

**Beitrag der Hochtemperaturtechnik
zu den Zielen des European Green Deal**

Diskussionspapier
der ProcessNet-Fachgruppe Hochtemperaturtechnik
in der ProcessNet-Fachgemeinschaft SuPER

Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	5
2. Baustoffbranchen.....	8
Charakterisierung der Branchen	8
Dekarbonisierung als zentraler Bestandteil der Circular Economy in den Baustoffbranchen.....	9
Technische Innovationen.....	11
3. Eisen- und Nichteisenmetalle sowie Hochleistungskeramikpulver.....	14
Metallurgie und Thermoprozesstechnik	14
Allgemeines.....	14
Anwendungen von gewalzten und geschmiedeten Stählen, Nichteisenmetallen und Hochleistungskeramikpulvern.....	15
Eingesetzte thermische Verfahren und Apparate	16
Zukünftige Optimierungen der Metallurgie/Thermoprozesstechnik/Pulverherstellung	16
Stahlproduktion im Hochofen mit Kohlenstoff	17
Energieeffiziente Stahlproduktion mit grünem Wasserstoff.....	18
Einsatz von Wasserstoff an Thermoprozessanlagen und Digitalisierung bei der Metallerzeugung.....	18
Optimierungen im Bereich der Pulverherstellung.....	18
Ausblick.....	19
4. Chemische Industrie	20
Ausgangssituation	20
Verfahren zur Reduktion des “Carbon Footprint“ unter Ausnutzung erneuerbarer Energie (Strom)	21
„Erneuerbarer Wasserstoff“	21
Elektrisch beheizter Steamcracker	21
Verfahren zur Schließung von Stoffkreisläufen („Circular Economy“) unter Ausnutzung rezyklierter Einsatzstoffe.....	22
Recycling von Kunststoffabfällen.....	22
Nachwachsende Rohstoffe.....	23
Forschungs- und Entwicklungsaufgaben speziell hinsichtlich Breakthrough Technologies	24
5. Abfallwirtschaft.....	25
Bedeutung der Hochtemperaturprozesstechnik in der Abfallwirtschaft unter Berücksichtigung der zirkulären Wertschöpfung – Stand und Entwicklungspotenzial	25
6. Literaturverzeichnis.....	30
7. Liste der Autoren	32

Abstract

Mit diesem Diskussionspapier möchte die **Fachgruppe Hochtemperaturtechnik** der Process-Net-Fachgemeinschaft SuPER den Beitrag der Prozesse und Verfahren der Hochtemperaturtechnik zu der Umsetzung der Ziele des *European Green Deal* in den verschiedenen Industriebranchen darstellen. Der Green Deal, der die Aufgaben der Energiewende und der Circular Economy zusammenführt, verbindet die Zielsetzungen einer klimaneutralen und ressourceneffizienten Industrie mit möglichst geringem Umwelteinfluss.

Für verschiedene Branchen werden Hochtemperaturverfahren beispielhaft bzgl. ihrer erwarteten Entwicklung im Sinne des Green Deal mit ihrer Einbindung in Gesamtprozessketten dargestellt, bzgl. ihres Potenzials zur Nutzung von rezyklierten Einsatzstoffen, zum Einsatz von erneuerbaren Energien, zur Reststoffminderung und zur Emissionsminimierung bewertet und die entsprechenden Forschungs- und Entwicklungsaufgaben aufgezeigt. Die technologischen Betrachtungen werden ergänzt durch Hinweise auf die roadmaps der Branchen zu den Themen Kreislaufwirtschaft, Energiewende und Klimaneutralität.

Im Vordergrund steht für die Arbeit der Fachgruppe Hochtemperaturtechnik die Entwicklung von neuen sowie die Verbesserung von bestehenden Hochtemperaturprozessen und -prozessketten für unterschiedlichste industrielle Anwendungen und Einsatzstoffe. Ziel der Entwicklungen ist die Sicherstellung der geforderten Produktqualität bei gleichzeitiger Ausschöpfung der Energie- und Rohstoffeffizienz unter Beachtung von ökologischen Vorgaben. Der Einsatz innovativer und nachhaltiger Hochtemperaturprozesse zielt auf die Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks der Produktionsverfahren, bei gleichbleibender Produktqualität und trägt damit auch zur Verminderung der spezifischen Produktionskosten bei.

Typische Temperaturen der Hochtemperaturprozesse liegen im Bereich 500 – 2000°C. Die thermo-chemischen sowie thermo-physikalischen Prozesse, im wesentlichen Verbrennung, Vergasung, Thermische Spaltung, Reformierung, Schmelzen, Warmumformen, Calcinieren, Sintern, werden in einer Vielzahl technischer Verfahren und Apparate, z.B. Brennkammer, Drehrohr, Rostofen, Flugstrom, Wirbelschicht, Festbett, Cracker, Reformier, Schmelzofen, Glaswanne, Durchschubofen realisiert. Diese in Prozessketten eingebundenen Verfahren dienen überwiegend der Stoffwandlung, der Formgebung, der Beheizung vor allem in der Eisen- und Stahlindustrie, Nicht-eisen-Metallindustrie, Chemischen Industrie, Kalk- und Zementindustrie, Glasindustrie, Keramik/Feuerfest-Industrie und der Abfall- und Recyclingtechnik. Die Produktionsprozesse in den Branchen Baustoffe, Metall und Glas basieren weit überwiegend auf Hochtemperaturverfahren, auch in der Chemie und Petrochemie sowie der Abfallwirtschaft sind Hochtemperaturverfahren wesentliche Elemente der Prozessketten.

Mitglieder des Beirats der Fachgruppe Hochtemperaturtechnik haben als Vertreter der verschiedenen Branchen ihren Blick auf die Herausforderungen und Potenziale des Green Deal dargelegt und die übergeordneten Aufgaben im Bereich der Hochtemperaturtechnik für die verschiedenen Branchen beschrieben. So werden in allen Branchen radikale Prozessinnovationen erforderlich sein (z.B. wasserstoffbasiertes Direktreduktionsverfahren/Stahl, Oxy-Fuel-Drehrohrverfahren/Zement), Verfahren auf neue Einsatzstoffe als Ersatz für fossile Edukte umzustellen sein (z.B. Kunst-

stoffabfall-Fraktionen, Substitution karbonatischer Rohstoffe/Zement) und Verfahren auf den Einsatz nicht-fossiler Energieträger anzupassen sein (z.B. elektrisch beheizter Steamcracker/Chemie, Einsatz von Plasma-Brennern).

Das Diskussionspapier erhebt nicht den Anspruch auf eine vollständige Darstellung der zukünftigen Anforderungen an die Prozesse und Verfahren der Hochtemperaturtechnik. Es soll einen Beitrag zur Diskussion über die Transformation der industriellen Produktion im Sinne des Green Deal aus der Sicht der Ingenieur/innen und Wissenschaftler/innen der Fachgruppe leisten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass ein erheblicher Entwicklungs- und Investitionsbedarf im Bereich der Hochtemperaturtechnik gegeben ist, dass eine rein strombasierte industrielle Produktion ohne chemische Energieträger nicht möglich sein wird und dass Technologieoffenheit eine wesentliche Voraussetzung für das Gelingen der Transformation ist.

1. Einführung

Circular Economy ist der Überbegriff für das Wirtschaften in synergetisch miteinander verbundenen Teilprozessen, d.h. in Prozessketten, in denen Stoffe im Sinne von chemischen Elementen und Verbindungen, aber auch Materialien Kreisläufe durchlaufen, die auch die Nutzung von Gütern miteinschließen. Dies schließt das Recycling und die Wiederverwendung von Gütern mit ein. Basierend auf den Grundlagen der Thermodynamik, insbesondere der Stoff-, Massen- und Energieerhaltung, lassen sich geschlossene Stoffkreisläufe der *Circular Economy* nur durch die Zufuhr von Energie von außen realisieren. Im Verständnis des von der EU postulierten *Green Deal* werden diese Kreisläufe bzw. Prozessketten durch nachhaltige klimaneutrale Energie (Abb. 1) angetrieben.

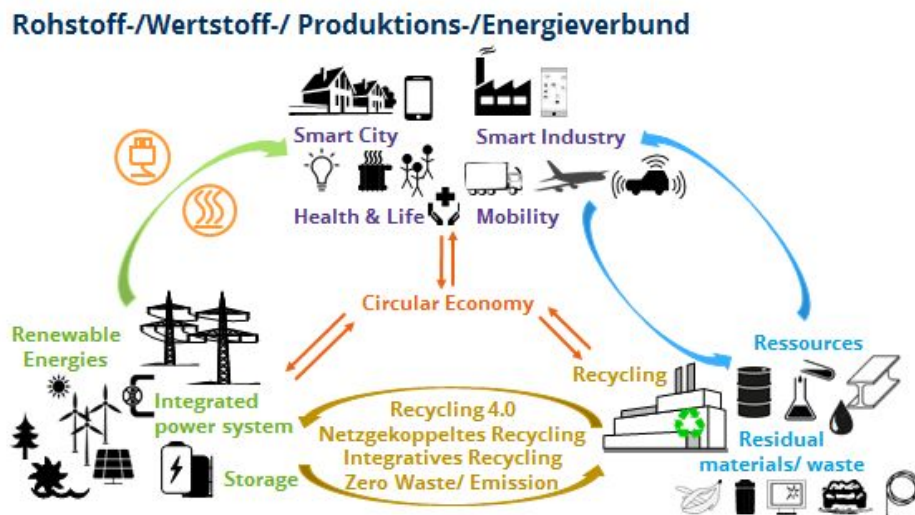


Abb. 1: Vernetzung von Rohstoff-, Wertstoff-, Produktions- und Energieströmen im Verbund ermöglichen eine Kreislaufwirtschaft ohne Abfälle und Emissionen. [1]

Der von der EU angestrebte *Green Deal* verbindet damit die Themen Energie und Produktion, Produkte und deren Nutzung mit dem Ziel, Treibhausgasemissionen zu minimieren und Ressourcen zu schonen. In der Energiewirtschaft sollen die Treibhausgasemissionen durch die Umstellung von fossilen Energierohstoffen zu nicht fossilen Energien mit dem Ziel *Zero Emission* reduziert werden. Bei der Herstellung von Produkten wird das Schließen von Stoffkreisläufen angestrebt, um begrenzte Ressourcen zu schonen und Abfallströme und Treibhausgasemissionen zu vermeiden. Diese Zielstellungen *Zero Waste* und *Zero Emission* sind als Benchmark für das gesamte Wirtschaften zu betrachten. Es genügt dabei nicht, einzelne Teilprozesse oder Verfahren zu betrachten, vielmehr müssen synergetisch miteinander verbundene Teilprozesse, ganze Prozessketten dem Paradigmenwechsel durch die *Energietransformation* und die *Circular Economy* einer Neu- bzw. Weiterentwicklung unterzogen werden. Dabei müssen auch über die Branchen und Sektoren hinweg Optimierungspotenziale betrachtet werden.

Die Prozesskettenbewertung und -optimierung ist eine Kernkompetenz der Verfahrenstechnik. Die Fachgruppe Hochtemperaturtechnik der ProcessNet-Fachgemeinschaft SuPER definiert ihr Arbeitsfeld über das Alleinstellungsmerkmal hoher Temperaturen bei technischen Prozessen und Verfahren. Dabei werden als untere Temperaturgrenze etwa 500 °C zur Abgrenzung gegenüber

anderen Arbeitsgebieten angenommen. Die hohen Temperaturen sind bei den Verfahren ein notwendiger Prozessparameter damit

- chemische Reaktionen vollständig oder gezielt selektiv ablaufen,
- gewünschte Produkteigenschaften erreicht werden
- sowie zur Steigerung der Effizienz von Energie- und Stoffwandlungsprozessen.

Hochtemperaturverfahren ermöglichen die Nutzung eines breiten Einsatzstoff-Spektrums von primären und sekundären Rohstoffen bzw. Abfällen. Sie erfüllen damit eine wesentliche Voraussetzung zur Schließung von Stoffkreisläufen im Sinne der Circular Economy und ermöglichen thermodynamisch die Aktivierung von CO₂ zur Rückführung von Kohlenstoff in den Stoffkreislauf. Hochtemperaturprozesse und ihre in die Prozess- und Wertschöpfungsketten der industriellen Produktion integrierten Hochtemperaturverfahren sind damit *Enabling Technologies* für die Erreichung der Ziele des *Green Deal*.

Hochtemperaturprozesse finden in den verschiedenen Branchen in unterschiedlichen Verfahren ihren Einsatz. Bedeutende Hochtemperaturprozesse, mit Beispielen für ihre Anwendung in unterschiedlichen Verfahren der verschiedenen Branchen und ihre entsprechende Funktion in der jeweiligen Prozesskette, sind in der nachfolgenden Tabelle 1 aufgelistet:

Tabelle 1: Beispiele für Hochtemperaturprozesse

Prozess	Verfahren (Beispiel)	Temperatur	Funktion	Einsatz
Verbrennung	Drehrohr Rostofen Brennkammer	900 - 1400°C	Beheizung Stoffwandlung	alle Branchen
Vergasung	Flugstrom Wirbelschicht Festbett	900 - 1200°C	Stoffwandlung	Chemie Abfallwirtschaft Zement
Thermische Spaltung	Steam Cracker Fluid Cat Cracker	850°C	Stoffwandlung	Chemie Mineralölwirtschaft
Reformierung	Steam Reformer	850°C	Stoffwandlung	Chemie
Schmelzen	Schmelzofen Glaswanne	700 - 1650°C >2000°C 1500 – 1630°C	Stoffwandlung	Al, Cu, Stahl Refraktärmetalle Glas
Warmumformen	Ofen	100 - 1300°C	Formen	Metall
Calcinieren und Sintern	Flugstrom Schachtofen Zementdrehrohr Tunnelofen	850 – 1450°C	Stoffwandlung	Kalk Zement Ziegel
Sintern	Durchschubofen	<1450°C	Verfestigen	Metall

Technische Anwendungen der Hochtemperatur finden sich in zahlreichen in der Fachgruppe vertretenen Branchen und Industrien. Branchenübergreifende Synergien bzgl. Stoff- und Energieströmen sind für die Prozessketten der Hochtemperaturtechnik vorhanden und müssen weiter ausgebaut werden. Die folgende Auflistung der wesentlichen Anwendungsfelder verdeutlicht, ohne Anspruch auf Vollständigkeit und Ranking, die große Anwendungsbreite dieses Fachgebietes:

- Eisen- und Stahlindustrie
- Nichteisen-Metallindustrie
- Chemische Industrie
- Kalk- und Zementindustrie
- Glasindustrie
- Keramik/Feuerfest-Industrie
- Abfall- und Recyclingtechnik
- Heiz- und Wärmetechnik
- Kraftwerkstechnik
- Anlagenbau

Im Vordergrund steht für die Arbeit der Fachgruppe Hochtemperaturtechnik die Entwicklung von neuen sowie die Verbesserung von bestehenden Hochtemperaturprozessen und -prozessketten für unterschiedlichste industrielle Anwendungen und Einsatzstoffe. Dabei ist die Sicherstellung der geforderten Produktqualität bei gleichzeitiger Ausschöpfung der Energie- und Rohstoffeffizienz unter Beachtung von ökologischen Vorgaben Ziel der Entwicklung. Der Einsatz solcher innovativer und nachhaltiger Hochtemperaturprozesse zielt auf die Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks der Produktionsverfahren bei gleichbleibender Produktqualität und trägt zur Verminderung der spezifischen Produktionskosten bei.

Mit diesem Diskussionspapier möchte die Fachgruppe Hochtemperaturtechnik den Beitrag der Prozesse und Verfahren der Hochtemperaturtechnik zu der Umsetzung der Ziele des *European Green Deal* in den verschiedenen Industriebranchen darstellen.

Für jede Branche werden **wichtige Hochtemperaturverfahren** beispielhaft bzgl. ihrer

- erwarteten Entwicklung im Sinne des Green Deal mit ihrer
- Einbindung in Gesamtprozessketten dargestellt, bzgl. ihres
- Potenzials zur Nutzung von rezyklierten Einsatzstoffen, zum
- Einsatz von erneuerbarer Energien und zur
- Emissionsminderung – Reststoffminderung bewertet und die
- Forschungs- und Entwicklungsaufgaben aufgezeigt.

Die technologischen Betrachtungen werden ergänzt durch Hinweise auf die **Branchen-Roadmaps** zu den Themen Kreislaufwirtschaft, Energiewende und Klimawandel.

2. Baustoffbranchen

Charakterisierung der Branchen

Die Baustoffbranchen gehören zu den Energie- und CO₂-intensiven Branchen. Die Baustoffe Zement, Kalk und Ziegel werden aus den natürlichen Rohstoffen Kalkstein und / oder Ton hergestellt. Bei Temperaturen von 900 °C bis 1450 °C erfahren die Rohstoffkomponenten durch chemische Umwandlung die so genannte Calcinierung und teilweise Sinterung. Dabei entstehen aus den Rohstoffen die jeweiligen Produkte mit ihren charakteristischen Eigenschaften. Die Hochtemperaturprozesse führen zu Brennstoff- und Rohmaterial-bedingten CO₂-Emissionen. Insgesamt stehen sie für ca. 30 Millionen Tonnen CO₂ pro Jahr in Deutschland, wovon die Zementindustrie etwa zwei Drittel ausmacht.

Eine vollständige Substitution der thermischen Prozesse durch elektrische Alternativen ist aus heutiger Sicht nicht möglich, da die hohe flächen- bzw. volumenspezifische Leistung von Feuerungen nicht erreicht werden kann. Aktuell ist daher die Verbrennung für diese Prozesse nicht ersetzbar. Der Einsatz alternativer biogener oder Kohlenstoff-freier Brennstoffe ist jedoch möglich.

Eine kurze Charakterisierung der Branchen ist in der folgenden Tabelle 2 gegeben.

Tabelle 2: Roadmaps der Branchen zur Dekarbonisierung, Deutschland

Branche	Produktion [Mio. t]	Stand- orte [-]	CO ₂ -Emis- sionen [Mio. t] (2019) <i>Quelle: EEA [2]</i>	Roadmap zur Dekarbonisierung	CO ₂ -Minderungs- potenzial 2050 [Mio. t]
Zement	34,2 (2019)	54	19,989	VDZ-Studie Dekarbonisierung Zement Beton 2020.pdf	+1,5 Mio. t (ohne Rekarbonatisierung) -1,6 Mio. t (inkl. Rekarbonatisierung und BECCS)
Kalk	6,4 (2018)	ca. 100	8,776	https://www.kalk.de/cosub2sub/	>95 %
Ziegel	9,3 (2019)	106	1,993	https://Ziegel 24 110321 Web 200dpi 1.pdf	Senkung auf 0,5 Mio t/a (Technologiepfad) bzw. Senkung auf 0,0 Mio t/a (Klimaneutralitätspfad)

Die drei Branchen haben in den vergangenen Jahren Roadmaps entwickelt und veröffentlicht, die mögliche Wege zur Dekarbonisierung der Branchen bis 2050 aufzeigen. Allen Roadmaps ist gemeinsam, dass die entsprechenden Pfade mit sehr großen Anstrengungen verbunden sind, darunter der Einsatz neuer Hochtemperaturtechnologien, neuer Roh- und Brennstoffe bis hin zu CO₂-Abscheidung, -Speicherung und -Nutzung. Eine vollständige Dekarbonisierung wird sich nur erreichen lassen, wenn die gesamte Wertschöpfungskette im Hinblick auf Klimaneutralität optimiert wird. Daraus resultiert ein erheblicher F&E-Bedarf im Bereich Hochtemperaturtechnologien in den kommenden Jahren. Die vorgeschlagenen Maßnahmen sind in den Abschnitten 2 und 3 berücksichtigt.

Dekarbonisierung als zentraler Bestandteil der Circular Economy in den Baustoffbranchen

Kaum ein Industriezweig kommt heute noch umhin, im Sinne einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft und Ressourcenschonung darzulegen, mit welchen Optionen die Thermoprozesse in den Baustoffbranchen optimiert und die Produkte nach der ersten Nutzungsphase in den Verwertungskreislauf zurückgeführt werden. Hierfür müssen sowohl neue Wege zur Minimierung und Separierung von klimaschädlichen Gasen beschränkt als auch Vorkehrungen im Design der Gesamtprozesskette getroffen werden, die einen sortenreinen Rückbau und eine einfache Trennung von recyclingfähigen Komponenten ermöglichen.

In Deutschland fallen jährlich etwa 214,6 Mio. t mineralische Bauabfälle an. Mehr als die Hälfte sind Bodenaushub, Baggergut und Gleisschotter. Knapp 90 Mio.t bestehen aus Bauschutt, Straßenaufbruch, Gips- und Baustellenabfällen; davon stammen etwa 10 Mio. t aus Abbruchziegeln sowie anderen ziegelreichen Stoffgemischen.

In den Hochtemperaturprozessen der Baustoffbranchen sind der Ressourceneinsatz der Mineralstoffe Zement, Kalk und Ziegel und der damit verbundene Primärenergieeinsatz untrennbar. Natürliche Rohstoffe und fossile Brennstoffe werden zunehmend substituiert, was einerseits den Ausstoß klimaschädlicher Gase mindert und Natur und Landschaft durch die Verringerung des Flächenverbrauchs für den Abbau von natürlichen Kiesen und Sande schont. Gleichzeitig werden Deponiekapazitäten eingespart. Eine sinnvolle Wiederverwertung tritt an die Stelle der bisherigen umweltbeeinträchtigenden Beseitigung von Bauabfällen.

Die Baustoffbranchen sind in hohem Maße für die CO₂-Emissionen verantwortlich, weil sie einerseits Hochtemperaturprozesse zur Herstellung der Produkte benötigen und andererseits Rohmaterialien verwenden, die im Produktionsprozess unvermeidbar CO₂ freisetzen. Zielgerichtete Maßnahmen in der Ziegelherstellung setzen zur Ressourcenschonung darauf, während der Herstellung Bodenaushub, organische Porosierungsstoffe und RC-Material einzusetzen. Neben der Wiederverwendung wird ziegelreicher Mauerwerksbruch eingesetzt bzw. erprobt.

Zur Erreichung der Klimaziele 2050 sind in der Ziegelindustrie folgende Maßnahmen vorgesehen:

- Verminderung des Tonmineralgehalts bei gleichzeitiger Erhöhung des inerten Anteils (RC-Ziegel)
- Alternative Tone ohne fossilen Kohlenstoff, d.h. kalkfreie Tone
- Einsatz biogener Porosierungsstoffe (Verfügbarkeit!)
- Gewichtsreduktion (verbesserte Ziegelgeometrie)

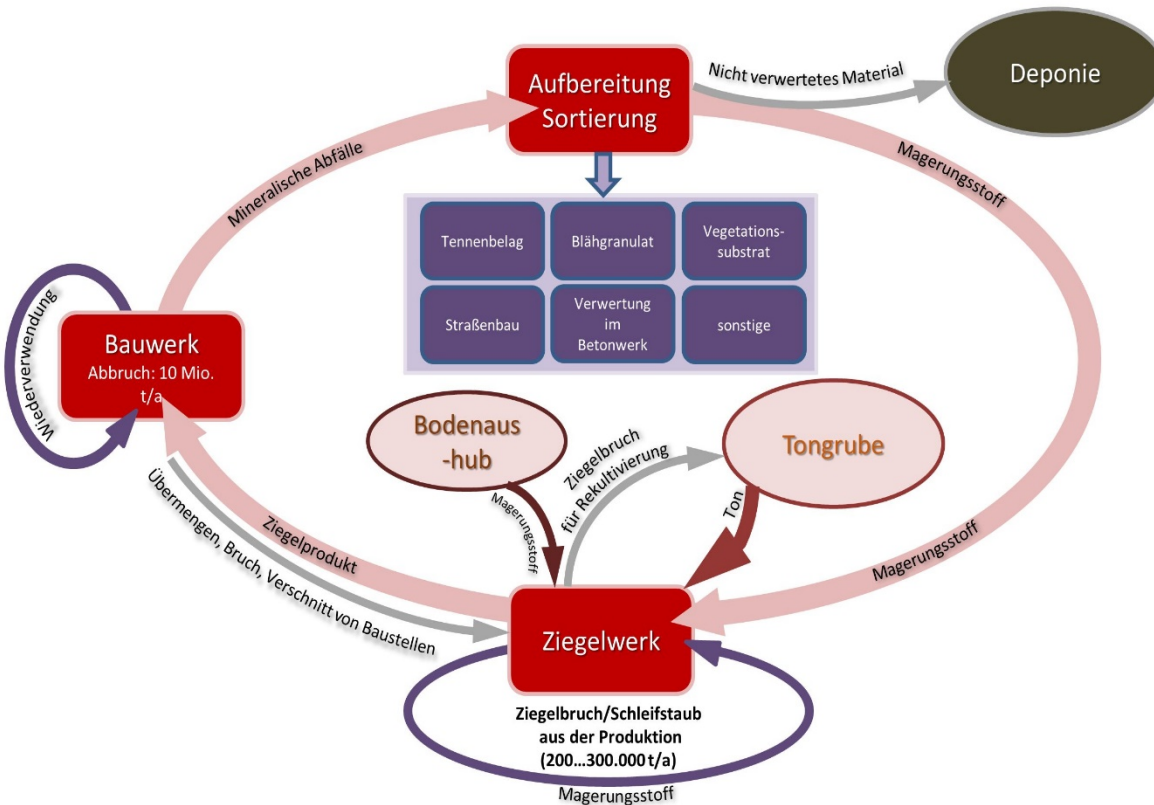


Abb. 2: Circular Economy am Beispiel der Ziegelindustrie [3]

Ressourcenschonung in der Zement- und Betonindustrie heißt, den bislang verwendeten Kalkstein durch bspw. Steinkohlenflugasche, Hüttensand, REA-Gips, Tone oder Materialien zu ersetzen. Erstere stehen mittelfristig aufgrund der Energiewende nicht mehr ausreichend zur Verfügung.

Für die Beton- und Zementindustrie ergeben sich daher folgende Maßnahmen zur Ressourcenschonung und Minderung der Freisetzung von Treibhausgasen:

- Einsatz von SCMs (supplementary cementitious materials)
- Reduktion Klinker-Zement-Faktor
- Einsatz calcinierter Tone, RC-Ziegel, Kalkstein als Zuschlagstoff
- Einsatz von alternativem RC-Gips oder Phosphorgips
- Nutzung von Schlacke aus der Verhüttung von Eisen und Metallen
- Produkt-Recycling: Beton, Kalk, Gips;
- Einsatz Sulfat-freier rezyklierter Gesteinskörnungen (aus Betonbruch, Ziegel)

Abb. 3 zeigt Möglichkeiten zur technischen Realisierung der Circular Economy am Beispiel der Zementherstellung. Kernstück dieses Beispiels ist die Umstellung des Hochtemperaturprozesses „Klinkerherstellung“ auf die Oxyfuel-Technologie.

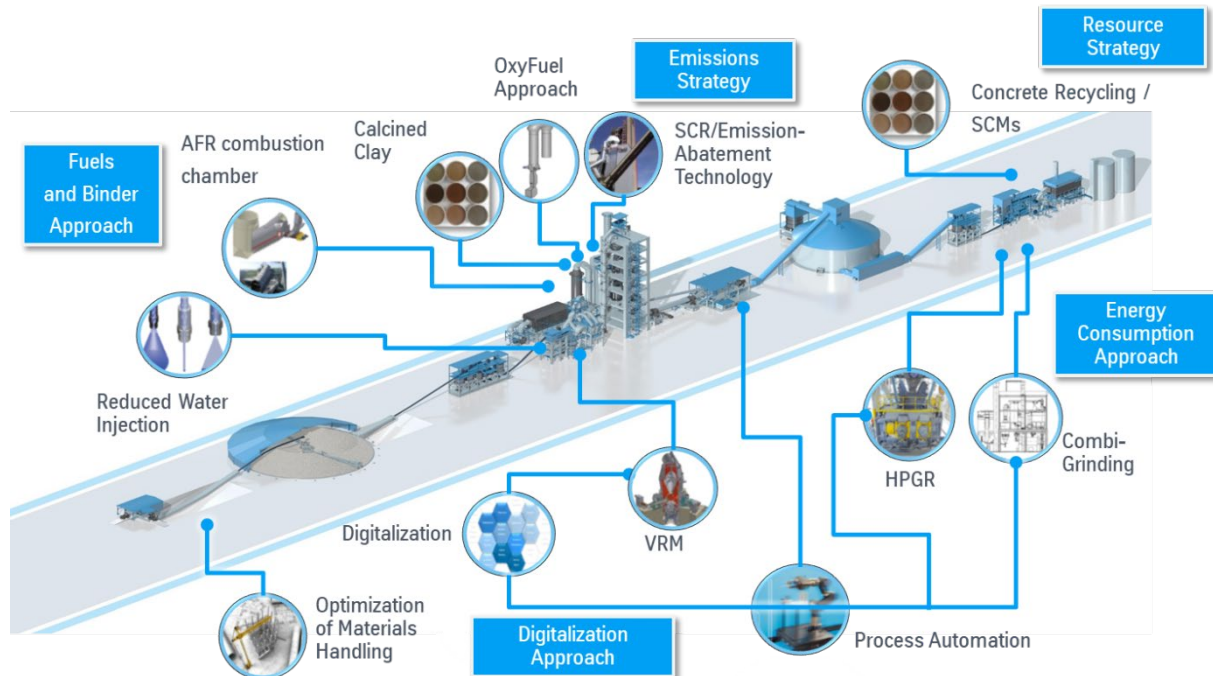


Abb. 3: Technische Realisierung der Circular Economy am Beispiel der Zementherstellung [4]

Beton und Ziegel sind heterogene Stoffgemische, die durch mechanische und chemische Aufbereitung in verwertbare Stoffströme überführt werden können. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, durch Carbonatisierung des separierten Zementgesteins und des Ziegels als CO₂-Senke zu fungieren. Eine Aufbereitung von Beton und Nutzung als Gesteinskörnung wird stetig weiterentwickelt. Für die Mineralstoffbranche sind die Erreichung der Klimaziele mit einer Um- und Neugestaltung der gesamten Thermoprozesskette verbunden, die große Herausforderungen auch an die Prozessführung stellt, wie im Folgenden bei der Beschreibung der Technischen Innovationen aufgezeigt wird.

Technische Innovationen

Die notwendigen technischen Innovationen auf dem Weg zur Klimaneutralität in der Baustoffbranche führen zwangsläufig über die Sektor-Kopplung und sind mit großen Herausforderungen hinsichtlich der technischen Machbarkeit und notwendigen Investitionen verbunden. Dabei sind im Hinblick auf CE unterschiedliche Stoff- und Energieströme zu betrachten: das Rohmaterial, die Zuschlagstoffe, die Brennstoffe und die gasförmigen Sekundärprodukte, die bei der Herstellung von Baustoffen freigesetzt werden z.B. CO₂, SO₂, NH₃ etc. Beim Zement und auch beim Kalk

spricht man u.a. von der unvermeidbaren CO₂-Freisetzung, wenn CO₂ als Inhaltstoff des Rohmaterials bei der stofflichen Umwandlung freigesetzt wird. Zur Vermeidung bzw. Verminderung von CO₂-Emissionen können im Herstellungsprozess unterschiedliche Wege beschrrieben werden, die nachfolgend aufgelistet und bewertet sind:

Wie die Roadmaps der Branchen aufzeigen, gliedern sich die Maßnahmen im Hinblick auf deren Dekarbonisierung in Material-technologische (wie z.B. neue Klinker-arme oder neue Zemente bzw. Bindemittel, neue bisher nicht genutzte Einsatzstoffe usw.) und die Hochtemperaturprozesse selbst betreffende Innovationen. Zur letztgenannten Kategorie sind in **Tabelle 3** relevante Technologien aufgeführt und mit ihrem Entwicklungsstand (TRL=Technology Readyness Level) und ihrer Umsetzbarkeit in bestehenden Anlagen bewertet. Daraus ist abzuleiten, dass zum einen noch teilweise erheblicher F&E-Bedarf besteht und zum anderen häufig der Ersatz der bestehenden Anlagen durch Neuanlagen erforderlich ist – mit den damit verbundenen erheblichen Investitionen.

Beispiel Oxyfuel-Technologie bei der Zementherstellung: Beim Oxyfuel-Prozess wird die Verbrennungsluft durch reinen Sauerstoff ersetzt. Dabei wird zwischen Hochtemperaturprozessen in Sauerstoff-Atmosphäre bzw. in einem Gemisch aus Sauerstoff und rezirkuliertem CO₂ unterschieden. In Kombination mit der Oxyfuel-Technologie ergeben sich für die Anlagenbauer und Betreiber neue große Herausforderungen durch die höheren Flammentemperaturen und Anforderungen an die Dichtigkeit der Ofenlinie, denn die Effizienz der CO₂-Separation hängt maßgeblich von der erzielten Reinheit im Rauchgas ab. Angestrebt werden CO₂-Konzentrationen von mehr als 90%. Für die Verflüssigung und eine weitere Verwertung bzw. Lagerung von CO₂ sind Konzentrationen von über 99% Voraussetzung. Die größte Herausforderung für die Betreiber stellt die weitere Nutzung des separierten CO₂ dar. Für die Nutzung von CO₂ führt ein Weg über die Sektor-Kopplung, die eine Verknüpfung von z.B. Windenergie und elektrolytisch erzeugtem Wasserstoff hin zur Methan- bzw. Methanol-Synthese beinhaltet. Die Nutzung von CO₂ kommt aufgrund der enormen Menge, die bei der Produktion von Baustoffen anfällt, nur für einen beschränkten Anteil in Frage. Der größere Teil des separierten CO₂ muss unterirdisch gelagert werden. Dazu ist eine entsprechende Logistik erforderlich.

Die Baustoffbranche nimmt diese Herausforderungen auf dem Weg zur Klimaneutralität an und beschreitet unterschiedliche Wege, um sowohl für bestehende als auch für neue Anlagen die bestmögliche Technologie zu entwickeln und bereitzustellen. Die Umsetzung setzt aber sowohl die gesetzgeberische Unterstützung bei der Definition von Grenzwerten und der Anpassung von Normen, die gesellschaftliche Akzeptanz einer Verteuerung der Produkte als auch die finanzielle staatliche Unterstützung bei der Entwicklung neuer Hochtemperaturtechnologien voraus, die den Ausstoß klimaschädlicher Gase vermeiden und den Ressourcenverbrauch minimieren.

Tabelle 3: Innovative Technologien im Bereich der Hochtemperaturprozesse

Technologie	TRL	Nachrüstbarkeit
<u>Innovative Ofen-/Vorwärmer und Trocknertechnologien</u>		
Trockner (Ziegel): Trennung des Ofen-Trockner-Verbunds; unabhängige Optimierung beider Komponenten, Trocknung mit Mikrowelle	3-5	mittel
Ofen (Ziegel): Wärmerückgewinnung aus Rauchgasen, Luftvorwärmung, Senkung Luft-Ziegel-Verhältnis, Verminderung Brennhilfsmittel, Hybridofen mit elektrischen Aufheiz- und Kühlzonen inkl. Umwälzern, Brennzonen mit Gas bei geringeren Besatzhöhen, Reingasbrenner	3-9	mittel - hoch
Ofen (Kalk, Zement): Verbrennung in reiner O ₂ - bzw. O ₂ /CO ₂ -Atmosphäre im Dreh- bzw. Schachtofen, Einsatz von H ₂ , Brenner/ Brennkammer für Kombinationen EBS und O ₂ ,	3-9	hoch
Vorwärmer/Calcinator (Zement): Nutzung von Solarenergie (Solar-Receiver); EBS-Brennkammer für H ₂ , Biomasse, EBS in Kombination mit O ₂	3-9	hoch
<u>Brennstoffsubstitution(fossil) und Nutzung erneuerbarer Energiequellen:</u>		
Ersatzbrennstoffe: EBS aus Abfällen, Biomasse, H ₂ , Synthesegas	3-9	hoch
Erneuerbare Energie (elektrisch), solare oder elektrische Wärme	3-5	gering
Einsatz von Wärmepumpen, Abwärmenutzung	5-9	mittel - hoch
Intelligente Produktionsplanung zur optimalen Nutzung elektrischer Energie	7-9	mittel - hoch
Temperung von Tonen und deren Nutzung als Substitut für Zementklinker	7-9	hoch
<u>Technische Lösungen zur CO₂-Abscheidung mit dem Ziel der Nutzung bzw. Speicherung</u>		
Oxyfuel-Technologie mit Rauchgasrückführung Dreh- Schachtofen (Zement, Kalk)	6	mittel
Oxyfuel-Technologie durch Verwendung von reinem Sauerstoff für die Verbrennung (Zement)	6	gering
Carbonate Looping/Calcium Looping (integriert) für Zement	6	gering
für Kalk	4	
Indirekte Calcinierung (Zement, Kalk)	6	gering
Tail-End-CO ₂ -Abscheidung mittels Aminwäsche (alle Branchen)	8	hoch
Tail-End-CO ₂ -Abscheidung mittels Chilled Ammonia-Technologie	6	hoch
Tail-End-CO ₂ -Abscheidung mittels Membranen	4-5	hoch
Tail-End-CO ₂ -Abscheidung mittels Adsorption	4-5	hoch

3. Eisen- und Nichteisenmetalle sowie Hochleistungskeramikpulver

Metallurgie und Thermoprozesstechnik

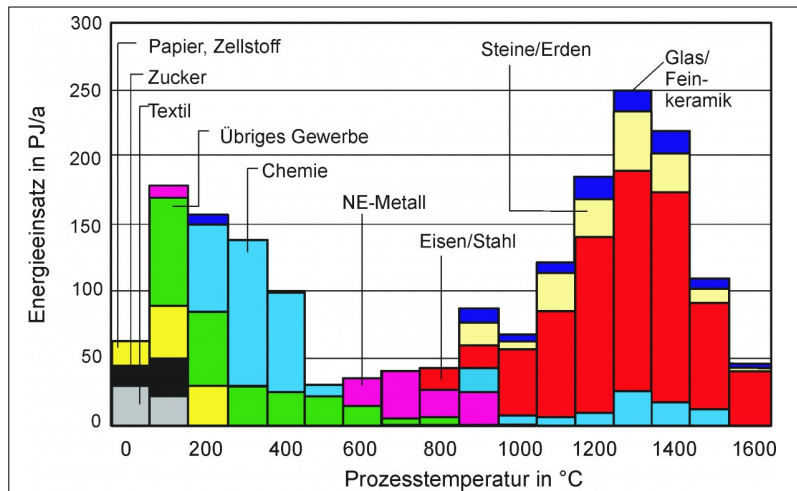


Abb. 4: Herstellungstemperaturen von Produkten [5]

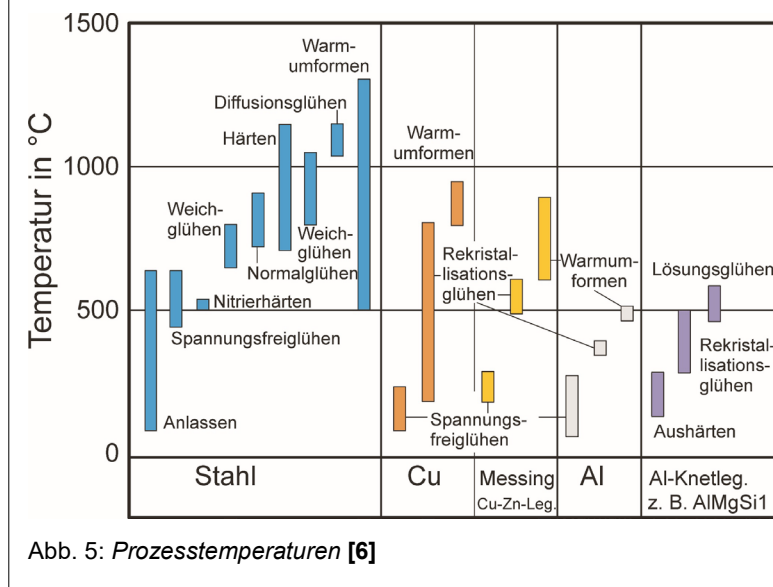


Abb. 5: Prozesstemperaturen [6]

Allgemeines

Viele Herstellungsverfahren im Bereich der Metallherstellung und des Metallrecyclings lassen sich ohne thermische Verfahren und die dafür erforderliche Energie nicht realisieren. Dabei spielen insbesondere die sogenannten Hochtemperaturverfahren mit Temperaturen über 1000°C eine entscheidende Rolle, Abb. 4.

Die Metalle, hier liegt der Fokus auf den Massenmetallen Fe (Stahl), Al und Cu, sind aufgrund der Metallurgie und deren Wertigkeit technisch/wirtschaftlich gut für das Recycling durch wiederholtes Einschmelzen geeignet. Die dafür erforderlichen Schmelzprozesse (Metallurgie der Metalle) erfolgen oberhalb der Schmelztemperatur (Fe: 1538 °C; Al: 660 °C, Cu: 1085 °C) und basieren auf elektrischer Energie (z. B. Lichtbogenofen für Stahl) und brennstoffbeheizten Verfahren (z. B. Zweikammerofen für kontaminierte Al-Schrotte). Neben dem Schmelz-

und Raffinationsvorgang, in dem u. a. die geforderte chemische Zusammensetzung und der Reinheitsgrad der Metalle in der flüssigen Phase eingestellt werden, werden die thermophysikalischen Eigenschaften durch wärmetechnische Prozesse in der festen Phase (Thermoprozesstechnik der Metalle) anwendungsgerecht eingestellt (Erwärmung für die Warmumformung, Glüh- und Wärmebehandlungsprozesse). Die relevanten Temperaturen liegen im Bereich von 100 °C (Alterung von Al) bis hin zu 1400 °C für das Warmwalzen von Elektroblech, Abb. 5. In Zukunft liegt das Hauptaugenmerk deshalb verstärkt auf der Optimierung der Hochtemperaturverfahren, z. B. durch weitere Energiereduzierungen, dem Einsatz CO₂-neutraler Brennstoffen (grüner Wasserstoff, erneuerbare elektrische Energie), neuen Prozessführungen oder sogar neuartigen Verfahren. Beispielhaft ist die Entwicklung des wasserstoffbasierten DRI-Prozesses (DRI: Direct Reduced Iron) auf der Basis von grünem Strom und der Wasserelektrolyse (grüner Wasserstoff) zur Herstellung

von CO₂-freiem H-DRI als Ersatz für ca. 26 Mio. t Roheisen im Jahr 2019 in Deutschland zu nennen. Damit verbunden ist die Verdrängung des etablierten Hochofenprozesses, dem spezifische CO₂-Emissionen von 1288 kg/t_{RE} nach Benchmark zugeordnet werden, durch das CO₂-neutrale (arme) H-DRI-Verfahren.

Wichtig ist in diesem Zusammenhang zu verstehen, dass die derzeit angewendeten thermischen Hochtemperaturverfahren mit den genutzten Brennstoffen, wie z. B. Erdgas, nicht uneingeschränkt auf erneuerbare elektrische Energie umgestellt werden können.

Anwendungen von gewalzten und geschmiedeten Stählen, Nichteisenmetallen und Hochleistungskeramikpulvern

Die mengenmäßig dominierenden gewalzten (Lang- und Flachprodukte) und geschmiedeten metallischen Materialien werden als Konstruktions- und Funktionswerkstoffe in mehr oder weniger allen Bereichen eingesetzt:

- Automobilindustrie (Stahl- und Al-Bleche, Getriebe, Antriebe, Fahrwerk, ...)
- Bauindustrie (Stahlbeton, Träger, ...)
- Verpackungen (Stahl und Al, Dosen, Kanister)
- Schiffbau
- Chemie- und Verfahrenstechnik
- Maschinenbau
- Elektrotechnik

Der Fokus der Nichteisenmetall- und Hochleistungskeramikpulver liegt u. a. auf die Herstellung von häufig hochreinen, feindispersen Pulvern mit besonderen Eigenschaften. Diese Pulver werden z. B. eingesetzt

- als Legierungsmetall (Rhenium) für Flugzeugturbinenschaufeln,
- als Sintermetall im Werkzeugbau (Wolframcarbid),
- als Zündmittel (Bor) in Airbags,
- als Zusatzstoffe im Bereich von optischen Linsen (Nioboxid) oder direkt
- in Kondensatoren (Tantal) für Hochleistungshandys,
- als Sinterbauteile, wie z. B. Gleitlager (Siliziumcarbid) oder Wärmeleitsysteme (Aluminiumnitrid),
- als Kosmetikkomponenten (Bornitrid) oder
- als sog. Komplexpulver (zusammengesetzt aus mehreren Metall- oder Keramikkomponenten) für den Bereich der Oberflächenbeschichtungen oder den Einsatz im 3D-Druck

Eine besonders interessante Innovation in den letzten Jahren stellt in der Fertigungstechnik der 3D-Druck da, der ohne Nichteisenmetall- und Keramikpulver nicht denkbar ist. Mit dieser Technologie lassen sich inzwischen Konstruktionsbauteile herstellen, die früher mit klassischen Fertigungsverfahren nicht hergestellt werden konnten.

Die Herstellung der o. g. unterschiedlichen Pulver erfordert mindestens einen, häufig sogar, je nach der Komplexität der Produktanwendung, zwei oder mehrere Hochtemperaturverfahrensschritte in der entsprechenden Verfahrenslinie. Dabei werden teilweise thermische Verfahren eingesetzt die eine Anwendungstemperatur von bis zu 2000 °C benötigen, um die geforderten Reinheiten, Eigenschaften usw. zu erzeugen.

Eingesetzte thermische Verfahren und Apparate

Im Folgenden wird kurz beschrieben, welche thermischen Hochtemperaturprozesse und Apparate für Herstellung gewalzter und geschmiedeter Stähle und Nichteisenmetalle eingesetzt werden.

- Reduktion: Hochofen - CO₂-reduzierte/-freie Alternativverfahren sind am Beginn der Entwicklung
- Schmelzen: Elektro-Lichtbogenöfen - die Entwicklung der H-DRI-Verfahren erfordert eine Vielzahl zusätzlicher Lichtbogenöfen mit anzupassender Schmelztechnik; Modifikation erdgasbeheizter Al-Schrottschmelzöfen (Ein- und Zwei-Kammeröfen) durch alternative Verfahren
- Wärmen für die Warmumformung: Alternative Beheizungsverfahren (elektrisch, nachhaltige Brenngase) für Stoß-, Hubbalken-, Hubherd- und Drehherdöfen
- Schmelzen und Wärmebehandlung unter Schutzgas: Für die indirekte Erwärmung (meist Vermeidung einer Oxidation, z. B. unter Wasserstoff oder Argon) werden Öfen mit Muffeln und Strahlheizrohren (Haubenöfen für die Kaltbandglühung von Stahl, kontinuierliche Glüh- und Beschichtungsanlagen - z. B. Durchlauföfen und Verzinkungslinien für Stahl und Bandschwebeöfen für hochfeste 6000er und 7000er Al-Legierungen eingesetzt sowie Anlagen für das Aufkohlen (Härten) und Nitrieren (direkte Nitrierung zum Aluminiumnitrid oder Siliziumnitrid)

Die Verfahrenstechnik zur Herstellung der Pulver umfasst im Wesentlichen: Carburierung, Schmelzen, Entbinderung, Sintern, Nitridierung, Oxidierung (Rösten), thermisches Lösen, Chlorierung, Reduzierung und Kalzinierung. Dafür werden u. a. Apparate wie Durchschuböfen, Induktionsspulen, Drehrohröfen, Etagenöfen, Haubenöfen, Hubbalkenöfen, Lichtbogenöfen, Wirbelschichtreaktoren, Trommelöfen und Bandöfen eingesetzt, die i. w. auf elektrischer Energie basieren.

Eine Übersicht der Verfahren und Anlagen der Thermoprozesstechnik ist in [7] gegeben.

Zukünftige Optimierungen der Metallurgie/Thermoprozesstechnik/Pulverherstellung

Im Bereich der thermischen Behandlung wird in der Regel bis zu Temperaturen von 1250 °C Erdgas für Beheizungszwecke eingesetzt. Es gibt hier inzwischen Überlegungen, statt Erdgas später auch „grünen“ Wasserstoff einzusetzen. Dazu werden bereits Tests mit Wasserstoffbren-

nen durchgeführt. Dabei ist aber zu berücksichtigen, dass sich die unterschiedlichen Brennstoffkennzahlen zwischen Wasserstoff und Erdgas z. T. stark unterscheiden. Dies führt zu unterschiedlichen Wärmeübertragungsbedingungen, Abgasströmen, Geometrien der Brenner und NO_x-Emissionen. Dies ist auch der Grund, dass diese neuartigen wasserstoffbasierten Brenner-technologien in der Regel nur in neuen, entsprechend ausgelegten Ofenanlagen eingesetzt werden können. Die Wechselwirkungen der Güter (Hochtemperaturkorrosion bzw. Verzunderung und damit verbunden das Entzunderungsverhalten) und der Feuerfestmaterialien mit H₂O-reichen Abgasen sind ebenfalls noch vertieft zu untersuchen.

Für Behandlungstemperaturen über 1250 °C wird in der Regel elektrische Energie eingesetzt. Diese Energie kann relativ einfach durch CO₂-freie erneuerbare elektrische Energie ersetzt werden. Es ist jedoch immer im Blick zu behalten, dass in der Regel große Thermoprozessanlagen aufgrund der deutlichen Energiekostenunterschiede von Brenngas und elektrischer Energie derzeit wirtschaftlicher mit gasförmigen Brennstoffen betrieben werden können.

Die CO₂-relevantesten Branchen im Bereich der Metallerzeugung sind die Stahl-, Aluminium- und Kupferindustrie. Diese Branchen besitzen aufgrund der Nachfrage nach den Werkstoffen, der Bedeutung ihrer Produktionsstandorte für sichere Prozessketten der Wirtschaftsabläufe sowie aufgrund ihres Energiebedarfs und der damit einhergehenden CO₂-Freisetzung eine entscheidende Bedeutung für die Volkswirtschaft [8]. So werden jährlich in Deutschland rd. 42 Mio. t Stahl, 1,2 Mio. t Rohaluminium und rd. 0,7 Mio. t Kupfer hergestellt.

Die Stahlbranche zählt zu den Branchen mit den höchsten CO₂-Emissionen. Sie setzt jährlich über 50 Mio. t CO₂ frei (rd. 1,5 t pro t Stahlfertigerzeugung [9]) und ist damit für rund sechs Prozent des Treibhausgasausstoßes in Deutschland verantwortlich. Im Vergleich dazu werden bei der Aluminiumherstellung rd. 9,8 Mio. t CO₂ (rd. 8,2 t pro t Aluminium [9]) und Kupferherstellung rd. 2 Mio. t CO₂ (rd. 2,8 t pro t Kupfer [10]) freigesetzt.

Um den hohen Anforderungen an die Produktqualität, z. B. Festigkeit, Zähigkeit, Langlebigkeit und Korrosionsbeständigkeit zu genügen, müssen bei der Herstellung der Metalle mehrere Prozessschritte durchlaufen werden. Dabei ist es in den vergangenen Jahren gelungen, mit kontinuierlicher Forschung und Entwicklung die metallischen Werkstoffe energieeffizienter und damit auch CO₂-ärmer herzustellen und die Produktionsverfahren zu optimieren.

Stahlproduktion im Hochofen mit Kohlenstoff

Im Unterschied zu Eisen ist Stahl eine Legierung aus Metallen, in der sich hauptsächlich Eisen befindet. Die Entfernung des Sauerstoffs vom Eisenerz (Reduktion) kann durch Kohlenstoff oder Wasserstoff erfolgen.

Im Hochofenprozess wird Kohlenstoff in Form von Koks genutzt. Dieser entzieht dem Eisenerz den Sauerstoff (Reduktion), wodurch neben dem gewünschten Roheisen CO₂ entsteht und freigesetzt wird. Durch eine Vielzahl anlagen- und prozesstechnischer Verbesserungen konnten der Koksverbrauch und die damit verbundenen CO₂-Emissionen in den vergangenen Jahren immer weiter gesenkt werden. Der spezifische Energiebedarf hat sich in den letzten 30 Jahren ca. 15 % verringert, was ca. 3 GJ/t und 0,3 t CO₂/t Stahl entspricht. Ebenso wurde der Schrottanteil an der Gesamtrohstahlerzeugung auf ca. 45 % erhöht.

Energieeffiziente Stahlproduktion mit grünem Wasserstoff

Die Alternative zur Stahlproduktion im Hochofen ist die Direktreduktion mit Wasserstoff. Dieser wird dem Eisenerz zugegeben und es entsteht neben dem Eisenschwamm nur Wasser als Abfallprodukt. Der Eisenschwamm wird anschließend in einem Elektrolichtbogenofen geschmolzen und in die gewünschte Form gegossen. Die Direktreduktion mit Wasserstoff ist komplex und die hierfür notwendige Anlagentechnik muss noch erforscht werden. Ein Technologiewechsel kann daher nur schrittweise erfolgen, sodass auch die konventionelle Stahlroute weiterhin Gegenstand von Forschung und Entwicklung ist. Im Vergleich zur Hochofenroute lassen sich durch den Einsatz von grünem Wasserstoff im Direktreduktionsprozess bis zu 95 % CO₂-Emissionen einsparen.

Einsatz von Wasserstoff an Thermoprozessanlagen und Digitalisierung bei der Metallerzeugung

Weitere Potenziale für eine energieeffiziente und CO₂-ärmere Metallerzeugung liegen in der Anpassung der Verbrennungs- und Strömungstechnik sowie der Thermodynamik in Thermoprozessanlagen. Forschungsgegenstand ist die Substitution fossiler Brenngase durch Wasserstoff ohne negative Beeinträchtigung der geforderten hohen Produktqualität.

Auch die Digitalisierung spielt bei den Produktionsanlagen eine wesentliche Rolle. So gibt z. B. die Sensorik im Hochofen exakte Informationen über den Energiebedarf und den Materialfluss in der Prozesskette, sodass unmittelbar und optimal auf sich ändernde Bedingungen reagiert werden kann. Ziel ist auch weiterhin, die Energieeffizienzpotenziale der Produktionsanlagen auszubauen und Technologien, Methoden sowie Verfahren auch im Sinne der Energiewende weiterzuentwickeln und im Markt zu implementieren.

Optimierungen im Bereich der Pulverherstellung

Durch die eingeleitete Energiewende liegt der Fokus derzeit auch auf den Schutz- und Prozessgasen für die Produktion. Die meisten komplexen Metallpulver werden, je nach angestrebter Produktqualität, in der Regel unter Wasserstoff, Stickstoff oder Argon produziert. Insbesondere der Argoneinsatz wird in den nächsten Jahren stark steigen. Dies führt derzeit zur Überlegung, das Argon nach dem Gebrauch vor Ort beim Produzenten zu recyceln. Außerdem gibt es derzeit bei den großen Gasproduzenten Überlegungen, die Produktion teilweise auf erneuerbare elektrische Energie umzustellen oder die Produktionsverfahren zu ändern, um z. B. „grünen“ Wasserstoff herzustellen.

Ein wesentlicher Punkt, der derzeit ebenfalls im Rahmen von CO₂-Minderungsmaßnahmen betrachtet wird, ist die Reduzierung der CO₂-Fracht beim Entbinderungsprozess. Hier sind in Zukunft Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforderlich.

Im Bereich der hochschmelzenden Metalle wird derzeit bereits ein sehr hoher Anteil an Recyclingverfahren angewendet. Durch den hohen Metallpreis lohnt sich ein aufwendiges Recycling trotz des häufig erforderlichen hohen Energieeinsatzes. Die unterschiedlichen Recycling-Verfahren setzen neben chemischen und mechanischen Stufen auch häufig mehrere Hochtemperaturverfahren ein, um auftretende Metallkomplexe zu trennen und wieder zu hochreinen Metallen zu überführen.

Im Bereich der Hochleistungskeramiken ist ein Recycling nur bedingt möglich, da chemische und häufig auch thermische Verfahren nicht zur gewünschten Produktqualität führen. Hier setzen die Produktkenngößen wie Schmelzpunkt, Art der Phasen und erforderliche Reinheit Grenzen. Insbesondere in diesem Bereich besteht in Zukunft ein sehr hoher Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Ausblick

In den nächsten Jahren ist es unerlässlich, die produzierenden Branchen bei den zukünftig notwendigen Entwicklungsarbeiten im Bereich der Energie- und CO₂-Einsparung sowie Energieverwendung kontinuierlich zu unterstützen. Eine Forschungsförderung wird insbesondere in folgenden Bereichen erforderlich sein:

- Wasserstoffeinsatz zur Dekarbonisierung von Thermoprozessanlagen wie Wärm- und Wärmebehandlungsanlagen, Hochöfen, Schmelzöfen, Direktreduktionsanlagen, Drehrohröfen sowie Schachtöfen
- Erhöhung der Flexibilisierung sowie Digitalisierung der Produktion
- Additive Fertigung
- Effizienzsteigerung der Prozesse

4. Chemische Industrie

Ausgangssituation

Die Chemische Industrie gehört zu den energieintensiven Industriebranchen Deutschlands. Durch effizientere Verfahren und eine CO₂-ärmere Energieversorgung konnten in der deutschen Chemie die Treibhausgasemissionen aus Energiebedarf und Prozessen im Zeitraum von 1990 bis 2017 bereits um 48 Prozent gesenkt werden. Durch weitere Optimierungen und den Bezug von CO₂-ärmerem Strom erscheint eine zusätzliche Absenkung um 27 Prozent von aktuell 112,8 Millionen (2020) auf 82,1 Millionen möglich [11]. Hier liegt der erwartete Schwerpunkt in der Spezialchemie („Downstream“), die insgesamt gegenüber der Basischemie („Upstream“) für einen kleineren Teil der Treibhausgasemissionen in der Chemischen Industrie verantwortlich ist. In der Basischemie hingegen können die Treibhausgasemissionen nach 2030 nur dann deutlich abgesenkt werden, wenn in neue Prozesstechnologien („radikale Prozessinnovationen“) investiert wird. Hierzu zählen beispielsweise die Entwicklung von elektrisch beheizten Steamcrackern oder die großtechnische Herstellung von Wasserstoff mittels Elektrolyse oder Methanpyrolyse. Erste Anlagen der nächsten Generation könnten allerdings frühestens ab etwa 2035 in Betrieb genommen werden. Daneben müssen aber auch etablierte Verfahren durch neue Prozesse - wie die Produktion von hochgespanntem Dampf aus Abwärme unter Verwendung von Wärmepumpen und Dampfkompressoren – ersetzt werden. Diese Transformation kann unter dem Schlagwort „Elektrifizierung der Chemischen Industrie“ zusammengefasst werden. Durch die skizzierten Umstellungen wird sich der Bedarf an erneuerbarem Strom in der Chemischen Industrie vervielfachen.

Bei abnehmenden Treibhausgasemissionen werden die CO₂-Emissionen aus dem in den Produkten der Chemischen Industrie enthaltenen Kohlenstoff zunehmend relevant. Chemische Produkte bestehen zu ca. 50% aus Kohlenstoff. Eine kohlenstofffreie Chemieindustrie ist folglich unmöglich. Hierin unterscheidet sich die Chemie ganz wesentlich von anderen Industrien. Nur durch den Ersatz der bisher genutzten fossilen durch nachwachsende Rohstoffe oder durch Schließen von Kohlenstoffkreisläufen („Circular Economy“), beispielsweise im Rahmen des chemischen Kunststoffrecyclings, dem Einsatz von Biogas oder der direkten Nutzung von CO₂ als Kohlenstoffquelle, können die Treibhausgasemissionen aus den chemischen Produkten selbst am Ende des Lebenszyklus vermieden werden.

In der Roadmap Chemie 2050 „Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen Chemischen Industrie in Deutschland“ haben DECHEMA und FutureCamp mögliche Szenarien einer zukünftigen Entwicklung skizziert. Wesentliche Voraussetzungen für die erfolgreiche Transformation der Chemischen Industrie sind die Verfügbarkeit von bezahlbarem erneuerbarem Strom, die Förderung „radikaler Prozessinnovationen“ sowie geeignete politische Randbedingungen. Speziell bei der Entwicklung neuer Prozesse und Verfahren spielt die Hochtemperaturtechnik eine entscheidende Rolle.

Verfahren zur Reduktion des "Carbon Footprint" unter Ausnutzung erneuerbarer Energie (Strom)

„Erneuerbarer Wasserstoff“

Wasserstoff kann nicht nur als Einsatzstoff in der chemischen Industrie, sondern auch als Energieträger (Mobilität, Gebäudeheizung) verwendet werden. Die CO₂-freie Produktion von Wasserstoff ist über zwei alternative Prozesse realisierbar: Wasserelektrolyse (in kleinerem Maßstab bereits etabliert) und Methanpyrolyse (in der Entwicklung). Bei der Methanpyrolyse müssen mittels elektrischer Beheizung Temperaturen von über 1000°C erreicht werden. Voraussetzung sind für beide Prozesse ausreichende Mengen an kostengünstigem, erneuerbarem Strom.



Abb. 6: CO₂-Footprint am Beispiel der Ammoniaksynthese für unterschiedliche Herstellungsprozesse [12]

Elektrisch beheizter Steamcracker

Um Naphtha zur Weiternutzung in Olefine und Aromaten zu spalten, müssen in Steamcrackern Temperaturen von ca. 850°C erzeugt werden. Bisher werden die Crackeröfen fossil beheizt (Erdgas). Erfolgt die Beheizung mit Strom aus erneuerbaren Quellen, könnten die CO₂-Gesamtemissionen um ca. 90% Prozent reduziert werden.

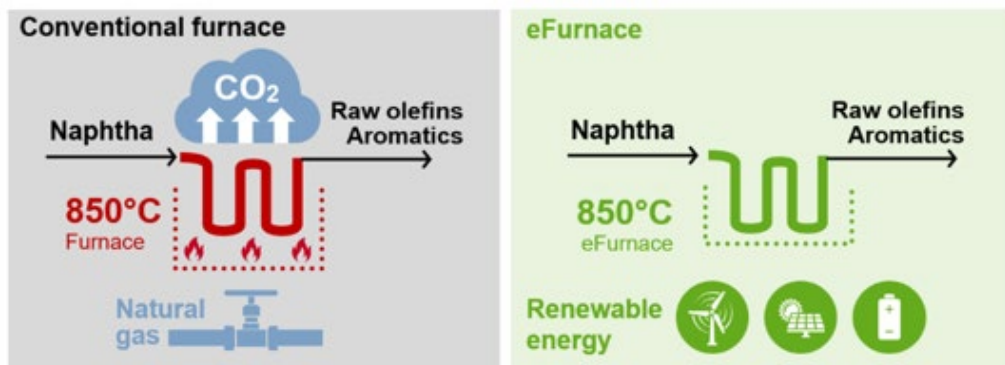


Abb. 7: Vergleich fossil befeuerter und mit Strom aus erneuerbaren Quellen betriebener Spaltöfen eines Steamcrackers [13]



Abb. 9: Mögliche Rohstoffquellen für chemisches Recycling: gemischte Kunststoffabfälle und Altreifen [12]

Nachwachsende Rohstoffe

Denkbar ist auch der Einsatz größerer Mengen an Biomasseabfällen oder von Biogas aus landwirtschaftlicher Produktion oder Lebensmittelverarbeitung. Bei der Herstellung von Spezialchemikalien ist auch der Einsatz nachhaltig produzierter biologischer Zwischenprodukte denkbar, wobei man sich die Syntheseleistung der Natur zunutze macht, um zu vorteilhaften wirtschaftlichen und ökologischen Verfahren zu kommen.

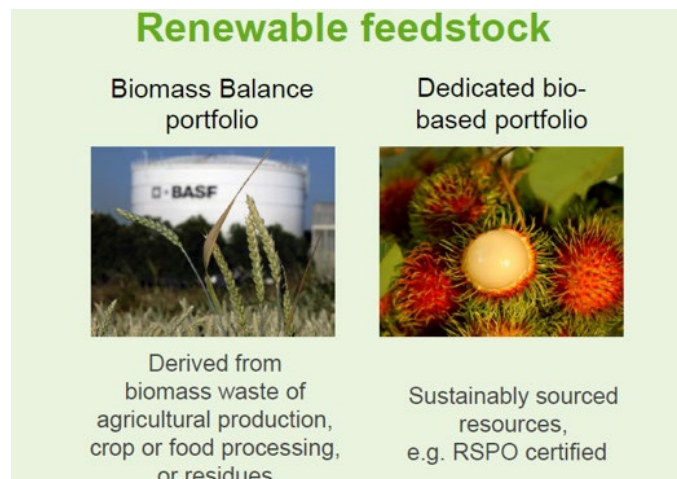


Abb. 10: Nachwachsende Rohstoffquellen: landwirtschaftliche Abfallströme und biobasierte Spezialitäten [12]

Forschungs- und Entwicklungsaufgaben speziell hinsichtlich Breakthrough Technologies

Wie bereits ausgeführt, können die Treibhausgasemissionen der Chemischen Industrie nach 2030 nur dann weiter deutlich abgesenkt werden, wenn es gelingt, neue CO₂-arme oder komplett CO₂-freie Prozessalternativen in der Basischemie bis zur großtechnischen Reife zu entwickeln. Zahlreiche dieser Prozesse nutzen hohe Temperaturen, um die gewünschten Stoffumwandlungen thermodynamisch erst zu ermöglichen. Auch beim Schließen der Kohlenstoffkreisläufe, wie z.B. beim chemischen Recycling von Kunststoffabfällen, kommen Hochtemperaturprozesse zum Einsatz.

Der Hochtemperaturtechnik kommt damit zukünftig eine zentrale Rolle bei der Entwicklung marktreifer radikaler Prozessinnovationen (Breakthrough Technologies) im Bereich Carbon Management und Circular Economy innerhalb der Chemischen Industrie zu.

Eine wesentliche Herausforderung ist die Nutzung regenerativen Stroms anstelle fossiler Brennstoffe zur Erzeugung der erforderlichen hohen Prozesstemperaturen. Hierfür müssen neue Konzepte, eine angepasste Prozessführung sowie verbesserte Werkstoffe entwickelt werden.

5. Abfallwirtschaft

Bedeutung der Hochtemperaturprozesstechnik in der Abfallwirtschaft unter Berücksichtigung der zirkulären Wertschöpfung – Stand und Entwicklungspotenzial

Das Prinzip der Nachhaltigkeit gilt heute als Handlungsprinzip für die Ressourcennutzung, die Stabilität und Regenerationsfähigkeit unseres Ökosystems sowie auch gesellschaftlicher Prozesse. Für viele Materialien haben sich Kreisläufe etabliert, bspw. in der Papier-, Glas- und Metallbranche. Dennoch verbleiben auch hier Reststoffe, die mit dem gegenwärtigen Stand der Technik nicht weiter einer unmittelbaren stofflichen Nutzung zugeführt werden können bzw. bei denen der energetische Aufwand für eine weitergehende Aufbereitung überproportional groß ist.

Im Zusammenhang mit dem Stoffkreislauf muss auch der Energiebedarf gesehen werden. Energie wird sowohl für Herstellungs- als auch Rückgewinnungsprozesse benötigt. Mit Energie lassen sich Stoffe umwandeln und aus Stoffumwandlungsprozessen lässt sich nutzbare Energie gewinnen. Damit bilden Stoff und Energie im Sinne der Kreislaufwirtschaft eine Einheit.

Die thermischen (Hochtemperatur-) Verfahren der Abfallbehandlung erfüllen in diesem Zusammenspiel somit gleich mehrere Aufgaben: je nach Stand der Technik der Rückgewinnungsverfahren sind die Verfahren der Abfallbehandlung

- die Umwandlungsstufe für die Zerstörung von umweltgefährdenden Stoffen sowie zum Ausschleusen von Schadstoffen aus dem Stoffkreislauf und
- können zugleich auch selbst die Wertstoffrückgewinnung und/oder Energienutzung zum Verfahrensziel haben und sind somit das Bindeglied zwischen Stoffkreislauf und Energieumwandlung.

Die thermische Abfallbehandlung muss sich den jeweils anfallenden Stoffströmen und den energiepolitischen Rahmenbedingungen entsprechend anpassen und weiterentwickeln. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen flankieren den Prozess. Das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) ist hierbei maßgebend für die Einstufung der Abfallbehandlung in den abfallwirtschaftlichen Kontext.

Unter thermischer Behandlung von Abfällen werden Verfahren zusammengefasst, die die verfahrenstechnischen Grundbausteine Trocknung, Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung in unterschiedlicher Weise in getrennten oder gemeinsamen Prozessteilschritten vorsehen. Für die Umsetzung dieser Prozesse stehen eine Vielzahl von Apparaten zur Verfügung (Brennkammern, Eta-Genöfen, Rostsysteme, beheizte Drehrohre usw.) – die Tabelle 4 gibt einen Überblick.

Tabelle 4: Systematische Aufteilung für thermische Hauptverfahren [16]

	1. Stufe	2. Stufe	Verfahren
A.	Verbrennung ¹	Verbrennung	Verbrennungs-Nachverbrennungs-Verfahren (z.B. klassische Abfallverbrennung) [17]
B.	Thermolyse ²	Verbrennung	Thermolyse-Nachverbrennungs-Verfahren (z.B. Schwel-Brenn-Verfahren nach Siemens KWU) [18]
C.	Vergasung ³	Verbrennung	Vergasungs-Nachverbrennungs-Verfahren (weiterentwickelte klassische Abfallverbrennung) [19] [20]
D.	Thermolyse	Vergasung	Thermolyse-Nachvergasungs-Verfahren (z.B. Konversionsverfahren nach Noell, Thermoselect-Verfahren usw.) [21]
E.	Vergasung	Vergasung	Vergasungs-Nachvergasungs-Verfahren (z.B. Vergasung mit Gasspaltung nach Lurgi) [22]
¹ hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs-, Vergasungs- und Verbrennungsvorgänge ² hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs- und Pyrolysevorgänge ³ hier: zusammenfassende Bezeichnung für Trocknungs-, Entgasungs- und Vergasungsvorgänge			

Die Verfahrensauswahl ist abhängig von den Eigenschaften der Abfallstoffe und den Zielstellungen.

Für Restabfall aus Siedlungsabfall, Gewerbeabfall und für Ersatzbrennstoffe ist nach wie vor die sogenannte klassische Abfallverbrennung für Restmüll und Ersatzbrennstoffe der Stand der Technik. Bei diesem Verfahren existieren im Sinne der Kreislaufwirtschaft Optimierungspotenziale bei der weiteren Minderung von Schadstoffen insbesondere durch Primärmaßnahmen, der Rückgewinnung von Wertstoffen insbesondere aus der Asche sowie der Verbesserung der Energieeffizienz. Für die Verfügbarkeit der Anlagentechnik ergeben sich besondere Herausforderungen hinsichtlich der Minderung von Belagsbildung und Korrosionen im Dampferzeuger.

Ein weiteres Entwicklungspotenzial existiert im Hinblick auf die systemische Einbindung von Abfallverbrennungsanlagen in die Energie- und Stoffwirtschaft. Eine Abfallverbrennungsanlage kann z. B. Regelungsaufgaben in dezentralen Netzen übernehmen, indem sie als stabilisierende, träge Masse in regionalen Energieverbänden fungiert (vgl. Abb. 11). Dieser Ansatz geht davon aus, dass zukünftig zur Reduktion des gesamten Netzausbaus lokale Netzverbände gestärkt werden und sich zunächst selbst stabil ausregeln. Übergeordnet findet weiterhin der energetische Ausgleich statt. Eine unmittelbar lastflexible Fahrweise ist aufgrund der bislang üblichen Auslegung auf die Entsorgungsaufgabe aber so gut wie unmöglich.

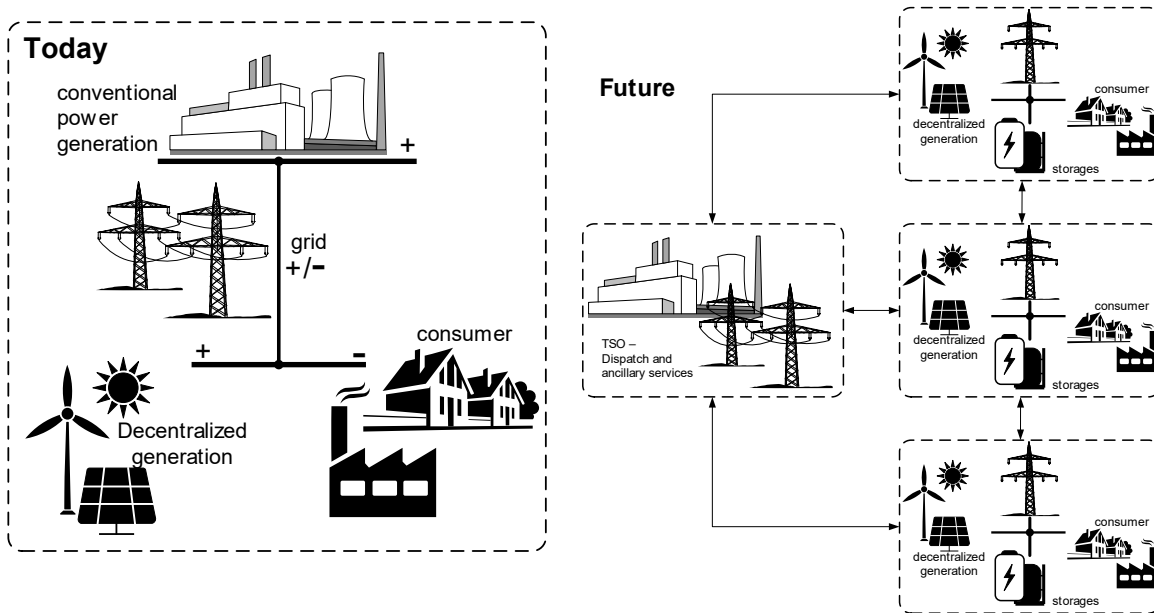


Abb. 11: Abfallverbrennungsanlage als Regelungselement in dezentralen Netzen [23]

Für eine Flexibilisierung von Energiebereitstellung und -bedarf können Abfallverbrennungsanlagen als KWK-Anlagen jedoch erweitert werden.

Die Flexibilisierung durch Erweiterungsmaßnahmen ist in Abb. 12 dargestellt. Unter der Prämisse, dass die Entsorgungsaufgabe bestehen bleibt und die Dimensionierung zukünftiger Anlagen auch keinen intermittierenden Betrieb vorsieht (bspw. durch größere Bunker als Speichersysteme, mehrere Turbinen), lassen sich zur Netzstabilisierung

- Batteriespeichersysteme,
- Biogasanlagen (Flexibilität durch Wärmebedarf und Gasmotoren) oder
- Power-to-X-Konzepte

realisieren.

Damit kann Ausgleichsleistung für fluktuierende Wind- und Solarenergie bereitgestellt werden. Dies kann außerdem „anlagenschonend“ erfolgen, wenn die Prognosegenauigkeit des Energiebedarfs und der Erzeugung aus Sonne und Wind zumindest für einige Tage im Voraus verbessert und zugänglich wird.

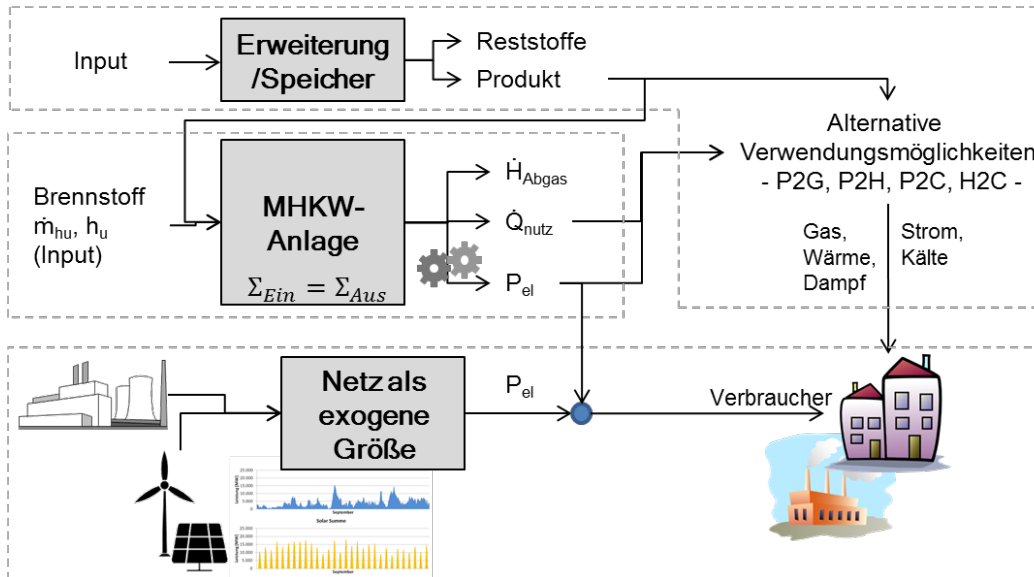


Abb. 12: Erweiterungsmöglichkeiten für Abfallverbrennungsanlagen zur Flexibilisierung und Geschäftsfelderweiterung [1]

Die Anlagenerweiterung bringt neben der Einsetzbarkeit für Regelungsaufgaben auch eine Erweiterung des herkömmlichen Geschäftsfelds mit sich. Je nach Ergänzung wird der Wärmeabsatz verstärkt (Power-to-Heat, besonders mit Wärmepumpen in kommunalen Verbänden), alternative Energiedienstleistung wie Nah- oder Fernkälte (Power-to-Cold) oder gar Rohstoffe (gereinigtes CO₂ für externe Synthesen aus Ab- oder Biogas, Wasserstoff aus Elektrolyse, Biomethan für Mobilität (s.a. Biomethanisierung von H₂) u.a.) bereitgestellt.

Darüber hinaus besteht ein großes Potential in der Nutzbarmachung von biogenen Rest- und Abfallstoffen, die bislang aufgrund von chemischen und physikalischen Eigenschaften nicht oder nur unzureichend genutzt werden. Beispielhaft seien wässrige Biomassen, invasive Pflanzen, Ernterückstände und Rückstände der Tierhaltung erwähnt. Durch Kombination von biologisch/chemischen Prozessen mit thermochemischen Verwertungsbausteinen wie der hydrothermalen Karbonisierung, Pyrolyse, Vergasung und Verbrennung ist es möglich, mit biogenen Reststoffen einen nennenswerten Beitrag einerseits zur regenerativen Energiebereitstellung zu leisten und andererseits biobasierte Grundstoffe, wie z.B. hochwertige Karbonisate für die Kunststoff-, Reifen- oder Farbindustrie, zu erzeugen.

Insbesondere die Rohstoffversorgung kann zukünftig synergetisch mit einer verstärkten Wertstoffrückgewinnung aus Aschen, Schlacken, industriellen oder gewerblichen Reststoffen wirken. Bislang liegt ein Schwerpunkt auf vergleichsweise leicht abtrenn- und wiederverwertbaren Eisenmetallen.

Pyrolyse und Vergasungsverfahren gewinnen zunehmend an Bedeutung im Zusammenhang mit der gezielten Wertstoffrückgewinnung insbesondere von vorsortierten Fraktionen wie z. B. von Aluminium-Verbund-Verpackungsabfällen im Sinne des thermischen Einschichtens durch Pyrolyse mit dem Ziel der Rückgewinnung von Aluminium oder der Pyrolyse von Mono-Kunststofffraktionen wie z. B. von PMMA - Polymethylmethacrylat (Plexiglas®) zur Rückgewinnung des Monomeres. Immer komplexer werdende Bauteile aus Verbundstoffen (z.B. Flügel von Windrädern aus

GFK, Wärmedämmverbundsysteme) müssen in Zukunft im Sinne der Kreislaufwirtschaft aufbereitet und in den Stoffkreislauf rückgeführt werden. Pyrolyseverfahren haben in diesem Kontext großes Potential.

Es ist zu erwarten, dass über die wenigen bereits etablierten Verfahren hinaus die Pyrolyse und Vergasung als Grundbausteine für die Behandlung von Kunststoffabfällen für die Synthesechemie in Zukunft weiter an Bedeutung gewinnen werden. Thermodynamisch ist der Weg über die Pyrolyse und Vergasung von organischen Stoffen zur Gewinnung von Synthesegasen günstiger als z. B. über das aus Verbrennungsprozessen abgeschiedene CO₂ mit *grünem* Wasserstoff – allerdings existieren derzeit noch erhebliche betriebliche Probleme z. B. im Zusammenhang mit der Anlagenverfügbarkeit und der Behandlung von anfallenden Reststoffströmen. In dieser Hinsicht besteht noch ein erhebliches Forschungs- und Entwicklungspotenzial.

6. Literaturverzeichnis

- [1] K. Fischer, C. Pieper, S. Unz, M. Beckmann und M. Bertau, „Energie- und Rohstoffverbund,“ in *Kraftwerkstechnik*, SAXONIA Standortentwicklungs- und Verwaltungsgesellschaft mbH, 2019, pp. S.11-18.
- [2] „European Energy Agency (EEA), EU Emissions Trading System (ETS) data viewer, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/emissions-trading-viewer-1>“.
- [3] A. Tretau, *Circular Economy am Beispiel der Ziegelindustrie*, MFPA Weimar: (unveröffentlicht), 2021.
- [4] L. Rudwoski, „Grey2Green,“ in *2nd Global Future Cement Conference (FutureCem)*, Brüssel, Belgien, 22.-23. Mai 2019.
- [5] H. Schäfer, „Entwicklung und Struktur des Energiebedarfs für wärmetechnische Prozesse,“ *gaswärme int*, Bd. 33, Nr. 6/7, pp. 245-247, 1984.
- [6] H. Pfeifer, „Wärmebehandlungsanlagen und -öfen,“ in *In: Zoch, H.-W., Spur, G.: Handbuch Wärmebehandeln und Beschichten*, München, Carl Hanser Verlag, 2015, p. 307/334.
- [7] H. Pfeifer, B. Nacke und F. Beneke, *Praxishandbuch Thermoprozesstechnik Band 1 Grundlagen, Prozesse, Verfahren; Band 2 Anlagen, Komponenten, Sicherheit*, Essen: Vulkan-Verlag, 2018, p. 760 / 1000.
- [8] G. Cusano, M. Gonzalo, F. Farrell, R. Remus, S. Roudier und L. Sancho, „Best Available Techniques (BAT),“ Reference Document for the Non-Ferrous Metals Industries, Industrial Emissions Directive 2010/75/EU, 2017.
- [9] *Wirtschaftsvereinigung Stahl*.
- [10] P. Nuss und M. Eckelman, „Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis,“ *PLOS ONE*, Bd. 9, Nr. 7, 2014.
- [11] „Roadmap Chemie 2050 - Auf dem Weg zu einer treibhausgasneutralen chemischen Industrie in Deutschland - Eine Studie von DECHEMA und Future Camp für den VCI,“ 2019.
- [12] J. Kellenbenz, *Chemieindustrie unter dem Einfluss der Energiewende und ihr Beitrag zur Kreislaufwirtschaft @ BASF, Vortrag beim Jahrestreffen der ProcessNet-Fachgruppe Hochtemperaturtechnik*, 2021.
- [13] „Neue Technologien <https://www.basf.com/global/de/who-we-are/sustainability/we-produce-safely-and-efficiently/energy-and-climate-protection/carbon-management/innovations-for-a-climate-friendly-chemical-production.html>“.
- [14] „VCI-Positionspapier "Kreisläufe für Kohlenstoff",“ 2018.
- [15] „Forschungspolitische Empfehlungen zum chemischen Kunststoffrecycling – neue Verfahren und Konzepte <https://www.vci.de/themen/zirkulaere-wirtschaft/neue-verfahren-und-konzepte-chemisches-kunststoffrecycling.jsp>,“ 2021.

- [16] R. Scholz, M. Beckmann und F. Schulenburg, Abfallbehandlung in thermischen Verfahren, Stuttgart, Leipzig, Wiesbaden: B.G.Teubner, 2001.
- [17] G. Lautenschlager, „Moderne Rostfeuerung für die thermische Abfallbehandlung,“ in *GVC-Symposium Abfallwirtschaft Herausforderung und Chance*, Würzburg, 17.-19. Oktober 1994.
- [18] H.-J. Berwein und A. Kanczarek, Das Schwel-Brenn-Verfahren für Restmüll und Klärschlamm: Entsorgungs-Praxis Nr.5, 1991.
- [19] R. Scholz, M. Beckmann, F. Schulenburg und W. Brinker, „Thermische Rückstandsbehandlungsverfahren - Aufteilung in Bausteine und Möglichkeiten der Bilanzierung,“ *Brennstoff-Wärme-Kraft (BWK)*, Bd. 46, 1994.
- [20] R. Scholz, M. Beckmann und F. Schulenburg, „Experimental research on gasification of coarse waste on a stocker system and separate after burning as well as optimization with the aid of a process model,“ in *The 1994 Incineration Conference*, Houston, Texas, 9.-13. Mai 1994.
- [21] J. Carl und P. Fritz, NOELL-Konversionsverfahren zur Verwertung und Entsorgung von Abfällen, Berlin: EF-Verlag für Energie- und Umwelttechnik, 1994.
- [22] J. Albrecht, J. Loeffler und R. Reimert, „Restabfallvergasung mit integrierter Ascheverschlackung,“ in *GVC-Symposium Abfallwirtschaft: Herausforderung und Chance*, Würzburg, 17.-19. Oktober 1994.
- [23] C. Pieper, T. Heß und J. Henoch, „Renewable, Cellular Energy Clusters Providing Ancillary Services,“ in *Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems*, Hamburg, 20.-21. September 2018.

7. Liste der Autoren

	Firma / Universität	Mitarbeit in Kapitel
Beckmann, Michael	TU Dresden	1 / 5
Hoening, Volker	VDZ Technology gGmbH	2
Kellenbenz, Jochen	BASF SE	4
Kolb, Thomas	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	0 / 1 / Koordination
Lampe, Karl	thyssenkrupp Industrial Solutions AG, Beckum	2
Malek, Christian	TH Köln	5
Pfeifer, Herbert	RWTH Aachen	3
Rumpel, Stefan	Evonik Resource Efficiency GmbH	4
Schlichting, Holger	Air Liquide Forschung u. Entwicklung GmbH, Frankfurt	1
Schulenburg, Frank	Höganäs Germany GmbH	3
Stapf, Dieter	Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	1
Stranzinger, Bernhart	VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH, Düsseldorf	3
Tretau, Anne	Materialforschungs- und -prüfanstalt (MFPA), Weimar	2

Herausgeber: ProcessNet-Fachgruppe Hochtemperaturtechnik

DECHEMA e.V.

Theodor-Heuss-Allee 25

60486 Frankfurt am Main

Erschienen im Februar 2022