffizienzsteigerung

Prof. Dr.-Ing. Gotthard Wolf (Direktor des Instituts für Gießereitechnik),

Dr.-Ing. Claudia Dommaschk (Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Gießereitechnik)

Einleitung

Bereits seit mehr als 5000 Jahren wird die Technik des Metallgießens genutzt. Innerhalb dieser Zeit hat sich das Gießen dynamisch entwickelt und sich immer seinen Anforderungen und Märkten angepasst – sei es durch Veränderung seiner Werkstoffe oder der Fertigungsverfahren.

Die Gießerei-Industrie ist eine klassische Zulieferindustrie nahezu aller Industriebereiche, insbesondere des Maschinenbaus, der Automobilindustrie, der Elektronik und der Bauindustrie. Im letzten Jahrzehnt kamen die Windenergieanlagen als neues Kundensegment mit enormen Abnahmemengen neu hinzu.

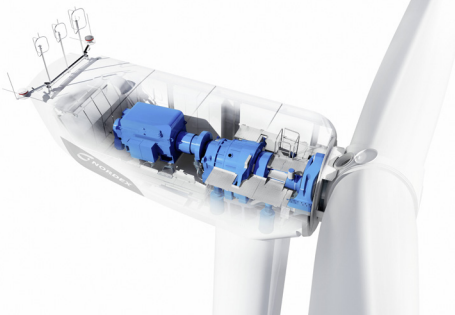


Abb. 1: 3D-Modell Gamma

Quelle: Nordex SE; www.nordex-online.com/fileadmin/user_upload/bilder_presse_2/Gamma-3_D.jpg
[Zugriff: 21.02.2017]

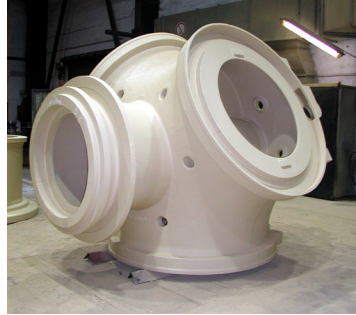


Abb. 2: Rotornabe

Quelle: Meuselwitz Guss Eisengießerei GmbH

Weltweit werden heute rd. 100 Mio. t Guss pro Jahr erzeugt. Größter Produzent ist hierbei mit Abstand China. Deutschland, das auf Platz 5 der Gusserzeuger liegt, produziert ca. 5,3 Mio. t Guss mit rd. 80.000 Mitarbeitern in mehr als 600 überwiegend KMU-Betrieben und erwirtschaftet dabei einen Umsatz von rd. 13 Mrd. Euro.

Die Gießereien stehen in einem intensiven nationalen und internationalen Wettbewerb. Europa ist zu einem gemeinsamen Markt zusammengewachsen und fordert von deutschen Gießereien entsprechende Innovationskraft und technische Höchstleistungen zur Behauptung im Markt. Gerade die europaweit stark differierenden Energiepreise müssen und können durch technologische Prozessführung kompensiert werden.

Dies konnte insbesondere durch eine permanente Weiterentwicklung der Prozesstechnik erreicht werden. Angefangen bei der computergestützten Bauteil- und Prozessentwicklung über eine kontinuierliche Verbesserung der Energie- und Werkstoffeffizienz bis hin zur Schließung der Stoffkreisläufe ist die deutsche Gießerei in einer führenden Position.

Diese Position gilt es aber permanent zu halten. Hierbei hat sich in der Branche seit vielen Jahren die Erkenntnis durchgesetzt, dass unsere Standorte nur langfristig gesichert werden können, wenn es gelingt, allen Anforderungen der Gesellschaft an Umweltschutz, Energie- und Werkstoffeffizienz und Gestaltung der Arbeitsplätze zu entsprechen und damit die Akzeptanz der Gesellschaft für einen energieintensiven Betrieb unter wirtschaftlichen Bedingungen aufrecht zu erhalten. Hieran arbeitet die Branche kontinuierlich.

Vor ca. 200 Jahren begann die Entwicklung zur Verwendung von Schrotten und damit von Sekundärmaterial als Einsatzmaterial in den Schmelzöfen. Der Anteil an Schrotten beim Schmelzen stieg kontinuierlich mit der Verfügbarkeit des Materials an. Bei Eisen- und Stahlguss konnte der Materialkreislauf aufgrund des weltweiten Handels mit Stahl und



Abb. 3: Aluminiumschrott

Quelle: patalia, Foto-ID: #75205375, www.fotolia.com

Gusschrotten fast schon geschlossen werden, bei Aluminium ist dies aufgrund der stark steigenden Anwendung noch nicht möglich, es fehlt schlicht an den benötigten Schrottrückläufen. Waren bis vor wenigen Jahren Kohle, Erdöl und Gas die dominierenden Energiequellen zum Schmelzen der Metalle, geht die Entwicklung heute sowohl aus produktionstechnischen Gründen als auch aufgrund der Klimadiskussion Schritt für Schritt hin zu elektrischen Schmelzöfen.

Neben der Ressourcenschonung wird unter dem Begriff des „Integrierten Umweltschutzes“ seit Jahren intensiv daran gearbeitet, die sogenannten „End-of-pipe“-Umweltschutztechnologien durch integrierte Vermeidungsstrategien zu substituieren. Der Grundgedanke hierbei ist, durch eine entsprechende Prozesstechnik und geeignete Einsatzmaterialien Emissionen aller Art zu vermeiden und sie nicht am Ende des Prozesses separieren, deponieren oder vernichten zu müssen. Unterstützt wird dies mit der Eliminierung aller nicht wirklich wertschöpfenden Prozessschritte und der damit steigenden Material- und Energieeffizienz. So konnte der interne Kreislaufanteil durch eine computergestützte Berechnung der Bauteile und der Gießsysteme drastisch verringert und somit der spez. Energieeinsatz bei der Gussteilherstellung in den letzten Jahren deutlich reduziert werden.

Die derzeitigen Entwicklungsschwerpunkte der deutschen Gießerei-Industrie mit Bezug auf eine klimagerechte Herstellung der Gussteile sind im Wesentlichen:

1. Schließung der Stoffkreisläufe und Vermeidung von Prozessemissionen durch integrierten Umweltschutz
2. Erhöhung der Energie- und Materialeffizienz
3. Entwicklung von Leichtbauteilen (nicht zu verwechseln mit dem Einsatz von Leichtmetallen!)

Schließung der Stoffkreisläufe und Vermeidung von Prozessemissionen

Neben den so weit wie möglich geschlossenen Materialkreisläufen für die Metalle steht hierbei mengenmäßig insbesondere der Formstoff als Gemisch aus Sand und einem Bindemittel im Fokus. Obwohl in den letzten 20 Jahren zahlreiche Projekte zur Regenerierung und Kreislaufführung der gebrauchten Formstoffe realisiert werden konnten, ist die nahezu vollständige Wiederverwendung der Formstoffe in den meisten Gießereien noch nicht realisiert. In diesem Kontext ist ebenfalls die Entwicklung umweltgerechter, emissionsarmer Bindemittelsysteme zu betrachten. Die derzeitigen Bindemittelsysteme für Kerne und Kernpakete benötigen nahezu alle eine thermische Hochtemperatur-Regenerierung, lediglich die Bindersysteme für die Formen lassen sich überwiegend kalt-mechanisch regenerieren. Beim Gießvorgang und bei der thermischen Regenerierung treten heutzutage organische und anorganische Emissionen auf, die es langfristig zu vermeiden gilt. Des Weiteren ist auch die thermische Regenerierung so zu gestalten, dass sie ohne Gas/Öl-Brenner auskommt und mit regenerativen Energien betrieben werden kann.

Die thermische Regenerierung von organisch und anorganisch gebundenen Gießereialtsanden stellt eine wirksame Technologie dar, um hochwertige Regenerate zum erneuten Einsatz in der Form- und Kernherstellung zu erzeugen. Thermische Regenerierungsanlagen werden heute meist unter Verwendung von Gas- oder Ölbrennern betrieben, welche bei Arbeitstemperaturen zwischen 700 und 900 °C vorhandene Binderreste vollständig verbrennen. Thermische Regenerierungsanlagen sind aufgrund der notwendigen kontinuierlichen Betriebsweise mit den dafür benötigten großen Altsandmengen und des hohen Energieverbrauchs wirtschaftlich schwer zu betreiben und daher nur in wenigen deutschen Gießereien im Einsatz.



Abb. 4: Thermische Regenerierungsanlage
Quelle: R. Scheuchl GmbH, 05/2015

Verbesserungspotenzial bei der thermischen Regenerierung gibt es in zwei Bereichen:

- Technologien mit diskontinuierlicher Betriebsweise für den Einsatz in mittleren Gießereien mit wechselnden Altsandmengen
- Der Einsatz von elektrischer Energie zur Regenerierung, optimalerweise in Kombination mit Pkt. a)

Bei der Verwendung von elektrischer Energie zur Altsandregenerierung und damit der Möglichkeit zur Entkarbonisierung der Beheizung sind folgende Ansätze denkbar:

- Die Nutzung der induktiven Erwärmung, hier wäre ein Verfahrensprinzip ähnlich des Drehrohrofens günstig, da dadurch sowohl die gesamte Altsandoberfläche

- für die thermische Energie zugänglich gemacht würde als auch ein Transport des Altsandes/Regenerates im Regenerierungsaggregat realisiert werden könnte.
- b) Die Verwendung von induktiv erwärmten Metallkörpern (z. B. Kugeln), die die Wärme in den Altsand eintragen und neben der thermischen Regenerierung auch eine Zerkleinerungswirkung für ggf. im Altsand vorliegende Knollen haben.
 - c) Zu beachten wäre bei Pkt. b) aber auch die denkbare Kornschädigung durch zu starke mechanische Beanspruchung des Altsandes, was die Untersuchung alternativer Materialien für diese Körper, z. B. Hybridbauweisen aus metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen sinnvoll macht.
 - d) In allen Fällen wäre es sinnvoll, eine Vorwärmung des zu regenerierenden Altsandes durch die Nutzung von Abwärme aus dem Gießereiprozess (insbesondere aus dem Bereich Schmelzbetrieb) der eigentlichen Regenerierung vorzuschalten.

Die Strategie zur Vermeidung von Emissionen schließt heute auch alle Aspekte zur Entkarbonisierung der Schmelzbetriebe in der Gießerei-Industrie ein. In deutschen Eisen- und Stahlgießereien werden heute zwar noch rund 50 % der gesamten Produktion in mit Koks befeuerten Kupolöfen erschmolzen, praxiserprobte Elektroschmelzbetriebe sind jedoch weit entwickelt und ihre vollständige Einführung ist zeitlich im Wesentlichen nur noch an die wirtschaftlich sinnvollen Investitionszyklen der Betriebe gekoppelt. Technisch ist ein Schmelzbetrieb in Eisen- und Stahlgießereien mit ausschließlich elektrischen Induktions- oder Lichtbogenöfen kein Problem.

Das karbonfreie Schmelzen von Al-Legierungen hingegen erfordert noch wesentliche Entwicklungsanstrengungen, um die heutigen energieeffizienten Gasbrenner gegen elektrische Beheizungen austauschen zu können. Das heutige Schmelzen in großen Herd- oder Schachtöfen mit einer Schmelzleistung von 500 bis 2.000 kg/h mit heißen Abgasen sollte aus wirtschaftlichen und technischen Gründen möglichst beibehalten werden. Somit ist der Einsatz von Plasmabrennern als Substitution der heutigen Gasbrenner eine realistische, aber noch zu entwickelnde Technologie, bei der der heiße Gasstrom zur Erhitzung des Metalls im Schachtofen durch den Plasmabrenner rein elektrisch erfolgt.



Abb. 5: Induktionsofen
Quelle: OTTOJUNKER GmbH

In einem kontinuierlichen Schmelzprozess wird so mit einem oder auch mehreren dieser Schmelzaggregate die Metallversorgung für die gesamte Gießerei zur Verfügung gestellt. An den einzelnen Gießmaschinen werden kleinere Mengen in Warmhalteöfen gespeichert. Eine Substitution der fossil beheizten zentralen Schmelzaggregate bei glei-

cher Schmelzleistung und Schmelzequalität durch elektrisches Schmelzen ist alternativ zum Plasmabrenner auch mit dem Konzept des portionierten Schmelzens möglich. Bei dem Konzept des portionierten Schmelzens wird das Metall nicht mehr in einer zentralen Schmelzerei in großen Aggregaten erschmolzen, sondern portioniert unmittelbar vor dem Vergießen in die Gießform induktiv aufgeschmolzen. Da die Schmelze unmittelbar nach Erreichen der gewünschten Überhitzungstemperatur vergossen wird, kann das Schmelzen und Warmhalten von großen Metallmengen bei diesem Konzept entfallen und es können dadurch zusätzlich Energieverluste vermindert werden. Zur Umsetzung dieses Konzeptes ist eine Forschungstätigkeit sowohl hinsichtlich Prozesstechnik und Schmelztechnik erforderlich. Zur wirtschaftlichen Fertigung muss das Schmelzen im Gießtakt der Maschine erfolgen, wodurch eine entsprechend kurze Schmelzzeit zu erreichen ist. Üblicherweise wird vor dem Vergießen von Aluminiumschmelzen eine Entgasungsbehandlung durchgeführt, um den qualitätsmindernden Wasserstoffgehalt in der Schmelze zu reduzieren sowie chemische Präparate zur Verbesserung des Erstarrungsverhaltens und der mechanischen Eigenschaften zugeben. Die Entgasungsbehandlungen für übliche große Schmelzemengen werden mit Impellersystemen durchgeführt und dauern ca. 7 bis 12 Minuten. Für das Konzept des portionierten Schmelzens ist eine solche Reinigungstechnik aus zeitlichen und prozesstechnischen Gründen jedoch nicht möglich. Somit entsteht Forschungsbedarf zur Entwicklung einer Schmelzebehandlungs- und Reinigungstechnologie für das elektrisch portionierte Schmelzen kleiner Mengen. Einen möglichen Ansatz bietet das induktive Schmelzen in geschlossenen Tieglern unter vermindertem Druck, da die Wasserstofflöslichkeit in Aluminium druckabhängig ist.

Erhöhung der Energie- und Materialeffizienz



Abb. 6: Die ursprüngliche Gießtechnik für das Zahnrad sieht 5 Speiser pro Teil vor (linkes Bild), mit optimierter Gießtechnik sind nur noch 2 Speiser pro Teil nötig (rechtes Bild).

Quellen: Heidelberg Manufacturing Deutschland GmbH

Bei diesem Punkt spielt neben dem Schmelzen des Metalls und aller hier noch möglichen Effizienzsteigerungen insbesondere die Auslegung der Anschnitt- und Speisersysteme für die Gussteile, also des Kreislaufanteils eine entscheidende Rolle. Kann

das Anschnitt- und Speisungssystem eines Gussteils von z. B. 50 % nur um 10 % verkleinert werden, wird auch 10 % weniger Energie zum Schmelzen benötigt. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Wärmebehandlung der Gussstücke. Heute wird für die Wärmebehandlung der Gussstücke häufig die gleiche Energie wie für den gesamten Schmelzprozess benötigt. Ziel muss es zukünftig sein, Gussteile möglichst ohne Wärmebehandlung direkt im Gusszustand einzusetzen. Die Abkühlung der Gussstücke nach der Erstarrung rückt hierbei ins Rampenlicht und muss reproduzierbar und steuerbar sein. Bei Eisenguss ist dies sicherlich schon am weitesten fortgeschritten, „as cast“ ist Stand der Technik, aber auch bei Aluminiumgussteilen sind erste Erfolge mit selbstaushärtenden Legierungen in der Wissenschaft sichtbar. Gelingt diese Werkstoffentwicklung, sind Energieeffizienzsteigerungen in Größenordnungen von 50 % realistisch!

Entwicklung von Leichtbauteilen

Hierzu sei gleich zu Beginn der Ausführungen betont, dass Leichtbau nicht mit der Verwendung von Leichtmetallen gleichgesetzt werden darf. Die Lösung beim Leichtbau liegt in der konstruktiven Auslegung der Bauteile, so dass die Lasten aufgenommen werden können, aber auch nur so viel Werkstoff wie notwendig eingesetzt wird. Dabei ist vielmehr ein Umdenken bei der Bauteilkonstruktion gefordert als nur die stupide Verwendung von energieintensiv hergestellten Leichtmetallwerkstoffen. Die Adaption von Konstruktionen der Natur ist hierbei

ein nahezu unerschöpflicher Ideengeber. Es gelingt somit, das Fertiggewicht der Bauteile und damit natürlich auch die benötigten Metallmengen und somit den Energieeinsatz zum Schmelzen deutlich zu reduzieren. Hinzu kommt noch die teilweise deutlich höhere Einsparung an Betriebsenergie solcher Leichtbauteile. Am prägnantesten wird dies im modernen PKW-Bau sichtbar. Gerade in diesem Bereich ist Leichtbau nicht mit der Verwendung von Leichtmetall gleichzusetzen.



Abb. 7: Waage Bionisches Schwenklager
Quelle: Georg Fischer Automotive GmbH

Entwicklungstendenzen im Bereich der Stahlherstellung und anderer metallurgischer Prozesse

Prof. Dr.-Ing. O. Volkova (Direktorin des Instituts für Eisen- und Stahltechnologie (IEST)),
Dr.-Ing. Tobias Dubberstein (Wissenschaftlicher Mitarbeiter am IEST)

Kurzfassung

Im Sinne des Zentrums für effiziente Hochtemperaturstoffwandlung (ZeHS) sollen Schritte in Richtung einer CO₂ freien Stahlherstellung und der Effizienzsteigerung von Hochtemperaturprozessen der Metallurgie aufgezeigt werden. Die Situation der Rohstahlherstellung in Deutschland ist durch ein Verhältnis von etwa 70 % zu 30 % von Primär- zu Sekundärerzeugung charakterisiert. Bei den vorhandenen Prozessen werden Optimierungspotentiale untersucht, wobei mit CO₂ Abscheidung und Lagerung (CCS, engl. carbon capture and storage) als auch mit Direktreduktionsverfahren (Midrex) neue Forschungsfelder vorhanden sind. Als zielführend für die Stahlmetallurgie des 21. Jahrhunderts werden Elektrolyseverfahren zur quasi CO₂ freien Eisenerzreduktion angestrebt. Die Industrie 4.0 verknüpft die realen technischen Prozesse virtuell miteinander, sodass ein noch höherer Automatisierungsgrad erreicht werden kann. Für Stahlbauteile mit hoher geometrischer Komplexität stellen 3D-Druckverfahren neuartige Fertigungsverfahren dar. Es wird nachfolgend die Situation der Stahlindustrie am Beispiel Deutschlands dargestellt, und es werden zukünftige und für die Stahlmetallurgie sinnvolle Themenschwerpunkte aufgezeigt.

Einleitung

Stahl stellt mit Abstand den am meisten verwendeten metallischen Werkstoff des 21. Jahrhunderts dar. Mit spezifischen einzustellenden Eigenschaften wie bspw. Korrosionsbeständigkeit, Umformbarkeit, Festigkeit, Plastizitätsvermögen, u.a. ist er universell einsetzbar. So wird der Stahl für Getriebekomponenten in modernen Windkraftträgern aber auch für Druckbehälter in den konventionellen Kernreaktoren benötigt und verwendet. Für Infrastrukturprojekte wie Brückenbau, Kraftwerksbau, etc. ist der Einsatz von Stahl geboten und kann im Rahmen einer Kosten-Leistungs-Nutzen-Analyse oftmals nicht durch andere Legierungen oder Verbundwerkstoffe ersetzt werden. Im Jahr 2015 wurden ca. 1,6 Milliarden Tonnen Rohstahl weltweit erzeugt, wobei allein in China etwa 800 Millionen Tonnen Rohstahl metallurgisch erschmolzen wurden. Innerhalb der Europäischen Union wurden ca. 166 Millionen Tonnen Rohstahl in 2015 gefertigt (Angaben aus Referenz Stahl und Eisen [1]). Nicht nur der Importdruck von Seiten asiatischer Stahlerzeuger in die Europäische Union als auch der selbstaufgelegte Emissionshandel innerhalb der EU sind zukünftige Herausforderungen für die stahlerzeugenden Industrien der teilnehmenden Staaten. Dieser Zertifikatehandel wird von Seiten des BDI (Bundesverband der Deutschen Industrie) und der WV Stahl (Wirtschaftsvereinigung Stahl) auf ca. 1 bis 2 Milliarden Euro Mehrbelastung für das Jahr 2020 für die deutsche Stahlindustrie angegeben [2,3]. Neben den politisch zu schaffenden Rahmenbedingungen ist auch ein hohes Maß an Forschung und

Entwicklung gegeben, um den mechanischen Anforderungen zu genügen wie auch kosteneffiziente Stahlgüten zu erzeugen. So kann der Einsatz von weiterentwickelten und hochfesten Legierungen in Automobilkarosserien gesteigert werden. Die damit verbundene Gewichtseinsparung der Karosserie ist zielführend in Richtung eines Automobilleichtbaus [4]. Neben den traditionellen Prozessen der Primärerzeugung über die Erzroute mittels eines integrierten Hüttenwerkes als auch der Sekundärerzeugung über die Schrottroute mittels eines Elektrostahlwerkes wird auch die Schmelzreduktion im 21. Jahrhundert an Bedeutung gewinnen. In den Weiterverarbeitungsstufen der Halbzeuge eröffnet sich mit dem dreidimensionalen Druckverfahren respektive der additiven Fertigung ein Prozess, welcher Stahlbauteile in äußerster Komplexität anwendungsnah herstellen lässt. Durch die digitale Revolution mit der Industrie 4.0 wird der Automatisierungs- und Digitalisierungsgrad auch innerhalb der Stahlindustrie zunehmen. Im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsarbeit wird die vollumfängliche Modellierung der metallurgischen Fertigungsschritte liegen. Dabei müssen die komplexen Hochtemperaturprozesse weiter erforscht werden.

Aktuelle Entwicklungstendenzen in der Stahlherstellung am Beispiel Deutschlands

Am Beispiel Deutschlands werden nachfolgend die beiden vorhandenen Erzeugungsrouten der Stahlmetallurgie dargestellt. In Deutschland wurden im Jahr 2015 ca. 42 Millionen Tonnen Rohstahl produziert. Davon wurden ca. 30 Millionen Tonnen Oxygenstahl (71 %) und ca. 12 Millionen Tonnen Elektrostahl (29 %) metallurgisch erschmolzen [5]. In den nachfolgenden Abbildungen sind die Luftaufnahmen eines integrierten Hüttenwerkes (Abb. 1) als auch eines Elektrostahlwerkes (Abb. 2) zu sehen. Das Hüttenwerk ist durch einen Flächenmehrerverbrauch gegenüber dem Ministahlwerk gekennzeichnet. So nimmt beispielsweise das Werk von JFE Steel in Chiba (Japan) eine Fläche von 8,32 Millionen Quadratmetern ein und erreicht einen Rohstahlausstoß von ca. 4 Millionen Jahrestonnen [6]. Ein Ministahlwerk wie die Elbestahlwerke Feralpi in Riesa nimmt eine Fläche von ca. 0,3 Millionen Quadratmetern bei einer Rohstahlproduktion von ca. 1 Million Jahrestonnen ein.

Innerhalb der Primärerzeugungsrouten werden aus den Grundeinsatzstoffen Eisenerz, Kalk und Kohle und weiteren Zuschlagstoffen verschiedene niedrig-, mittel-, und hochlegierte Stahlgüten erschmolzen. Dabei werden die Zuschlagstoffe über Sinter-



Abb. 1: Luftaufnahme eines integrierten Hüttenwerkes
Quelle: Dr. Hans-Peter Heller (IEST)



Abb. 2: Luftaufnahme eines Elektrostahlwerkes
Quelle: Dr. Hans-Peter Heller (IEST)

anlagen und/oder Pelletierungsanlagen vorbereitet. Mittels einer Kokerei wird aus Einsatzkohle Koks hergestellt. Innerhalb des Hochofens wird Eisenerz mit 1200 °C Heißwind und Kokszuschlägen und weiteren Reduktionsmitteln zu Roheisen reduziert. Moderne Hochöfen können dabei Arbeitsvolumina $> 6000 \text{ m}^3$ bei einem Ausstoß von mehr als 15.000 t Roheisen am Tag erreichen [7]. Innerhalb eines Stahlwerkes wird das Roheisen mit



Abb.3: Ansicht einer Direktreduktionsanlage
Quelle: Dr. Hans-Peter Heller (IEST)

Sauerstoff in einem Konvertergefäß gefrischt, um den Kohlenstoffgehalt des Roheisens abzusenken und Rohstahl zu erzeugen. Mit nachfolgenden sekundärmetallurgischen Behandlungszyklen, z. Bsp. Pfannenofen, RH-Anlage (Ruhrstahl-Heraeus), VD-Anlage (Vakuumentgasung) wird der Rohstahl in seine gewünschte chemische Zusammensetzung, der Gießtemperatur und des metallurgischen Reinheitsgrades gebracht. Über eine Stranggießanlage wird der behandelte flüssige Stahl kontinuierlich zu sogenannten Halbzeugen wie Brammen oder Dünnbrammen vergossen. Alle weiteren nicht metallurgischen Verfahrensschritte verlaufen über das Um- bzw. Urformen der Halbzeuge und die Oberflächenveredelung in Warm- und Kaltwalzwerken hinaus. Als Endprodukte können unter anderem verschiedene Blech- und Rohrgüten stehen. Der Nachteil an diesem Erzeugungsverfahren liegt an der Kontinuität der Prozesse und an einem enormen Aufwand an Logistik für die Absicherung mit den geforderten Mengen an Einsatzstoffen. Der Energieverbrauch liegt bei ca. $14,8 \text{ GJ/t}$ Rohstahl [8]. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Substitution des Hochofens durch einen kostengünstigen Schachtofen, wobei mittels Erdgas als Reduktionsträger des Eisenerzes „Direct Reduced Iron“ DRI (direkt reduziertes Eisen) erzeugt wird. Ein bekanntes Verfahren ist das Midrex Verfahren, welches unter anderem bei ArcelorMittal Hamburg zum Einsatz kommt (Abb. 3). Das DRI wird anschließend zusammen mit Schrott im Elektrolichtbogenofen zu Rohstahl erschmolzen. Der Vorteil basiert hierbei in der Reduzierung der CO_2 Ausstöße je Tonne Rohstahl um ca. 40 % gegenüber dem Hochofen durch den Einsatz von Erdgas als Reduktionsgas. Unter Berücksichtigung der Energieverbräuche für die DRI Erzeugung und dem Einsatz im Lichtbogenofen ergibt sich eine Energiebilanz für die Rohstahlerzeugung in der Größenordnung der Hochofenroute [9]. Bei der sekundären Prozessroute wird aus Stahlschrott Rohstahl erschmolzen. Der Stahlschrott wird in einem Elektrolichtbogenofen mittels elektrischer und chemischer Energie aufgeschmolzen und durch Schlackenarbeit werden Stahlschädlinge wie Phosphor entfernt. Dabei kann der Lichtbogenofen eine Schmelzkapazität bis 400 t aufweisen. Der Rohstahl wird wie bei der Erzeugungsrouten in der Sekundärmetallurgie veredelt und kann über das kontinuierliche Stranggießverfahren oder den Blockguss vergossen werden. Dabei reicht das Produktionsspektrum von niedrig- bis hochlegierten Stählen als auch speziellen Edelstählen. Der eindeutige

Vorteil der Elektrostahlerzeugungsrouten steht in seinem diskontinuierlichen Verfahren, d.h. last- und versorgerabhängig kann der Lichtbogenofen bei Bedarf abgestellt und wieder angefahren werden. Des Weiteren liegt der Energieverbrauch des Lichtbogenofens bei nur ca. 7,3 GJ/t Rohstahl und kann somit zu einer beachtlichen Reduzierung von Energieträgern beitragen [10]. Im Sinne der Zunahme an erneuerbaren Energieträgern und der Reduzierung von Emissionen wird die flexible Lichtbogenofenroute weiter an Bedeutung gewinnen.

Neue Prozessentwicklungen in der Stahlmetallurgie des 21. Jahrhunderts

Aufgrund der zunehmenden gesetzlichen Beschränkungen der Industrieemissionen und auch des Gegenwirkens gegenüber eventuellen Klimawandlungsphänomenen durch CO₂ Emissionen wird die kohlenstoffträgerarme bzw. kohlenstofffreie Reduktion von Eisenerzen in den weiteren Mittelpunkt rücken. Bereits in den 1960er Jahren sind Ideen aufgetreten, um mittels der Hochtemperatur-Schmelzfluss-Elektrolyse, der Tieftemperatur-Schmelzfluss-Elektrolyse und der Wasserstoffelektrolyse flüssiges Eisen bzw. Eisenschwamm zu erzeugen [11], S. 32. Für die Primärerzeugung von Aluminium wird die Elektrolyse bereits als einziges Prozessverfahren weltweit eingesetzt. Der Energieverbrauch für die Tonne Rohstahl wird auf 10 bis 16 GJ angegeben [12], S. 39. Im Zusammenhang mit der Bereitstellung erneuerbarer Energien kann die CO₂ freie Stahlherstellung erreichbar werden. In einem Industriekonsortium ULCOS „Ultra-Low Carbon Dioxide“ wird an Technologien für eine CO₂ senkende Stahlerzeugung innerhalb der Europäischen Union geforscht [13]. Bestandteile dieses Großprojektes sind ein Hochofenverfahren mit Gichtgasrückführung, die Elektrolyse und CCS „Carbon Capture and Storage“ (CO₂ Abscheidung und Lagerung). Aufgrund massiver Bedenken und Einwände der Bevölkerung ruht der Einsatz des Abscheidungsverfahrens in Deutschland [14], S. 36. In der Zusammenfassung kann als Technologiesprung nur eine intensive Forschung und Entwicklung von Prozessen wie die der Hochtemperatur-Schmelzfluss-Elektrolyse zur Eisengewinnung im Rahmen des ZeHS stehen, um den Weg in eine gewissermaßen CO₂ freie Stahlerzeugung zu verfolgen.

Industrie 4.0

In Deutschland wird derzeit von der vierten industriellen Revolution unter dem Synonym Industrie 4.0 gesprochen. Nach der Mechanisierung, der Elektrifizierung und der Prozessautomation stehen jetzt die Verknüpfung der Prozesse bzw. Objekte und die digitale Vernetzung der Industrie im Vordergrund. Auch in der Stahlindustrie werden zu implementierende Standards und IT-Architekturen diskutiert. Für die Stahlerzeugung bedeutet dies die visuelle Darstellung aller Hochtemperaturprozesse unter dem Begriff des Cyber-Physikalischen Systems und damit der Ausblick auf eine weiterführende Automatisierung [15]. Durch die Analyse der anfallenden Datenmengen ist man bereits in der Lage, Schmelz- und Walzprozesse dynamisch zu steuern, um auftretende Qualitätsmängel abzustellen. Über ein mobiles Computing verschmelzen die Bereiche der 3D Visualisierung, der Instandsetzung und der Datenabrufbarkeit

miteinander. Die Prozesse können optimal gesteuert und optimiert werden. Innerhalb der Automatisierungspyramide muss es zu einem gesamten Datenaustausch kommen. In diesem Zusammenhang wird von horizontaler Integration, Engineering, vertikaler Integration und der Verknüpfung mit der Wertschöpfungskette Mensch gesprochen [16]. Auch innerhalb der Erforschung von Hochtemperaturprozessen muss die weitere Anbindung an vorhandene IT-Schnittstellen Berücksichtigung finden.

Stahlzerstäubungsprozesse als Sonderverfahren

Mit den weitergehenden Entwicklungen der Sonderverfahren der Stahlerzeugung respektive der Stahlpulvererzeugung ist man in der Lage, Pulver für additive Fertigungsverfahren mit definierten Eigenschaften bereitzustellen. Zu den Eigenschaften der Pulver (Abb. 4) zählen unter anderem die Oberflächenmorphologie, der Partikeldurchmesser, die Größenverteilung der Pulver und die chemische Homogenität. Für den industriellen Fertigungsmaßstab von metallischen Pulvern wie beispielsweise Titan, Eisenbasislegierungen, Refraktär Metalle, Kobalt-Chrom haben sich das EIGA (engl. electrode inert gas atomization) als auch das VIGA (engl. vacuum inert gas atomization) Verfahren durchgesetzt. Die additiven Fertigungsverfahren von metallischen Pulvern wie SLM (engl. selective laser melting) und EBM (engl. electron beam melting) stellen unterschiedliche Anforderungen an die Pulvergröße dar. Aufgrund der unterschiedlichen Strahlbreite bei Laser und Elektronstrahlen wird bei SLM ein mittlerer Partikeldurchmesser von 30 bis 50 μm und bei EBM von 80 bis 100 μm gefordert [17]. Die additiven Fertigungsverfahren werden kontrovers diskutiert und ihr industrieller ganzheitlicher Einsatz ist bisher nicht gesichert. Allerdings zeigt sich auch, dass mit einer zunehmenden Bauteilkomplexität und Bauteilindividualität die Druckverfahren an Bedeutung gewinnen. Durch die Fertigung nach optimierten CAD Konstruktionen können aufwendige Weiterverarbeitungsschritte wie das Fräsen und Zerspanen von Massivbauteilen entfallen und zu erheblichen Gewichts- und Kostenersparnissen führen [18]. Der Wegfall von Fertigungsschritten kann somit im Sinne der Energie- und Emissionseinsparungen innerhalb der Industrienationen zielführend sein. Für das „fast und rapid-prototyping“ ist nach Aussage von G. Ludkovsky das dreidimensionale Druckverfahren von Stählen für zukünftige Anwendungen zielführend [19]. Innerhalb einer ersten Prototypenanwendung erfolgt das robotergesteuerte Drucken mittels Stahlpulvern einer Brücke in Amsterdam [20]. Für die Prozessführung und die Fertigung von Metall-Matrix-Verbundwerkstoffen über Druckverfahren ist bekannt, dass spezielle Sinterhilfsmittel notwendig sind, um die Oberflächengüte des Endproduktes zu erhöhen [21]. Auch für die Verbesserung der Oberflächengüte von reinen keramischen Partikeln können heterogen verteilte Pulver zum Einsatz kommen [22]. Seit der Einrichtung eines Sonderforschungsbereiches (SFB 799) in Freiberg existiert eine Vakuuminertgasverdüsungsanlage für die Herstellung metallischer Pulver am Institut für Eisen- und Stahltechnologie. Diese Anlage wird insbesondere für die Fertigung von hochlegierten Chrom-Mangan-Nickel Stahlpulvern eingesetzt. Die Pulver dienen als Grundlage für die Fertigung von Metall-Matrix-Verbundwerkstoffen bestehend aus Stahl und Keramikmatrix. Als Sinterverfahren werden

z. Bsp. Spark Plasma Sintern oder das Heiß Isostatische Pressen verwendet. Die schmelztechnische Erzeugung des metallischen Ausgangsmaterials erfolgt über einen Vakuuminduktionsofen, womit unter Einsatz von Eisenbasislegierungen und Reinstlegierungselementen (Chrom, Mangan, Nickel, etc.) die geforderten Edelstahlgüten metallurgisch erzeugt werden (Abb. 5). Anschließend werden diese Stahlgusslegierungen bei ca. 1600 °C

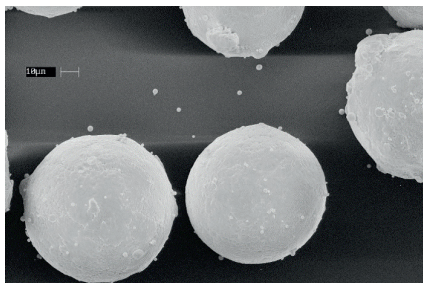


Abb.4: Hochlegiertes Cr-Mn-Ni Stahlpulver
Quelle: LEO Elektronenmikroskop, Eigenaufnahme (IEST)

hochenergetisch mit einer Verdüngsanlage zerstäubt (Abb. 6). Über einen Mittelfrequenzgenerator wird der Stahl mit etwa 30 kW induktiv aufgeschmolzen. Durch eine zentrische Bohrung innerhalb eines Al_2O_3 Tiegels tritt der flüssige Metallstrahl aus dem Auslaufstein heraus und wird beschleunigt. Die Einleitung der Gasphase als Zerstäubergas erfolgt mit einer Ringspaldüse. Es kommt zur Wechselwirkung der flüssigen Hochtemperaturstahlphase und dem Gasstrahl. Dabei werden feine Ligamente und Tropfen gebildet, welche durch den Abkühlprozess erstarren. Im begrenzten Maße kann durch anlagentechnische Modifikationen wie Druckerhöhung, Überhitzungsregime und Gasvorheizung Einfluss auf die Partikelgröße der Pulver genommen werden, wobei es zu beachtlichen Investitionen in die Anlagen kommen kann [23]. Wesentlich interessantere Ansätze, welche bei den hochlegierten Stählen verfolgt werden, sind die Einflussnahme der Hochtemperatureigenschaften der flüssigen Stahlschmelze auf den Strahlzerfall. Dabei werden die Eigenschaften wie die Dichte, die Oberflächenspannung und die Viskosität gezielt beeinflusst, um die für die weitere Anwendung geeigneten Pulver zu erzeugen [24,25]. Die Lage der Partikelverteilungsfunktion kann dadurch zu kleineren Partikelgrößen verschoben werden und die effektive Pulverausnutzung wird gesteigert. Im Sinne der additiven Fertigungsverfahren des Laser und Elektronenstrahlschmelzens muss dieser Wechselwirkungseffekt zwischen den Hochtemperatureigenschaften der Legierungen weiterer Bestandteil von Untersuchungen sein.



Abb.5: Vakuuminduktionsschmelzofen am IEST
Quelle: VIGA, Eigenaufnahme (IEST)

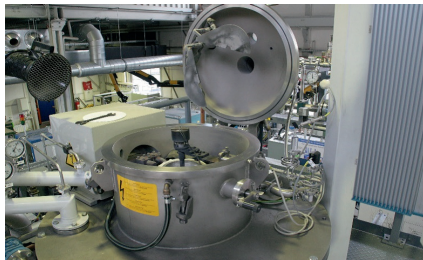


Abb.5: Vakuuminertgasverdüngsanlage am IEST
Quelle: VIGA, Eigenaufnahme (IEST)

Referenzen

- [1] Rohstahlerzeugung, Stahl Eisen. 136 (2016) 67.
- [2] EU-Emissionshandelssystem 2013-2020, BDI - Bundesverband der Deutschen Industrie, Berlin, 2008.
- [3] M. Böhmer, M. Hoch, Volkswirtschaftliche Folgen einer Schwächung der Stahlindustrie in Deutschland, Wirtschaftsvereinigung Stahl, Freiburg, 2016.
- [4] D. Anderson, Strong future for steel in the automotive industry, Stahl Eisen. 135 (2015) 126–132.
- [5] Rohstahlerzeugung, Stahl Eisen. 136 (2016) 95.
- [6] East Japan Works, JFE Steel, (2003).
- [7] H.B. Lüngen, M. Peters, P. Schmöle, Ironmaking in Western Europe - Status quo and future trends, Stahl Eisen. 135 (2015) 168–174.
- [8] A. Hasanbeigi, L. Price, N. Aden, Z. Chunxia, L. Xiuping, S. Fangqin, A Comparison of Iron and Steel Production Energy Use and Energy Intensity in China and the U.S., Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, 2011.
- [9] L. Price, D. Phylipsen, E. Worrell, Energy Use and Carbon Dioxide Emissions in the Steel Sector in Key Developing Countries, University of California, Berkeley, 2001.
- [10] L. Horvath, Energy Use in the Steel Industry, (2013).
- [11] R. Schulten, G. Dibelius, W. Wenzel, Einführung: Über einige Probleme bei der Entwicklung eines Hochtemperaturreaktors zur Kohlevergasung. Elektrische Energie und Wärme aus Gasturbinenprozessen für Hochtemperaturreaktoren. Eisengewinnung mit Kernreaktorwärme. Über die Anwendung von Hochtemperaturkernreaktoren zur Kohlevergasung, VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 1968. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:1111-20121108650> (accessed April 21, 2016).
- [12] M. Weigel, Ganzheitliche Bewertung zukünftig verfügbarer primärer Stahlherstellungsverfahren Einschätzung der möglichen Rolle von Wasserstoff als Reduktionsmittel, Bergische Universität Wuppertal, 2014.
- [13] ULCOS, <http://www.ulcos.org/de/> (accessed April 21, 2016)
- [14] R. Herrenbrück, CCS in Deutschland, RWTH Aachen Univ. Inst. Für Polit. Wiss. (2015) 101.
- [15] P. Schmieding, Workshop zu Industrie 4.0 zeigt Projekte der digital-vernetzten Produktion in der Stahlindustrie, Stahl Eisen. 136 (2016) 80–82.
- [16] H. Peters, Industrie 4.0 in der Stahlindustrie aus Sicht der angewandten Forschung, Stahl Eisen. 136 (2016) 61–70.
- [17] A. Strondl, O. Lyckfeldt, H. Brodin, U. Ackelid, Characterization and Con-

trol of Powder Properties for Additive Manufacturing, JOM. 67 (2015) 549–554. doi:10.1007/s11837-015-1304-0.

[18] B.P. Conner, G.P. Manogharan, A.N. Martof, L.M. Rodomsky, C.M. Rodomsky, D.C. Jordan, et al., Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services, Inaug. Issue. 1–4 (2014) 64–76. doi:10.1016/j.addma.2014.08.005.

[19] G. Ludkovsky, We progressively pay more and more attention to the evolution of the carbon fibre composites, Stahl Eisen. 135 (2015) 106–108.

[20] MX3D, Robot is going to 3-D-print a steel bridge, Stahl Eisen. 135 (2015) 70–72.

[21] T. Do, C.S. Shin, D. Stetsko, G. VanConant, A. Vartanian, S. Pei, et al., Improving Structural Integrity with Boron-based Additives for 3D Printed 420 Stainless Steel, 43rd North Am. Manuf. Res. Conf. NAMRC 43 8-12 June 2015 UNC Charlotte N. C. U. S. 1 (2015) 263–272. doi:10.1016/j.promfg.2015.09.019.

[22] M. Lanzetta, E. Sachs, Improved surface finish in 3D printing using bimodal powder distribution, Rapid Prototyp. J. 9 (2003) 157–166. doi:10.1108/13552540310477463.

[23] J. Baecker, W. Graf, W. Kawaters, J. Poetschke, Production of metal powder by atomization of the melt with low-temperature liquid gas, Metall. 45 (1991) 764–771.

[24] T. Dubberstein, H.-P. Heller, O. Fabrichnaya, C.G. Aneziris, O. Volkova, Determination of Viscosity for Liquid Fe–Cr–Mn–Ni Alloys, Steel Res. Int. (2016). doi:10.1002/srin.201500470.

[25] T. Dubberstein, H.-P. Heller, Effect of Surface Tension on Gas Atomization of a CrMnNi Steel Alloy, Steel Res. Int. 84 (2013) 845–851. doi:10.1002/srin.201200321.

Virtualisierung von Hochtemperaturprozessen für neue, ressourcenschonende Technologien

Dr.-Ing. Andreas Richter (Abteilungsleiter CFD-Modellierung von Hochtemperatur-Prozessen (VIRTUH-CON)) und Prof. Dr.-Ing. Bernd Meyer (Direktor des Instituts für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen)

Der folgende Artikel basiert auf einem Beitrag veröffentlicht in der Zeitschrift **ACAMONTA 2015**

Modellierung von Hochtemperatur-Konversionsprozessen

Ob Mineralstoffe, Kunststoffe oder Metalle, nahezu sämtliche Basisprodukte des täglichen Lebens durchlaufen während ihrer Herstellung energieintensive Hochtemperatur-Konversionsprozesse. Diese Prozesse finden bei Temperaturen bis teilweise über 2000 °C und hohen Drücken bis ca. 60 bar statt und verursachen prozessbedingt hohe CO₂-Emissionen. Vor dem Hintergrund der Energiewende und den sich ändernden wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, beispielsweise bei den Rohstoff- und Energiepreisen, stellen sich neue technologische Herausforderungen. Einerseits werden neue, ressourcenschonendere Konversionstechnologien benötigt, andererseits müssen bestehende Technologien schneller als bisher weiterentwickelt werden, beispielsweise bezüglich höherer Anforderungen an die Toleranz gegenüber wechselnden Einsatzstoffen oder Lastflexibilität. Der zeit- und kostenaufwendige klassische Entwicklungsweg für neue Technologien, der normalerweise vom Labormaßstab über die Pilotanlage bis zur ersten Demonstrationsanlage verläuft, stößt hier an seine Grenzen.

Das Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen nutzt seit vielen Jahren verstärkt die numerische Simulation, um einzelne Schritte bei der Entwicklung neuer Hochtemperatur-Konversionsprozesse zu beschleunigen bzw. vollständig zu ersetzen. Solche Prozesse stellen eine besondere Herausforderung an die Modellierung dar, da hier komplexe Mehrphasenströmungen, multiple Stoffumwandlungsvorgänge, hohe Drücke und räumlich und zeitlich stark ändernde Stoffeigenschaften aufeinandertreffen. Die Hochtemperatur-/Hochdruckumgebung verhindert zudem oftmals den direkten experimentellen Zugang.

Ein wesentlicher Baustein bei der rechnergestützten Prozessentwicklung und -optimierung ist das Zentrum für Innovationskompetenz (ZIK) Virtuhcon (**Virtual High Temperature Conversion**). Seit dem Start 2009 entwickelt das Innovationszentrum fortschrittlichste und effizienteste Modellierungswerkzeuge, die die Basis für eine beschleunigte Technologieentwicklung bilden. Dabei profitiert das Zentrum entscheidend von der hervorragenden Infrastruktur des Forschungsstandortes. Erst durch modernste Laboranalysen der Einsatzstoffe können sämtliche Parameter der Rechenmodelle in der notwendigen Genauigkeit bereitgestellt werden. Die Möglichkeit, die Genauigkeit der Rechenmodelle durch Vergleichsmessungen an großskaligen, industrierelevanten Versuchsanlagen zu überprüfen, stellt ein besonderes Alleinstellungsmerkmal des Standorts dar.

Die Abb. 1 illustriert die Prozessentwicklung am Beispiel der Hochdruck-Partialoxidation von Erdgas, einem weitverbreiteten Verfahren zur Gewinnung von Synthesegas als chemischen Basisstoff. Der bestehende, reale Prozess (in der Regel im Labor- oder Pilotmaßstab) wird im Rechner virtuell abgebildet. Der Vergleich von Messdaten mit dem Rechenmodell garantiert dabei die Zuverlässigkeit der numerischen Ergebnisse. Dieses Modell dient als Grundlage für die systematische, virtuelle Erprobung neuer Konzepte. Der daraus resultierende optimale Prototyp wird anschließend experimentell überprüft und im letzten Schritt mithilfe der numerischen Simulation auf großtechnische Systeme übertragen. Im Ergebnis stehen optimierte und an den großtechnischen Maßstab angepasste Verfahren, deren Funktionalität umfassend virtuell abgesichert ist.

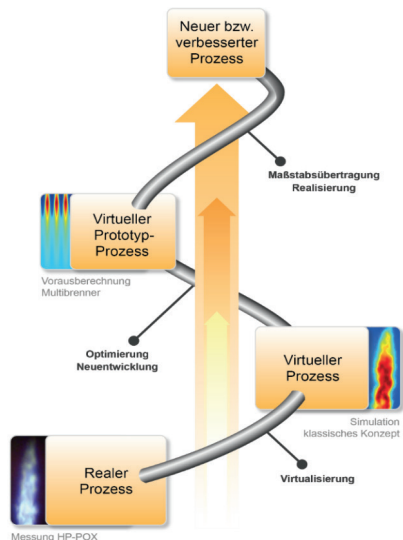


Abb. 1: Entwicklung neuer Technologien und die Übertragung in den Industriemaßstab am Beispiel der nichtkatalytischen Partialoxidation von Erdgas

Neue Ansätze für die Flugstromvergasung

Der Schwerpunkt der ersten, zwischenzeitlich erfolgreich abgeschlossenen Phase von Virtuhcon lag bei der Vergasung von Kohle und Biomasse in Flugstrom-Reaktoren sowie bei der Partialoxidation von Erdgas. Das Zentrum für Innovationskompetenz Virtuhcon hat dabei einen neuen Forschungsansatz verfolgt. Den Ausgangspunkt stellen detaillierte, rechnergestützte Untersuchungen der Stoffumwandlungsprozesse auf Mikroebene dar, wie beispielhaft in der Abb. 2 für die Kohlevergasung aufgezeigt. Die Erweiterung auf deutlich rechenintensivere 3D-Modelle erlaubt mittlerweile die

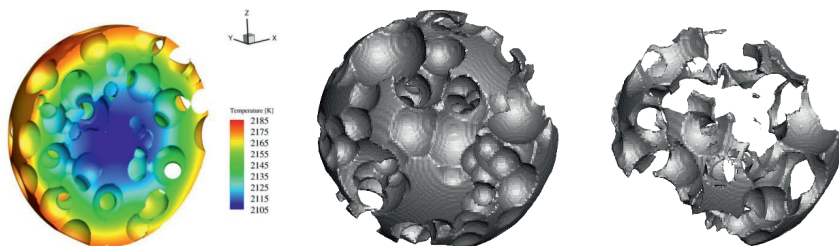


Abb.2: (links) Temperaturverteilung in einem Kokspartikel unter Vergasungsbedingungen; (Mitte) Entwicklung der Porenstruktur bei 1912 °C; (rechts) Porenentwicklung bei 1415 °C

Analyse des Stoff- und Wärmetransportes in das poröse Partikel (siehe Abb. 2, links), und die Berechnung der Porenentwicklung in verschiedenen Reaktionsregimen. Das gewonnene Grundlagenverständnis wurde in Teilmodelle bspw. zur Partikelauflösung, für die Pyrolyse oder für die Koksvergasung umgesetzt. Diese Teilmodelle liefern die Basis für fortschrittlichste Reaktorsimulationen. Dabei hat sich die Arbeit vor allem in den letzten Jahren auf industrielle Hochdrucksysteme konzentriert. Ein Beispiel hierfür sind die in der Abb. 3 dargestellten Berechnungen des Stoffumsatzes in einem Siemens-Flugstromvergaser bei 26 bar. Der Vergleich mit den Experimenten zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Daten.

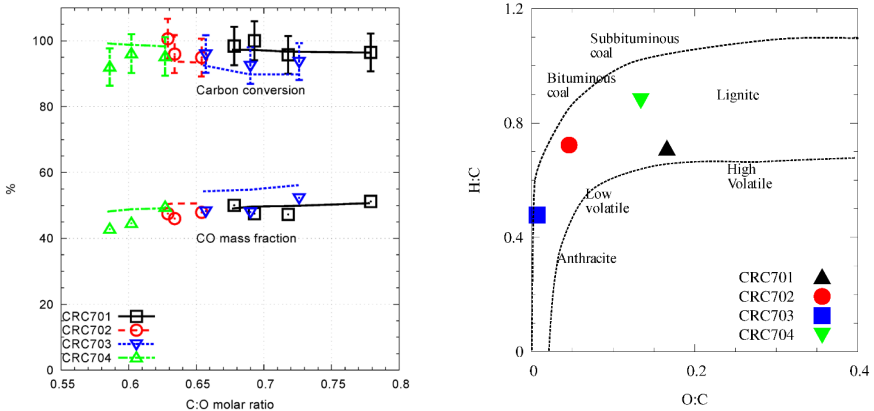


Abb. 3: Vergleich zwischen gemessenem und berechnetem Kohlenstoffumsatz in einem Flugstromvergaser der Siemens Fuel Gasification Technology GmbH & Co. KG. (links) Kohlenstoffumsatz für vier unterschiedliche Kohlen, (rechts) Übersicht über den Rang der einzelnen Kohlen.

Abbildungen übernommen aus Vascellari et al., Fuel 152, pp. 58–73, 2015.

Mithilfe dieses Ansatzes war es möglich, Rechenmodelle mit einer bis dahin nicht erreichten Genauigkeit zu erzeugen. Die konsequente Begleitung durch das Experiment von der Mikro- bis zur Makroskala garantiert dabei die Zuverlässigkeit der eingesetzten Modelle und Methoden. Mithilfe modernster Messtechnik können die Stoffeigenschaften für industrierelevante Bedingungen mehr oder weniger exakt erfasst werden. Beispiele hierfür sind die kinetische Messanlage KIVAN, eine Eigenentwicklung, in der bei Drücken bis 100 bar und Temperaturen bis 1200 °C Reaktionskinetiken ermittelt werden, oder eines der Hochtemperatur-Rotationsviskosimeter zur Bestimmung der Schlackeviskosität in vergasertypischen reduzierenden Gasatmosphären bis 1700 °C. Beide Systeme sind in der Abbildung 3 dargestellt. Die experimentellen Arbeiten bilden einerseits die Grundlage für die numerischen Untersuchungen auf Partikelebene, und andererseits sind sie die Basis für eine Validierung der Gesamtreaktormodelle.

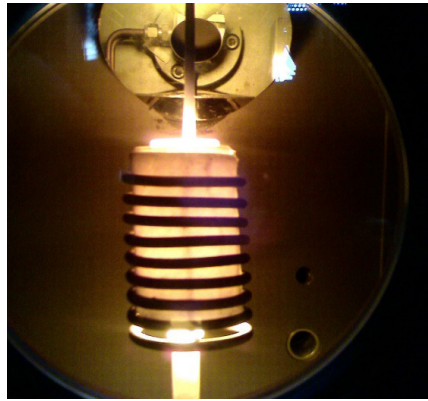
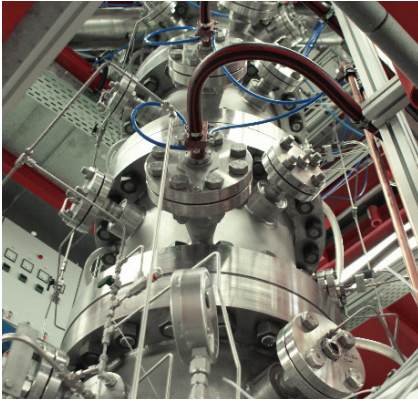


Abb. 4: (links) KIVAN-Reaktor zur Bestimmung von Hochdruck-Reaktionskinetiken; (rechts) Viskosimeter

Von der Flugstromvergasung zur Metallgewinnung

Zukünftig wird sich die Technologieentwicklung des Institutes für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen neben Flugstromverfahren verstärkt auf hochbeladene Partikelsysteme konzentrieren. Vor allem das ZIK Virtuhcon wird in den nächsten 5 Jahren seine Modellierungskompetenz auf weitere Hochtemperaturprozesse ausweiten. Dabei stehen hochbeladene Gas-Feststoff-Systeme in der Chemie und Metallurgie im Vordergrund. Hierzu zählen auf chemischer Seite vor allem die Vergasung von Kohle und Biomasse in Wirbelschicht- und Festbettreaktoren. Der Schwerpunkt in der Metallurgie liegt auf Recyclingprozessen, auf der Gewinnung von Nickel- und Kupferstein in Badschmelzöfen und auf der Röstung von Zinkkonzentraten in der Wirbelschicht. Die hier auftretenden komplexen Mehrphasenprozesse stellen eine nochmals erhöhte Anforderung an die Modellierung, die nur durch die in den letzten Jahren aufgebaute Virtualisierungskompetenz des Zentrums erfüllt werden kann. So können für unterschiedliche Teilprozesse bereits bestehende Modelle weiterverwendet bzw. adaptiert werden. Vor allem für die Beschreibung der Partikel-wechselwirkungen in hochbeladenen Systemen müssen aber neue Lösungsansätze und Modelle erarbeitet werden.



Abb. 5: Rerenzanlagen. (links) IsaSmelt-Anlage, INEMET; (Mitte) BGL-Schlackebadvergaser, IEC; (rechts) Coorved-Reaktor, IEC.

Ein Ergebnis der Forschung in den letzten Jahren war, dass nur durch die enge Verzahnung von Simulation und Experiment von der Mikroskale bis hin zum großtechnischen Versuch zuverlässige und vertrauenswürdige Rechenmodelle entwickelt werden konnten, die mittlerweile auch von den Partnern aus der Industrie akzeptiert werden. Aus diesem Grund konzentriert sich die Forschung des ZIK Virtuhcon zukünftig weiterhin auf Prozesse, für die die entsprechenden großskaligen Versuchsanlagen an der TU Bergakademie Freiberg vorhanden sind. Hierzu zählen die IsaSmelt-Anlage als ein repräsentatives Badschmelzverfahren des Institutes für Nichteisenmetallurgie und Reinstoffe (INEMET) und der Schlackebadvergaser sowie der Coorved-Reaktor am Institut für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (IEC), bei denen es sich um Festbett- bzw. Wirbelschichtsysteme zur Vergasung schwieriger kohlenstoffhaltiger Einsatzstoffe handelt. Die entsprechenden Anlagen sind in der Abb. 5 dargestellt.

Mit den daraus abgeleiteten und am großtechnischen Experiment validierten Rechenmodellen stehen in wenigen Jahren breit anwendbare Werkzeuge für die gezielte Entwicklung ressourcenschonender Technologien und Prozesse in Metallurgie und Chemie zur Verfügung.

Weiterführende Literatur

- K. Uebel, P. Rößger, U. Prüfert, A. Richter, B. Meyer, CFD-based multi-objective optimization of a quench reactor design, *Fuel Processing Technology* 149, 290–304, 2016.
- A. Richter, M. Vascellari, P.A. Nikrityuk, C. Hasse, Detailed analysis of reacting particles in an entrained-flow gasifier, *Fuel Processing Technology* 144, 95–108, 2016.
- S. Schulze, A. Richter, M. Vascellari, A. Gupta, B. Meyer, P.A. Nikrityuk, Novel intrinsic-based submodel for char particle gasification in entrained-flow gasifiers: Model development, validation and illustration, *Applied Energy* 164, 805–814, 2016.
- A. Richter, P. Seifert, F. Compart, P. Tischer, B. Meyer, A large-scale benchmark for the CFD modeling of non-catalytic reforming of natural gas based on the Freiberg test plant HP POX, *Fuel* 152, 110–121, 2015.
- P. A. Nikrityuk, B. Meyer, Editoren, *Gasification Processes: Modeling and Simulation*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2014.
- A. Richter, P. A. Nikrityuk, B. Meyer, Three-dimensional calculation of a chemically reacting porous particle moving in a hot O_2/CO_2 atmosphere. *Int. J. Heat and Mass Transfer* 83, 244–258, 2015.
- A. Richter, P. A. Nikrityuk, M. Kestel, Numerical investigation of a chemically reacting carbon particle moving in a hot O_2/CO_2 atmosphere. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 52, 5815–5824, 2013.
- S. Schulze, M. Kestel, P. A. Nikrityuk, D. Safronov, From detailed description of chemical reacting carbon particles to subgrid models for CFD. *Oil & Gas Science*

- and Technology 68, 1007–1026, 2013.
- M. Vascellari, D. G. Roberts, S. S. Hla, D. J. Harris, C. Hasse, From laboratory-scale experiments to industrial-scale CFD simulations of entrained flow coal gasification, *Fuel* 152, 58–73, 2015.
 - M. Vascellari, H. Xu, S. Hartl, F. Hunger, C. Hasse, Flamelet/progress variable modeling of partial oxidation systems: From laboratory flames to pilot-scale reactors, *Chemical Engineering Science* 134, 694–707, 2015.
 - D. Dietzel, D. Messig, F. Piscaglia, A. Montorfano, G. Olenik, O. T. Stein, A. Kronenburg, A. Onorati, C. Hasse, Evaluation of scale resolving turbulence generation methods for Large Eddy Simulation of turbulent flows, *Computers & Fluids* 93, 116–128, 2014.
 - E. Komarova, S. Guhl, B. Meyer, Brown coal char CO₂-gasification kinetics with respect to the char structure. Part I: Char structure development, *Fuel* 152, 38–47, 2015.
 - M. A. Duchesne, A. M. Bronsch, R. W. Hughes, P. J. Masset, Slag viscosity modeling toolbox, *Fuel* 114, 38–43, 2013.
 - L. Zhang, C. Schmetterer, P. J. Masset, Thermodynamic description of the M₂O–SiO₂ (M = K, Na) systems, *Computational Materials Science* 66, 20–27, 2013.

Feuerfeste Verbundwerkstoffe für Hochtemperaturanwendungen

Prof. Dr.-Ing. habil. Christos G. Aneziris (Professur für Keramik),

Dr.-Ing. Nora Brachhold (Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Keramik, Glas- und Baustofftechnik)

Einleitung

Feuerfeste Werkstoffe stellen Schlüsselwerkstoffe für die heutige Gesellschaft dar, da sie für die Herstellung von Metallen, insbesondere Stahl, Glas und Zement und die Erzeugung von Energie unabdingbar sind. Die weitere Bedeutungszunahme der Gruppe der feuerfesten Werkstoffe lässt sich anhand der erwarteten Entwicklung der Stahlherstellung zeigen, da mehr als 65 % in der Eisen- und Stahlindustrie verbraucht werden. 2014 wurden 1,67 Mrd. t Stahl produziert. Bis 2050 wird die 1,5-fache Menge erwartet.

Zahlreiche aktuelle Entwicklungen begründen neue Anforderungen an Hochtemperaturwerkstoffe. So hat sich im Bereich Stahl die Vielfalt der nachgefragten und angebotenen Stahlqualitäten stark vergrößert, um maßgeschneiderte Produkte für spezifische Anwendungen anbieten zu können. Das führt zu einem starken Anstieg der Sekundärmetallurgie, die in der Behandlungspfanne durchgeführt wird, um hoch qualitative Stähle herzustellen. Verbunden mit dieser Technologie ist das Auftreten stark aggressiver Schlacken, welche die Lebensdauer des Feuerfestmaterials bestimmen. Des Weiteren rückt zunehmend in den Fokus, inwiefern Kontaminationen in Metallen im Sinne von exogenen Einschlüssen und in-situ gebildeten Einschlüssen oder durch aufgenommenen Kohlenstoff vermieden werden können. Daher ist die Forschung zur Filtration von Metallschmelzen ein wichtiger Forschungsbereich. Es werden Anstrengungen unternommen, konventionelle kohlenstoffgebundene Feuerfestwerkstoffe weiterzuentwickeln, um die sog. „Clean-Steel-Technologie“ zu etablieren und die Kohlenstoffaufnahme durch Stahlschmelzen möglichst zu vermeiden. Im Sinne der Optimierung und Verbesserung der Eigenschaften von Hochtemperaturmaterialien wird ebenfalls der Ansatz von refraktären Verbundwerkstoffen verfolgt, der die Kombination unterschiedlicher Materialien und ihrer Eigenschaften ermöglicht. Für qualitativ hochwertige Produkte spielt die Formgebungstechnologie eine wichtige Rolle. Hier ist eine hohe Reproduzierbarkeit der Produkteigenschaften bei geringer Schwankungsbreite von hoher Bedeutung, um eine lange Nutzungsdauer eines Bauteils zu gewährleisten. Die Überführung technologischer Verfahren aus benachbarten Werkstoffbereichen in den Bereich der Feuerfestwerkstoffe, die eine kostengünstige und automatisierbare Produktion ermöglichen, bewirkt wichtige Innovationsschübe im Feuerfestbereich.

Derartige Entwicklungstendenzen stehen gleichzeitig im Einklang mit der zunehmenden Bedeutung von Themen wie Ressourceneffizienz, Nachhaltigkeit und Umweltfreundlichkeit. Beispielsweise ist die Stahlindustrie bestrebt thermische Energieverluste zu minimieren. Ein Temperaturverlust von 1 K führt zu zusätzlichen Kosten von 5 cent pro Tonne Stahl. Außerdem ist 2016 die REACH-Verordnung der Europäischen Union (EU) in Kraft getreten, die den Umgang mit chemischen Stoffen im

Bereich der EU regelt. Diese Regelungen sind insofern von Bedeutung, als sie die für die Herstellung feuerfester Werkstoffe eingesetzten Rohstoffe und die bei der Herstellung freigesetzten Emissionen betreffen. Insbesondere sind dabei die Bindemittel bzw. Kohlenstoffträger, wie Teere, Peche und Kunstharze zu betrachten, die schädliche Emissionen verursachen. Gleichzeitig ist die Reduktion von Kohlenstoffkomponenten in Feuerfestwerkstoffen mit einer Verringerung der Kohlenstoffdioxid-Freisetzung während der Herstellung und im Einsatz verbunden.

Im Folgenden werden einige Ansätze vorgestellt, die sowohl werkstofftechnische als auch technologische Innovationen darstellen und aktuell den Bereich der Hochtemperaturwerkstoffe weiterentwickeln.

Neue Filter für die Metallschmelzefiltration

Nichtmetallische Einschlüsse stellen in metallischen Gussstücken einen bedeutenden Einflussfaktor in Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften des Metalls, wie z.B. Bruchzähigkeit, Zugfestigkeit und Ermüdungsverhalten, dar. Solche Einschlüsse sind beispielsweise Desoxidationsprodukte aus dem Herstellungsprozess, aber auch aus- geschiedene Carbide, Nitride und Sulfide. Die Entfernung derartiger Einschlüsse aus der metallischen Schmelze erfolgt vor dem Abguss üblicherweise durch keramische Filter, die Porengrößen im Bereich von 10 ppi (pores per inch) für Stahlschmelzen und 30 ppi für Aluminiumschmelzen aufweisen. Besonders hohe Anforderungen werden an diese Funktionsbauteile bezüglich der Thermoschockbeständigkeit gestellt, da sie ohne Vorwärmung mit der flüssigen Schmelze beaufschlagt werden. Vor allem kohlenstoffgebundene Filterkomponenten stellen hier eine technologische Verbesserung dar. Diese weisen aufgrund ihres Kohlenstoffgehaltes eine verhältnismäßig hohe Wärmeleitfähigkeit auf und zeigen dadurch exzellente Thermoschockeigenschaften, d.h. einen hohen Widerstand gegen plötzliche, lokal sehr unterschiedliche Temperaturgradienten [Emm2012].

Um höhere Filtrationseffizienzen zu erreichen, wurde aufbauend auf den thermodynamischen Grundlagen von Janiszewski und Kudlinski [Jan06] durch Aneziris et al. vorgeschlagen, die Filteroberfläche durch Beschichtungen zu funktionalisieren [Ane2012a, Ane2012b]. Dieser Ansatz wird grundlegend im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 920 der Deutschen Forschungsgemeinschaft an der TU Bergakademie Freiberg „Multifunktionale Filter für die Metallschmelzefiltration – Ein Beitrag zu Zero-Defect Materials“ erforscht. Das Konzept der „aktiven“ Beschichtung schlägt vor, die Filteroberfläche mit einer Beschichtung derselben Chemie wie die zu entfernenden Einschlüsse zu versehen. Diese Herangehensweise wurde bereits intensiv im Hinblick auf Aluminiumoxid-Einschlüsse in Stahlschmelzen untersucht, da diese aufgrund der Desoxidation der Schmelzen mit Aluminium von besonderer Bedeutung sind. Hervorzuheben sind bei diesen Untersuchungen kohlenstoffgebundene Aluminiumoxid-Filter. Es konnte gezeigt werden, dass derartige Filter eine hohe Abscheideleistung gegenüber Aluminiumoxid-Einschlüssen aufweisen. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass im Kontakt mit der Stahlschmelze Lösungsvorgänge sowohl des

enthaltenen Kohlenstoffs als auch der Aluminiumoxid-Körnung der Filter stattfinden [Zie2015]. Anschließend kommt es zur Ausscheidung von sekundärem Aluminiumoxid aus der Schmelze, das sich als dünne Schicht auf der Filteroberfläche ausbildet (siehe Abbildung 1, III) [Sto2016]. Darunter lässt sich eine entkohlte Schicht im Filter nachweisen (siehe Abbildung 1, II). Die Ausbildung einer derartigen modifizierten Oberfläche wird beschleunigt, indem die Filter zusätzlich mit einer zusätzlichen Beschichtung versehen werden, die Kohlenstoff-Nanoröhrchen enthält, da sie aufgrund ihrer hohen Oberfläche eine hohe Reaktivität aufweisen. Die zügige Ausbildung der funktionalisierten Oberfläche ist wichtig, damit die Filtrationswirkung zeitig im Gießprozess beginnen kann. Die Filtrationswirkung beruht darauf, dass die Stahlschmelze im Kontakt mit einer Aluminiumoxid-Oberfläche ist, die eine deutlich geringere Benetzbarkeit als die ursprüngliche Kohlenstoff-Aluminiumoxid-Oberfläche aufweist, was zu einer stark verbesserten Abscheideleistung von Aluminiumoxid-Einschlüssen aufgrund der gleichen Oberflächenchemie führt. Dies wird in Abbildung 1 ersichtlich, die eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Oberfläche einer stabförmigen Probe nach einem 30s-Eintauchen in eine Prüfstahlschmelze (42CrMo4) mit gezielt vorgelegten Aluminiumoxid-Einschlüssen zeigt. Bereich IV enthält zahlreiche Aluminiumoxid-Partikel, die aus der Schmelze an der Aluminiumoxid-Oberfläche des kohlenstoffgebundenen keramischen Filters abgeschieden worden sind und versinterten.

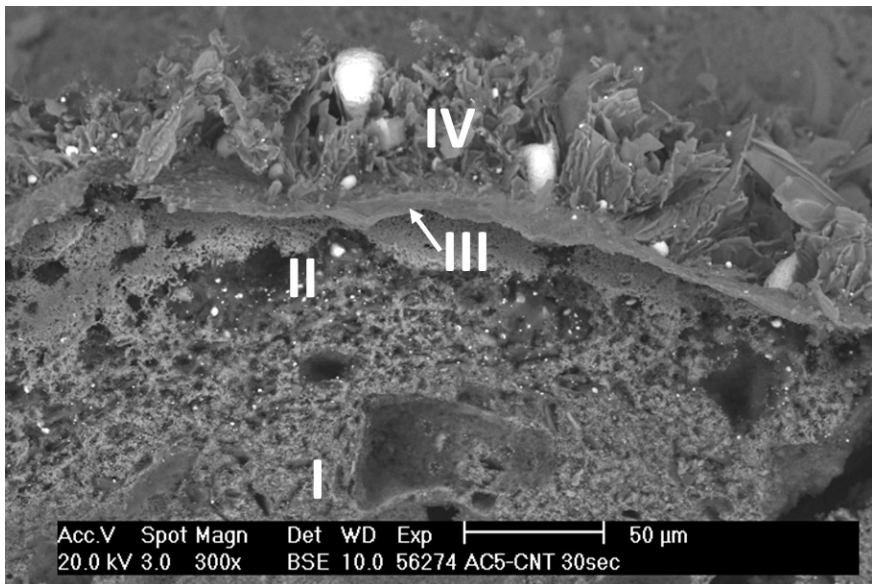


Abb. 1: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Querschnitts durch die Filteroberfläche eines mit Kohlenstoffnanoröhrchen beschichteten kohlenstoffgebundenen Aluminiumoxid-Filters nach einem Eintauchen von 30 s in eine Prüfstahlschmelze, I – Kohlenstoffgebundenes Aluminiumoxid, II – Entkohlte Filterbereiche, III – Abgeschiedene Aluminiumoxid-Schicht, IV – Anhaftende Einschlüsse.

Die Erforschung solcher funktionalisierter Filterstrukturen weist ein hohes Potential für die technologische Weiterentwicklung von Filtrationsprozessen für Metallschmelzen auf. Damit verbunden werden deutliche Verbesserungen in den mechanischen Eigenschaften metallischer Gussteile erwartet.

Verbundwerkstoffe für Hochtemperaturanwendungen

Die thermomechanischen Eigenschaften von keramischen Werkstoffen sind für eine Vielzahl von Hochtemperaturanwendungen von zentraler Bedeutung, da die Thermochockbeanspruchung eine sehr häufige Belastungsform darstellt. Dabei handelt es sich um lokales, sehr starkes Abkühlen oder Aufheizen, bei dem steile Temperaturgradienten auftreten. Es ergeben sich daraus thermische Spannungen, die sehr komplex sind, da sie sowohl von den Umgebungsbedingungen, z.B. auftretender Wärmefluss und umgebendes Medium, als auch von den Materialeigenschaften, z.B. Wärmeausdehnungskoeffizient, Wärmeleitfähigkeit und Elastizitätsmodul, abhängen. Erreichen die thermischen Spannungen eine kritische Größe, treten Bauteilschädigungen ein, die bis zum Versagen führen können [Sal2007].

Um diesen Anforderungen zu begegnen, ist der Einsatz von Verbundwerkstoffen ein vielversprechender Ansatz. Durch die Kombination von zwei oder mehr Werkstoffen entstehen Grenzflächen innerhalb des Körpers. Führt die mechanische Belastung zu Ablösungen zwischen den verbundenen Phasen, wird auftretenden Rissen durch die Schaffung von Oberflächen Energie entzogen. Das Material wird somit schadenstoleranter, da ein Totalversagen in Folge einer Schädigung verzögert wird [Sal2007]. Keramische Werkstoffe weisen im Allgemeinen eine hohe Korrosionsbeständigkeit und Härte auf. Jedoch sind sie durch ein ausgeprägtes Spröbruchverhalten gekennzeichnet. Durch Kombination mit einer metallischen Phase, die i.d.R. ein deutlich duktileres Verhalten besitzt, kann ein Verbundwerkstoff mit verbesserter Zähigkeit und somit höherer Schadenstoleranz erreicht werden. Ein vielversprechendes keramisches Material für Hochtemperaturverbundwerkstoffe ist Zirkoniumoxid. Es weist die Besonderheit auf, dass es in drei verschiedenen Modifikationen auftreten kann. Von besonderer Bedeutung ist die Umwandlung zwischen der tetragonalen Phase und der monoklinen Tieftemperaturphase bei 1170 °C. Diese Umwandlung ist mit einer Volumenzunahme von 5-8 % bei Unterschreitung der Umwandlungstemperatur verbunden. Erfolgt eine Teilstabilisierung des Materials, z.B. mit Magnesiumoxid, Kalziumoxid oder Yttriumoxid, liegt ein Teil des Werkstoffs als umwandlungsfähige tetragonale Phase vor, die unter mechanischer Belastung zu monoklinem Zirkoniumoxid unter Volumenzunahme reagiert. Die dabei auftretenden Druckspannungen schirmen vorhandene Risse ab und erhöhen die Bruchzähigkeit. Im Bereich der metallischen Werkstoffe stellen sog. TRIP-Stähle (TRIP = Transformation Induced Plasticity) eine interessante Kombination dazu dar. Diese Chrom-Nickel-Stähle zeigen ebenfalls eine Phasenumwandlung unter Volumenzunahme. Diese tritt bei der Umwandlung von Austenit zu Martensit auf. Die bewusste Kombination dieser beiden Werkstoffe mit der Fähigkeit zur Phasenumwandlung bei (thermo-)mechanischer Be-

lastung unter Volumenzunahme stellt ein innovatives Konzept dar, um Werkstoffe mit verbesserten Thermoschockigenschaften zur Verfügung zu stellen [Sal2007].

Dieser Werkstoffansatz wurde im Projekt „Phasenumwandlungsverstärkte, zirkoniumoxidreiche Verbundwerkstoffe mit TRIP-Stahl – Partikelzusätzen“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft untersucht. Die Herstellung derartiger Verbundwerkstoffe mit 10-30 Vol.-% Stahl erfolgt über die Schlickergusstechnologie [Wen2011]. Im späteren Sinterschritt ist der Sauerstoffgehalt besonders kritisch, da ein zu hoher Sauerstoffpartialdruck zu Zersetzungsreaktionen der enthaltenen Stahlpartikel führt, so dass die gewünschten Materialeigenschaften nicht erreicht werden. Bei ausreichend niedrigem Sauerstoffgehalt wird ein Gefüge wie in Abbildung 2 erreicht, bei dem die sphärischen Stahlpartikel in der Zirkoniumoxid-Matrix eingebettet vorliegen.

Die Biegebruchfestigkeit des Verbundmaterials liegt im Vergleich zu reinem, Magnesiumoxid-stabilisiertem Zirkoniumoxid (110 MPa) deutlich erhöht vor [Wen2011]. Es werden Werte zwischen 149 MPa (30 Vol.-% Stahl) und 209 MPa (10 Vol.-% Stahl) erreicht. Das Thermoschockverhalten wurde durch Abschrecken von bei 600 °C vorgewärmten Proben in Wasser untersucht. Der höchste Festigkeitsverlust wurde mit 25 % für den Verbundwerkstofftyp mit 10 Vol.-% Stahl ermittelt und liegt damit deutlich unter reinem Zirkoniumoxid (Magnesiumoxid-stabilisiert), das einen Festigkeitsverlust von 45 % aufwies. Eine wesentliche Ursache für dieses verbesserte thermo-mechanische Verhalten liegt in den verzahnten Grenzflächen, die sich zwischen der metallischen und der keramischen Phase ausbilden. Sie führt zur Ablenkung von auftretenden Rissen und zur Energieaufnahme durch die Schaffung neuer Oberflächen während sich die Grenzflächen unter Thermoschockbelastung öffnen.

Ein weiterer interessanter Ansatz in diesem Werkstoffsystem ist die Herstellung von Voll- und Hohlkugeln (siehe Abbildung 3), die als Komponente in einem Verbundwerkstoffsystem eingesetzt werden können. Die Herstellung dieser Körper erfolgte über einen Gelcasting-Prozess, bei dem die Rohstoffsuspension Alginate, ein Polysaccharid, enthält. Durch Eintropfen in eine wässrige Lösung mit zweiwertigen Ionen, wie z.B. Ca^{2+} , wird die Gelierung ausgelöst. Ist die Lösung neutral bis sauer, bildet sich eine Vollkugel aus, während im basischen Bereich aufgrund veränderter Lösungsbedingungen nur die Tropfenoberfläche geliert und so eine Hohlkugel entsteht. Anschließend erfolgt die Trocknung der Körper. Die Hohlkugeln müssen mittels Gefriertrocknung getrocknet werden, da sonst die Hohlkörper einfallen. Nach der anschließenden Entbinderung können die Körper gesintert werden, wobei im Fall enthaltener Stahlanteile der Sauerstoffpartialdruck während des Brennprozesses eine entscheidende Größe darstellt. Für die hergestellten Voll- und Hohlkugeln konnte nachgewiesen werden, dass sie unter Druckbelastungen im Bereich niedriger Stauchungen im Vergleich zu alternativen Strukturen, wie z.B. offenzelligen Schäumen, eine stark verbesserte spezifische Energieabsorption aufweisen [Opp2015]. Die Kombination von Zirkoniumoxid und Stahl führt zu einer weiteren Verbesserung [Opp2014].

Diese Ergebnisse zeigen innovative Ansätze, um keramikbasierte Verbundwerkstoffe mit verbesserten Eigenschaften zu realisieren. Im Vordergrund stehen dabei vor allem refraktäre Verbundsysteme für die Anwendung bei erhöhter Temperatur.

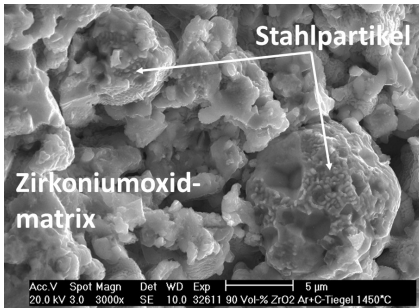


Abb.2: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Gefüges der Stahl-Zirkoniumoxid-Verbundwerkstoffe

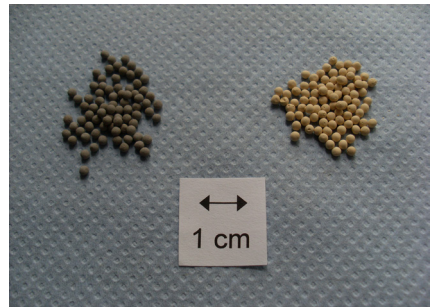


Abb.3: Links – Vollkugeln aus Zirkoniumoxid (80 Vol.-%) + Stahl (20 Vol.-%); Rechts – Vollkugeln aus Zirkoniumoxid

Druckschlickerguss als innovatives Formgebungsverfahren für Hochtemperaturwerkstoffe

Die Entwicklung bei Hochtemperaturbauteilen ist mit steigenden Anforderungen verbunden. Die Komponenten werden zunehmend komplexer. Des Weiteren rückt eine kontinuierliche Fertigung endabmessungsnaher Bauteile bei einer geringen Streuung ihrer Endigenschaften zunehmend in den Mittelpunkt. Das Formgebungsverfahren des Druckschlickergusses ist im Bereich der Feinkeramik als kosteneffizientes Formgebungsverfahren für Produkte mit komplexen Formen weit verbreitet [Sal2007]. Bei diesem Verfahren wird die Entwässerung für die Scherbenbildung in einer porösen Kunststoffform durch angelegte Druckluft unterstützt. Der stattfindende Flüssig-Fest-Trennprozess kann als Filtrationsprozess aufgefasst werden. Die Formgebung über die Druckschlickergusstechnologie erfüllt die genannten Anforderungen im Vergleich zu konventionellen Formgebungsverfahren wie uniaxialem oder kaltisostatischem Pressen hervorragend. Die Übertragung des Druckschlickergussverfahrens auf grobkörnige Werkstoffsysteme für Hochtemperaturanwendungen ist somit mit Vorteilen verbunden.

Um dieses Ziel zu realisieren, ist die Einstellung geeigneter Suspensionseigenschaften eine wichtige Voraussetzung. Hier sind eine ausreichende Suspensionsstabilität, die Verhinderung der Entmischung der einzelnen Komponenten und ein geeignetes rheologisches Verhalten zu nennen. Die Suspension muss bei einem hohen Feststoffgehalt eine gute Fließfähigkeit zeigen und eine dichte Partikelpackung im Grünkörper ermöglichen. Dabei muss jedoch gleichzeitig eine ausreichende Porosität vorhanden sein, um die Entwässerung und Scherbenbildung in angemessen kurzen Zeiträumen zu realisieren. Ein wichtiger Einflussfaktor dafür ist die Korngrößenverteilung, für die Partikelpackungsmodelle, wie beispielsweise das Modell nach Dinger und Funk [Fun1992] zur Anwendung kommen. Für die Einstellung der rheologischen Eigenschaften der Suspension ist des Weiteren die Auswahl geeigneter Additive von hoher Bedeutung.

Diese müssen an die Oberflächenchemie des jeweiligen Stoffsystems angepasst sein.

Verschiedene Arbeiten haben sich mit der Anwendung des Druckschlickergusses für feuerfeste Werkstoffe beschäftigt. Eine erste Herausforderung bestand darin, geeignete Additive zu identifizieren, um die grobkörnigen Systeme mit maximalen Teilchengrößen bis 4 mm, wie sie im Feuerfestbereich eingesetzt werden, zu identifizieren. Hier sind beispielsweise Arbeiten von Klippel [Kli2011], Schafföner [Sch2012] und Aneziris [Ane2015] zu nennen, die rein oxidische Systeme untersucht haben. Dabei kommen Additive, wie z.B. Xanthan oder Guarkernmehl, zum Einsatz, um diese grobkörnigen Suspensionen zu stabilisieren. Neben rein oxidischen Systemen wird ebenfalls erforscht, inwiefern der Druckschlickerguss als Formgebungstechnologie für kohlenstoffgebundene Systeme anwendbar ist. Die Kohlenstoffbindung wirkt sich aufgrund ihrer verhältnismäßig hohen Wärmeleitfähigkeit positiv auf die Thermoschockbeständigkeit aus. Des Weiteren wird sie wegen ihrer Nichtbenetzbarkeit durch metallische Schmelzen häufig in Feuerfestmaterialien für die Eisen- und Stahlmetallurgie eingesetzt. Zusätzlich zur Problematik der groben Körnung liegt bei kohlenstoffgebundenen Systemen die Herausforderung vor, geeignete Kohlenstoffträger einzubringen. Flüssige Harzkomponenten sind ungeeignet, da sie die feinporige Druckgussform verschließen würden. Daher werden granulare Rohstoffe, wie z.B. Ruß, Graphit oder modifizierte Steinkohleteerpeche verwendet. Als geeigneter Stabilisator hat sich hier eine Mischung aus Konjakmehl und Welan Gum erwiesen [Ger2012].

Abbildung 4 zeigt zwei Beispiele für eine rein oxidische Platte (Magnesiumaluminat-Spinell) und eine kohlenstoffgebundene Platte (basierend auf Aluminiumoxid), jeweils $20 \times 20 \times 3,8 \text{ cm}^3$ groß, die mittels Druckschlickerguss hergestellt wurden. Abbildung 5 zeigt das charakteristische Gefüge für einen Probekörper mit Siliziumcarbid als Grobkorn und einer mullitischen Matrix. Deutlich ist die grobe Körnung sichtbar, die für die im Feuerfestbereich notwendige Korrosions-, Kriech- und Thermoschockbeständigkeit notwendig ist. Der Druckschlickerguss stellt somit eine innovative Weiterentwicklung der Formgebungsmöglichkeiten von Hochtemperaturwerkstoffen dar. Es sind weitere Entwicklungen möglich, wie z.B. der Aufbau gradierter Strukturen durch Nutzung von Schlickern mit unterschiedlichen Maximalkorngrößen [Sch2016].



Abb.5: Druckschlickergegossene kohlenstoffgebundene Platte (links) und oxidische Platte (rechts)

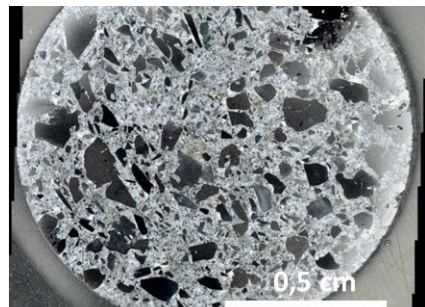


Abb.5: Gefüge einer druckschlickergegossenen Probe mit Siliziumcarbid als Körnung und mullitischer Bindung

Neue kohlenstoffgebundene Werkstoffe mit reduziertem Kohlenstoffgehalt durch Additive

Kohlenstoffhaltige Feuerfesterzeugnisse sind ein wesentlicher Bestandteil für die Stahlerzeugung, da sie über eine ausgezeichnete Thermoschockbeständigkeit verfügen und von Stahlschmelzen nicht benetzt werden. Die Entwicklung von kohlenstoffarmen und kohlenstofffreien Feuerfestmaterialien ist notwendig, um qualitativ hochwertige hochlegierte Stähle in der sogenannten „Clean-Steel-Technologie“ erzeugen zu können, die sehr stark zur Aufkohlung aus dem Feuerfestmaterial neigen. Weitere Vorteile liegen zum einen im Beitrag zur Senkung des weltweiten Ausstoßes von Kohlenstoffdioxid, da es sowohl im Herstellungsprozess als auch im Einsatz freigesetzt wird. Zum anderen bewirkt der geringere Kohlenstoffgehalt Energieeinsparungen durch bessere Wärmedämmeigenschaften aufgrund einer Absenkung der Wärmeleitfähigkeit. Die Herausforderung in der Entwicklung von Materialien mit niedrigeren Kohlenstoffgehalten liegt darin, Werkstoffe mit einer ausreichenden Thermoschockbeständigkeit zu erzeugen. Mit dieser Problematik beschäftigte sich das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft von 2009 bis 2015 geförderte Schwerpunktprogramm 1418.

Kohlenstoffgebundene Werkstoffe bestehen i.d.R. aus einer oxidischen Körnung, die die mechanische Festigkeit und die notwendige Korrosions- und Abrasionsbeständigkeit bewirkt. Die zweite Komponente stellt einen Kohlenstoffrohstoff dar, der aufgrund seiner hohen Wärmeleitfähigkeit die gewünschte Thermoschockbeständigkeit ermöglicht. Hier kommen z.B. Ruß, Graphit o.ä. zum Einsatz. Schließlich ist eine Binderkomponente notwendig, die üblicherweise auf phenolischen Harzen basiert [Sal2007]. Um den Kohlenstoffgehalt bei gleichbleibenden oder verbesserten Thermoschockeeigenschaften senken zu können, werden verschiedene Ansätze verfolgt. Eine Möglichkeit ist es, die Mikrostruktur von kohlenstoffgebundenen Werkstoffen gezielt einzustellen und zu optimieren. Ein Weg ist die Nutzung von Antioxidantien, die als feinkörnige metallische Pulver (Partikelgröße $< 150 \mu\text{m}$) zugegeben werden. Über Gasphasenreaktionen reduzieren sie die Verluste von Kohlenstoff durch Oxidationsvorgänge, indem sie den Sauerstoff aufnehmen [Yam2007]. Parallel dazu ist die Bildung von Whisker-Strukturen möglich, die durch ihre Verzahnung zu einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe beitragen. Ein weiterer Entwicklungsschritt ist die Anwendung nanoskaliger Additive, die aufgrund ihrer hohen Oberfläche alternative Reaktionen zwischen der Bindermatrix und der Körnung bewirken [Rou2012a, Rou2012b]. Untersucht wird z.B. die Wirkung von Kohlenstoff-Nanoröhrchen und von Aluminiumoxid-Nanoplättchen. Dadurch konnte der Primärkohlenstoffgehalt in Form von Graphit bei kohlenstoffgebundenen Aluminiumoxid-Werkstoffen von 30 Ma.-% auf 20 Ma.-% reduziert werden, wobei die Kaltbiegefestigkeit und die Restfestigkeit nach Thermoschock verbessert wurden.

Im nächsten Schritt wurde die Kombination dieser nanoskaligen Additive mit halbleitenden Additiven untersucht. Hier wurde vor allem Phosphordotiertes Silicium verwendet [Ste2012]. Einerseits hat Silicium eine antioxidative Wirkung. Andererseits wird vorgeschlagen, dass die zusätzlich vorhandenen Elektronen eine stabilisierende

Wirkung auf die Kohlenstoffstrukturen des Binders ausüben [Ste2012, Yam1996]. Derartig modifizierte kohlenstoffgebundene Aluminiumoxid-Werkstoffe zeigten ein stark verbessertes mechanisches und thermo-mechanisches Verhalten. Tabelle 1 zeigt die Kaltbiegefestigkeit im Ausgangszustand und nach 1 und 5 Thermoschocks (von 950 °C, Abschreckung in Luft) für ein Referenzmaterial mit 20 % primärem Kohlenstoff ohne Additive und ein Material mit 20 % primärem Kohlenstoff mit nanoskaligen und halbleitenden Additiven. Es wird ersichtlich, dass das Ausgangsniveau der Festigkeiten deutlich höher ist. Des Weiteren sind die Veränderungen der Festigkeit durch die Thermoschockbehandlung dargestellt. Im Gegensatz zur Referenz zeigt das modifizierte Material keine statistisch signifikanten Veränderungen in der Festigkeit durch die Thermoschocks [Bra2016]. Als Ursache dafür wurde vor allem eine intensive Bildung von Siliziumcarbid-Whiskern gesehen. Des Weiteren könnte ein Selbstheilungsmechanismus vorgeschlagen werden, der auf der Umlagerung von Kohlenstoff basiert und bei der das halbleitende Silizium eine wichtige Rolle spielt. Abbildung 6 gibt einen Einblick in die beobachtete Mikrostruktur mit den ausgebildeten Whiskern und Schichten von Glaskohlenstoff nach der Thermoschockbelastung. Somit ist der gezielte Einsatz derartiger Additive ein vielversprechender Weg, um zukünftig kohlenstoffreduzierte Feuerfestwerkstoffe mit verbesserten Eigenschaften zur Verfügung zu stellen.

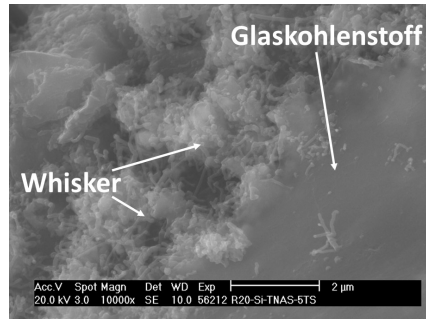


Abb.6: Mikrostruktur mit Whisker und Glaskohlenstoff im modifizierten Material nach 5 Thermoschocks

Tabelle 1: Kaltbiegefestigkeit (KBF) im Ausgangszustand und nach 1 und 5 Thermoschocks (TS) unter Angabe des Festigkeitsverlusts ΔTS , nach [Bra2016]

Versatz	KBF [MPa]	KBF1TS [MPa]	KBF5TS [MPa]	$\Delta TS(0 \rightarrow 1)$ [%]	$\Delta TS(1 \rightarrow 5)$ [%]
R20	10,31±0,15	6,95±0,36	6,65±0,45	-32,58	-4,41
R20-modifiziert	14,51±0,26	12,11±0,81	13,89±0,96	-16,54	14,64

Ausblick

Im Rahmen des Zentrums für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung ZeHS werden mit neuen Prozesstechnologien aus refraktären fein- und grobkörnigen Metallen in Kombination mit fein- bzw. grobkörnigen Feuerfestkeramiken Refraktäre Verbundwerkstoffe bzw. Werkstoffverbunde erforscht und entwickelt. Aus der Interaktion der Inhalte und Ergebnisse der bisherigen DFG-Projekte und in engem anwendungsorientierten Austausch mit der Industrie wird diese neue Generation von Hochtemperaturwerkstoffen angestrebt, die als Refraktäre Verbundwerkstoffe für spezielle Schlüs-

selbsteile in Hochtemperaturprozessen mit weiterentwickelten funktionstechnischen Eigenschaften als Smart Refractories und Smart Composite Refractory Materials zur Verfügung gestellt werden.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 920 „Multifunktionale Filter für die Metallschmelzefiltration – Ein Beitrag zu Zero Defect Materials“, des Schwerpunktprogramms 1418 „Feuerfest - Initiative zur Reduzierung von Emissionen“, des Sonderforschungsbereichs 799 „TRIP-Matrix-Composite“ sowie der Projekte „Formgebung von grobkörnigen, oxidkeramischen Schlickern mit Hilfe der Druckschlickergusstechnologie für die Herstellung von Großbauteilen hoher Dichte“, „Phasenumwandlungsverstärkte, zirkonoxidreiche Verbundwerkstoffe mit TRIP-Stahl – Partikelzusätzen“ und „Wässrige Druckschlickergussformgebung grobkörniger, kohlenstoffhaltiger Feuerfestmaterialien“.

Literatur

- [Emm2012] Emmel, M., Aneziris, C.G., Development of novel carbon bonded filter compositions for steel melt filtration, 2012, *Ceramics International*, 38 (6), pp. 5165-5173.
- [Jan2006] Janiszewski, K., Kudlinski, Z., Removal of liquid non-metallic inclusion from molten steel using the method filtration. *Metal*, (2006) 1-9.
- [Ane2012a] Aneziris C.G., Emmel M., Dudczig S. Aktive, keramische Filter. German patent DE 102011109681; 2013.
- [Ane2012b] Aneziris C.G., Emmel M, Dudczig S. Keramische, reaktive Filter. German patent DE 102011109684; 2013.
- [Zie2015] Zienert, T., Dudczig, S., Fabrichnaya, O., Aneziris, C.G., Interface reactions between liquid iron and alumina-carbon refractory filter materials, 2015, *Ceramics International*, 41 (2), pp. 2089-2098.
- [Sto2016] Storti, E., Dudczig, S., Schmidt, G., Colombo, P., Aneziris, C.G., Short-time performance of MWCNTs-coated Al₂O₃-C filters in a steel melt, 2016, *Journal of the European Ceramic Society*, 36 (3), pp. 857-866.
- [Sal2007] Salmang, H., Scholze, H., Telle, R. [Hrsg], *Keramik, z., vollständig neubearb. und erw. Aufl.*, Springer, 2007.
- [Wen2011] Wenzel, C., Aneziris, C.G., Ceramic matrix composites based on Mg-PSZ with Cr-Ni-steel-additions with improved thermo-mechanical properties, 2011, *Materials Science and Engineering B: Solid-State Materials for Advanced Technology*, 176 (1), pp. 32-40.
- [Opp2015] Oppelt, M., Aneziris, C.G., Analysis and evaluation of different influencing factors in processing of hollow and full beads based on TRIP steel, 2015, *Journal of Alloys and Compounds*, 634, pp. 43-49.
- [Opp2014] Oppelt, M., Wenzel, C., Aneziris, C.G., Berek, H., Processing and Characterization of MMC Beads Based on Zirconia and TRIP Steel,

- 2014, *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 45 (6), pp. 2000-2008.
- [Fun1992] Funk, J., Dinger, D., *Particle Packing*, 1992, *Interceram*, 41, pp. 10-14.
- [Kli2011] Klippel, U., Aneziris, C.G., Metzger, A.J., *Shaped coarse grained refractories by pressure slip casting*, 2011, *Advanced Engineering Materials*, 13 (1-2), pp. 68-76.
- [Sch20112] Schafföner, S., Aneziris, C.G., *Pressure slip casting of coarse grain oxide ceramics*, 2012, *Ceramics International*, 38 (1), pp. 417-422.
- [Ane2015] Aneziris, C.G., Lange, F., Grote, H., Gerlach, N., *Coarse-Grained Ceramic Heat Shields Made by Pressure Slip Casting*, 2015, *Refractories Worldforum*, 7 (2), pp. 101-104.
- [Ger2012] Gerlach, N., Wenzel, C., Aneziris, C.G., *Verwendung eines Gemischs aus Konjakmehl und Welan Gum als Binder für die keramische und pulvermetallurgische Formgebung*, Deutsches Patent DE 10 2012 017 822 B3.
- [Sch2016] Schafföner, S., Freitag, L., Hubálková, J., Aneziris, C.G., *Functional composites based on refractories produced by pressure slip casting*, 2016, *Journal of the European Ceramic Society*, 36 (8), pp. 2109-2117.
- [Yam2007] Yamaguchi, A.: *Self-repairing function in the carbon-containing refractory*, 2007, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 4 (6), pp. 490-495.
- [Rou2012a] Roungos, V., Aneziris, C.G.: *Improved thermal shock performance of Al₂O₃-C refractories due to nanoscaled additives*, 2012, *Ceramics International*, 38 (2), pp. 919-92.
- [Rou2012b] Roungos, V., Aneziris, C.G., Berek, H.: *Novel Al₂O₃-C refractories with less residual carbon due to nanoscaled additives for continuous steel casting applications*, 2012, *Advanced Engineering Materials*, 14 (4), pp. 255-264.
- [Ste2012] Stein, V., Aneziris, C.G., Guéguen, E., Hill, K.: *A prospective way to reduce emissions in secondary steel making metallurgy by application of functionalized dolomite carbon refractories*, 2012, *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 9 (3), pp. 615-624.
- [Yam1996] Yamaguchi, A., Zhang, S., Yu, J.: *Effect of refractory oxides on the oxidation of graphite and amorphous carbon*, 1996, *Journal of the American Ceramic Society*, 79 (9), pp. 2509-2511.
- [Bra2016] Brachhold, N., Mertke, A., Fruhstorfer, J., Aneziris, C.G., *Carbon-Bonded Alumina Refractories with Reduced Carbon Content due to the Addition of Semi-Conductive Silicon and/or Nanoparticles*, 2016, *Journal of Ceramic Science and Technology*, 7 (2), pp. 209-221.

Technologiemanagement und Systemanalyse

Prof. Dr. Michael Höck (Lehrstuhlinhaber für Industriebetriebslehre/Produktionswirtschaft, Logistik)

Kurzfassung

Die im Energiekonzept 2050 beschriebene Energiewende sowie die gesteckten klimapolitischen Ziele haben die Rahmenbedingungen der Industrie in Deutschland grundlegend verändert, welches mit zahlreichen Risiken, aber auch Chancen für die Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie verbunden ist. Um wettbewerbsfähig zu bleiben, sind die Unternehmen der Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie auf Innovationen angewiesen. Die Technologieentwicklungen erfordern hohe Investitionen, lange Entwicklungszeiten sowie eine enge Kooperation entlang der Wertschöpfungsketten von der Rohstoffgewinnung bis zum Fahrzeug- und Maschinenbau sowie der Bauwirtschaft.

In dem Beitrag wird zunächst auf die Bedeutung der Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie für das verarbeitende Gewerbe in Deutschland eingegangen. Darauf aufbauend werden die Phasen des Technologiemanagements und ausgewählte Methoden der Systemanalyse näher betrachtet. Zum Abschluss erfolgen eine Zusammenfassung und ein Ausblick.

Einleitung

Der Anteil des industriellen Sektors, genauer des verarbeitenden Gewerbes, an der gesamten Bruttowertschöpfung in Deutschland ist seit 20 Jahren annähernd konstant und lag 2015 bei 22 %. (vgl. Statistisches Bundesamt (2015), S. 6 ff.). Im internationalen Vergleich liegt Deutschland damit hinter der VR China und Südkorea; gleichwohl vor Japan, den USA, dem Vereinigten Königreich und Frankreich (vgl. Statistisches Bundesamt (2014), S. 2). Nicht zuletzt aufgrund des großen Exportanteils und der hohen Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen des verarbeitenden Gewerbes gilt Deutschland als eine der führenden Industrienationen, deren Stärken in der Schaffung hochwertiger Güter, maßgeschneiderter Systemlösungen sowie in der Beherrschung der Komplexität liegen. In Deutschland wird die Struktur des verarbeitenden Gewerbes maßgeblich von der Automobilindustrie inklusive der Zuliefererbranche sowie dem Anlagen- und Maschinenbau, aber auch der Elektroindustrie und der chemisch-pharmazeutischen Industrie, geprägt. Die chemische Industrie ist wiederum ein zentraler Bestandteil der Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie.

Das Energiekonzept 2050 der Bundesregierung hat die Rahmenbedingungen des industriellen Sektors in Deutschland grundlegend verändert, welches mit zahlreichen Risiken, aber auch Chancen für die Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie verbunden ist. Chancen resultieren in erster Linie aus neuen Produkten, Technologien oder Märkten, die mit den gesteckten klimapolitischen Zielen einhergehen. Hierzu gehören beispielsweise Bereiche wie die Windkraft, Elektromobilität oder der Leichtbau. Risiken bestehen vor allem in Form von Wettbewerbsnachteilen gegenüber der internationalen Konkurrenz, insbesondere aus der VR China, Südkorea und den USA. Her-

vorzuheben sind in diesem Zusammenhang neben den steigenden Stromkosten die zusätzlichen Kosten, die sich aus der notwendigen Flexibilisierung, Elektrifizierung und Dekarbonisierung der Produktionsprozesse ergeben. Beispielsweise rechnet alleine die deutsche Stahlindustrie nach Angaben der Wirtschaftsvereinigung Stahl mit einer Mehrbelastung von 0,6 bis 1,6 Mill. EUR pro Jahr bis zum Jahr 2030, die durch den Zertifikathandel von CO₂-Emissionen entstehen (vgl. Böhmer/Hoch 2016, S. 23 ff.). Insgesamt belaufen sich die Ausgaben für Umwelt- und Klimaschutz im produzierenden Gewerbe auf 7,5 Mill. EUR¹. Gleichzeitig ist die Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie ein integraler Bestandteil einer Kreislaufwirtschaft und somit von besonderer Bedeutung für die Nachhaltigkeit der industriellen Fertigung am Standort Deutschland.

Zur Erfassung, Bewertung und Analyse der jeweiligen Chancen bzw. Risiken sowie der Nachhaltigkeit steht im Rahmen der Betriebswirtschaftslehre eine Reihe von Konzepten und Methoden bereit. In den nachfolgenden Abschnitten sollen ausgewählte Instrumente des Technologiemanagements und der Systemanalyse vor dem Hintergrund der Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie kritisch betrachtet werden. Im Vordergrund der Betrachtung stehen Hochtemperaturprozesse (> 600 °C) und die dazugehörigen Werkstoffe. Zu diesem Zweck soll zunächst auf die Bedeutung der Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie für das verarbeitende Gewerbe in Deutschland eingegangen werden. Darauf aufbauend sollen Instrumente der Strategieformulierung sowie der Technologiefrüherkennung, -entwicklung und -verwertung näher betrachtet werden. Zum Abschluss erfolgen eine Zusammenfassung und ein Ausblick.

Bedeutung der Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie

Die Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie stellt die erste Stufe der industriellen Wertschöpfung dar und umfasst alle Wirtschaftszweige, die Rohstoffe gewinnen sowie Halbzeuge bereitstellen, die anschließend im verarbeitenden Gewerbe zu Verbrauchs- oder Industriegütern weiterverarbeitet werden. Hierzu zählen neben dem Bergbau sowie der Gewinnung von Steinen und Erden – die dem primären Sektor zugerechnet werden – Vorleistungsgüterproduzenten, wie die Sektoren: Kokereien, Mineralölverarbeitung, Chemische Erzeugnisse, Herstellung von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden, Metallherzeugung und -bearbeitung, die rund 1/3 des Produktionswertes des gesamten verarbeitenden Gewerbes ausmachen und naturgemäß durch eine hohe Energieintensität gekennzeichnet sind (vgl. Stat. Bundesamt (2008), (2015)) (vgl. Abb. 1).

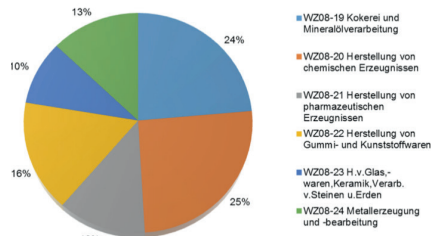


Abb. 1: Bruttowertschöpfung der Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie, Quelle: Destatis (2016).

¹ Siehe den Beitrag von B. Minderjahn in diesem Band.

Gemäß einer Umfrage des Instituts der deutschen Wirtschaft überwiegen die Risiken der Energiewende die Chancen bei weitem (vgl. Kempemann/Brandt (2014), S. 33 ff.). Neben einer Energiekostensteigerung befürchtet der industrielle Sektor vor allem eine Abwanderung der Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie ins Ausland und somit einen Verlust der Innovationsfähigkeit. Inwieweit die Innovationsfähigkeit des verarbeitenden Gewerbes unter dem Energiekonzept 2050 leidet, lässt sich jedoch nicht pauschal beurteilen, sondern hängt von einer Reihe von Determinanten, wie der Branchenstruktur, der Art der Innovationsnetzwerke, der Platzierung der Forschungs- und Entwicklungskapazitäten, etc. ab. Nachfolgend sollen deshalb drei Sektoren der Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie, die jeweils eine hohe Bruttowertschöpfung und Energieintensität aufweisen, eingehender betrachtet werden. Angesichts stark gesunkener Rohöl-, Steinkohle- und Erdgaspreise stehen hierbei die Stromkosten im Vordergrund, wenngleich davon auszugehen ist, dass mittelfristig die Preise der fossilen Energieträger wieder deutlich ansteigen.

Chemisch-pharmazeutische Industrie

Mit einer Bruttowertschöpfung von rund 55 Mrd. EUR zählt die chemisch-pharmazeutische Industrie – hinter dem Fahrzeug- und Maschinenbau – zu den bedeutendsten Wirtschaftszweigen in Deutschland. Gleichzeitig ist die chemisch-pharmazeutische Industrie der mit Abstand größte Strom- und Erdgasabnehmer des industriellen Sektors (vgl. Hassan (2013), S.109 ff.). Innerhalb der Branche kann wiederum grob zwischen der Grundstoffchemie (Anorganische und Organische Grundstoffe) mit einem Umsatzanteil von 2/3 und der Spezialchemie (Agrochemie, Lacke und Farben, Kosmetika, Wasch- und Pflegemittel, etc.) mit einem Anteil von 1/3 differenziert werden. Allerdings gestaltet sich die Abgrenzung der einzelnen Sektoren als schwierig, da die Chemieproduktion durch stark divergierende Wertschöpfungsketten gekennzeichnet ist, bei denen Neben- oder Kuppelprodukte der einen Herstellungsstufe als Basisstoffe der nachfolgenden Produktionsebene eingehen; größtenteils bedingen sie einander. So bilden sowohl im Hinblick auf den Umsatz als auch den Energieverbrauch die Chlor- und Ammoniakproduktion sowie die Herstellung der Industriegase den Schwerpunkt der anorganischen Grundstoffchemie. Das mittels elektrochemischer Verfahren gewonnene Chlor ist Ausgangsstoff der Produktion von Kunststoffen und Desinfektionsmitteln, während das anfallende Kuppelprodukt Natronlauge u. a. zur Herstellung von Reinigungsmitteln eingesetzt wird. Ammoniak ist wiederum ein wichtiger Grundstoff bei der Herstellung von Düngemitteln (vgl. Voß (2013), S. 14 ff.).

Generell lässt sich jedoch feststellen, dass es sich bei der Grundstoffchemie um einen stark konsolidierten Wirtschaftszweig handelt; ca. 10 % der Unternehmen erwirtschaften 90 % des Umsatzes – hauptsächlich im europäischen Ausland (vgl. Labitzke/Reinisch (2015), S. 8 ff.). Dem gegenüber ist die Spezialchemie stärker durch kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) geprägt, die ihre Produkte vorwiegend im Inland absetzen. Die Stromkosten machen im Mittel knapp 5 % der Herstellungskosten aus, während die Logistikkosten in der Grundstoffchemie bis zu 40

% der Kosten betragen können. Bei der chemisch-pharmazeutische Industrie handelt es sich ferner um eine stark regulierte Branche, z.B. durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), die EU-Emissionshandelsrichtlinien und -Kosmetikverordnung oder die REACH-EU-Richtlinie zur Chemikalienpolitik.

Vor allem in der Grundstoffchemie, die mehr als 80 % des Energieverbrauches und der Treibhausgasemission der gesamten chemisch-pharmazeutischen Industrie beansprucht, ist eine stetige Verlagerung der Produktionskapazitäten nach Asien, in die USA und der Golfstaaten zu beobachten. Die Gründe hierfür liegen weniger in den Energiekosten oder Umweltschutzauflagen, sondern vielmehr in der Nähe zu den Rohstoffen und der Erschließung von neuen Absatzmärkten (vgl. Labitzke/ Reinisch (2015), S. 11 ff.). Gegenwärtig werden z. B. in der Petrochemie die Hälfte aller globalen Kapazitätserweiterungen in den Golfstaaten Saudi-Arabien, Kuwait, Katar und Oman getätigt (vgl. Voß (2013), S. 71). Parallel zur Verlagerung der Produktionsstandorte verschieben sich die F&E-Ausgaben der chemischen Industrie. So betrug im Jahr 2000 der Anteil des Standortes Deutschland an den weltweiten Forschungs- und Entwicklungsausgaben der Chemie noch fast 16 % und ist seitdem auf 9,4 % gesunken (vgl. Gerke et al. (2015), S. 10).

Dieser Rückgang kann nur in Teilen durch das wachsende Segment der Spezialchemie kompensiert werden, dessen Forschungsschwerpunkte u. a. im Agrar-, Verkehrs- und Bausektor, wie z. B. der Oberflächentechnologie oder der Substitution von Metall und Glas durch Hochleistungskunst- und Verbundwerkstoffe, liegen. Die mittelständisch geprägte Spezialchemie profitiert von dem hohen Niveau heimischer Forschungseinrichtungen und innovationsorientierten Abnehmerbranchen, insbesondere dem Fahrzeug- und Maschinenbau (vgl. Labitzke/Reinisch (2015), S. 14 ff.), so dass trotz deutlich geringerer Forschungs- und Entwicklungsbudgets ein verhältnismäßig großer Anteil der Innovationserfolge der chemischen Industrie auf die KMU der Spezialchemie entfällt. Die KMU erwirtschaften einen überdurchschnittlich hohen Anteil des Umsatzes mit Produktinnovationen, d.h. Produkten die jünger als drei Jahre sind, und realisieren häufiger kostenreduzierende Prozessinnovationen (vgl. Gerke et al. (2015), S. 16).

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die chemisch-pharmazeutische Industrie alleine aufgrund der Höhe ihrer Wertschöpfung, der engen Verzahnung von Grundstoff- und Spezialchemie sowie den innovativen KMUs eine große Bedeutung für das verarbeitende Gewerbe in Deutschland hat. Von der Energiewende betroffen ist in erster Linie die Grundstoffchemie, die seit längerem ihre Produktionsstätten in Richtung rohstoffreicher bzw. wachstumsstarker Regionen verlagert. Um die für die Spezialchemie notwendigen Kapazitäten der Basischemie in Deutschland zu erhalten, wurden parallel zahlreiche Investitionen zur Energieeffizienzsteigerung getätigt. Nach den Angaben des Verbandes der Chemischen Industrie (VCI) konnte im Zeitraum zwischen 1990 und 2010 – bei einer Produktionssteigerung von 58 % – der Energieverbrauch um 20 % und die Emission der Treibhausgase um 49 % gesenkt werden. Insofern scheint die chemische Industrie in Deutschland im Hinblick auf das Energiekonzept 2050 bereits gut aufgestellt.

Metallerzeugung und -bearbeitung

Obwohl der Wirtschaftszweig der Metallerzeugung und -bearbeitung mit einer Bruttowertschöpfung von etwa 19 Mrd. EUR im Vergleich zur chemisch-pharmazeutischen Industrie deutlich kleiner ausfällt, ist der energetische Energieverbrauch höher. Gemäß den Angaben von Statista wurden im Jahr 2013 bei der Produktion von Metallen ca. 40 Mill. Tonnen CO₂ ausgestoßen, während der Stromverbrauch der Metallerzeugung und -bearbeitung in Deutschland bei 38 Terrawattstunden lag. Die Metallindustrie umfasst die Erzeugung von Roheisen, Stahl, Ferrolegierungen (mit einem Umsatzanteil von 35 %) sowie NE-Metallen (35 %), deren Bearbeitung zu Halbzeug, insbesondere Rohre, Profile oder Flachstahl (15 %), und Gießereien (15 %) (vgl. Hunger-Siegler/Segbers (2015), S. 7). Zu den wesentlichen Abnehmern der Erzeugnisse gehören der Fahrzeug- und Maschinenbau sowie das Baugewerbe. Allen Sektoren der Metallerzeugung und -bearbeitung ist gemeinsam, dass die Preise für Rohstoffe verhältnismäßig volatil sind und zudem weltweit große Überkapazitäten bestehen. Die damit einhergehende Wettbewerbsintensität und Marktmacht der Großabnehmer haben zur Folge, dass – anders als in der chemisch-pharmazeutischen Industrie – Steigerungen der Energiepreise oder Umweltkosten kaum weitergereicht werden können. Dem entsprechend sind viele Unternehmen der Metallerzeugung und -bearbeitung in Deutschland dazu übergegangen, sich auf höherwertige Güten und Nischenmärkte zu konzentrieren (vgl. Breun (2016), S.34 ff.), wobei die Sektoren der Metallindustrie sehr unterschiedliche Branchen- und Kostenstrukturen aufweisen:

Bei der Erzeugung von Stahl und Eisen sowie der NE-Metallindustrie herrschen wenige große Unternehmen mit einem hohen Automatisierungsgrad vor, die in den Bereichen Eisen und Stahl vor allem den europäischen Binnenmarkt beliefern. Im NE-Metallsektor herrschen dagegen globale Absatzmärkte vor. Ebenso wie die Grundstoffchemie wird die Metallerzeugung international durch die VR China dominiert, die bei der Metallerzeugung einen globalen Umsatzanteil von knapp 54 % besitzt, während der weltweite Anteil Deutschlands bei 3 % liegt. Erschwerend kommt hinzu, dass die Rohstoffversorgung durch oligopolistische Anbieterstrukturen geprägt und mit hohen Logistikaufwendungen verbunden ist. Beispielweise besitzen bei der Eisenerzförderung die drei führenden Rohstoff- und Bergbaukonzerne einen Marktanteil von 70 %, während die größten Roherzreserven in Australien, Russland, Brasilien und China vorliegen (vgl. USGS (2016)). Im Vergleich zum Branchendurchschnitt des verarbeitenden Gewerbes zeichnet sich die Erzeugung von Roheisen und Stahl durch einen hohen Material- (62,9 %) und Energiekostenanteil (9,6 %) aus. Gemäß einer Studie des Fraunhofer Instituts ISI besteht in der gesamten Stahlbranche ein Energieeinsparpotential von 5–15% bis zum Jahr 2035 durch eine Verlagerung der Prozessrouten der Stahlerzeugung von der Primärerzeugung (ca. 70 %) in integrierten Hüttenwerken auf die Sekundärerzeugung (ca. 30 %) in Elektrostahlwerken, bei denen Rohstahl aus Stahlschrott erschmolzen wird (vgl. Schломann et al. (2013))². In der NE-Metallerzeugung haben die Materialkosten teilweise, z. B. bei der Kupfer- (85 %)

² Siehe den Beitrag von O. Volkova et al. in diesem Band.

und Edelmetallgewinnung (87 %), ein noch größeres Gewicht (vgl. Hunger-Siegler/Segbers (2015), S. 15). Anders ist die Situation in der Aluminiumindustrie, in der die Energiekosten (65 %) ein wesentlicher Kostentreiber sind (vgl. Breun (2016), S. 50). Ferner ist der Sektor der Metallerzeugung, insbesondere die Stahlindustrie, aufgrund der hohen Treibhausgasemissionen in besonderem Maße von Umweltschutzaufgaben betroffen, wobei die beschlossene Verknappung der CO₂-Zertifikate im EU-Emissionshandel zu einer Erhöhung der Zertifikatpreise führen wird. Charakteristisch für den Standort Deutschland ist zudem der hohe Anteil der Sekundärmetalle an der gesamten Metallproduktion. So werden derzeit etwa 60 % des in Deutschland erzeugten Aluminiums aus recyceltem Aluminium gewonnen, während der Anteil bei Rohstahl bei 45 % liegt.

Im Gegensatz zur Metallerzeugung ist der Wirtschaftszweig der Metallbearbeitung, d.h. der ersten Bearbeitung der Metallerzeugnisse, stark mittelständisch geprägt; knapp 80 % der Betriebe haben weniger als 100 Beschäftigte. Entsprechend breit gefächert ist das Produkt- und Leistungsspektrum der Unternehmen, das u.a. die Herstellung von Schmiede- und Blechformteilen, Erzeugnissen der Pulvermetallurgie, Stahlrohre und Blankstahl sowie verschiedene Dienstleistungen, wie die Wärmebehandlung, die mechanische Bearbeitung und Oberflächenbehandlung umfasst. Die Energiekosten der Metallbearbeitung machen rund 3 % der Herstellkosten aus und liegen somit nur geringfügig über dem Branchendurchschnitt des gesamten verarbeitenden Gewerbes (vgl. Hunger-Siegler/Segbers (2015), S. 15). Gleichwohl sind die KMU der Metallbearbeitung aufgrund steigender Metall-Einkaufspreise indirekt von steigenden Strom- und Produktionskosten der Metallerzeugung in Deutschland betroffen. Gleichzeitig sind die Kosteneinsparungspotenziale durch Prozessinnovationen angesichts des hohen Materialkostenanteils, der bei 60 % bis 70 % liegt, vergleichsweise gering. Vielmehr sind die KMU der Metallbearbeitung zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit auf eine enge Kooperation entlang der Wertschöpfungskette von der Metallerzeugung bis hin zum Fahrzeug- und Maschinenbau angewiesen, um Kostenvorteile zu erreichen.

Analog zur Metallbearbeitung ist die Gießerei-Industrie ebenfalls überwiegend mittelständisch strukturiert und auf Nischenmärkte spezialisiert. Die Bruttowertschöpfung im Bereich Gießereierzeugnisse lag 2015 bei rund 5 Mill. EUR (vgl. Destatis 2016), wobei Gießereien über die vorhandenen Anlagen auf bestimmte Legierungen, Größen bzw. Gewichte der Gussprodukte festgelegt sind. Deutschlandweit sind in knapp 600 Eisen-, Stahl-, und Nichteisen-Metallgießereien ca. 80.000 Mitarbeiter beschäftigt; dies entspricht nahezu 1/3 aller Beschäftigten in der Metallindustrie. Im Gegensatz zur Metallbearbeitung sind Gießereiprozesse aufgrund des Schmelzbetriebes, der Wärmebehandlung und dem Putzen sowohl durch einen deutlich höheren Anteil an Energie- (ca. 6 %) als auch Personalkosten (ca. 25 %) gekennzeichnet. Vor allem die hohe Personalintensität der Gießereien hat zur Folge, dass es für die KMU nach dem reformierten EEG immer schwieriger wird, Ermäßigungen des Nutzungsentgeltes, der Konzessionsabgaben und der Strom- und Energiesteuer

zu erreichen (vgl. Rosenkranz/Quentin (2013), S.21 ff.). Trotz der vergleichsweise geringen wirtschaftlichen Größe des Sektors zählt die deutsche Gießerei-Industrie aufgrund ihres Know-Hows, der hochwertigen Qualität der Produkte sowie kurzer Lieferzeiten zu den wichtigsten Zulieferbranchen im Fahrzeug-, Maschinen- und Anlagenbau³. Beispielsweise konnten in der Automobilindustrie an Gusskomponenten, wie Motorblöcken und Getriebegehäusen, durch den Leichtbau deutliche Gewichtsersparungen erzielt werden, die maßgeblich zur Einhaltung der CO₂-Emissionsvorgaben der Fahrzeuge beigetragen haben. Entsprechend eng ist die Verzahnung der F&E- bzw. Konstruktionstätigkeiten zwischen den Gießereien und den Abnehmern im Fahrzeug und Maschinenbau. Gleiches gilt für die Abstimmung entlang der Wertschöpfungskette. Beispielsweise konnten Gießereien bereits frühzeitig eine Materialalterungsklausel durchsetzen, in denen zukünftig steigende Materialkosten in den langfristigen Rahmenverträgen mit der Automobilindustrie berücksichtigt wurden (vgl. Hunger-Siegler/Segbers (2015), S. 4 ff.).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der Sektor der Metallherzeugung und -bearbeitung im Hinblick auf die gesteckten klimapolitischen Ziele schlechter aufgestellt ist als die chemisch-pharmazeutische Industrie in Deutschland. Die oligopolistischen Marktstrukturen am Anfang und Ende der Wertschöpfungskette, d.h. wenige Rohstoff- und Bergbaukonzerne als Lieferanten und wenige Großabnehmer, insbesondere die Automobilindustrie als Kunden haben dazu geführt, dass sich die kleinen und mittelständischen Betriebe der Metallherzeugung und -bearbeitung in einer „Sandwich-Position“ befinden. Die Unternehmen der Metallbearbeitung und Gießerei-Industrie sind verstärkt auf Nischenmärkte sowie deutliche Effizienzsteigerungen angewiesen, z. B. durch Werksverträge oder Outsourcing personalintensiver Tätigkeiten, um wirtschaftlich zu bleiben. Andererseits ergeben sich im Fahrzeug-, Maschinen- und Anlagenbau, aber auch im Baugewerbe zunehmend wachsende, kleine Märkte, indem bestehende Werkstoffe durch Leichtbauwerkstoffe, wie hochfeste Stähle, Aluminium- oder Magnesium-Legierungen, substituiert werden. Solche Substitutionen, bspw. in der Automobilindustrie, erfordern jedoch viel Zeit – meist mehr als 7 Jahre – und einen hohen Forschungs- und Entwicklungsaufwand entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Trotz des schwierigen Marktumfeldes ist eine Verlagerung der Produktionskapazitäten – und damit der Verlust der Innovationsfähigkeit der Wertschöpfungskette – kaum zu erwarten, da es den KMU häufig am notwendigen Kapital fehlt und die Investitionen mit erheblichen Risiken verbunden sind. Anders ist die Situation in der Stahlbranche, die aufgrund massiver Überkapazitäten zunehmend konsolidiert. Die absehbaren Standortschließungen in Deutschland werden negative Auswirkungen auf den Wirtschaftszweig der Metallbearbeitung, aber auch den Fahrzeugbau- und Maschinenbau haben, sind jedoch nicht das Ergebnis steigender Energiekosten oder Umweltauflagen.

³ Siehe den Beitrag von G. Wolf et al. in diesem Band.

Herstellung von Glas, Keramik und Baustoffen

Neben der chemisch-pharmazeutischen Industrie sowie der Metallherzeugung und -bearbeitung zählen die Herstellung von Glas, Keramik und Baustoffen mit ca. 1500 Betrieben und 196.000 Mitarbeitern zu den größeren energieintensiven Wirtschaftszweigen des verarbeitenden Gewerbes. Beispielsweise gehört die Herstellung von Zement mit einem Energiekostenanteil von mehr als 52 % der Bruttowertschöpfung zu den Prozessen mit der höchsten Energieintensität (vgl. Buttermann/ Baten (2013), S. 10 ff.), während als Rohstoff vermehrt Hüttensand aus Hochofenschlacke von Stahlwerken eingesetzt wird. Alles in allem erwirtschaftete diese stark diversifizierte Branche im Jahr 2015 eine Bruttowertschöpfung von knapp 14 Mrd. EUR. Der Wirtschaftszweig umfasst die Herstellung von Glas und Glaswaren (23 %), feuerfeste keramische Werkstoffe und Waren (3 %), keramische Baumaterialien (6 %), sonstige Porzellan- und keramische Erzeugnisse (9 %), Zement, Kalk und gebrannten Gips (30 %), die Bearbeitung von Naturwerk und -steinen (1 %) sowie die Herstellung sonstiger Erzeugnisse aus nichtmetallischen Mineralien (15 %) (vgl. Destatis 2015). Hauptabnehmer der Produkte ist die heimische Bauwirtschaft; entsprechend ausgeprägt ist der konjunkturelle Gleichklang der Wirtschaftszweige (vgl. Grömling (2011), S. 2 ff.), wobei sich das Baugewerbe nach Jahren der Stagnation gerade wieder erholt. Im Gegensatz zu den metallischen Erzen sind die mineralischen Einsatzstoffe, wie Bausand/Baukies, Kalkstein oder Quarzsand, in Deutschland relativ reichlich vorhanden. Ebenso wie in anderen Branchen des verarbeitenden Gewerbes herrschen bei der Herstellung von Glas, Keramik und Baustoffen in den kapitalintensiven Segmenten, wie bei der Herstellung von Zement, Kalk und Gips, große mittelständische Betriebe bzw. Großunternehmen vor, während in den anderen Wirtschaftszweigen, z. B. der Keramik, die KMU dominieren.

Auf der einen Seite profitiert die deutsche Baustoffindustrie im besonderen Maße von dem Energiekonzept 2050 und den darin formulierten klimapolitischen Zielen, da rund 1/3 der CO₂-Emissionen und rund 40 % des Primärenergieverbrauches auf den Gebäudebereich entfallen (vgl. Grömling (2011), S. 6). Es sind somit vermehrt innovative, nachhaltige und wärmedämmende Baumaterialien nötig, d.h. es bieten sich Marktchancen, die von KMUs genutzt werden können. Andererseits ist die Baustoffindustrie genauso wie die Grundstoffchemie und die Metallherzeugung von steigenden Stromkosten und zunehmenden CO₂-Beschränkungen betroffen. Nach Grömling (2011) wurden durch Verfahrensinnovationen, vor allem bei der Herstellung von Bindemitteln (Zement, Kalk, Gips) und keramischen Produkten (Ziegel, Fliesen, Feuerfest) im Zeitraum 1990 bis 2008 die energiebedingten CO₂-Emissionen um 40 % gesenkt. Die Glasindustrie umfasst rund 400 Betriebe in Deutschland in den Bereichen Behälterglas, Flachglas, Glasfasern, Spezialglas sowie Glasbearbeitung und -veredelung für unterschiedliche Anwendungen. Beispielsweise produziert die Glasfaserindustrie Dämmstoffe (Glas- und Steinwolle) für die Bauwirtschaft, Verstärkungsfasern für die Kunststoffindustrie und textile Glasfasern für die Textilindustrie. Ähnlich wie beim Werkstoff Stahl existiert beim Glas ein geschlossener Verwertungskreislauf. Zudem

konnte aufgrund effizienterer Produktionstechniken der Energieverbrauch deutlich gesenkt werden.

Eng verbunden mit der Metallerzeugung sowie der Gießerei-Industrie ist dagegen der Zweig der Feuerfest-Industrie, der mit ca. 6.500 Betrieben und einer Produktion von 1,6 Tonnen in Deutschland rund 1/3 der europäischen Feuerfestproduktion abdeckt (vgl. Grömling (2011), S. 24 ff). Die nichtmetallischen keramischen Werkstoffe, deren Erweichungspunkt über 1.500 °C liegt, kommen zudem in der Baustoffindustrie, Petrochemie, Energiewirtschaft und Abfallverwertungsanlagen zum Einsatz. Insofern nimmt die Feuerfest-Industrie eine Schlüsselposition bei den energieintensiven Industrien ein, um die angestrebte Rohstoff- und Energieeffizienz zu erreichen⁴.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie ein integraler Bestandteil des verarbeitenden Gewerbes in Deutschland ist. Angesichts des hohen energetischen Energieverbrauchs und der erheblichen CO₂-Emissionen sind die Wirtschaftszweige der Metallerzeugung und -bearbeitung sowie ausgewählte Branchen der Herstellung von Glas, Keramik und Baustoffen im besonderen Maße von der Energiewende und den gesteckten klimapolitischen Zielen betroffen. Allen diesen Branchen gemeinsam sind die Hochtemperaturprozesse.

Eine stetige Verlagerung der Produktionskapazitäten ins Ausland bzw. ein Abbau heimischer Überkapazitäten ist vor allem in der Grundstoffchemie und Metallerzeugung zu beobachten. Hiervon betroffen sind in erster Linie die KMU der Metallbearbeitung, Gießerei-Industrie sowie die Spezialchemie, die zusätzlich zu den höheren Energiekosten steigende Materialaufwendungen und längere Lieferzeiten am Standort Deutschland zu erwarten haben. Gleichzeitig verlagern viele Großabnehmer dieser Branchen, insbesondere die Automobilindustrie, ihre Produktions-, aber auch Teile der Forschungs- und Entwicklungskapazitäten verstärkt ins Ausland, sodass das Marktumfeld für die KMU immer schwieriger wird.

Zur Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit sind die Unternehmen der Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie sowohl bei den Produkten als auch den Herstellprozessen auf Innovationen angewiesen. Erfolgreiche Innovationen, wie z. B. Leichtbauwerkstoffe, erfordern hohe Investitionen, lange Entwicklungszeiten sowie eine enge Kooperation entlang der Wertschöpfungsketten von der Rohstoffgewinnung bis zum Fahrzeug- und Maschinenbau sowie der Bauwirtschaft. In die Innovationsnetzwerke sind die mit der Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie eng verbundenen Branchen, wie der Anlagenbau, miteinzubeziehen. Ferner bedarf es eines entsprechenden Technologiemanagements und einer Systemanalyse.

Technologiemanagement und Systemanalyse

Die Erfassung, Bewertung und Analyse der Chancen bzw. Risiken, die mit der Energiewende und den gesteckten klimapolitischen Zielen einhergehen, sind Gegenstand des Technologiemanagements und der Systemanalyse. Gemeinhin umfasst das Tech-

⁴ Siehe den Beitrag von C. Aneziris et al. in diesem Band.

nologiemanagement die Planung, Durchführung und Kontrolle der Entwicklung und Verwertung von Produkt- oder Prozesstechnologien, d.h. des Wissens und der Fertigkeiten zur Lösung technischer Probleme sowie der Anlagen und Verfahren zur praktischen Umsetzung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse (vgl. Schuh (2011), S. 5 ff.).

Der Begriff der Systemanalyse stammt dagegen aus den Natur- und Ingenieurwissenschaften und beinhaltet die Beschreibung von (Teil-)Systemen mittels mathematischer Modelle (vgl. Imoden/Koch (2008), S. 5 ff.). Beide Aspekte gilt es zu integrieren, um die komplexen technischen und wirtschaftlichen Wirkungszusammenhänge entlang der Wertschöpfungsketten analysieren zu können.

Die nachfolgenden Ausführungen orientieren sich an den Kernaufgaben des betrieblichen Technologiemanagements, d. h. der Strategieformulierung, dem frühzeitigen Erkennen von aufkommenden Technologie sowie die Planung und Entwicklung bis zur Verwertung bestehender Lösungen.

Technologiestrategie

Aufgrund der hohen Anlagenintensität ist die Technologiestrategie in vielen Konzernen, aber auch mittelständischen Unternehmen der Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie, ein wesentlicher Bestandteil der Unternehmensstrategie. Eine Technologiestrategie beschreibt in groben Zügen, wie ein Unternehmen Produkt- und Prozesstechnologien einsetzen will, um Wettbewerbsvorteile zu erzielen (vgl. Porter, M. (1983), S. 1 ff.). Anders als in anderen Sektoren des verarbeitenden Gewerbes hängen in den Betrieben der Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie Produkt- bzw. Werkstoff- und Prozesstechnologien eng zusammen. Dies gilt für die chemisch-pharmazeutische Industrie, die Metallerzeugung, die Herstellung von Glas, Keramik und Baustoffen, aber auch Gießereien, die über die vorhandenen Anlagen auf bestimmte Legierungen, Größen bzw. Gewichte sowie Seriengrößen der Gussprodukte festgelegt sind. Gemäß dem so genannten Resource-Based View (vgl. Wernerfeldt (1984), S. 171 ff.) und Kernkompetenzansatz (vgl. Prahalad/Hamel (1990), S. 79 ff.) des Strategischen Managements lassen sich mittels Technologien Wettbewerbsvorteile generieren, wenn die darauf aufbauenden Kompetenzen wertvoll, selten und von der Konkurrenz schwer zu imitieren bzw. nicht zu substituieren sind.

Zu diesem Zweck sind die gegenwärtigen und künftigen Technologiefelder des Unternehmens sowie der angestrebte Grad der technologischen Leistungsfähigkeit festzulegen (Wolfrum, B. (2000), S. 21 ff.). Naturgemäß haben Technologiefelder, wie die Energieeffizienz und der Umweltschutz, für Betriebe der Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie eine große strategische Bedeutung. Dabei streben die Unternehmen häufig bei bestimmten Werkstoffen eine Technologieführerschaft an, um Nischenmärkte zu besetzen. Seitens der Energieeffizienz und des Umweltschutzes der Prozesstechnologien liegt der Schwerpunkt eher in der technologischen Präsenz mit dem Ziel, Kosteneinsparungspotentiale zu realisieren und auf dem aktuellen Stand der Technik zu bleiben. Ein wesentlicher Aspekt ist hierbei die Einhaltung gesetzlicher Auflagen.

Ferner sind im Rahmen der Technologiestrategie die Beschaffungsquellen zu definieren. Bezüglich der Beschaffungsquellen kann grundsätzlich zwischen einer unternehmensinternen Forschung und Entwicklung sowie der unternehmensexternen Beschaffung von Technologien differenziert werden. Zur externen Beschaffung gehören Mergers & Acquisitions ganzer Unternehmen oder Unternehmensteilen und der Kauf von Technologien, die Auftragsforschung sowie die Lizenznahme. Eine eigenständige Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Energieeffizienz und des Umweltschutzes bietet sich an, sobald ausreichend Forschungs- und Entwicklungskapazitäten sowie Kompetenzen vorliegen. Im Regelfall handelt es sich jedoch um einen Mix an Auftragsforschung, Technologiekauf und eigener Forschung und Entwicklung.

Schließlich spielen zeitliche Aspekte bei der Strategieformulierung, bspw. in Form eines Technologiekalenders, eine gewichtige Rolle. Durch Konzepte, wie das Simultaneous Engineering, d. h. eine (teilweise) Parallelisierung der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, lassen sich die Entwicklungszeiten von Technologien verkürzen (vgl. Sohlenius (1992), S. 645 ff.). Ein solches Vorgehen ist mit vergleichsweise hohen Kosten und Risiken verbunden. Gelingt es dem Unternehmen jedoch eine Technologieführerschaft bzw. die Position eines Pioniers am Markt zu erreichen, ist dies mit zahlreichen Vorteilen verbunden. Eine zeitlich begrenzte Monopolstellung ermöglicht höhere Preise, das Etablieren von Standards sowie die Realisierung von Erfahrungskurveneffekten und damit langfristigen Kostenvorteilen. Alternativ kann die Rolle des (frühen) Folgers eingenommen werden, wenn es gelingt von dem Know-How zu partizipieren, ohne die hohen F&E-Aufwendungen und Risiken zu tragen.

Den Ausgangspunkt der Strategieformulierung bildet häufig eine SWOT-Analyse, in der die Stärken (Strength) und Schwächen (Weaknesses) einer Technologie sowie die Chancen (Opportunities) und Risiken des Marktumfeldes qualitativ beschrieben werden (vgl. Hill/Westbrook (1997), S. 46 ff.). Dieses einfache und vielfältig einsetzbare Instrument des strategischen Managements lässt sich sowohl auf Werkstoff- und Prozesstechnologien als auch Technologie-/Markt-Kombinationen, aber auch ganze Branchen anwenden. Beispielsweise führen Hunger-Siegler/Segbers ((2015), S. 1 ff.) und Labitzke/Reinisch ((2015), S. 1 ff.) eine SWOT-Analyse für die Metalherzeugung und -bearbeitung bzw. die chemisch-pharmazeutische Branche durch. In diesem Zusammenhang bewerten die Autoren die höheren Anforderungen der deutschen Energie- und Klimapolitik als Risiko für die Metallindustrie.

Ergänzt wird die SWOT-Analyse vielfach durch den Einsatz der Portfolio-Technik. Zu diesem Zweck wurde in der Literatur zum Technologiemanagement eine große Zahl an Portfolio-Konzepten entwickelt (Pfeiffer et al. (1987), S. 77 ff.). Ziel dieser Ansätze ist es, relevante Technologien anhand verschiedener Dimensionen, z. B. der Technologieattraktivität (am Markt) und der Ressourcenstärke (des Unternehmens), zu bewerten und anhand der Positionierung in der Matrix Normstrategien der Technologieentwicklung abzuleiten. Wertschöpfungskettenorientierte Portfolio-Ansätze sind hingegen im Technologiemanagement selten zu finden. In Anlehnung an Lee (2002) lässt sich die Technologiestrategie in Abhängigkeit von der Nachfrage- und Ange-

botsunsicherheit wie folgt definieren (vgl. Abb. 2).

Bei vielen Commodities, wie den standardisierten Produkten der Grundstoffchemie oder Metallerzeugung, herrschen eine verhältnismäßig gleichförmige Nachfrage und ein stabiles Angebot an Roh- und Einsatzstoffen vor. Im Regelfall sind Commodities durch geringe Deckungsbeiträge, aber große Nachfrage-

volumina gekennzeichnet, sodass der Schwerpunkt des Technologiemanagements auf der Effizienz der Wertschöpfungsketten und dem Wirkungsgrad der Anlagen liegen sollte. Teilweise existieren bei den Commodities aber auch größere Angebots- bzw. Preisschwankungen, wie bspw. bei Kupfer, Germanium oder Stahlschrott, so dass zusätzlich zur Effizienz risikoabsichernde Maßnahmen vorzunehmen sind. Im Vordergrund der Strategie sollte die Flexibilität der Technologien hinsichtlich der Roh- und Einsatzstoffe stehen. Anders ist die Situation bei innovativen Produkten, wie beispielsweise Spezialchemikalien, die durch hohe Deckungsbeiträge, aber relativ geringe, schwer prognostizierbare Nachfragemengen charakterisiert sind. Im Falle einer stabilen Versorgung an Roh- und Einsatzstoffen bedarf es einer effektiven Wertschöpfungskette, um sich schnell den wandelnden Mengen- und Qualitätsanforderungen wachsender Nischenmärkte anpassen zu können. In kurzen Zyklen und mittels eines systematischen Prozesses sind entlang der Wertschöpfungskette Technologien zu entwickeln, zu selektieren, zu validieren und in marktfähige Produkte zu überführen. Ein wesentlicher Aspekt der Strategieformulierung ist in diesem Zusammenhang die Skalierbarkeit der Technologien. Agile Wertschöpfungsketten sind hingegen sowohl mit einer hohen Nachfrageunsicherheit als auch mit einer hohen Angebotsunsicherheit konfrontiert.

Idealerweise sollten die qualitativen Aussagen der Technologiestrategie durch quantitative Umfeldanalysen gestützt werden. Zu den Methoden der Systemanalyse gehören so genannten Integrated Assessment Modelle inklusive makroökonomischer Input-Output-Modelle. Breun (2016, S. 55 ff.) vermittelt einen aktuellen Überblick zur Bewertung klimapolitischer Instrumente.

Technologiefrüherkennung

Eng mit der Strategieformulierung verbunden ist die Technologiefrüherkennung, mit dessen Hilfe zukünftig bedeutende Technologien erfasst und beurteilt werden. In diesem Kontext gilt es – neben der Leistungsfähigkeit und zeitlichen Verfügbarkeit – weitere Aspekte, wie die Akzeptanz sowie die positiven und negativen Folgewirkungen einer Technologie einzuschätzen. Im Vordergrund der Früherkennung steht das Technologiemonitoring und -scouting, d.h. die Informationssammlung und -aufbereitung (vgl. Wellensiek et al. (2011), S. 89 ff.), wobei typischerweise folgende Instrumente der Technologiefrüherkennung eingesetzt werden:

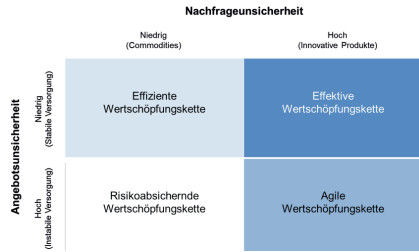


Abb. 2: Technologiestrategien von Wertschöpfungsketten
Quelle: In Anlehnung an Lee (2002)

- Delphi-Studien: Delphi-Studien beruhen auf einer systematischen, mehrstufigen Expertenbefragung (vgl. Gupta (1996), S. 185 ff.). Nach jeder Bewertungsrunde erhalten die Experten eine Rückkopplung der bisherigen Befragungsergebnisse, um ihre Prognosen anpassen und ggf. verfeinern zu können. Ein Beispiel für eine solche Delphi-Studie ist die Untersuchung von Jörß/Wehnert (2006, S. 47 ff.) zu den Europäischen Energiezukünften.
- Szenario-Technik: Die Delphi-Studien lassen sich mittels Szenario-Analysen ergänzen (vgl. Börjeson et al. (2006), S. 723 ff.). Szenarien beschreiben alternative, zukünftige Entwicklungen oder Umweltzustände, wobei üblicherweise zwischen Extremszenarien (Best Case / Worst Case) und einem wahrscheinlichen Szenario (Trendszenario) differenziert wird. In einem ersten Schritt der Szenario-Technik erfolgen eine Aufgaben- und Problemanalyse sowie eine Einflussanalyse, in der die Wechselwirkungen der wesentlichen Determinanten der Umwelt erfasst werden. Daraufhin wird eine Trendprojektion, die Ermittlung der Szenarien sowie deren Bewertung und Interpretation vorgenommen. Eine Studie von Heilman et al. (2015) befasst sich bspw. mit Analyse der Zukunftsszenarien der energieintensiven Industrien in Deutschland.
- Technologielebenszykluskonzepte: Mittels der Konzepte der Technologielebenszyklen werden die idealtypischen Entwicklungsverläufe von Produkt- und Prozesstechnologien aufgezeigt und in Phasen untergliedert. Anhand der einzelnen Phasen von der Technologienentwicklung bis zur -degeneration lassen sich wiederum Normstrategien ableiten (vgl. Ford/Ryan (1981), S. 117 ff.). Im Vordergrund der Betrachtung steht der Grad der Technologieausbreitung bzw. die Diffusion einer Technologie. Schuh, G, et al. (2011, S. 37 ff.) vermitteln einen Überblick über verschiedene Technologielebenszyklus-Modelle.
- Technologie-Roadmapping: Ebenfalls mit der zeitlichen Entwicklung einer Technologie beschäftigt sich das Technologie-Roadmapping (vgl. Möhrle/Isenmann (2008), S. 1 ff.). Im Mittelpunkt dieser Methodik stehen der Anwendungsbezug sowie die Kundenperspektive (vgl. Höck, M. et al (2014), S. 1 ff).

All diesen Methoden ist gemeinsam, dass die Analyseergebnisse mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Insbesondere bei langfristigen Technologieprognosen weichen – im Nachhinein betrachtet – die prognostizierten Größen meist deutlich von der realen Entwicklung ab, da sich viele relevante Ereignisse, wie Technologiesprünge oder eine Finanzkrise, nicht über einen längeren Zeitraum vorhersehen lassen. Der Nutzen der Technologiefrüherkennung liegt somit weniger in der Prognose als vielmehr in der systematischen Erfassung möglicher Chancen und Risiken sowie der dazugehörigen Wechselwirkungen der Umwelteinflussfaktoren.

Technologieplanung und -entwicklung

Aufbauend auf der Strategie und den Erkenntnissen der Früherkennung umfasst die Technologieplanung und -entwicklung die anwendungsorientierte Gewinnung und Weiterentwicklung des Wissens bzw. der Fähigkeiten zur Lösung technischer Probleme (vgl. Klappert (2011), S. 223 ff.). Ziel der Technologieplanung und -entwicklung in der Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie ist es, technologische Leistungspotentiale, d.h. Anlagen und Verfahren zur Herstellung marktfähiger Produkte zu generieren. Grundsätzlich können die Entwicklungen einerseits aus zukünftigen Markt- bzw. Kundenanforderungen (Market Pull) abgeleitet werden. Andererseits können aber auch durch Technologieentwicklungen Marktbedürfnisse entstehen (Technology Push) (vgl. Verworn/Herstatt (2007), S. 111 ff.). Ein Beispiel für einen Technology Push ist den Entwicklung eines Geiß-Walz-Verfahrens zur Herstellung von Magnesiumflachprodukten, das im Vergleich zu den bestehenden Technologien eine kostengünstiger Produktion von Magnesiumblechen ermöglicht (vgl. Höck et al. 2015). Insbesondere Technology Push- Entwicklungen sind aufgrund ihrer Komplexität mit hohen Investitionen und langen Entwicklungszeiten verbunden, wobei Erfolgsquoten von 10–20 % realistisch sind (vgl. Klappert (2011), S. 226).

Generell können aus Sicht des Technologiemanagements zwei informationsintensive Prozesse unterschieden werden, die sich gegenseitig bedingen.

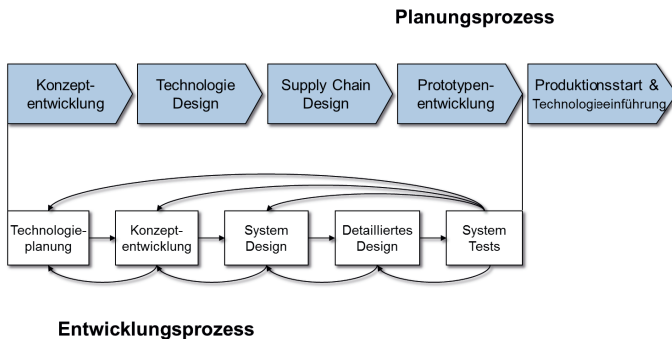


Abb. 3: Phasen der Technologieplanung und -entwicklung

Zum einen existiert der technische F&E-Prozess, der in der Regel durch viele Iterationen gekennzeichnet ist. Die Phasen des Entwicklungsprozesses, wie die Technologieplanung, Konzeptentwicklung, das Systemdesign, detaillierte Design und Systemtests (vgl. Brockhoff (1999), S. 31 ff.), müssen je nach den Ergebnissen der nachgelagerten Stufen mehrfach durchlaufen werden, um eine Lösung zu finden. Begleitet wird der F&E-Prozess durch einen betriebswirtschaftlichen Planungsprozess, der überwiegend sequentiell in Form eines Stage-Gate-Modells (vgl. Cooper et al. (2002), S. 21 ff.) organisiert ist. Hier stellt der Abschluss einer jeden Phase einen Meilenstein dar, an dem über die Fortführung des Projektes und das weitere Vorgehen entschieden wird. Typische Phasen des Technologieplanungsprozesses sind:

- **Konzeptentwicklung:** In einem ersten Schritt der Konzeptentwicklung gilt es zunächst erfolgsversprechende Ideen zu generieren. Analog zur Technologiestrategie erfolgt anschließend eine Auswahl der zur Umsetzung benötigten Techniken, es sind die Beschaffungsquellen zu definieren sowie das Timing der Markteinführung zu bestimmen. In diesem Zusammenhang kommen die herkömmlichen Methoden des Projektmanagements, wie die Netzplantechnik, zum Einsatz.
- **Technologie-Design:** Im Anschluss an die Konzeptentwicklung gilt es die Entwicklungsziele sowie das Design der Technologie zu konkretisieren. Zu diesem Zweck werden Technologiebasisstudien durchgeführt, in denen der Stand der Technik und vor allem die Machbarkeit der geplanten Entwicklung untersucht wird (vgl. Eldred/McGrath (1997), S. 41 ff.). Parallel können Projektsteuerungsmethoden, wie die Design-Struktur-Matrix, zur Beschleunigung des technischen Entwicklungsprozesses eingesetzt werden (vgl. Höck et al. (2011), S. 17 ff.).
- **Supply Chain Design:** Falls die Basisstudien die grundsätzlich Machbarkeit der geplanten Entwicklung bestätigt haben, folgen in einer nächsten Phase weitere Technologiestudien. Ein wesentlicher Aspekt ist in diesem Zusammenhang die Lieferantenverfügbarkeit, ggf. sind zusätzliche Partner bei der Technologieentwicklung hinzuzuziehen. Ferner sollte bereits in dieser Phase ein erster Geschäftsplan entwickelt werden, um die ökonomische Vorteilhaftigkeit des F&E-Projektes sicherzustellen.
- **Prototypenentwicklung:** Den Abschluss des Technologieplanungsprozesses bildet die Prototypenentwicklung. Als Prototyp wird das erste funktionsfähige Versuchsmodell bezeichnet. Aus betriebswirtschaftlicher Sicht steht in dieser Phase die kommerzielle Verwertung der Technologie im Vordergrund, auf die im nächsten Abschnitt noch ausführlicher eingegangen wird.

Nach erfolgreich abgeschlossener Prototypenentwicklung kann der Produktionsstart (SOP) bzw. die Technologieeinführung vorgenommen werden. Im Hinblick auf die Energieeffizienz und den Umweltschutz, können in allen Phasen der Technologieplanung Öko-Bilanzen oder auch Life Cycle Assessments zum Einsatz kommen (vgl. Höck et al. (2016), S. 2016). Ziel ist die systematische Analyse der Umweltwirkungen von Technologien während der gesamten Nutzungsdauer, inklusive dem Rückbau. Gemäß der Norm ISO 14040 bzw. 14044 umfasst eine Ökobilanz die Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen, eine Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung. Zu diesem Zweck können eine Vielzahl von Bewertungsverfahren (vgl. Günther (2008), S. 292 ff.) sowie unterstützende Softwareprogramme eingesetzt werden

Technologieverwertung

Ein wesentlicher Bestandteil des Technologiemanagements ist die Technologieverwertung, d.h. die finanzielle Ausschöpfung des technologischen Potenzials während des gesamten Lebenszyklus, wobei grundsätzlich zwischen einer internen und externen Ver-

wertung differenziert werden kann (vgl. Brodbeck, H. (1999), S. 12 ff.). In vielen Unternehmen der Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie erfolgt eine interne Technologieverwertung, d. h. eine Eigennutzung der Entwicklungen für angestammte oder neue Produkte/Märkte in Form einer technologiebasierten Diversifikation oder Technologieplattformen, um sich langfristige Wettbewerbsvorteile zu verschaffen. Alternativ besteht die Möglichkeit einer gemeinschaftlichen Nutzung, z. B. in F&E-Kooperationen, Strategischen Allianzen oder Joint Ventures, insbesondere dann, wenn es den Unternehmen an dem notwendigen Kapital fehlt und/oder das Risiko als zu groß eingeschätzt wird. Andere Formen der externen Technologieverwertung sind die Lizenzierung (Patent- und Know How-Lizenzierung) sowie der Verkauf (Technologieverkauf, Verkauf von Unternehmensteilen, Spin-offs). Ein Überblick über die Vor- und Nachteile dieser verschiedenen Optionen gibt Schuh et al. ((2011b), S. 241 ff.)

Zu den gängigen Methoden des Technologiemanagement gehören in diesem Kontext Marktstudien und Investitionsrechnungen, um die ökonomische Vorteilhaftigkeit der Technologieentwicklung zu prüfen. Beispielsweise beschreiben Höck et al. ((2013), S. 214 ff.) die wirtschaftliche und ökologische Herausforderung der Magnesiumgewinnung aus Salzlösungen der Kaliindustrie in Deutschland auf Grundlage einer vorangegangenen Marktstudie zum Magnesiummarkt (vgl. Höck, M. et al. (2013b), S. 92 ff.). Des Weiteren gilt es, der Technologienentwicklung frühzeitig ein Geschäftsmodell zu hinterlegen. Ein Geschäftsmodell beschreibt die betriebswirtschaftliche Funktionsweise einer Technologie, insbesondere wie mit der Produkt- oder Prozesstechnologie Gewinne erwirtschaftet werden sollen. Ein inzwischen weitverbreitetes Instrument zur Formulierung und Analyse von Geschäftsmodellen ist der Business Model Canvas von Osterwalder/Pigneur (2010), der von der Strategieformulierung bis hin zur Technologieverwertung eingesetzt werden kann.

Den Kern der Geschäftsmodellierung bildet das Werte- bzw. Nutzenversprechen der neuen Technologie, d. h. die Schnittmenge aus technologischem Potential und den Markt-/Kundenanforderungen. Bei der Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie stehen überwiegend Kosteneinsparungen im Vordergrund, gelegentlich aber auch spezifische Eigenschaften der Produkte. Daraufhin gilt es verschiedene Kundensegmente zu identifizieren. Schließlich gilt es die Vertriebs- und Kommunikationskanäle sowie die Einnahmequellen einer internen oder externen Verwertung zu bestimmen.

Des Weiteren sind die Schlüsselaktivitäten der Technologieentwicklung und -anwendung sowie die dazu benötigten Schlüsselressourcen (z. B. Physische Ressourcen, Know How, Humankapital) zu identifizieren. Im Regelfall erfordert die Technologieentwicklung und -anwendung wichtige Partner, wie z.B. die Kooperation mit anderen Forschungsinstituten oder Anlagenbauer. Aus diesen Konstrukten lassen sich die Investitions- und Betriebskosten der Technologieanwendung abschätzen, die mit den erwarteten Einnahmen abzugleichen sind.

Ebenso wie die Instrumente der Strategieformulierung und Früherkennung stellt der Business Model Canvas eine einfache und vielseitig einsetzbare Methodik dar, um die Technologieentwicklung bzw. -verwertung zu planen und zu kontrollieren.



Key Partners TU Bergakademie Freiberg External: 	Key Activities Services: <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> Research: <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> Network: <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	Value Proposition e.g. Newness, Performance, Customization, Cost Reduction, Risk Reduction, Convenience / Usability ... in comparison to competition	Customer Relationships Personal Assistance: <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> Events: <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> Network: <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	Customer (Segments)
	Key Resources Physical: <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> Intellectual: <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> Human: <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	Channels Publications: <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> Conferences: <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> Other: <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	Cost Structure Capital Expenditures <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/> <input type="text"/>	

Abb. 4: Business Model Canvas zur Technologieentwicklung.
Quelle: In Anlehnung an Osterwalder/Pigneur (2010)

Zusammenfassung und Ausblick

Die Stärken der deutschen Industrie liegen vor allem in der Schaffung qualitativ hochwertiger Güter, maßgeschneiderter Systemlösungen sowie in der Beherrschung der Komplexität, welches eine enge Verzahnung der Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie mit der Investitions- und Verbrauchsgüterindustrie voraussetzt. Die im Energiekonzept 2050 festgeschriebene Energiewende sowie die gesteckten klimapolitischen Ziele haben die Rahmenbedingungen am Industriestandort Deutschland grundlegend verändert, welches mit Risiken, aber auch Chancen für die Unternehmen verbunden ist. Im besonderen Maße vom Energiekonzept 2050 betroffen sind die Wirtschaftszweige der Metallerzeugung und -bearbeitung sowie ausgewählte Branchen der Herstellung von Glas, Keramik und Baustoffen. Besser aufgestellt scheint dagegen die chemische Industrie, die aufgrund stark divergierender Wertschöpfungsketten und hoher Kapazitätsauslastungen einfacher Kostensteigerungen an die Endabnehmer weiterreichen kann. Um weiterhin wettbewerbsfähig zu bleiben, sind die KMU der Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie auf Innovationen angewiesen. Werkstoff- oder Prozessinnovation erfordern jedoch hohe Investitionen, lange Entwicklungszeiten sowie eine enge Kooperation entlang der Wertschöpfungsketten von der Rohstoffgewinnung bis zum Fahrzeug- und Maschinenbau bzw. der Bauwirtschaft.

Ferner setzen erfolgreiche Innovationen ein entsprechendes Technologiemanagement voraus, das in vielen Betrieben der Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie

noch ausbaufähig ist. Den Ausgangspunkt des Technologiemanagements bilden die Strategieformulierung und Früherkennung aufkommender Techniken. Zu diesem Zweck stehen in der Betriebswirtschaftslehre zahlreiche einfache und vielseitig einsetzbare Konzepte, wie die Portfolio- oder die Szenario-Technik, zur Verfügung. Die Methoden des strategischen Managements erlauben eine unkomplizierte Bewertung möglicher Chancen und Risiken. Des Weiteren gilt es die Technologieentwicklung zielführend zu steuern. Auch in diesem Zusammenhang steht eine Reihe von Methoden, vom klassischen Projektmanagement bis zur Design-Struktur-Matrix, bereit. Von besonderer Bedeutung für den wirtschaftlichen Erfolg ist, dass der Technologieentwicklung bereits frühzeitig ein (grobes) Geschäftsmodell hinterlegt wird.

In der Vergangenheit profitierte die Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie von den innovationsorientierten Abnehmerbranchen, insbesondere dem Fahrzeug- und Maschinenbau, aber auch von dem hohen Niveau heimischer Forschungseinrichtungen, die Werkstoffinnovationen vorangetrieben haben. In der Industrie haben sich dementsprechend viele vertikal integrierte Wertschöpfungsketten herausgebildet, die eine hohe Effizienz oder Effektivität aufweisen. Die zunehmende Digitalisierung in der Automobilindustrie, aber auch im Maschinenbau, z.B. in Form selbstfahrender PKW oder so genannter Smart Services, erfordern dagegen horizontal integrierte Wertschöpfungsketten von der Elektronik- über die Telekommunikationsbranche bis hin Zulieferindustrie, an deren Innovationen die Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie nur indirekt beteiligt ist. Zudem können Konzepte, wie die Additive Fertigung, die Produktionsabläufe im Fahrzeug- und Maschinenbau grundlegend verändern. Anstelle einer Produktion bei den Zulieferbetrieben, könnte die bedarfsgerechte Bereitstellung der Teile direkt vor Ort mittels 3D-Drucker erfolgen. Neben der Energieeffizienz und dem Umweltschutz bleiben der Grundstoff- und Produktionsgüterindustrie somit zahlreiche Herausforderungen, die es zukünftig zu meistern gilt.

Literatur

Böhmer, M./Hoch, M. (2016): Volkswirtschaftliche Folgen einer Schwächung der Stahlindustrie in Deutschland, Prognos AG, Berlin 2016.

Börjeson L. et al. (2006): Scenario types and techniques: Towards a user's guide, in: Futures, Vol. 38, Is. 7, S. 723 – 739.

Breun, P. (2016): Ein Ansatz zur Bewertung klimapolitischer Instrumente am Beispiel der Metallerzeugung und –bearbeitung, Diss. Karlsruhe Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe 2016.

Brodbeck, H. (1999): Strategische Entscheidungen im Technologie-Management. Relevanz und Ausgestaltung in der unternehmerischen Praxis, Bd. 2., Zürich 1999.

Buttermann, H./Baten, T. (2013): Wettbewerbsfähige Stromkosten – Voraussetzung für die Zementherstellung am Standort Deutschland, Münster 2013.

Cooper, R. et al. (2002): Optimizing the stage-gate-process: what bestpractice com-

- panies do, in: *Research Technology Management*, Vol. 45, Is. 5, S. 21 – 27.
- Eldred, E./McGrath, M. (1997): Commercializing new technology, in: *Research Technology Management*, Vol. 40, Is. 1 – 2, S. 41 – 4.
- Ford, D./Ryan, C. (1981): Taking technology to market, in: *Harvard Business Review*, Vol. 81, Is. 2, S. 117 – 126.
- Gehrke, B. et al. (2015): Innovationsindikatoren Chemie 2015, Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung GmbH (ZEW) und Niedersächsisches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. (NIW), Hannover 2015.
- Grömling, M. (2011): Volkswirtschaftliches Porträt der deutschen Baustoffindustrie, Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden (Hrsg.), Berlin 2011.
- Günther, E. (2008): *Ökologieorientiertes Management*, Stuttgart 2008.
- Gupta, U. (1996): Theory and applications of the Delphi technique: A bibliography (1975–1994), in: *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 53, Is. 2, S. 185 – 211.
- Hassan, A. (2013), Grundstoffchemie, in: *Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien – Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente*, T. Fleiter et al. (Hrsg), ISI-Schriftenreihe »Innovationspotenziale«, S. 109 – 276.
- Heilmann, D. et al. (2015): Zukunftsszenarien der energieintensiven Unternehmen in Deutschland, Handelsblatt Research Institute, Düsseldorf 2015.
- Hill, T./Westbrook, R. (1997): SWOT Analysis, in: *Long Range Planning*, Vol. 30, Is. 1, S. 46 – 52.
- Höck, M. et al. (2011): New Product Development Scheduling: Modelling Iterative Design Modes, in: B. Gobsch, J. Käschel, J. Vörös (Eds.) *Supply Chain and Corporate Environmental Management*, Hamburg, S. 17 – 35.
- Höck, M. et al. (2013a), Die wirtschaftliche und ökologische Herausforderung der Magnesiumgewinnung aus Salzlösungen der Kaliindustrie in Deutschland; in: *Metall*, Jg. 67, Heft 5, S. 214 – 219.
- Höck, M. et al. (2013b), Analyse und Prognose des Magnesiummarktes. In: *Metall*, Jg. 67, Heft 4, S. 92 – 97.
- Höck, M. et al. (2014), Zukunftstechnologie Lithium-Batterien – Technologie-Roadmap für Lithium-Gerätebatterien, *Chemie Ingenieur Technik*, Vol. 86, S. 1 – 8.
- Höck, M. et al. (2015), Concept of a quality assurance system for hot rolled TRC magnesium strips, Mg 2015 Conference proceedings, Korea, S. 121 – 127.
- Höck, M. et al. (2016): INTRA r³⁺ Integration und Transfer der r³ Fördermaßnahme – Ergebnisse der Begleitforschung, in: *Recycling und Rohstoffe*, K. Thome-Kozmiensky /

D. Goldmann (Hrsg.), Bd. 9, Neuruppin, S. 253–272.

Hunger-Siegler, C./Sebers, R. (2015), *Metallerzeugung und -bearbeitung Branchenbericht – Corporate Sector Report*, Commerzbank AG, Frankfurt 2015.

Jörß, W./Wehnert, T. (2006): *Europäische Energiezukünfte*, in: *Ökologisches Wirtschaften-Fachzeitschrift*, 2006, 21. Jg., Nr. 2., S. 47–50.

Kempermann, H./Brandt, H. (2014), *Risiken der Energiewende für die Industrie*, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen*, Vol. 64, Is. 3, S. 33–39.

Klappert, S. et al. (2011): *Technologieentwicklung*, in: *Handbuch Produktion und Management 2, Technologiemanagement*, Schuh, G./Klappert, S. (Hrsg.), 2. Aufl., Berlin et al. 2011, S. 223–239.

Labitzke, O./Reinisch, R. (2015), *Chemie Branchenbericht – Corporate Sector Report*, Commerzbank AG, Frankfurt 2015.

Lee, H. (2002): *Aligning Supply Chain Strategies with Product Uncertainties*, in: *California Management Review*, Vol. 44, Is. 3, S. 105–119.

Möhrle, M./Isenmann, R. (2008): *Grundlagen des Technologie-Roadmapping*, in: *Technologieroadmapping*, Möhrle, M./Isenmann, R. (Hrsg.), Berlin 2008, S. 1–15.

Osterwalder, A./Pigneur, Y. (2010): *Business Model Generation: A Handbook For Visionaries, Game Changers, And Challengers*, New York, 2010.

Pfeiffer, W. et al. (1987): *Technologie-Portfolio zu Management strategischer Zukunftsgeschäftsfelder*, 4. Aufl., Göttingen 1987.

Porter, M. (1983): *The technological dimension of competitive strategy*, in: Rosenbloom, R. (Hrsg.) *Research on Technological Innovation, Management and Policy*, Greenwich, S. 1–33.

Prahalad, C./Hamel, G. (1990): *The core competence of the corporation*, in: *Harvard Business Review*, Vol. 68, Is. 3, S. 79– 91.

Rosenkranz, G./Quentin, J. (2013): *Die Energiewende und die Strompreise in Deutschland – Dichtung und Wahrheit*, Deutsche Umwelthilfe, Berlin 2013.

Schlohmann, B. (2013): *Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Produktionstechnologien- Einsparpotentiale, Hemmnisse und Instrumente*, Fraunhofer Verlag 2013.

Schuh, G. et al. (2011): *Grundlagen zum Technologiemanagement*, in: *Handbuch Produktion und Management 2, Technologiemanagement*, Schuh, G./Klappert, S. (Hrsg.), 2. Aufl., Berlin et al. 2011, S. 33–55.

Schuh, G. et al. (2011b): *Technologieverwertung*, in: *Handbuch Produktion und Management 2, Technologiemanagement*, Schuh, G./Klappert, S. (Hrsg.), 2. Aufl., Berlin et al. 2011, S. 241–279.

Solenius, G. (1992): Concurrent Engineering, in: CIRP Annals - Manufacturing Technology, Vol. 41, Is. 2, S. 645–655.

Statistisches Bundesamt (2008), Klassifikation der Wirtschaftszweige – Mit Erläuterungen.

Statistisches Bundesamt (2014): China, Statistische Länderprofile, G20 Industrie- und Schwellenländer.

Statistisches Bundesamt (2015), Produktion des Verarbeitenden Gewerbes sowie des Bergbaus und der Gewinnung von Steinen und Erden, Fachserie 4 Reihe 3.1–4. Vierteljahr 2015.

Statistisches Bundesamt (2015b), Energieverwendung der Industrie 2014, Pressemitteilungen des Statistischen Bundesamtes, Wiesbaden 2015.

USGS (2016): Iron Ore, World Mine Production and Reserves. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2016.

Verworn, B. / Herstatt, C. (2007): Strukturierung und Gestaltung der frühen Phasen des Innovationsprozesses, in: Management der frühen Innovationsphasen – Grundlagen – Methoden – Neue Ansätze, Verworn, B., Herstatt, C. (Hrsg.), 2. Aufl., Wiesbaden (2007), S. 111–135.

Voß, W. (2013), Ressourceneffizienz als Herausforderung für die Grundstoffchemie in Deutschland, Abschlussbericht Hans-Böckler-Stiftung, Bremen 2013.

Wellensiek, M. et al. (2011): Technologiefrüherkennung, in: Handbuch Produktion und Management 2, Technologiemanagement, Schuh, G./Klappert, S. (Hrsg.), 2. Aufl., Berlin et al. 2011.

Wernerfelt, B. (1984): A resource-based view of the firm, in: Strategic Management Journal, Vol. 5, Is. 2, S. 171–180.

Wolfrum, B. (2000): Strategisches Technologiemanagement, 2. überarb. Aufl., Wiesbaden 2000.

Schließung von Stoffkreisläufen

Dr.-Ing. Heiner Gutte (Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Eisen- und Stahltechnologie),
Dr. Hans-Georg Jäckel (Leiter des Instituts für Maschinenbau), Anja Brumme (Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Allgemeine Volkswirtschaftslehre, insbesondere Rohstoffökonomik),
Prof. Dr. rer. pol. Dirk Rübhelke (Lehrstuhlinhaber für Allgemeine Volkswirtschaftslehre, insbesondere Rohstoffökonomik),
Prof. Dr.-Ing. Bernd Meyer (Direktor des Instituts für Energieverfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen)

Der folgende Artikel basiert auf einem Beitrag veröffentlicht in der Zeitschrift **ACAMONTA 2014**

Die globalen organischen und anorganischen Stoffkreisläufe auf der Erde sind die Basis allen Lebens. Eine industrielle Produktionsweise nach dem Leitprinzip der Nachhaltigkeit bedeutet eine naturangepasste Stoff- und Energiewirtschaft, die die anthropogenen Produktions- und Konsumtionsprozesse in Einklang mit natürlichen Organisations- und Wirkprinzipien bringt. Im Zuge der Austauschprozesse zwischen den Stoffspeichern Lithosphäre, Biosphäre und Atmosphäre haben sich im Verlauf der Erdgeschichte beispielsweise aus kohlenstoffhaltigen Verbindungen die fossilen kohlenstoffhaltigen Ressourcen wie Erdöl, Erdgas und Kohle und aus den metallhaltigen Verbindungen die primären Erzressourcen gebildet. Ausgehend von der Betrachtung der Erde als ein geschlossenes System kann ihr Gesamtrohstoffgehalt als nahezu konstant aufgefasst werden. Dies gilt sowohl für die kohlenstoffhaltigen als auch die metallischen Ressourcen und soll im Weiteren für beide Rohstoffklassen, die traditionell wesentliche Arbeitsschwerpunkte der TU Bergakademie Freiberg sind, näher erläutert werden.

Derzeit werden fossile und biogene Kohlenstoffträger überwiegend energetisch genutzt, um Elektrizität, Wärme und Kraftstoffe zu erzeugen. Kohlenstoff wird von allen chemischen Elementen mit Abstand am stärksten aus der Lithosphäre entnommen. Die energetische Nutzung fossiler Kohlenstoffträger führt zu einer markanten Veränderung der Umfänge der Stoffmengenströme zwischen den obengenannten Kohlenstoffspeichern – insbesondere zu einer CO_2 -Anreicherung in der Erdatmosphäre. Im Jahr 2013 erreichten die globalen CO_2 -Emissionen ihren bisherigen Höchstwert von 36 Mrd. Tonnen¹. Für einen ressourcenschonenden Umgang mit Kohlenstoffträgern erscheint es unumgänglich, die derzeit dominierende kohlenstoffintensive in eine kohlenstoffarme Wirtschaft zu transformieren. Unter der Annahme, dass über erneuerbare Energien zukünftig Zugriff auf ein nahezu unbegrenztes Energieaufkommen besteht, sollten Ansätze zur stofflich-chemischen Nutzung der fossilen Energierohstoffe und von CO_2 im Hinblick auf das Schließen von Kohlenstoffkreisläufen neu bewertet werden. Durch Substitution des Kohlenstoffs im energetischen Bereich durch erneuerbare Energien und im stofflichen Bereich durch Kohlenstoff aus biogenen bzw. sekundären Quellen kann mit fossilen Kohlenstoffressourcen schonender und intelligenter umgegangen werden.

¹ D. Carlson, H. Pfeiffenberger; Global Carbon Budget 2013, Earth System Science Data (ESSD)

Der klassische Ansatz für eine Kreislaufwirtschaft allgemein besteht in der Anhebung der Ressourceneffizienz. Entweder wird aus der gleichen Menge an Ausgangsstoffen eine größere Energiemenge gewonnen (Energieeffizienz), oder es gelingt, die Produktausbeute zu steigern (Stoffeffizienz). Energie- und Stoffeffizienz sind die kostengünstigsten Optionen, die Versorgungssicherheit mit Energie und Rohstoffen zu verbessern und die Emissionen von Treibhausgasen zu vermindern. Das größte Einsparpotenzial liegt im Energiesektor selbst, aber auch in einigen energieintensiven Industriebranchen wie beispielsweise der Erzgewinnung und -aufbereitung sowie der Metallurgie. Etwa 30 Prozent des Primärenergieverbrauchs der EU entfallen auf die Umwandlungen in Strom und Wärme und auf deren Verteilung bzw. Transport². Literaturangaben zufolge werden zudem weitere vier Prozent der Weltenergieproduktion für Zerkleinerungsprozesse für die Aufbereitung primärer und sekundärer Rohstoffe benötigt.

Ein wesentlicher Schritt zur Transformation in Richtung Dekarbonisierung des Wirtschaftssystems besteht im Übergang von fossilen zu erneuerbaren Energiequellen. Die Energiewende ist möglich, weil auf ein breites Spektrum an erneuerbaren Energiequellen, die zukünftig dezentral in großen Mengen preiswert zur Verfügung stehen werden, zurückgegriffen werden kann. Der zweite Transformationsschritt, die Rohstoffwende, besteht in Analogie zur Energiewende im Übergang von primären Rohstoffen zu sekundären bzw. nachwachsenden Rohstoffen.

Es wird erwartet, dass im Jahr 2050 ca. 38 Terawattstunden (TWh) Strom aus erneuerbaren Energien zur Verfügung stehen, die in Deutschland nicht zeitgleich verbraucht werden können³. Daher besteht zukünftig Bedarf an innovativen und ökonomisch tragfähigen Lösungen zur Nutzung von Überschussstrom aus erneuerbaren Energien. Dieser zu erwartende Überschuss an erneuerbaren Energien ermöglicht völlig neue technologische Zugänge zur Dekarbonisierung des Energiesystems und ist Voraussetzung für die zukünftige Schließung anthropogener Kohlenstoffkreisläufe. Im Zentrum stehen innovative kohlenstoffbasierte Stoffumwandlungsprozesse, wobei die Kohlenstoffkreisläufe in Analogie zu denen in der Natur durch erneuerbare Energien angetrieben werden (siehe Abb. 1).

Dies betrifft elektrothermisch und elektrochemisch angetriebene Stoffumwandlungsprozesse. Oft liefern exotherme Reaktionen, wie beispielsweise die Verbrennung von Kohlenstoff, die für endotherme Reaktionen erforderliche Reaktionswärme. Vielversprechend sind auch die photokatalytische Spaltung von Wasser zu Wasserstoff und Sauerstoff und die

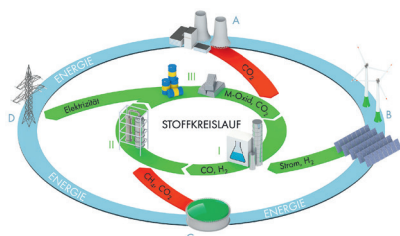


Abb. 1: Naturangepasster Stoffkreislauf unter innovativer Nutzung erneuerbarer Energien und biogener, fossiler und sekundärer Kohlenstoffquellen

² KOM (2011) 109: Energieeffizienzplan der UE, 2011.

³ Prognos AG: Bedeutung der internationalen Wasserkraft-Speicherung für die Energiewende. Studie im Auftrag des Weltenergierats. Deutschland e.V., Berlin 2012, abrufbar unter: www.prognos.com.

Synthese von Kerosin aus CO_2 mit erneuerbaren Energien. Die prinzipielle Durchführbarkeit eines chemischen Recyclings von CO_2 durch erneuerbare Energien wurde anhand zahlreicher Versuche demonstriert. Zur Schaffung neuer Wertschöpfungsketten auf der Basis diverser Kohlenstoffträger sind im Rahmen der BMBF-Forschungsprojekte Innovative Braunkohlenintegration in Mitteldeutschland (ibi) und im Deutschen EnergieRohstoff-Zentrum Freiberg (DER) neue Stoff- und Verfahrenskombinationen mit hohen stofflichen und energetischen Wirkungsgraden entwickelt worden, bei denen der Kohlenstoff nicht zu CO_2 verbrannt, sondern in werthaltigen Produkten chemisch gebunden wird.

- A Kohlendioxid aus Kraftwerken als Rohstoff
- B Erneuerbare Energien – Schlüssel für innovative Stofftransformation
- C Hochwertige Veredelungsstufen für die Biotechnologie
- D Entlastung und Stabilisierung der Stromnetze
- I Innovative Stofftransformationstechnologien
- II Maßgeschneiderte Synthese und Recyclingprozesse
- III Hochwertige und hochenergiehaltige Chemikalien und Metalle

Außer bei den kohlenstoffbasierten Rohstoffen gibt es die Tendenz des verstärkten Einsatzes sekundärer Ressourcen im besonderen Maße auch bei den metallischen Rohstoffen, von denen die wichtigsten (Fe-/NE-/Edelmetalle) auf Grund ihres Wertpotenzials schon seit jeher im Kreislauf geführt werden. Der Rohstoffbedarf der Weltwirtschaft ist jedoch, nicht zuletzt auch durch den wirtschaftlichen Erfolg großer Schwellenländer wie China und Indien, in den letzten Jahren global stark gestiegen. Die kontinuierliche Verknappung eines Teils der natürlichen Ressourcen und die Bemühungen der Industriestaaten, ihren Rohstoffbedarf langfristig zu decken, bewirken aktuell entsprechende Gegenreaktionen bei den industriellen Verbrauchern. Bei den börsennotierten metallischen Rohstoffen (beispielsweise Edel-, Technologiemetalle) lassen sich verschiedene Strategien erkennen. Zum einen wird versucht, den Bedarf deutlich zu verringern, indem man auf teure Metallrohstoffe möglichst verzichtet oder diese durch preiswertere Alternativen substituiert. Zum anderen bewirkt das wachsende Denken in den Kategorien Stoffkreisläufe, Nachhaltigkeit und Ressourcenschonung die Erschließung wichtiger, national verfügbarer sekundärer Rohstoffquellen.

Mit dem Recycling von wertstoffhaltigen Siedlungs-, Produktions- bzw. Konsumptionsabfällen werden bisher verloren gegangene sekundäre Metallrohstoffreserven erneut verfügbar. In Analogie zu den Primärrohstoffen muss unter dem Recycling sekundärer Rohstoffe ebenfalls die komplette Prozesskette, bestehend aus Erkundung, Gewinnung, Aufbereitung und metallurgischer Veredelung, verstanden werden. Die Effektivität des Recyclings wird dabei nicht nur durch aufbereitungstechnische oder metallurgische Prozesse bestimmt, sondern maßgeblich auch durch die Logistik der Erfassung/Gewinnung der Sekundärrohstoffe. Als wesentliche Besonderheit wertstoffhaltiger Abfälle müssen insbesondere die Strukturierung der urbanen »Lagerstätten«

(vergleichsweise große Anfallflächen) sowie deren jährliches, teils auch saisonales Aufkommen (verfügbares Wertstoffpotenzial) charakterisiert werden. Von besonderer Bedeutung sind darüber hinaus auch Kenntnisse zur Lebens- bzw. Nutzungsdauer wertstoffhaltiger Güter, die erst nach Ablauf ihrer Nutzungsphase als sekundäre Rohstoffe zur Verfügung stehen. Diese Bestrebungen werden aktuell unter dem Begriff Urban Mining zusammengefasst.

An der TU Bergakademie Freiberg hat die Aufbereitung sekundärer Ressourcen wie beispielsweise von Schrotten und metallhaltigen Abfällen eine lange Tradition. Resultierend aus den Erfahrungen der Erzaufbereitung initiierte Prof. Heinrich Schubert am damaligen Institut für Aufbereitung der Bergakademie bereits vor ca. 50 Jahren eine Entwicklung, die das heutige, ressourcenorientierte Erscheinungsbild der TU noch maßgeblich prägt. Mit der Einrichtung des Lehrstuhls Aufbereitungstechnik und Recycling und unter seinem nachfolgenden langjährigen Leiter, Prof. Gert Schubert, wurden wichtige Grundlagen zum Verständnis der Zerkleinerungs-, Klassier- und Sortierprozesse im Bereich metallhaltiger Abfälle geschaffen. Im Ergebnis dieser Entwicklungen verfügt die TU Bergakademie Freiberg heute über eine solide labor- und kleintechnische Ausrüstung zur Aufbereitung sekundärer metallischer Rohstoffe, die europaweit einzigartig sein dürfte. Mit der Integration von Erfahrungen aus peripheren Forschungsfeldern, wie bspw. Mineralogie, Werkstoff-, Geo und Energietechnik, Chemie, Physik, Maschinenbau, Metallurgie bis hin zur Betriebswirtschaft, ist es mittlerweile gelungen, die gesamte Wertschöpfungskette für technische Produkte forschungsseitig zu begleiten. Neben den traditionellen Aktivitäten zur stofflichen (Wieder-)Verwertung der Konstruktionswerkstoffe betrifft das aktuell insbesondere auch die Konfektionierung und Rückgewinnung moderner Funktionswerkstoffe aus vergleichsweise fein strukturierten Werkstoffverbunden. Auf Grund vielfältiger Referenzen und ihres guten Rufes werden die Recyclingspezialisten der TU Bergakademie daher auch zunehmend konsultiert, um die Verwertbarkeit neuartiger Werkstoff-Verbundkonstruktionen bereits vor ihrer Marktreife zu beurteilen. Die Beispiele hierfür sind vielfältig. Neben anderen werden gegenwärtig verstärkt FuE-Themen bearbeitet, die sich mit dem Recycling von Produkten der Zukunftstechnologien aus den Bereichen regenerative Energien (u. a. Komponenten aus Windkraftanlagen, Photovoltaik-Module) und Fahrzeug-Leichtbau (insbesondere CFK-Leichtmetall-Verbunde, Lithium-Traktionsbatterien sowie Seltenerd-Metall-Magneten aus Elektrofahrzeugen) beschäftigen.

Ein interessantes Beispiel in diesem Zusammenhang ist die Problematik der Rückgewinnung der Seltenerd-Metalle aus sekundären Rohstoffen. Bei diesen handelt es sich um 17 chemische Elemente der Ordnungszahlen 57 bis 71 sowie 21 und 39. Sie sind unerlässlich für eine Vielzahl technologischer Anwendungen – von Energiesparlampen über Autokatalysatoren bis hin zu Permanentmagneten, die in Windkraftanlagen zum Einsatz kommen. Aufgrund ihrer großen Bedeutung für High-Tech-Industrien werden »Seltene Erden« von der Europäischen Kommission als für die EU kritische Rohstoffe bezeichnet⁴.

⁴ EC (2010): Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-Hoc Working Group on defining critical raw materials. European Commission Enterprise and Industry, Fraunhofer ISI.

Deren strategische Relevanz kommt vor allem in der Tatsache zum Ausdruck, dass speziell China auf der Angebotsseite derzeit eine marktbeherrschende Stellung innehat; im Jahr 2013 kamen 90 Prozent der weltweit geförderten Seltenen Erden aus China.⁵ Im Laufe der 1980er-Jahre konnte China die bis dato vertretenen Wettbewerber mit geringen Preisen aus dem Markt für Seltene Erden verdrängen und daraufhin Zölle und Exportquoten etablieren, die heute die angebotene Menge verknappen, zu einem Nachfrageüberschuss führen und den Weltmarktpreis ansteigen lassen. Dadurch wird es für andere potenzielle Anbieter rentabel, die Förderung Seltener Erden (wieder) aufzunehmen. Dabei sind jedoch time lags von zehn bis 15 Jahren zu berücksichtigen, sodass in der kurzen Frist die heimische Bereitstellung Seltener Erden nur durch Recycling realisiert werden könnte. Gegenwärtig liegt die Recyclingrate für diese Metalle bei teilweise weniger als einem Prozent.⁶ Die Ursachen für die Kleinheit dieses Anteils sind vielfältig:

- Die Anreize zum Recycling bzw. zu FuE-Aktivitäten waren bis vor einigen Jahren gering (Angebotsüberschuss, Preisniveau vergleichsweise niedrig).
- Die Verfügbarkeit von SE-haltigen Sekundärrohstoffen ist erst mit beträchtlicher zeitlicher Verzögerung gegeben (lange Lebensdauer der Anwendungen, teilweise Bestrebungen zur Wiederverwendung von SE-haltigen Bauteilen).
- Das Recycling ist nicht wirtschaftlich darstellbar (sehr geringe SE-Gehalte bzw. -Konzentrationen in Konsumtionsschrotten; Energieaufwand teilweise höher als bei Primärproduktion; Produktqualitäten teilweise schlechter).

Die Politik hat das Problem der kritischen Ressourcen und die Bedeutung geschlossener Stoffkreisläufe erkannt. So hat die deutsche Bundesregierung eine Rohstoffstrategie erarbeitet, in der FuEProgramme im Bereich Recycling eine große Rolle spielen.⁷ Auf EU-Ebene wird Recycling als einer von drei Hauptpunkten der Europäischen Rohstoffinitiative genannt. Neben logistischen Verbesserungen des Abfallsammel- und Aufbereitungsprozesses geht es vor allem darum, illegale Müllexporte in Drittländer zu unterbinden, um auf diese Weise die Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen in Europa zu erhöhen sowie in Forschungsvorhaben zu Recyclingverfahren zu investieren.⁸ Da diesbezüglich noch erheblicher Handlungsbedarf besteht, werden entsprechende Forschungsaktivitäten als ein erster Schritt auf dem Weg zu geschlossenen SE-Stoffkreisläufen angesehen.

Ausgehend von der ursprünglich reinen Umweltschutzmaßnahme, die Abfälle umweltgerecht und kontrolliert zu entsorgen, hat das Recycling als eines der Hauptinstrumente der Rohstoffwende damit eine neue Dimension der Entwicklung erreicht. Der

⁵ U.S. Geological Survey (2014): Mineral Commodity Summaries 2014.

⁶ Graedel, T.E. (2011): Recycling Rates of Metals – A Status Report. United Nations Environment Programme.

⁷ BMWi (2010): Rohstoffstrategie der Bundesregierung. Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nichtenergetischen mineralischen Rohstoffen. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.

⁸ EC (2011): Grundstoffmärkte und Rohstoffe: Herausforderungen und Lösungsansätze. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen, KOM (2011) 25 endgültig.

Weg des wertstoffextensiven Wirtschaftens ist eine der größten Herausforderungen für Wissenschaft und Wirtschaft im 21. Jahrhundert. Ein entsprechendes Engagement vorausgesetzt, kommt Deutschland als führendem europäischen Technologieland und Initiator der Energiewende dabei eine Schlüsselrolle zu. Mit der schrittweisen Profilierung der TU Bergakademie Freiberg zur Ressourcenuniversität sind in den vergangenen Jahren wesentliche Grundlagen dafür geschaffen worden, dass der Standort Freiberg zukünftig wichtige Beiträge zu dieser Entwicklung leisten und damit seiner historischen Bedeutung gerecht werden kann.

Elektrifizierung maßgeblicher Bereiche der Syntheseverfahren und -umgebung im Bereich der Grundstoffindustrie

Prof. Dr. rer. nat. Dirk C. Meyer (Direktor des ZeHS und des Instituts für Experimentelle Physik),
Ass. iur. Theresa Lemser (Referentin)

Kurzfassung

Die Zielsetzung der Energiewende für eine umwelt- und ressourcenschonende sowie energieeffiziente Volkswirtschaft unter Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit und des allgemeinen Wohlstandsniveaus bedingt neben dem erforderlichen Umbau in allen relevanten Bereichen, insbesondere in der Energiewirtschaft, neue Herausforderungen und auch Chancen. Durch den in der ersten Säule vorgesehenen Ausbau der Erneuerbaren Energien (EE) für eine klimaverträgliche und von fossilen Brennstoffen unabhängige



Abb.: EE-Anlagen und Netzeinrichtungen
Quelle: Sven Jachalke

Umstellung der Versorgung kommt der Flexibilisierung des Einsatzes elektrischer Energie Bedeutung zu. Neben der Schaffung von Voraussetzungen für die Schließung von Energie- und Stoffkreisläufen, der Gewährleistung der Netzstabilität und der allgemeinen Steigerung der Energieeffizienz ergeben sich zusätzliche Potenziale. Industriebranchen, welche Prozessenergie bisher aufgrund fossiler Brennstoffe nutzen, sind so gehalten, auf der Basis des Einsatzes elektrischen Stromes ihre Bilanzen neu zu konzipieren bzw. bereits vorhandene Ansätze in größerer Breite anzuwenden. Diesbezügliche Möglichkeiten in der besonders energieintensiven Grundstoffindustrie werden nachfolgend umrissen. Dabei wird der bisher im aktuellen Zusammenhang in der Literatur vereinzelt geführte Oberbegriff der Elektrifizierung aufgegriffen.

Einleitung

Der Einsatz zeitlich fluktuierender (auch Überschuss-) Angebote elektrischen Stromes aus dem aufwachsenden Anteil der EE anstelle fossiler Energieträger in unterschiedlichen Feldern (Industrie, Gebäude, Verkehr) kann mit deren (zunehmender) Elektrifizierung in Zusammenhang gebracht werden. Recherchen in deutschsprachigen Publikationen führen vereinzelt auf die Verwendung dieser Begrifflichkeit, während das Studium von Veröffentlichungen aus dem englischen Sprachraum bzw. allgemein in Englischer Sprache verfasst, bei der Suche in der Kategorie Electrification seit geraumer Zeit einschlägige Ergebnisse aufzeigt.

Allgemein wird unter diesem Begriff der Ausbau von Versorgungsnetzen für elektrischen Strom für bestimmte Regionen erfasst. Der Umfang dieses Ausbaus sowie die Nutzung elektrischer Energie in den einzelnen Feldern kann durch Angabe ei-

nes Grads der Elektrifizierung bemessen werden. Der hier diskutierte Zusammenhang führt entsprechend zu einer Anhebung dieses Anteils im Bereich der Grundstoffindustrie aus; infolge des drastischen Umfangs soll verkürzt von deren Elektrifizierung gesprochen werden.

Zu den gesetzlichen und marktwirtschaftlichen Rahmenbedingungen sowie der Bedeutung der Elektrifizierung der Grundstoffindustrie für das Gelingen der Energiewende (Gewährleistung von Netzstabilität etc.) und die Nutzung zeitlich fluktuierender (Überschuss-) Angebote aus den EE für die Erreichung der weltweiten Klimaschutzziele sowie die Schließung von Energie- und Stoffkreisläufen finden sich in diesem Band Ausführungen an anderer Stelle. Inzwischen existieren verschiedene Publikationen, welche die Möglichkeit eines hundertprozentigen Einsatzes von EE für die Bereitstellung elektrischen Stroms und zur Erfüllung des Wärmebedarfs in Deutschland sowie auch für andere Regionen der Welt begründen. Bereits im Jahr 2012 kam eine Studie des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE zu entsprechenden Ergebnissen¹, wobei als zeitliche Zielmarke das Jahr 2050 zugrunde gelegt wurde. Zentrale Ergebnisse betreffen die Aussagen zur Möglichkeit der Energieversorgung Deutschlands für Strom und Wärme ohne jegliche Importe, d.h. auf Basis von Ressourcen, die im Lande zur Verfügung stehen. Grundlage bildete die Forderung, dass die erforderlichen Gesamtkosten für den systemischen Umbau jene der heute für die Versorgung Deutschlands in diesem Bereich gehandhabten nicht übersteigen (in der Studie wurden dabei zukünftige Preissteigerungen für fossile Energieträger noch nicht berücksichtigt). Für die Realisierung des Umbaus werden verschiedene Systeme beschrieben, die zugleich Bestandteile eines flexiblen Gesamtkonzepts sein können. Neben den erforderlichen Investitionen insbesondere im Bereich der EE stellt die Steigerung der Energieeffizienz, hierbei insbesondere die Senkung des Heizwärmebedarfs im Gebäudesektor durch energetische Sanierungsmaßnahmen, eine Voraussetzung dar. Im Zusammenhang ist jedoch hervorzuheben, dass das zugrundegelegte Modell den Bedarf an Hochtemperaturwärme sowie des brennstoffbasierten Verkehrs und entsprechender Industrieprozesse (damit auch die energieintensiven Hochtemperaturprozesse der Grundstoffindustrie) nicht einschloss, womit ca. 40 % des Primärenergiebedarfs unberücksichtigt blieben, was jedoch die grundlegende Tendenz der abgeleiteten Ergebnisse nicht in Frage stellt, wobei auch hier Kernaussagen, wie etwa zur notwendigen Effizienzsteigerung, getroffen wurden. Als Richtgröße wird eine Reduktion des Brennstoffverbrauchs in der Industrie bis zum Jahr 2050 in der Größe von 30 % angegeben.

In einer durch das Umweltbundesamt vorgelegten umfassenden Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland 2015“² wird der Zugang im Wesentlichen über die internationalen Zielsetzungen zur Eindämmung des Klimawandels für Deutschland gewählt. Wegen der hohen CO₂-Emissionen wurde dabei der Bereich der Stromerzeugung an erster Stelle untersucht. Im Ergebnis wird zusammengefasst, dass bis zum Jahr 2050

¹ Fraunhofer ISE, 100 % Erneuerbare Energien für Strom und Wärme in Deutschland, 2012.

² Umweltbundesamt (Hrsg.), Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050, 2014.

eine Stromerzeugung aus 100% EE möglich ist. Für die weitestgehende Vermeidung von Treibhausgasemissionen müssten sich jedoch auch andere Wirtschaftsbereiche deutlich verändern, weshalb alle relevanten Emissionsquellen in die Untersuchung einbezogen wurden. Das abgeleitete Zielszenario schließt detaillierte Transformationspfade noch nicht in ganzer Breite ein. Im Einzelnen untersetzte Betrachtungen zu den Bereichen Energie und Verkehr sowie für einzelne Branchen, wie etwa Abfall und Abwasser oder Landwirtschaft wurden bereits genauer beleuchtet. Insgesamt wird resümiert, dass bis zum Jahr 2050 in Deutschland eine Senkung der CO₂-Emissionen um 95 % technisch möglich ist und nicht nur die Stromversorgung, sondern auch die Deckung des Kraft- und Brennstoffbedarfs durch EE erfolgen kann. Dabei käme der Umwandlung des elektrischen Stroms aus den EE zu Wasserstoff, Methan und höherwertigen Kohlenwasserstoffen auch hinsichtlich ansteigenden Bedarfes in diesen Bereichen besondere Bedeutung zu. Neben einer direkten Elektrifizierung im Industriesektor und darüber hinaus wird nach dem beschriebenen Szenario zugleich der Bedarf an Kraft-, Brenn- und Rohstoffen gedeckt, wobei die für die Reduzierung von Treibhausgasemissionen erforderliche Schließung von Energie- und Stoffkreisläufen wesentlich und Gegenstand der Diskussion in diesem Band an anderer Stelle ist. Während sich die Studie am aktuellen Stand der Technik orientierte, wurde für den Ausblick eine breite Markteinführung bisher nur in kleinerem Maßstab erprobter Technologien angenommen. Dies begründet das Erfordernis der Realisierung zahlreicher Technikinnovationen im vorausschauend betrachteten Zeitraum. Für den Bereich der Industrie wurde in der Studie vom Endenergieverbrauch (EEV) ausgegangen³. Dessen Anteil am gesamten EEV in Deutschland wurde für das zugrunde gelegte Jahr mit 28 % angegeben, wobei rund zwei Drittel durch den direkten Einsatz fossiler Brennstoffe entstehen, was gemäß der Ableitung im Rahmen der Studie einen maßgeblichen Anteil an Treibhausgasemissionen bedeutet und eine weiter vertiefte Betrachtung gemäß der Zielsetzung dieser Studie bedingt. Für ein treibhausgasneutrales Deutschland sei dieser Anteil auf nahe Null zu reduzieren, zugleich solle der EEV halbiert werden. Für das Abstecken der Rahmenbedingungen wurde davon ausgegangen, dass die Erzeugungskosten für Strom aus den EE geringer als jene für regenerativ gewonnene Brennstoffe, die auf der Basis von erneuerbarem Strom bereitgestellt werden, sind. Unter Hinzunahme der weiteren Randbedingung, dass fossile Kohlenstoffquellen bei Erreichen des zeitlichen Zielkorridors für die chemische Synthese keine Anwendung mehr finden, wird die Priorisierung des direkten Einsatzes von Strom aus den EE und damit die umfassende Elektrifizierung der Grundstoffindustrie begründbar.

Ressourcen- und Energieeffizienz

Die Steigerung der Ressourceneffizienz zielt darauf, ein vergleichbares Produktionsergebnis bzw. das Resultat einer Dienstleistung mit geringerem Verbrauch an Einsatzstoffen (Ressourcen) zu erbringen. Sind die eingesetzten Ressourcen Energierohstoffe oder allgemein -materialien, wird der angestrebte Nutzen mit dem Unterbegriff Ener-

³ Umweltbundesamt (Hrsg.), Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050, 2014, S.123.

gieeffizienz bemessen. Die damit weiterreichende Kategorie der Ressourceneffizienz wird zumeist auf die natürlichen Quellen, etwa den landwirtschaftlich genutzten Boden sowie alle mineralischen Rohstoffe, fossilen Energieträger usw., Wasser und Luft in entsprechender Qualität unter Einschluss der Biosphäre, das heißt allgemein der Lebensräume als Ausgangsbasis bezogen. Für die Bestimmung der Ressourceneffizienz wird neben den Eingangsgrößen dieser Quellen auch der Anfall stofflicher Emissionen, die entlang der Wertschöpfungskette bei Produktion, Nutzung und Entsorgung für die einzelnen Glieder entstehen, betrachtet. Eine Steigerung der Ressourceneffizienz folgt zwei Zielen, nämlich der Verringerung sowohl des Ressourceneinsatzes als auch stofflicher Emissionen. Durch betriebliches Stoff- und Energiestrommanagement werden alle wirtschaftlich und ökologisch relevanten Material- und Energieflüsse analysiert und können so fortlaufend optimiert werden. Auf diesem Wege sind neben der Senkung des Ressourcen- und Energieverbrauchs im Unternehmen Potenziale für die Reduzierung von Emissionen, die Vermeidung bzw. Verminderung von Abfällen identifizierbar, womit Perspektiven zukünftiger Entwicklungen frühzeitig erkannt werden können. Im Bereich der Grundstoffindustrie, aber auch auf anderen Feldern können auf diesem Wege innovative Prozesse zur Optimierung bestehender und zur Einführung neuer Technologien begründet werden. Zugleich erlaubt eine umfassende Transparenz der Prozessabläufe und ihrer Kostenstrukturen Entscheidungen auf fundierter Informationsbasis. Ressourcen- und Energiekonzepte umfassen organisatorische, technische und verhaltensorientierte Maßnahmen. Für die praktische Umsetzung kommt der Datenerfassung der einzelnen Verbräuche der Energiepfade sowie der Hauptverbraucher und der darauf basierten laufenden Analyse und Bewertung besonderer Stellenwert zu. Damit rücken Handlungsfelder, die in den Mittelpunkt der Ressourcen- und Energiekonzepte gestellt werden können, in den Fokus, womit z.B. auf Einsparpotenziale, deren Erschließung nur geringe Investitionskosten erfordert, priorisierbar sind.

In der Folge soll der Durchfluss an Material und Ressourcen zu einem Kreislauf umgestaltet werden, wobei insbesondere die Wiederverwendung von Stoffen zu einem geringeren Ressourcenverbrauch beitragen soll. Einschlägige Maßnahmen umfassen beispielsweise die Abwärme- und Brauchwassernutzung und setzen in der Bewertung sowohl die Betrachtung der Produkte als auch der erforderlichen Prozesse voraus. In der Grundstoffindustrie wird besonderes Potenzial in der zeitlichen Verkürzung von Prozessketten durch die daran geknüpfte Vermeidung von Abwärmeverlusten gesehen, was insbesondere durch die Vermeidung wiederholter Abkühl- und Aufheizvorgänge zwischen den einzelnen Prozessschritten erreichbar ist. Darin eingeschlossen ist die Nutzung von Wärmeinhalten der Güter für nachfolgende Prozessschritte oder ggf. für eine Verstromung.

Dekarbonisierung und Elektrifizierung

Inzwischen haben verschiedene Autoren zur Dekarbonisierung und Elektrifizierung der gesamten Volkswirtschaft ausgeführt, wobei sich auch Arbeiten finden, die direkt

auf die Dekarbonisierung der Grundstoffindustrie durch Elektrifizierung eingehen⁴. Implikationen im gesamteuropäischen Zusammenhang werden dabei seit mehreren Jahren diskutiert, wobei auch Szenarien der Elektrifizierung der Wärme- und Kältebereitstellung auf unterschiedlichen Feldern bewegt wurden⁵. Allgemein feststellbar ist eine Übereinstimmung hinsichtlich der Erfordernisse für die angestrebte Reduktion der CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2050 bei gleichzeitiger Steigerung der Ressourcen- und Energieeffizienz. Entsprechend des Anteils des industriellen Sektors an den absoluten CO₂-Emissionen (im europäischen Maßstab zwischen 20 und 25%)⁶ kommt diesem signifikante Bedeutung zu. Zu den Vorteilen der Nutzung elektrischer Energie für die Bereitstellung von Wärme zählen folgende Aspekte:

- einfache und präzise Kontrollierbarkeit und Automatisierung der Prozesse
- keine Einschränkung der erreichbaren Prozesstemperaturen im relevanten Bereich
- Prozesswärme kann unter Vakuumbedingungen bzw. in verschiedenen Atmosphären bereitgestellt werden
- Verfügbarkeit hoher Leistungsdichten
- Möglichkeit der direkten Einkopplung der Energie in das Prozessgut (elektromagnetische Wechselwirkung)
- Rückwirkung auf das Stromnetz mit dem Ziel der Stabilisierung (Demand-side management)

Für die Umsetzung unter Schließung von Energie- und Stoffkreisläufen kommen der Entwicklung neuer und flexibler Technologien und der Bereitstellung zusätzlicher Angebote an elektrischer Energie besonderes Gewicht zu. Zum erforderlichen Bedarf an elektrischer Energie sowie für deren Zwischenspeicherung existieren verschiedene Betrachtungen. Die Prognosen schließen dabei auch die Möglichkeit ein, dass durch Steigerung der Energieeffizienz und durch die Nutzung alternativer Energieträger (z. B. durch Einsatz nachwachsender Rohstoffe) im Gesamtzusammenhang auch ein im Vergleich zum heutigen Stand verminderter Verbrauch eintreten könnte.

Flexibilisierung

Neben der Zwischenspeicherung von Strom aus zeitlichen Überschüssen der EE ist der Ausbau der Flexibilität der Verbraucher für das Gelingen des beschriebenen Umbaus von besonderer Relevanz. Dies erfordert, die betrieblichen Abläufe in möglichst großem Umfang derart zu gestalten, dass mit flexiblen Lastwechseln auf die Angebotssituation reagiert werden kann. Beispiele für flexible Lasten sind die Erzeugung von Druckluft oder Prozesswärme und -kälte im Zusammenhang mit deren Zwischenspeicherung. Darin eingeschlossen ist die zeitlich anpassbare Eigenerzeugung von elektrischer Energie sowie Prozesswärme und -dampf durch die Energieintensiven Industrien (EI).

⁴ Siehe z.B. Lechtenböhrer, Stefan; Nilsson, Lars J; Ahman, Max; Schneider, Clemens, Decarbonising the energy intensive basic materials industry through electrification – implications for future EU electricity demand, 2015.

⁵ Siehe z. B. Eurelectric, Electrification of Heating and Cooling – A EURELECTRIC Policy Paper, 2011.

⁶ Siehe Fußnote 2

Derzeit besteht mit der Strompreiskompensation für einen beschränkten Kreis von Unternehmen (überwiegend aus dem Bereich der Grundstoffindustrie/El), die aufgrund des hohen Stromeinsatzes in ihrer Produktion ein erhebliches Risiko der Verlagerung ins Ausland aufweisen, noch eine staatliche Beihilfe. Die für die Flexibilisierung erforderliche Anpassung der betrieblichen Abläufe wird durch die Entwicklung dynamischer Strompreissysteme flankiert, um die Voraussetzungen für eine zukünftige, laufende Adaption an die Situation im Energiesystem und die Möglichkeit der Generierung zusätzlicher Einnahmen durch den Verkauf von Potenzialen zur Lastverschiebung zu schaffen. Querschnittsanwendungen, z.B. für Lüftungsanlagen und Kältebedarf, sind als schaltbare Lasten prädestiniert, wobei das größte Potenzial durch die Flexibilisierung der eigentlichen Grundprozesse erschlossen werden soll.

Im Hochtemperatur-Bereich werden derzeit u.a. folgende Prozesse flexibel gefahren: Stahlherstellung mittels Elektrolichtbogenofen, Aluminiumelektrolyse, Mahlen in der Zementherstellung, Chlorherstellung durch Elektrolyse und Kupferherstellung im Elektroofen. Für die umfassende Elektrifizierung der Grundstoffindustrie sind die in den genannten Prozessen gewonnenen Erfahrungen systematisch zu erfassen, die Material- und Prozessanforderungen im Zusammenhang zu identifizieren und daraus Entwicklungen für weitere flexible elektrische Hochtemperatur-Prozesse abzuleiten, was den Schwerpunkt der Forschungsprogrammatis des ZeHS darstellt. Durch die angestrebte Elektrifizierung und Flexibilisierung der Hochtemperatur-Prozesse werden zugleich deren weitgehende Dekarbonisierung unterstützt und die Schließung von Energie- und Stoffkreisläufen ermöglicht. Die Entwicklungen sind jeweils in den Systemzusammenhang von Erzeugern und Unternehmensverbänden im Rahmen von Virtuellen Kraftwerken etc. einzuordnen.

Etabliertes Lastenmanagement im größeren Stil erfolgt beim Betrieb von Elektrolyseanlagen zur Herstellung von Primäraluminium. Die Hamburger Aluminiumhütte der Trimet stellt als Industrieunternehmen außerhalb der Energieversorgungsbranche in einer Vorreiterrolle bereits Primärregelreserven bereit. Für eine flexible Steuerung der Energiezufuhr sind die Elektrolyseöfen so ausgelegt, dass ihre elektrische Leistung bei laufendem Betrieb ohne Gefährdung für mehrere Stunden erhöht oder gedrosselt werden kann. Aluminiumhütten können damit schon heute als Stromspeicher fungieren und gewährleisten den Ausgleich zwischen volatiler Energieerzeugung und bedarfsorientiertem -verbrauch. Technische Herausforderungen bestehen insbesondere im Zusammenhang mit häufigeren Temperaturwechseln und den damit verbundenen Einflüssen auf die Standzeit der Komponenten der Prozessumgebung.

Zusammenfassung

Unter den weiter oben umrissenen Randbedingungen kommen die Autoren der Studie Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050 für den industriellen Sektor in Deutschland insgesamt zu einem belastbaren Szenario. Danach ist es möglich, die energiebedingten Treibhausgasemissionen auf der Grundlage des Einsatzes von regenerativem Strom, Methan sowie Wasserstoff auf null zu reduzieren. Vorausset-

zung dafür sind grundsätzliche Umstellungen der Prozess- und Anlagentechnik. Als Beispiel werden die vollständige Abkehr von der Primärstahlerzeugung über die Hochofen-Oxygen-Stahlroute und der massive Ausbau der Elektrostahlerzeugung aus Schrott und Schwammeisen genannt. Als Energieträger bzw. Reduktionsmittel kommen dann ausschließlich regenerativ erzeugtes Methan und entsprechend gewonnener Wasserstoff zum Einsatz; Elektrolichtbogen- und Walzwerksöfen werden ausschließlich unter Nutzung von regenerativem Strom betrieben. Insgesamt soll im Vergleich zum Bezugsjahr 2010 auch unter Berücksichtigung von Produktionssteigerungen der gesamte EEV halbiert werden können. Voraussetzung dafür sind die Optimierung von Fertigungsprozessen hinsichtlich der Ressourcen- und Energieeffizienz, konsequente Abwärmennutzung sowie hocheffiziente Anlagentechniken. Als Hauptenergieträger werden mit einem Anteil von ca. 50 % regenerativ erzeugtes Methan sowie ca. 45 % entsprechend gewonnener Strom prognostiziert. Regenerativ erzeugtes Methan kommt dann zusätzlich als (stoffliche) Kohlenstoffquelle für chemische Synthesen zum Einsatz. Für den gesamten Energiesektor wird von einer möglichen Reduzierung prozessbedingter Treibhausgasemissionen um ca. 75 % im Vergleich zum Bezugsjahr 2010 ausgegangen. Die erwarteten EEV sowie die zugrundeliegenden Prognosen der Anteile von Methan und elektrischem Strom bis zum Jahr 2050 werden in der Studie für die einzeln untersuchten Bereiche des Industriesektors und des verarbeitenden Gewerbes aufgegliedert angegeben⁷. Gleiches gilt für die Entwicklung der energie- und prozessbedingten Treibhausgasemissionen.

⁷ Umweltbundesamt (Hrsg.), Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050, 2014, S.231.

Anforderungen im Rahmen der Energiewende und der Zielsetzung für ein treibhausgasneutrales Deutschland im Bereich der Chemischen Industrie

Prof. Dr. rer. nat. Dirk C. Meyer (Direktor des ZeHS und des Instituts für Experimentelle Physik),
Ass. iur. Theresa Lemser (Referentin)

Kurzfassung

Der Chemiesektor zählt zu den bedeutendsten Industriebranchen in Deutschland und auch im weltweiten Maßstab. Für den erforderlichen Umbau der Grundstoffindustrie im Zuge der Energiewende und hinsichtlich der Erlangung des Ziels für ein treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050 kommt der Chemischen Industrie eine dem Energiesektor vergleichbare Bedeutung zu, da diese zum einen zu den energieintensiven Branchen zählt und zum anderen maßgeblich zu den stoffbezogenen CO₂-Emissionen beiträgt. Die wichtigsten Chemiesparten in Deutschland betreffen die Erzeugung anorganischer Grundchemikalien, von Petrochemikalien und Derivaten, Polymeren, Fein- und Spezialchemikalien, Pharmazeutika sowie Wasch- und Körperpflegemitteln¹. Neben der verstärkten Nutzung von Erneuerbaren Energien (EE) und dem allgemeinen Bestreben der Schließung von Energie- und Stoffkreisläufen auf verschiedenen Ebenen wurde zusätzliches Potenzial identifiziert. Dieses besteht insbesondere in der Unterbindung der Freisetzung von Treibhausgasemissionen durch die Anwendung von Chemieprodukten in einem größeren Umfang, als im Zuge ihrer Herstellung entstanden sind. Beispiele dafür sind Dämmmaterialien oder auch der vermehrte Einsatz von Kunststoffen in Kraftfahrzeugen mit dem Ergebnis einer Gewichtsreduzierung und somit verminderten Kraftstoff- bzw. Energieverbrauchs.

Einleitung

In der Chemischen Industrie stützt sich der Rohstoffeinsatz maßgeblich auf Erdöl, Erdgas und Kohle sowie mit einem Anteil von ca. 13 % auf nachwachsende Rohstoffe ab². Aktuell werden die Produkte am Ende ihres Einsatzes überwiegend zur Bereitstellung thermischer Energie und nur zu geringen Teilen stofflich, etwa als Zuschlagstoffe, genutzt. Der Energieverbrauch für die chemischen Syntheseprozesse konnte zurückliegend kontinuierlich gesenkt werden (im Zeitraum der Jahre 1990 bis 2009 um 33 %, was einem Durchschnittswert von nahezu 1,7 % pro Jahr entspricht³). Damit liegt die realisierte Effizienzsteigerungsrate im vorgesehenen Rahmen der Maßgaben der EU-Energieeffizienzziele bis zum Jahr 2020. Daran geknüpft ist, auch bei Produktionssteigerungen, eine Reduzierung der energiebedingten Treibhausgasemissionen. Das gleiche gilt für prozessbedingte Freisetzungen (im Zeitraum der Jahre 1990 bis 2010 wurde allein der jährliche Umfang der CO₂-Emissionen im Chemiesektor

¹ Umweltbundesamt, Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050, 07/2014, S. 167.

² Umweltbundesamt, Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050, 07/2014, S. 169.

³ VCI, Factbook 04.

mit einem Gesamtvolumen von 34,2 Mio. t auf 20 Mio. t reduziert)⁴. Als besonders starke Verursacher gelten weiterhin die Syntheseprozesse für Salpetersäure, Adipinsäure und Ammoniak⁵. Das bei der Ammoniakproduktion (bedeutendster Prozess ist das Haber-Bosch-Verfahren) entstehende CO₂ kann abgetrennt und prinzipiell für die Synthese weiterer Produkte genutzt werden. Entsprechend bestehen in der Erhöhung der Nutzung des CO₂ interessante Perspektiven. Bei der Synthese von Adipinsäure mit Salpetersäure ist insbesondere die Freisetzung von N₂O (Lachgas) kritisch. Inzwischen existieren technische Lösungen zur thermischen und katalytischen Zersetzung

von N₂O, was auch für den Bereich der eigentlichen Synthese von Salpetersäure bedeutsam ist.

Ein Beispiel für einen CO₂-neutralen Produktionsprozess ist die Soda-Herstellung, bei der das CO₂ aus dem eingesetzten Kalkstein vollständig in das Produkt eingebunden wird. Allerdings erfolgen dann, abhängig von der Weiterverwendung, später CO₂-Freisetzungen.



Abb. 1: Rauchgasanlagen
Quelle: Sven Jachalke

Perspektiven

Insgesamt kann davon ausgegangen werden, dass durch den vollständigen Einsatz regenerativer Brennstoffe bzw. die Erhöhung des Anteils der Elektrifizierung unter Nutzung von EE-Strom in der Chemischen Industrie energiebedingte Treibhausgasemissionen perspektivisch unterbleiben können. Somit liegt der Fokus auf den prozessbedingten Anteilen, was den Bedarf an der Entwicklung neuer Syntheseverfahren und der daran gebundenen Effizienzsteigerung für bisher unikale und voraussichtlich auch bis zum Jahr 2050 nicht abzulösende Routen und damit neue Techniken zur Emissionsminderung begründet. Am oben genannten Beispiel der Soda-Herstellung wird deutlich, dass sich dieser Anspruch auch auf die Reduzierung des Einsatzes dieser Basischemikalie in der Folge erstrecken muss. Grundsätzlich kommt der chemischen Nutzung von regenerativ erzeugtem Wasserstoff Bedeutung in großer Breite zu. Dies betrifft sowohl die Ablösung chemischer Ausgangsstoffe auf der Grundlage von Erdöl, Erdgas und Kohle sowie die Methanisierung von CO₂ als auch den Ersatz von Kohle als Reduktionsmittel.

Aktuelle Prognosen gehen anhand der in den zurückliegenden Jahrzehnten realisierten Entwicklung von einem weiteren Wachstum der Produktion im Bereich der Chemischen Industrie aus, wobei Zuwachsraten, die deutlich über jenen der durchschnittlichen gesamtwirtschaftlichen Entwicklung liegen, erwartet werden. Abschätzungen legen so, ausgehend vom aktuellen Stand bis zum Jahr 2050, nahezu eine Verdopplung des Volumens der Chemieproduktion nahe.⁶

⁴ Umweltbundesamt, Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2010, 2012.

⁵ Umweltbundesamt, Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050, 07/2014, S. 170.

⁶ Umweltbundesamt, Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050, 07/2014, S. 173.

Mikrowellengestützte Synthese als Beispiel für neue Prozessrouten

Nahezu alle Arten thermisch getriebener chemischer Reaktionen auf organischer Basis können durch die Einkopplung von Mikrowellen beschleunigt und in besonderer Weise kontrollier- und reproduzierbar gestaltet werden. Während auf der Laborskala etwa seit 1985 der Einsatz von Mikrowellen untersucht und ausgearbeitet wurde (Microwave-Assisted Organic Synthesis (MAOS)),^{7,8} erfährt seither die Übertragung auf die Industrieskala besondere Aufmerksamkeit⁹. Die Voraussetzungen dafür bilden zahlreiche Entwicklungen der Mikrowelleninstrumentierung, was durch eine laufend steigende Zahl entsprechender Publikationen dokumentiert ist. Insgesamt wurde so in den zurückliegenden drei Dekaden eine große Vielfalt von Verbindungen auf der Grundlage von Mikrowellen synthetisiert, wobei insbesondere die Erzeugung pharmazeutischer Produkte, von Nanopartikeln, Biomaterialien und Polymeren im Fokus lag. Damit steht ein neues Verfahren der Synthesechemie, das insgesamt besonders umweltfreundlich ist, an der Schwelle zur umfassenden Nutzung (möglicher Einsatz von EE-Strom, neue Syntheserouten ohne schädliche Abprodukte, insgesamt höhere Energieeffizienz). Besonders hervorzuhebende Kennzeichen sind hohe Produktionsraten infolge verringerter Reaktionszeiten, erhöhte Durchsätze und die erreichbare Qualität der Produkte (Darstellung in höchster Reinheit), was insgesamt den Erfordernissen einer „grünen“ Chemie entspricht. So können bestimmte Syntheserouten durch den Einsatz von Mikrowellen lösungsmittelfrei gefahren werden, was Belastungen der Umwelt durch entsprechende Einträge und die Erzeugung toxischer Nebenprodukte sowie die Emission gefährlicher Gase vermeidet. Zusätzliche Vorteile ergeben sich durch die Art der Erwärmung, die im Vergleich zur konventionellen Bereitstellung (vorwiegend durch Brenner oder Strahlungsheizung) sehr schnell unter direkter Einkopplung in das Reaktionsmedium erfolgen kann, womit exklusiv die Reaktanten und vorhandenen Lösungsmittel homogen erhitzt werden. Die Bestandteile des Reaktors selbst werden nahezu nicht beeinflusst und der Einsatz inerter Schutzgase kann drastisch reduziert werden. Einschränkungen für Anwendungen der MAOS bestehen bei Vorliegen elektrisch nicht polarer Lösungsmittel. Grundsätzliche Fragen der Aufskalierbarkeit wurden durch die erwähnte Entwicklung der Instrumentierung positiv beantwortet. Ähnliche Potenziale bestehen im Einsatz von Plasmen sowie allgemein elektromagnetischer und mechanischer Wellenfelder, bereitgestellt durch EE.

⁷ Gedye, R., Smith, F., Westaway, K., Humera, A., Baldisera, L., Laberge, L., & Rousell, J. (1986). *Tetrahedron Letters*, 27, 279-282.

⁸ Giguere, R. J., Bray, T. L., Duncan, S. M., & Majetich, G. (1986). *Tetrahedron Letters*, 27, 4945-4948.

⁹ Für eine aktuelle Übersicht: *Microwave-assisted organic synthesis: a green chemical approach*/ Eds. Ameta, S. C., Punjabi, P. B., Ameta, R. and Ameta, C., Apple Academic Press, Inc., 2015, ISBN 978-1-77188-039-8. .

Impressum

Herausgeber/Redaktion:

Zentrum für effiziente Hochtemperatur-Stoffwandlung an der Technischen Universität
Freiberg

Postanschrift:

Am St.-Niclas-Schacht 13, 09599 Freiberg

Telefon: +49 (0)3731 419 167

Fax: +49 (0)3731 419 6167

E-Mail: Theresa.Lemser@zehs.tu-freiberg.de

Internet: <http://tu-freiberg.de/zehs> und <http://www.zehs-freiberg.de/>

Redaktionskollegium:

Prof. Dr. Dirk C. Meyer, Ass. iur. Theresa Lemser

Gestaltung/Satz:

Medienzentrum der TU Bergakademie Freiberg

Druck: Medienzentrum der TU Bergakademie Freiberg

Auflage: 250

Die Verantwortung für Inhalte namentlich gekennzeichnete Beiträge liegt bei den jeweiligen Autoren. Die Form der Literaturzitationen folgt der Wahl der einzelnen Autoren entsprechend der Kultur ihrer Fachgebiete.

ISSN 2513-1192