Fraunhofer
UMSICHT

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR UMWELT-, SICHERHEITS- UND ENERGIETECHNIK UMSICHT

UMSICHT-Diskurs Heft 1

KOHLENDIOXID, BIOMASSE UND REGENERATIVER STROM – RESSOURCEN EINER NEUEN KOHLENSTOFFWIRTSCHAFT?

T. Marzi*, G. Deerberg, C. Doetsch, A. Grevé, M. Hiebel, S. Kaluza, V. Knappertsbusch, D. Maga, T. Müller, H. Pflaum, A. Pohlig, M. Renner, U. Seifert, S. Stießel, C. Unger, T. Wack, E. Weidner

*Korrespondenzautor



Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik
UMSICHT
Osterfelder Str. 3
46047 Oberhausen

Telefon 0208 8598-1230
E-Mail thomas.marzi@umsicht.fraunhofer.de
URL www.umsicht.fraunhofer.de

ISBN 978-3-87468-358-6

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Warenzeichen und Handelsnamen in dieser Publikation sind geschützt.

Für Zitate und Bezugnahmen direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien übernimmt der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität.

Einzelfotos ©pixabay.com; Gestaltung Torsten Müller, Fraunhofer UMSICHT

© Verlag Karl Maria Laufen
Oberhausen 2017

Dieses Themenheft ist Prof. Dr. rer. nat. Rolf Kümmel gewidmet.
Rolf Kümmel hat maßgeblich den Werdegang unseres Institutes gestaltet und leitete es von 2002 bis 2004.
Als Privatdozent im Interdisziplinären Fernstudium Umweltwissenschaften ist er dem Institut weiterhin verbunden.

Kurzfassung

Um das von der Pariser Klimaschutzkonferenz vereinbarte »Zwei-Grad-Ziel« zu erreichen, mit dem drastische, unumkehrbare Umweltveränderungen durch den Klimawandel vermieden werden sollen, dürfen netto in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts wahrscheinlich keine Treibhausgase mehr emittiert werden. Hiervon sind neben dem Energiesystem auch wichtige Industrien wie die Stahl-, Zement- und chemische Industrie betroffen, deren Produktionsstrukturen wesentlich auf der Verarbeitung von fossilen Kohlenstoffverbindungen aufbauen. Soll wirklich »Nullemission« erreicht werden, ist auch in diesen Industrien ein Systemwechsel erforderlich, der eine fundamental andere Bewirtschaftung kohlenstoffhaltiger Rohstoffe beinhaltet.

Will man Erdgas, Erdöl und Kohle ersetzen, kommen als alternative Kohlenstoffträger nur Biomasse und CO_2 in Frage. Doch wie ist es um die Verfügbarkeit dieser Ressourcen bestellt? Reichen die zur Verfügung stehenden Mengen aus, die o. g. Industriebereiche zu versorgen, und wie hoch ist der Energiebedarf zur Erschließung dieser »neuen« Rohstoffe? Im vorliegenden Themenheft werden ausgewählte Aspekte einer Transformation zu einer neuen Kohlenstoffwirtschaft diskutiert. Eine besondere Rolle spielt dabei die Vision eines zukünftigen Produktionssystems, das Kohlenstoff kaskadenförmig nutzt und die Kopplung verschiedener Branchen vorsieht. Als systemverknüpfende bzw. sektorkoppelnde Technologien kommen dabei Carbon-Capture-and-Utilisation- oder Power2X-Verfahren in Frage, die CO_2 in energiereiche chemische Verbindungen umwandeln. Sie ermöglichen es, Kohlenstoff mehrfach zu nutzen, Produktionskreisläufe zu schließen und die insgesamt benötigte Biomassemenge zu verringern.

Zur Umwandlung von CO_2 muss regenerative Energie in erheblicher Größenordnung bereitgestellt werden. Unklar ist, ob dies im erforderlichen Umfang gelingen kann. Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass die zur Erreichung des Zwei-Grad-Ziels erforderlichen Systemveränderungen in sehr kurzer Zeit eingeleitet werden müssen, ohne dass bekannt ist, welchem Rohstoff zukünftig welche Rolle zukommt, und welche Technologien zum Einsatz kommen werden. Hier bietet es sich an, Technologien und Produktionssysteme zu entwickeln, die auf unterschiedliche Kohlenstoffträger anwendbar sind. Der Systemwechsel zu einer neuen nachhaltigeren Kohlenstoffwirtschaft ist dabei als eine die ganze Gesellschaft betreffende Aufgabe anzusehen.

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung 9

2 Transformation der Kohlenstoffwirtschaft 11

2.1 Befinden wir uns in einem fundamentalen Systemwandel? 11

2.2 Rohstoffe und Energie sind die materielle Basis einer Gesellschaft 15

2.3 Potenzielle Kolehnstofftransformationspfade in einem Wirtschaftssystem ohne Erdgas, Erdöl und Kohle – orientierende Betrachtungen 18

- Kohlenstoffkreislauf und Klima 18

- Der »industrielle Metabolismus« 20

- Wie kann ein Produktionssystem ohne fossile Rohstoffe aussehen? 22

2.4 Pariser Abkommen, Klimaschutzplan und Energiewende 28

3 CO_2 als Rohstoff für chemische Produkte und Treibstoffe 33

3.1 Die Energiewende – Ausgangspunkt für Technologien, die CO_2 in chemische Produkte und Energieträger umwandeln? 33

3.2 Chemische Produkte aus CO_2 herstellen? – Eine Pfadanalyse 37

- Reaktivität von CO_2 37

- Welche Produkte können aus CO_2 hergestellt werden? 39

3.3 Wie viel Strom wird zur CO_2-Aktivierung benötigt? – Eine orientierende Betrachtung der Situation in Deutschland 48

- Exkurs I: Hüttenwerke als Kohlenstoffquelle 51

- Exkurs II: Chemische Produkte in einem Prozessschritt direkt aus Wasser und CO_2 herstellen? – Gibt es eine Renaissance der Elektrochemie? 55

4 Resümee 59

5 Dank 65

6 Anhang 67

6.1 Literaturverzeichnis 68

6.2 Abkürzungsverzeichnis 76

6.3 Tabellenverzeichnis 77

6.4 Abbildungsverzeichnis 78

Das Wesen der Geschichte ist die Wandlung.[1]

Jacob Burckhardt (1818–1897), Historiker

Die Geschichte – diesen chaotischen, kontingenten Strom singulärer gesellschaftlicher Ereignisse, durch den wir geworden sind, was wir sind – die Geschichte also in Epochen einzuteilen, ist aus pragmatischer Sicht, zumindest zur ersten groben Orientierung, ganz hilfreich.[2]

Reinhard Haneld (1952–2016), Philosoph

Innerhalb einer Epoche gibt es keinen Standpunkt, eine Epoche zu betrachten.[3]

Johann Wolfgang von Goethe (1749–1832), Dichter

---

1 [Burckhardt2009, s. Kapitel 4]

2 [Haneld2016]

3 [Goethe1907]

1 Einführung

Spätestens seit den 1970er Jahren, als der Club of Rome [ClubofRome2017] mit seinen »Grenzen des Wachstums« auf die endliche Verfügbarkeit fossiler (Energie-)Rohstoffe öffentlichkeitswirksam hinwies, ist die Erschließung von alternativen Rohstoffen Gegenstand der wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Diskussion. Das besondere Interesse richtet sich dabei auf Erdgas, Erdöl und Kohle, die als kohlenstoffhaltige Stoffe sowohl für die Energiewirtschaft als auch für die Produktion von Gütern von systemrelevanter Bedeutung sind. Auch wenn die genannten Stoffe, insbesondere Kohle, vermutlich länger zur Verfügung stehen werden, als es zunächst den Anschein hatte, ist die Rohstofffrage heute aktueller denn je. Grund hierfür ist der anthropogen verursachte Klimawandel, für den im Wesentlichen kohlenstoffhaltige Verbindungen wie Methan und CO_2 verantwortlich sind.

Nach den Prognosen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [IPCC2017], das als von der UN beauftragter Ausschuss den aktuellen Stand der Klimaforschung zusammenfasst, ist mit drastischen, unumkehrbaren Umweltveränderungen zur rechnen, wenn es nicht gelingt, die Erderwärmung auf deutlich unter zwei Grad Celsius im Vergleich zur vorindustriellen Zeit zu begrenzen. Dieses sogenannte »Zwei-Grad-Ziel« hat sich die Weltgemeinschaft auf der Pariser Klimaschutzkonferenz zu eigen gemacht. Um es zu erreichen, dürfen netto in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts wahrscheinlich keine Treibhausgase mehr emittiert werden, was nur möglich ist, wenn kohlenstoffhaltige Rohstoffe fundamental anders bewirtschaftet werden als bisher. Hiervon ist nicht nur die Energiewirtschaft betroffen; auch wichtige Industriebereiche benötigen Kohlenstoff um Güter und Produkte herzustellen, auf die nicht ohne Weiteres verzichtet werden kann. Als Grundstoffindustrien sind hier vor allem zu nennen: die Stahlindustrie, in der Kohlenstoff als Reduktionsmittel eingesetzt wird, die chemische Industrie, deren Produkte zu einem großen Teil Kohlenstoff enthalten und die Kalk- bzw. Zementindustrie, die Kalkstein verarbeitet, der Kohlenstoff in einer anorganischen Bindungsform enthält. Die produzierten Grundstoffe sind dabei wichtige Ausgangsmaterialien für andere Industriezweige, beispielsweise die Kunststoffindustrie oder den Automotivbereich.

Die Einhaltung des Zwei-Grad-Ziels erfordert die Transformation eines auf fossilen Kohlenstoffressourcen aufgebauten Wirtschafts- und Gesellschaftssystems zu einem neuen System, das Kohlenstoffquellen nachhaltig nutzt und industrielle Strukturen so konzipiert, dass netto keine Treibhausgase mehr emittiert werden. Dabei kommt es darauf an, die Transformation so zu gestalten, dass Menschen ausreichend mit Nahrung, Ener-

gie und Gütern versorgt werden. Die Transformation darf sich nicht nur auf technologische Innovationen gründen, sondern muss soziale Innovationen integrieren sowie die Beziehungen zwischen Mensch, Technik und Natur neu gestalten. Der Übergang zu einer neuen Energie- und Rohstoffbasis kann mit anderen Entwicklungen, wie der rasanten Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnologie, interagieren und weitreichende Änderungen unserer Lebensweise mit sich bringen.

Im vorliegenden Themenheft werden ausgewählte Aspekte, die bei einer Transformation zu einer neuen Kohlenstoffwirtschaft von Bedeutung sind, diskutiert. Die Autoren greifen dabei, begründet durch die jeweiligen Arbeitsschwerpunkte, hauptsächlich technologische, wirtschaftliche und naturwissenschaftliche Fragestellungen auf, wohlwissend, dass andere Disziplinen, wie die Kulturwissenschaften, die hier als Oberbegriff für die Geistes- und Sozialwissenschaften verstanden werden [Anzenbacher2002, S. 36], ebenfalls von großer Bedeutung sind. Dabei werden für den wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Diskurs Informationen zusammengestellt und Anregungen zur Gestaltung von Transformationspfaden geliefert.

Ausgehend vom Gedanken einer Transformation der Kohlenstoffwirtschaft vergleicht die Abhandlung die derzeitige Ausgangslage mit historischen Transformationen. Anschließend wird die Vision eines Produktionssystems diskutiert, das ohne fossile Rohstoffe auskommt. Eine besondere Rolle spielt dabei die Kopplung verschiedener Branchen, die in einem solchen System über die Nutzung des Elements Kohlenstoff verknüpft sind. Es werden Abschätzungen vorgenommen, welcher Kohlenstoffbedarf global in einzelnen Branchen besteht und wie er gedeckt wird. Wichtige branchenverknüpfende Technologien können dabei Carbon-Capture-and-Utilisation-(CCU)- oder Power2X-Verfahren sein, die CO_2 unter Zuhilfenahme regenerativer Energie zu Produkten umsetzen und so eine kaskadenförmige Kohlenstoffnutzung oder eine Kreislaufführung von Kohlenstoff ermöglichen.

Die Randbedingungen für die Vision einer neuen Kohlenstoffwirtschaft resultieren aus dem Pariser Klimaabkommen, dem Klimaschutzplan der Bundesregierung und der deutschen Energiewende. Hier wird auf den fluktuierenden Charakter zukünftiger Stromsysteme, mutmaßliche Überschusskapazitäten und Power2X-Konzepte eingegangen. Anschließend werden naturwissenschaftliche Hintergründe betrachtet, die bei der Nutzung von CO_2 als Rohstoff von Bedeutung sind, eine orientierende Pfadanalyse für ausgewählte Produkte vorgestellt und Ressourcen abgeschätzt, die für den Bilanzraum Deutschland benötigt werden. Die Autoren greifen hierbei auf Beispiele aus ihren eigenen Arbeiten zurück.

2 Transformation der Kohlenstoffwirtschaft

2.1 Befinden wir uns in einem fundamentalen Systemwandel?

Sucht man in der Menschheitsgeschichte nach Übergängen, die einen grundlegenden Wandel der Lebensweise mit sich brachten, sind mit der »Neolithischen Revolution« und der »Industriellen Revolution« vor allem zwei Übergänge zu nennen, denen eine dauerhafte Umgestaltung der wirtschaftlichen und sozialen Verhältnisse zugeschrieben wird. Während die Bezeichnung Neolithische Revolution einen vor mehr als 10.000 Jahren einsetzenden und Jahrtausende andauernden Übergang von einer Jäger- und Sammlerkultur zu einer sesshaften Lebensweise, in der Ackerbau und Viehzucht die Lebensgrundlage bilden, umfasst, wird unter der Industriellen Revolution der in einigen Teilen der Welt Mitte des 18. Jahrhunderts beginnende Übergang von der Agrar- zur Industriegesellschaft verstanden. Formen und Verläufe solcher Übergänge werden auch als »Transformationen« bezeichnet; ein Begriff, den auch der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU)[4] in seinen Gutachten anwendet[5]. Neolithische und Industrielle Revolution werden vom WBGU, als die »beiden fundamentalen Transformationen der Weltgeschichte« bezeichnet[6], deren charakteristisches Merkmal es war, dass sie jeweils zu einer erheblichen Veränderung der Bevölkerungszahl und zu einem fundamental anderen – deutlich intensiveren – Umgang mit Energie, Ressourcen und Nahrung führten (Abbildung 1) [WBGU2011, S. 87ff.].

---

[4] Der WBGU wurde 1992 im Vorfeld der Konferenz der Vereinten Nationen über Umwelt und Entwicklung (»Erdgipfel von Rio«) von der Bundesregierung als unabhängiges wissenschaftliches Beratergremium eingerichtet. Zu seinen Hauptaufgaben gehört es, globale Umwelt- und Entwicklungsprobleme zu analysieren sowie Handlungs- und Forschungsempfehlungen zu erarbeiten.

[5] Der Begriff Transformation wird in verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen unterschiedlich verwendet. In seinem Glossar beschreibt der WBGU [WBGU2011, S. 420] eine Transformation als Form und Verlauf eines Übergangs oder einer Veränderung.

[6] Unter dem Konzept einer »großen Transformation« bezieht sich der WBGU auf Arbeiten des Ökonomen Karl Polanyi, der eine umfassende Analyse der Industriellen Revolution vorgenommen hat. Eine große Transformation fasst der WBGU demnach »als umfassenden Wandel auf, der einen Umbau der nationalen Ökonomien und der Weltwirtschaft innerhalb dieser Leitplanken vorsieht, um irreversible Schädigungen des Erdsystems sowie von Ökosystemen und deren Auswirkungen auf die Menschheit zu vermeiden« [WBGU2011, S. 417].

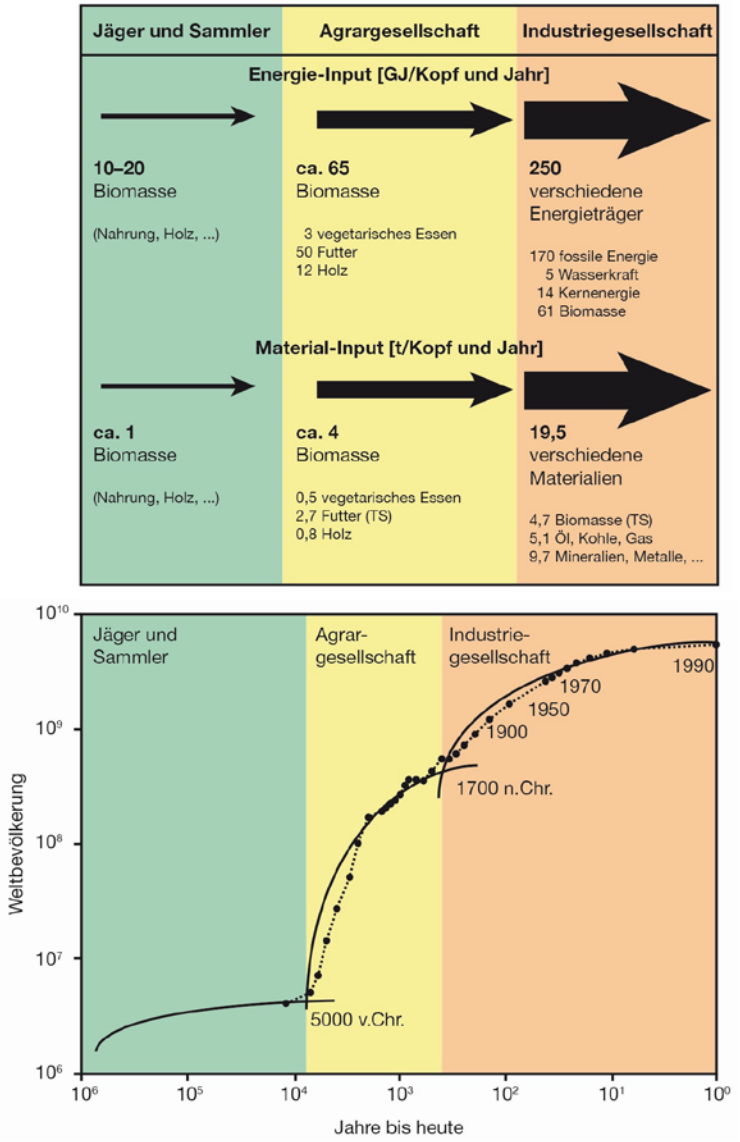


Abbildung 1: Entwicklung der Weltbevölkerung bei den Übergängen »Neolithische Revolution« und »Industrielle Revolution« im Vergleich zur Zunahme des Energieeinsatzes in Gigajoule (GJ) pro Kopf und Jahr (Quelle: WBGU [WBGU2011, S. 92] mit Verweis auf die Primärquellen [Kates1996] und [Fischer1997]).

Das Wirken von Entwicklungsabläufen und Ereignissen in Transformationen ist äußerst komplex. Transformationen beschreibt der WBGU als nicht lineare Prozesse. Ihrem Wesen nach sind sie eine »Folge von ineinandergreifenden Dynamiken, die sich auf unterschiedlichen Zeitskalen abspielen, aber sich zu einer Richtung des Wandels verdichten« [WBGU2011, S. 90]. Es ist innerhalb eines Übergangs grundsätzlich nicht möglich, eine Transformation sicher als eine solche zu erkennen. Rückblickend auf die Industrielle Revolution ist jedoch festzustellen, dass diese Transformation die Energiebasis, die Bedeutung von Zeit in Wirtschaft und Gesellschaft, die Produktions-, Konsum-, Kommunikations-, Wissens- und Logistikinfrastrukturen sowie Macht- und gesellschaftliche Verhält-

nisse grundlegend verändert hat [WBGU2011, S. 92]. Vergleicht man diese Phänomene mit Entwicklungen in unseren heutigen Gesellschaften sowie mit Veränderungen in bewirtschafteten Energie- und Rohstoffsystemen, weist viel darauf hin, dass sich erneut ein fundamentaler Systemwandel ankündigt, der möglicherweise bereits begonnen hat.

Zu beobachten sind heute bereits mehrere, in komplexer Art und Weise wechselwirkende Entwicklungen, die sich im hohen Maße verändernd auf die Bereiche auswirken, die oben in Zusammenhang mit der Industriellen Revolution genannt wurden. Die Wahrnehmung dieser Veränderungen ist sehr unterschiedlich. Während ökologische Veränderungen wie Klimawandel oder das Aussterben von Arten oft noch nicht angemessen genug wahrgenommen werden, sind Veränderungen in unserer Lebenswelt, die in sozialen und wirtschaftlichen Phänomenen sichtbar werden, zunächst viel unmittelbarer. So ist es zu erklären, dass die Folgen von Migrationsbewegungen[7] in der Öffentlichkeit eine größere Aufmerksamkeit erreichen als Folgen und Begrenzung des Klimawandels. Für jeden Benutzer eines Smartphones ist sichtbar und erlebbar, welche Veränderungsprozesse durch Informations- und Kommunikationstechnologien (IuK) angestoßen werden und was unter dem Begriff »Digitalisierung« zu verstehen ist. Wie die Verwendung des Begriffs »Industrie 4.0« für die Implementierung digitaler, vernetzter Systeme im Industriebereich deutlich macht, weisen viele Befürworter bereits alleine dem Phänomen der Digitalisierung das Potenzial einer weiteren industriellen Revolution zu. Mit der Digitalisierung verbundene Konzepte werden als neue Wachstumsstrategien angesehen, die helfen sollen, wirtschaftliches Wachstum mit einem geringeren Ressourcenverbrauch zu verknüpfen. Dabei geht man davon aus, dass digitale Technologien helfen, die Material- und Energieeffizienz in Produktionsprozessen zu verbessern und dass neue Wirtschaftsmodelle entstehen, die weniger Ressourcen verbrauchen als konventionelle. Zu einem geringeren Ressourcenverbrauch kommt es jedoch nur, wenn es gelingt, »Rebound-Effekte« einzudämmen, die die eingesparten Ressourcen durch einen steigenden Konsum wieder zunichtemachen können [Lange2016].

Das Ziel einer durch Nachhaltigkeit geprägten Transformation hat sich inzwischen zu einem wesentlichen Aspekt internationaler politischer Aktivitäten entwickelt. Es begründet sich vor allem mit den Notwendigkeiten, die sich aus dem anthropogen verursachten Klimawandel ergeben und den Konsequenzen, mit denen zu rechnen ist, wenn die Transformation ausbleibt. So hält der WBGU einen »nachhaltigen weltweiten Umbau von Wirtschaft und Gesellschaft« und die klimafreundliche Wandlung eines bisher auf Nutzung fossiler Kohlenstoffressourcen aufgebauten Weltwirtschaftsmodells für erforderlich [WBGU2011, S. 9ff.]. Die Dringlichkeit einer Transformation hat sich dabei, wie der

[7] Diese sind teilweise selbst nicht unabhängig von ökologischen Faktoren.

Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU)[8] in seinem Hauptgutachten aus dem Jahr 2012 feststellt, seit der Rio-Konferenz von 1990, die den Klimawandel zum ersten Mal in einem globalen politischen Rahmen thematisierte, weiter verschärft. Laut SRU ist es – trotz partieller Erfolge bisher – nicht gelungen, Entwicklungspfade in Deutschland, Europa und der Welt systematisch so auszurichten, dass ökologische Grenzen eingehalten werden [SRU2012, S. 365ff.]. So verabschiedeten im Jahr 2015, wenige Monate vor der Pariser Klimakonferenz, die 193 Mitgliedsstaaten der Vereinten Nationen auf ihrem Gipfeltreffen in New York die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung. Bereits mit ihrem Titel »Transformation unserer Welt« signalisieren die Regierungen den Anspruch, dass die Agenda grundlegende Veränderungen in Politik und Gesellschaft anstoßen soll[9] [Martens2016], [UN2015]. Die Agenda bildet, mit den 17 »Sustainable Development Goals (SDGs)«, die für alle Unterzeichnerstaaten gelten, den globalen Rahmen für die Umwelt- und Entwicklungspolitik der kommenden 15 Jahre. Auch die Bundesregierung hat in der Neuauflage der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie 2016 die SDGs übernommen und damit den Transformationsanspruch der deutschen Gesellschaft bekräftigt [Bund2017].

Heute gibt es eine breite und interdisziplinäre wissenschaftliche Diskussion um die Erfolgsbedingungen tiefgreifender, ökologisch motivierter Transformationen in Industriegesellschaften. Transformationen werden als notwendig erachtet, um Ressourcennutzung, Emissionen und Abfälle zu reduzieren. Sie umfassen technischen, gesellschaftlichen und institutionellen Wandel und zielen auf grundlegende systemische Innovationen über längere Zeiträume [acatech2015b], [Haas2015], [SRU2016]. Dabei ist nicht auszuschließen, dass sich von ihrem Wesen her unterschiedliche Entwicklungen, wie die Digitalisierung und die Umstellung der Rohstoff- bzw. Energiebasis, zu einer »großen Transformation« verdichten, die mit noch fundamentaleren Veränderungen verbunden ist, als die Industrielle Revolution. Denkbar ist auch eine Sichtweise, die die Industrielle Revolution als wellenförmige, große Transformation begreift, die Mitte des 18. Jahrhunderts begann und immer noch andauert [Steenblock2011, Kapitel 2.2].

[8] Der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) wurde 1971 durch Erlass der Bundesregierung eingerichtet und ist wie der WBGU ein wissenschaftliches Beratungsgremium der Bundesregierung. Seine Aufgaben bestehen neben der Beratung auch in der Begutachtung der Umweltsituation in Deutschland.

[9] Die Agenda 2030 basiert auf der Rio-Konferenz von 1992 und dem Millenniumsgipfel von 2000, dessen Millennium Development Goals vor allem Entwicklungs- und Schwellenländer adressierten. Sie wird, wenn sie mehrheitlich Einzug in globale und nationale Politikentscheidungen hält, alle Politikbereiche von der Wirtschafts-, Sozial-, Umwelt- und Finanzpolitik über die Agrar- und Verbraucherpolitik bis hin zu Bereichen wie Verkehr, Städtebau, Bildung und Gesundheit berühren [Martens2016], [UN2015].

2.2 Rohstoffe und Energie sind die materielle Basis einer Gesellschaft

Auch wenn wirtschaftliches Wachstum bei einem geringeren Ressourcenverbrauch grundsätzlich möglich erscheint, darf die Diskussion um die Digitalisierung nicht den Blick darauf verstellen, dass unsere Gesellschaft immer ein materielles Fundament haben wird. Wir brauchen und verbrauchen Ressourcen als Nahrungsmittel, zur Herstellung von Gütern und zur Wandlung von Energie. Wie bedeutend Rohstoffe bzw. Ressourcen sind, wird dadurch deutlich, dass mehr als ein Drittel aller Güter im Welthandel Rohstoffe sind [Haas2015], [Gebhard2013] und dass die Definition ganzer Epochen wie Stein-, Bronze- und Eisenzeit auf Basis der verwendeten Rohstoffe erfolgt. Betrachtet man die in der Geschichte der Industrialisierung verwendeten Energierohstoffe, so zeigt sich, dass zunächst nachwachsende Biomassen – insbesondere Holz – als Energierohstoffe eingesetzt wurden. Deren Nutzung erfolgte jedoch in vielen Regionen nicht nachhaltig, da mehr Holz entnommen wurde, als durch natürliches Wachstum hinzukam[10]. Die Schonung der Ressource Wald, mit einem auf Dauerhaftigkeit angelegten Waldkartierungs- und Bewirtschaftungssystem, konnte erst erreicht werden, nachdem mit Kohle und später Erdöl und Erdgas fossile Energierohstoffe mit hoher Energiedichte und leichter Transportierbarkeit besser verfügbar wurden. Diese verdrängten Holz zunehmend als Energieträger. Bis heute hat die Nutzung fossiler Ressourcen nichts von ihrer Dominanz und Intensität verloren, auch wenn Biomasse in den letzten Jahren wieder vermehrt als Rohstoffquelle in Betracht gezogen wird.

Welcher Art die Rohstoffe sind, die eine Gesellschaft verwendet, hängt vom technologischen Entwicklungsstand, vom Bedarf und von der Verfügbarkeit der Rohstoffe ab. So werden bestimmte Rohstoffe im Zeitverlauf weniger oder gar nicht mehr nachgefragt, während Rohstoffe an Bedeutung gewinnen, die zuvor nicht benötigt wurden oder nicht verwendet werden konnten, weil bestimmte Technologien nicht verfügbar waren. Ein Beispiel für eine Veränderung in der Rohstoffbasis lässt sich in der Geschichte der chemischen Industrie finden, die früher hauptsächlich Kohle als primären Rohstoff einsetzte und heute nahezu vollständig auf Basis von Erdöl mit zunehmenden Erdgasanteilen produziert.

Die Produktvielfalt der chemischen Industrie beruht auf einer relativ kleinen Anzahl von Basis- oder Grundchemikalien, die zu einem großen Teil aus der sogenannten Naphthafraktion hergestellt und über den in Abbildung 2 skizzierten Produktstammbaum weiterverarbeitet werden. Naphtha fällt, neben den Treibstoffen Benzin, Dieselöl, Kerosin und

[10] Der Nachhaltigkeitsbegriff stammt ursprünglich aus der Forstwirtschaft und geht auf Hans Carl von Carlowitz zurück [Hiller2013].

den Heizstoffen leichtes und schweres Heizöl, zu 7 bis 15 % bei der destillativen Trennung von Rohöl an [NRW2015, S. 19]. Konkurrenz ist der Erdölroute in den letzten Jahren durch die Schiefergas- oder shale-gas-Förderung in den USA entstanden [Kneißel2013]. Bei Schiefergas handelt es sich um Erdgas, das in der Porenstruktur von Tonsteinen vorkommt. Im Vergleich dazu liegt »konventionelles« Erdgas in grobkörnigeren Gesteinen vor und hat sich in Erdgasfallen angesammelt. Die wirtschaftliche Ausbeutung der Schiefergasvorkommen wurde erst in den letzten Jahren möglich. Eine Konkurrenz für Erdöl entsteht durch Schiefergas u. a. deshalb, weil aus dem in Schiefergas enthaltenen Ethan durch Dehydrierung Ethen erzeugt werden kann.

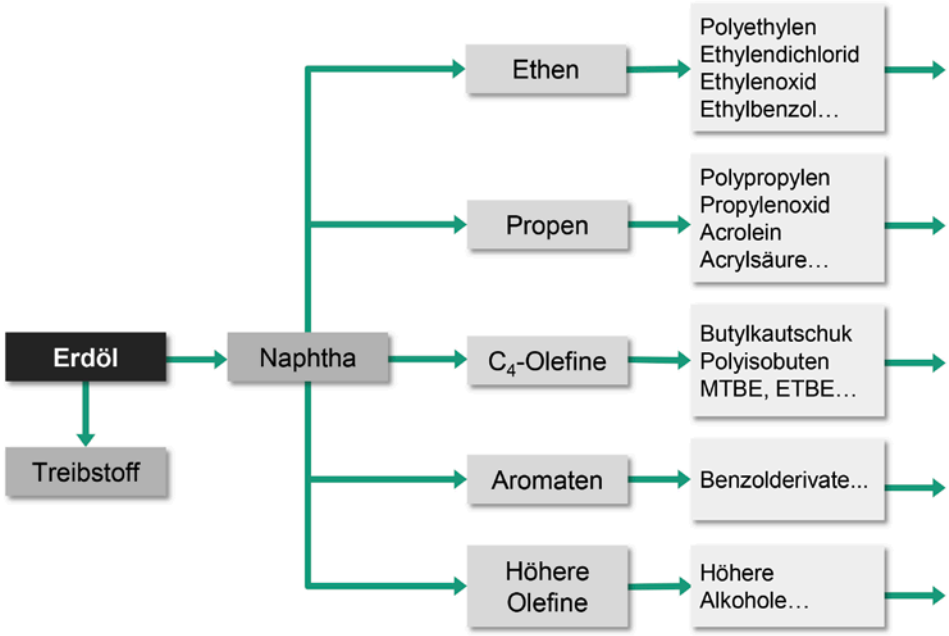


Abbildung 2: Schema eines Produktstammbaums für chemische Produkte aus Erdöl.

Warum Erdöl so gute Voraussetzungen bietet, die heute verwendeten chemischen Produkte herzustellen, wird durch Abbildung 3 verdeutlicht. Dargestellt ist ein ternäres Diagramm, in dem der molare C-, H- und O-Anteil für unterschiedliche Rohstoffe und chemische Produkte aufgetragen ist[11]. Als Produkt ist in Abbildung 3 neben Ethen auch die Summenformel $CH_{3,2}O_{0,3}N_{0,2}$ angegeben. Dabei handelt es sich nicht um eine konkrete chemische Verbindung, sondern um die mittlere Zusammensetzung von chemischen Produkten (in diesem Fall die der Produkte der BASF [Bottke2016], [Schwab2016]). Abbildung 3 zeigt, dass Erdöl in seiner Bruttozusammensetzung dem betrachteten chemi-

[11] Diese Art der Darstellung wurde nicht von den Autoren entwickelt. Sie wurde durch die von Bottke [Bottke2016] und Schwab [Schwab2016] gewählte Darstellungsform angeregt. Die Darstellungsform von Bott und Schwab wurde auf die in Abbildung 3 dargestellten Stoffe übertragen.

schen Produktportfolio sehr ähnlich ist[12]. Andere potenzielle Ausgangsstoffe wie Biomassen, Kohle oder gar CO_2 sind im ternären Diagramm wesentlich weiter von den angestrebten Produkten entfernt, so dass mit einem deutlich höheren Herstellungsaufwand zu rechnen ist.

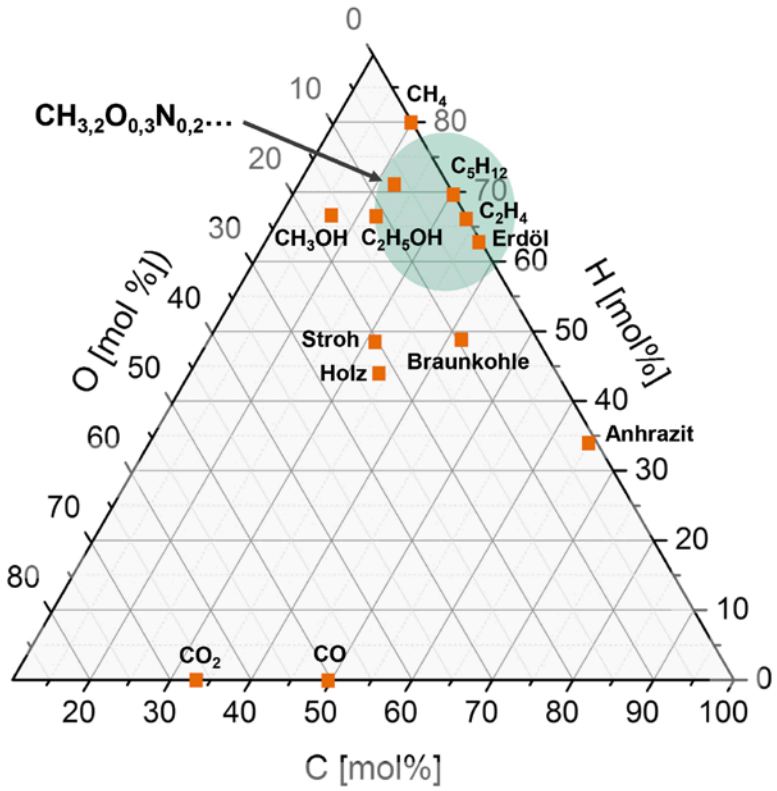


Abbildung 3: Ternäres Diagramm, das den molaren Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Sauerstoffgehalt für unterschiedliche chemische Produkte und potenzielle Rohstoffe beschreibt.

Abgesehen von Standorten in Ländern, die aufgrund einer Embargopolitik keinen freien Zugang zum globalen Rohstoffmarkt hatten[13], konnte sich die chemische Industrie in der Vergangenheit meistens mit den Rohstoffen versorgen, die in ihrer Zusammensetzung am besten für ihre Zwecke geeignet waren. Die aktuelle Verfügbarkeit fossiler Ressourcen suggeriert, dass dieser Sachverhalt auch in den kommenden Jahrzehnten noch Gültigkeit haben wird. Zwingt uns aber vielleicht der anthropogen verursachte Klimawandel und nicht eine Rohstoffverknappung oder das Vorhandensein einer besseren Rohstoffalternative dazu, unser Wirtschaftssystem umzustellen und nicht nur für den Energiesektor Alternativen zu fossilen Stoffen wie Erdöl, Kohle und Gas zu entwickeln?

[12] Dieser Zusammenhang ist natürlich auch damit zu begründen, dass die von uns konsumierten Produkte im Rahmen einer Erdölchemie entwickelt wurden. Einen anderen Ansatz verfolgt das Konzept der Bioraffinerie, das Produkte auf Basis der in Biomassen vorhandenen chemischen Vorstrukturen aufbauen möchte [VDI2016].

[13] Beispielsweise Südafrika zu Zeiten der Apartheid.

Nimmt man die Beschlüsse des Pariser Klimaabkommens 2015 ernst, so müssen menschliche Aktivitäten mit globalen Kohlenstoffkreisläufen in ein stabiles und verträgliches Gleichgewicht gebracht werden. Hierzu wird es erforderlich sein, eine Wirtschaftsform zu entwickeln, die das Produktions- und Energiesystem möglichst frei von primären fossilen Kohlenstoffanteilen gestaltet und Strukturen und Prozesse so aufbaut, dass der (Netto-)Kohlenstoffeintrag in die Biosphäre auf ein verträgliches Maß begrenzt wird (vgl. hierzu auch Schlögl [Schlögl2015]). Im folgenden Kapitel erfolgt deshalb zunächst eine Darstellung des globalen Kohlenstoffkreislaufs[14,15]. Darauf aufbauend wird diskutiert, ob ein Verzicht auf fossile Kohlenstoffressourcen möglich ist und welche Konzepte dafür in Frage kommen können.

2.3 Potenzielle Kohlenstofftransformationspfade in einem Wirtschaftssystem ohne Erdgas, Erdöl und Kohle – orientierende Betrachtungen

Kohlenstoffkreislauf und Klima

Der natürliche überwiegend CO_2-getragene Kohlenstoffaustausch [IPCC2007, S. 511] in der Biosphäre findet zwischen Atmosphäre und Land (120 Gt C/Jahr) sowie zwischen Atmosphäre und Ozeanen (70 Gt C/Jahr) statt. Terrestrische Pflanzen nehmen mithilfe von Sonnenlicht CO_2 aus der Atmosphäre auf, während durch den Metabolismus von Flora und Fauna sowie durch die Zersetzung abgestorbener Biomasse, CO_2 und Methan an die Atmosphäre abgeben werden. Ein kleinerer Anteil des Kohlenstoffs wird im Boden gebunden (0,4 Gt/a). Beim Austausch zwischen Atmosphäre und Ozean wird CO_2 zunächst in oberflächennahen Ozeanschichten gelöst, wo es mit Wasser zu Hydrogencarbonat oder Carbonationen reagiert. Durch jahreszeitliche oder geografische Einflüsse kühlt das Oberflächenwasser ab und sinkt aufgrund der höheren Dichte in tiefere Wasserschichten; es gelangt jedoch auch ein kleinerer CO_2-Anteil aus tieferen Schichten wieder an die Oberfläche. Die Verweilzeit von CO_2 in oberflächennahen Ozeanschichten beträgt weniger als zehn Jahre. Zusätzlich wird CO_2 vom Phytoplankton durch Photosynthese in marine Biomasse umgewandelt, die nach dem Absterben teilweise in tiefere

[14] Eine detaillierte Beschreibung globaler elementspezifischer Kreisprozesse beschreibt beispielsweise Kümmel [Kümmel1990]

[15] Ob ein Prozess als Kreisprozess oder Kreislauf erkannt wird, hängt vom Bilanzraum und der Zeitskala, die der Betrachtung zugrunde liegt, ab. So kann der Austausch kohlenstoffhaltiger Verbindungen zwischen Atmosphäre und Land sowie zwischen Atmosphäre und Ozeanen in historischen Zeiträumen als Kopplung von Kreisprozessen interpretiert werden. In geologischen Zeiträumen tragen jedoch auch irreversible Prozesse dazu bei, Inventare in Kompartimenten zu verschieben und Kopplungsmechanismen zu verändern.

Ozeanschichten absinkt und dort in Bodensedimente eingelagert wird. Die Durchmischung tieferer Ozeanschichten benötigt Zeiträume von Jahrtausenden, so dass dem Kohlenstofftransport in tiefere Ozeanschichten eine wichtige Funktion als Kohlenstoffsenke zukommt. [IPCC2007, S. 511]

In diese »natürlichen« Kreislaufsysteme werden seit Beginn der Industrialisierung große zusätzliche Mengen an Treibhausgasen wie CO_2, Methan und Stickoxide über die Atmosphäre eingetragen. So betrug die jährlich emittierte CO_2-Menge nach einer Zusammenstellung des WBGU [WBGU2016, S. 11] in den letzten fünf Jahren durchschnittlich etwa 40 Gt, wovon etwa 32 Gt der Verbrennung fossiler Brennstoffe, etwa 4 Gt der Kalk-/Zementproduktion und anderen industriellen Prozessen sowie etwa 4 Gt Landnutzungsänderungen zugeschrieben werden [WBGU2016, S. 11][16]. Die Hälfte des seit der Industriellen Revolution emittierten CO_2 befindet sich immer noch in der Atmosphäre, die andere Hälfte wurde von den Ozeanen und von der terrestrischen Biosphäre aufgenommen [WBGU2016, S. 12]. So hat der CO_2-Gehalt der Atmosphäre von Beginn der Industrialisierung bis heute von 280 ppm [IPCC2007, S. 511] auf 400 ppm [ESRL2017] zugenommen und in den Ozeanen zu einer Absenkung des pH-Werts um etwa 0,1 Einheiten gegenüber dem vorindustriellen Niveau geführt [WBGU2009, S. 11], [IPCC2015, S. 41][17]. Diese Daten zeigen, dass die Kohlenstoffinventare in den einzelnen Kompartimenten durch die zusätzlichen CO_2-Emissionen bereits deutlich beeinflusst wurden. Es gilt heute als gesichert, dass der bisherige anthropogene Eintrag von Treibhausgasen in die Kohlenstoffkreisläufe der Erde zu einer Zunahme der globalen mittleren Temperatur um etwa ein Grad[18] [IPCC2015, S. 40] geführt hat, obwohl natürliche Faktoren, wie ein geringerer Energieeintrag durch die Sonne, in den vergangenen 50 Jahren eine leicht abkühlende Wirkung auf das Klima hatten [WBGU2009, S. 9]. Die Wirkung von emittiertem CO_2 auf das Klima ist lange andauernd. Auch bei einem sofortigen Ausbleiben aller anthropogenen CO_2-Emissionen sinkt die CO_2-Konzentration in der Atmosphäre nur langsam. So rechnet man damit, dass es etwa tausend Jahre dauern wird, bis die Hälfte des durch menschliche Aktivitäten in die Atmosphäre gelangten CO_2 von den Ozeanen oder der terrestrischen Biosphäre aufgenommen worden ist [WBGU2011, S. 41]. Man geht davon aus, dass sich das System Erde spätestens bei einer Erwärmung um vier Grad Celsius fundamental verändern wird, da dieser Temperaturunterschied in etwa der Differenz

[16] Nach Angaben des Global Carbon Projects [Global2016] wurden 2015 durch fossile Brennstoffe und die Industrie 36,3 ± 1,8 Gt CO_2 freigesetzt.

[17] Eine pH-Wert Abnahme um 0,1 scheint gering; da der pH-Wert aber in einer logarithmischen Skalierung angegeben wird, entspricht die pH-Wert-Abnahme einer Zunahme der Hydroniumionenkonzentration (H_3O^+) von 26 % [IPCC2015, S. 41].

[18] Die global gemittelten kombinierten Land- und Ozean-Oberflächentemperaturdaten, berechnet als linearer Trend, zeigen eine Erwärmung um 0,85 °C (Intervall von 0,65 bis 1,06 °C) über den Zeitraum von 1880 bis 2012 [IPCC2015, S. 40].

zwischen dem Höhepunkt der letzten Eiszeit vor 20.000 Jahren und heute entspricht. Dem Klimasystem werden dabei sogenannte »Kippelemente« zugeordnet, bei deren Eintreten sich das globale System sprunghaft und irreversibel verändert und deren Folgen kaum vorhersagbar sind. Als bedeutendste Risiken betrachtet man das abrupte Abreißen von Meeresströmungen, den Kollaps des Amazonasregenwaldes, Veränderungen im Monsunsystem und die Destabilisierung der arktischen und antarktischen Eisschilde [WBGU2009, S. 12]. Man hält es für möglich, dass das Abschmelzen der Eisschilde bereits bei einer länger andauernden Erderwärmung von mehr als 1,9 °C ausgelöst werden kann. Eine Temperaturerhöhung um maximal zwei Grad gegenüber dem vorindustriellen Niveau gilt deshalb als Grenzmarke, um eine gefährliche Störung des Klimasystems zu verhindern [WBGU2009, S. 9ff.], [WBGU2011, S. 35ff.], [WBGU2016, S. 9ff.], [IPCC2015]. Nach den Modellen des IPCC verbleibt unter Berücksichtigung des jetzt vorliegenden Kohlenstoffinventars der Atmosphäre ab dem Jahr 2016 eine Menge von 800 Gt CO_2, die noch in die Atmosphäre emittiert werden kann, ohne dass die Erwärmung die Zwei-Grad-Grenze überschreitet. Diese Betrachtungsweise wird auch als »Budgetansatz« bezeichnet. Die verbleibende emittierbare CO_2-Menge, das »Budget«, wäre bei einem CO_2-Eintrag in die Atmosphäre auf heutigem Niveau in 20 Jahren ausgeschöpft [WBGU2011, S. 40], [WBGU2016, S. 11].[19]

Der »industrielle Metabolismus«

Die Wirtschaftsprozesse, die dazu führen, dass zusätzliches CO_2 in die natürlichen Kohlenstoffkreisläufe eingetragen wird, ordnen sich einem Bilanzraum zu, der, in Anlehnung an die Begriffe Biosphäre oder Ökosphäre, auch als (vom Menschen geprägte) »Anthroposphäre« bezeichnet wird. Die Stoff-, Energie- und Produktkreisläufe, die diesen Bilanzraum bestimmen, weisen Parallelen zu den Stoffwechselkreisläufen eines Lebewesens auf, so dass auch von einem »industriellen Metabolismus« oder einem »gesellschaftlichen Stoffwechsel« gesprochen wird. Der industrielle Metabolismus benötigt ebenso wie ein natürlicher Organismus Nähr- bzw. Rohstoffe sowie Energie und erzeugt »Stoffwechselprodukte« in Form von Abfällen [WBGU2011, S. 35f.].

Bei dieser Art der Betrachtung ist es jedoch wichtig, zu berücksichtigen, dass die Definition einer Anthroposphäre oder eines industriellen Metabolismus lediglich den Bilanzraum eines Modells darstellt, mit dem das Zusammenwirken bestimmter Prozesse be-

[19] Ob das Zwei-Grad-Ziel erreicht werden kann, ist umstritten. Aktuelle Studien kommen zu dem Ergebnis, dass eine größere Temperaturerhöhung als zwei Grad Celsius wahrscheinlich ist. Raftery [Raftery2017] geht dabei von einer mittleren globalen Erwärmung von drei Grad (2–4,9 Grad) bis zum Ende des Jahrhunderts aus. Mauritsen [Mauritsen2017] erwartet, dass sich selbst bei einem sofortigem Emissions-Stopp, die mittlere globale Temperatur im selben Zeitraum um 1,3 Grad erwärmen würde. (Siehe auch zusammenfassend [Podbregar2017]).

schrieben werden soll. Dieser Bilanzraum ist keinesfalls mit einem real vorhandenen, physikalisch abgegrenzten Raum zu verwechseln, sondern – wie die Ökosphäre oder Biosphäre auch – ein theoretisches Konstrukt. So suggerieren viele Darstellungen, dass es sich bei Biosphäre und Anthroposphäre um zwei unterschiedliche Systeme handelt, die – ähnlich wie technische Anlagen – über definierte Ein- und Auslässe miteinander verbunden sind. Durch eine solche Betrachtungsweise können zwar wichtige Teilaspekte beschrieben werden; der Komplexität eines Systems Erde, das in sich nicht abgeschlossen ist und beispielsweise Energie von außen bezieht, werden sie nicht gerecht. Aus der Erdgeschichte ist bekannt, dass Lebewesen sich nicht einfach an eine vorgegebene Umgebung angepasst haben, sondern diese Umgebung verändern und selbst Teil einer Umwelt für andere werden[20]. Unter diesem Betrachtungswinkel stellen menschliche Aktivitäten, die zu Veränderungen im System Erde führen, zunächst einmal kein grundsätzlich neues Phänomen dar. So ist die heutige Zusammensetzung der Atmosphäre mit einem Gehalt an molekularem Sauerstoff von 21 % eine Folge des Auftretens Photosynthese betreibender Organismen vor etwa 2 Milliarden Jahren. Allerdings ist zu beachten, dass solche Veränderungen das System Erde in einen anderen Systemzustand überführen können, der sich vor allem auf unsere Spezies dramatisch auswirken kann. So ist mehr als zweifelhaft, ob das »menschliche Sein« und die »Welt der Natur« grundsätzlich getrennt betrachtet werden können. Hier ist zu fragen, ob nicht vielmehr diese scheinbare Trennung selbst ein Teil des Problems Klimawandel ist.

Betrachtet man wirtschaftliche Prozesse[21] unter dem modellhaften Blickwinkel eines industriellen Metabolismus, so bestehen wesentliche kohlenstoffhaltige Substrate aus den fossilen Energierohstoffen Erdöl, Kohle und Erdgas sowie dem in der Kalk-/Zementindustrie eingesetzten Kalkstein[22]. Fossile Rohstoffe werden zum einen als Energieträger und zum anderen als Rohstoffe eingesetzt. Das Energiesystem ist hauptsächlich fossil und nuklear getrieben und wird in wachsenden Anteilen durch regenerative Quellen aus Wind, Sonne, Biomasse, Geothermie und Wasserkraft ergänzt. Durch den fossilen Anteil und ggf. nicht nachhaltig erzeugte Biomasse setzt das Energiesystem netto CO_2-Emissionen frei.

---

[20] Eine extreme Ausprägung findet diese Betrachtungsweise in der sogenannten »Gaia-Hypothese« von James Lovelock [Lovelock1988], in der die Erde mit ihren vielen Lebensformen sowie der sogenannten unbelebten Natur als Ganzes betrachtet und als komplexes System angesehen wird, das einem Lebewesen sehr nahe kommt. Der Begriff »Gaia« leitet sich dabei aus der Bezeichnung für eine Urgottheit (Erdgöttin) der griechischen Mythologie ab.

[21] Der Fokus liegt in der hier dargestellten Betrachtung auf dem Energiesystem und der Grundstoffindustrie; wichtige Bereiche wie Landwirtschaft und andere Industrien werden hier nicht betrachtet.

[22] Kalkstein ist unterschiedlichen Ursprungs. Der überwiegende Teil wurde von Lebewesen im Laufe der Erdgeschichte gebildet und abgelagert. Dieser Anteil kann ebenso wie Kohle, Erdöl und Erdgas als »fossil« bezeichnet werden. Weitere Kalksteine wurden durch chemische Prozesse aus Wasser ausgefällt.

Die bedeutendsten Sparten der Grundstoffindustrie werden nur zum Teil aus dem Energiesystem mit Energie versorgt. Sie sind größtenteils autark und tragen mit ihren Energiewandlungsanlagen ebenfalls zu den CO_2-Emissionen bei. Ihre stoffliche Basis decken sie überwiegend aus fossilen Rohstoffen. Zu beachten sind hier vor allem die Stahlindustrie, die chemische Industrie und die Kalk-/Zementindustrie[23].

In der Stahlindustrie wird Kohlenstoff (C) u. a. als Reduktionsmittel im Hochofenprozess eingesetzt, um Eisen-III-oxid (Fe_2O_3) zu Eisen (Fe) zu reduzieren. Kohlenstoff reagiert dabei zu CO_2 und Kohlenmonoxid (CO):

$$Fe_2O_3 + 2\ C \rightarrow 2\ Fe + CO + CO_2 \qquad \text{Gleichung 1}$$

Die chemische Industrie/Petrochemie greift im Wesentlichen auf Erdöl zurück, und die Kalk-/Zementindustrie verwendet Calciumcarbonat ($CaCO_3$) als Rohstoff, um gebrannten Kalk (Calciumoxid CaO) zu erzeugen.

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2 \qquad \text{Gleichung 2}$$

In der Kalk-/Zement- und Stahlindustrie kommt es durch die genannten Prozesse zu direkten CO_2-Emissionen. In der Petrochemie fallen bei der Herstellung von Treibstoffen CO_2-Emissionen an; der in den Treibstoffen gebundene Kohlenstoff wird bei einer Nutzung im Transportsektor als CO_2 emittiert. Die chemische Industrie verarbeitet Erdölfraktionen zu kohlenstoffhaltigen Produkten, die anschließend in einen globalen Wirtschaftskreislauf gelangen und nach ihrer Nutzung in Ländern mit einer gut entwickelten Kreislaufwirtschaft in größeren Anteilen in ein Recycling, eine energetische Wiederverwertung (waste to energy) oder eine geordnete Entsorgung gelangen. Auch hier kommt es zu CO_2-Emissionen. Werden die Produkte nicht geordnet gesammelt, gelangen sie in unterschiedlicher Form in die Biosphäre und richten hier unter Umständen Schaden an. Ein Beispiel ist das Auftreten von (Mikro-)plastik in den Ozeanen.

Wie kann ein Produktionssystem ohne fossile Rohstoffe aussehen?

Um den globalen Temperaturanstieg auf zwei Grad Celsius zu begrenzen, ist es notwendig, den anthropogenen CO_2-Nettoeintrag in die Erdatmosphäre zu mindern und bis 2070 völlig zu unterbinden[24]. Dies erfordert, das Produktions- und Energiesystem möglichst frei von primären fossilen Kohlenstoffanteilen zu gestalten und Strukturen so aufzubauen, dass der anthropogene Kohlenstoffeintrag in die Atmosphäre auf einen Betrag

[23] Andere Industriebereiche werden an dieser Stelle nicht berücksichtigt; Ziel der Darstellung ist es, die relevanten Zusammenhänge für (Grundstoff)Industrien herauszuarbeiten, die große Mengen an kohlenstoffhaltigen Verbindungen umsetzen.

[24] Bei 1,5 °C bis 2050.

begrenzt wird, der nicht größer ist, als die Kohlenstoffmenge, die durch Senken langfristig aufgenommen werden kann. In Anlehnung an die beschriebenen heutigen Transformationspfade ist in Abbildung 4 ein Produktionssystem dargestellt, das nahezu keine fossilen Kohlenstoffträger einsetzt. Dabei handelt es sich um eine Vision mit orientierendem Charakter, für die sich auch andere Lösungskonzepte denken lassen.

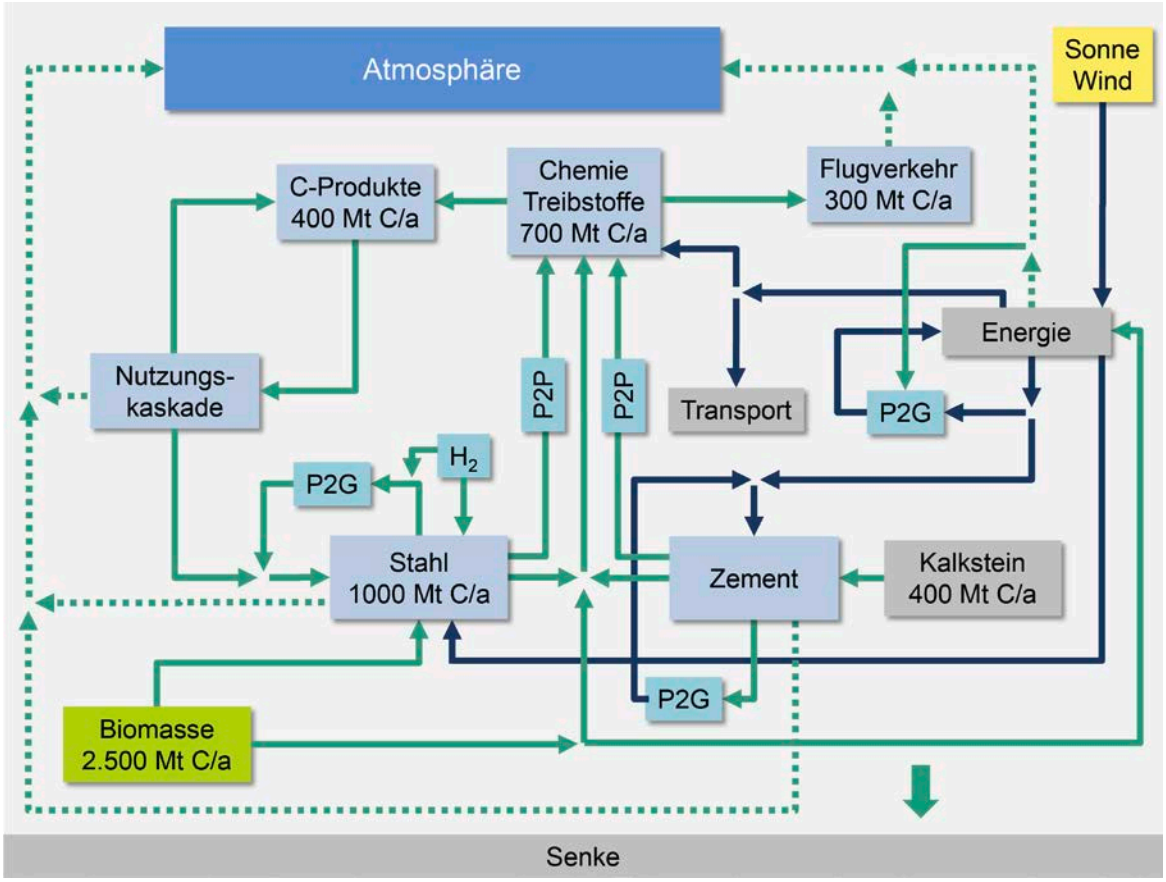


Abbildung 4: Vereinfachte Darstellung einer Kohlenstoffwirtschaft (Vision), die bis auf Kalkstein keine fossilen Kohlenstoffträger mehr einsetzt (Transformationspfade für Kohlenstoff sind als grüne Pfeile, Transformationspfade für Energie als blaue Pfeile, Emissionspfade gestrichelt dargestellt; P2G: Power2Gas, P2P: Power2Products bzw. Power2X).

Klammert man fossile Rohstoffe aus, kommen als kohlenstoffhaltige Rohstoffe nur Biomasse und CO_2 in Frage. Welcher dieser Kohlenstoffquellen in einem zukünftigen System welche Rolle zukommt, lässt sich heute nur schwer abschätzen. Da nachwachsende Rohstoffe durch die zur Verfügung stehenden Flächen[25] begrenzt sind, kommt es jedoch darauf an, die Ressource Biomasse zu schonen. Es ist deshalb wichtig, das Energiesystem möglichst weitreichend auf kohlenstofffreie Prozesse umzustellen, um Biomasse vermehrt als Kohlenstoffträger in Produktionsprozessen nutzen zu können. Lässt man die Atomkraft bei dieser Betrachtung außen vor, stehen als Energiequellen in großem Um-

[25] Grundsätzlich kann die Biomassemenge durch neue Landnutzungskonzepte verändert werden.

fang hauptsächlich Sonne und Wind zur Verfügung, die nach Angaben des WBGU [WBGU2011, S. 127] zusammengenommen unter nachhaltigen Bedingungen ein globales Potenzial von etwas mehr als 11 000 EJ/a haben. Um den fluktuierenden Charakter von Sonnen- und Windenergie auszugleichen, werden Energiespeicher benötigt, oder es müssen Grundlasten bereitgestellt werden. Letzteres kann in einem nicht fossilen und nicht nuklearen System grundsätzlich durch die energetische Nutzung von Biomasse und Brennstoffen, die mit regenerativem Strom hergestellt wurden, erfolgen. Regenerative Energieanteile aus Sonne und Wind müssen ebenfalls zu einem großen Teil die energetische Grundlage für den Transportsektor bilden. Dies kann durch Elektrofahrzeuge [acatech2015a, S. 35] oder durch Wasserstoff bzw. Treibstoffe geschehen, die mithilfe von regenerativem Strom hergestellt werden.

Damit die Nutzung von Biomasse in Summe CO_2-neutral erfolgt, ist eine nachhaltige Biomasseproduktion eine wichtige Voraussetzung. Wie groß die zur Verfügung stehenden Biomassemengen sind, ist umstritten. Die Autoren dieses Themenheftes orientieren sich hier an den Angaben des WBGU, der das jährliche nachhaltige Potenzial von Biomasse auf 100 EJ schätzt [WBGU2011, S. 127]. Hieraus lässt sich berechnen, dass nachhaltig weltweit ca. 2 500 Mt Kohlenstoff der Biosphäre entnommen und verarbeitet werden können[26].

In der Stahlindustrie werden weltweit etwa 1000 Mt[27] Kohlenstoff gebraucht, um Eisenerz zu reduzieren. Dieser Betrag muss theoretisch nicht vollständig über Biomasse eingebracht werden, wenn es zukünftig gelingt, bei der Herstellung von Eisen Wasserstoff[28] oder – im größeren Umfang als bisher[29] – Methan als Reduktionsmittel einzuset-

---

[26] Grundlage ist die von Kaltschmitt angegebene mittlere Zusammensetzung von Pflanzentrockensubstanz (42–47% C) und die von ihm angegebene Heizwertspanne für trockene biogene Festbrennstoffe (16,5–19 MJ/kg) [Kaltschmitt2009, S. 610].

[27] Die Abschätzung erfolgte auf Grundlage der in der Stahlindustrie verwendeten Kohlemengen von weltweit 1200 Mt [Worldcoal2014]. Unter Berücksichtigung des variierenden Kohlenstoffgehalts unterschiedlicher Steinkohlen (75 bis über 91,5% (Anthrazit) [Franck1979]) ergibt sich ein Kohlenstoffbedarf für die Stahlindustrie von 900 bis 1100 Mt Kohlenstoff. Der Bereich der Eisen- bzw. Stahlerzeugung, der bereits heute im Direktreduktionsverfahren Methan als Reduktionsmittel einsetzt, wird so nicht miterfasst. Die insgesamt benötigte Kohlenstoffmenge ist also eher noch größer.

[28] Grundsätzlich lässt sich auch Wasserstoff als Reduktionsmittel im Hochofen einsetzen [Kashiwaya2013], wobei jedoch noch eine Reihe technischer Fragestellungen beantwortet werden muss, was wahrscheinlich einen neuen Hochofenprozess erfordert. Ein kritischer Punkt bei der Nutzung von Wasserstoff im Hochofenprozess ist beispielsweise die Hochofentemperatur. Da die Reduktion von Eisenerzen mit Wasserstoff eine stark endotherme Reaktion ist, kann es bei intensiver Nutzung von Wasserstoff als Reduktionsmittel zu einem Temperaturabfall im Hochofen kommen. Weiterhin beeinflussen fehlende Koksanteile die mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Hochofenbettes. Wichtig ist es, die Durchströmbarkeit des Hochofenbettes zu erhalten. Hier hat Koks in heutigen Hochöfen eine wichtige Funktion. Auch die Produkteigenschaften verändern sich, wenn als Reduktionsmittel Wasserstoff verwendet wird. So entsteht

zen. Wasserstoff als Reduktionsmittel ersetzt in diesem Fall Kohlenstoff, während beim Einsatz von Methan grundsätzlich zumindest ein Teil der in Hüttengasen enthaltenen Kohlenstoffverbindungen über Power2Gas-Verfahren[30] wieder zu Methan umgesetzt werden kann. Letzteres erfolgt über die Reaktion von CO_2 mit Wasserstoff. Das zurückgewonnene Methan kann erneut als Reduktionsmittel verwendet werden[31]. In beiden Fällen wird regenerativ erzeugter Strom zur Herstellung von Wasserstoff verwendet. Wie viel Kohlenstoff schließlich netto für die Stahlherstellung bereitgestellt werden muss, hängt davon ab, wie viel Wasserstoff eingesetzt bzw. wie viel Methan im Kreis geführt werden kann. Eine weitere Stellschraube ist die Recyclingquote für Eisenschrott. (siehe auch »Exkurs I Hüttenwerke als Kohlenstoffquelle«) In der Kalk-/Zementindustrie kann Kalkstein nicht durch ein anderes biogenes oder kohlenstofffreies Material ersetzt werden[32]. Hier fließen 400 Mt fossilen Kohlenstoffs[33] in den Bilanzraum ein[34].

Im Transportsektor können kohlenstoffhaltige Treibstoffe zunehmend durch elektrische Antriebe oder Brennstoffzellenantriebe ersetzt werden. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass für Teile des Transportsektors weiterhin flüssige Treibstoffe mit hoher Energiedichte

---

ein hochreines Material, das höhere Prozesstemperaturen in den nachfolgenden Verarbeitungsprozessen erfordert. Kohlenstoff und andere Legierungsstoffe müssen nachträglich zugesetzt werden, um vergleichbare Produktqualitäten wie beim aktuellen Hochofenprozess zu erzielen. Grundsätzlich können auch Verfahren entwickelt werden, die Eisenoxide elektrolytisch reduzieren [ULCOS].

29 Methan wird bereits heute beim Direktreduktionsverfahren als Reduktionsmittel eingesetzt. Dies geschieht allerdings, abhängig von der Erdgasverfügbarkeit, regional begrenzt. In Deutschland findet das Verfahren keine Anwendung.

30 Vgl. hierzu die Beschreibung des Power2Gas-Verfahrens (P2G) in Kapitel 3.1.

31 Grundsätzlich muss nicht unbedingt eine Kreislaufführung des Kohlenstoffs im Stahlwerk erfolgen. Es können auch andere CO_2-Quellen zur Methanherstellung verwendet werden, beispielsweise Energieanlagen oder Anlagen der Kalk-/Zementindustrie. In diesem Fall erfolgt die Herstellung von Methan dort und es gelangt über ein Verteilnetz in die Stahlindustrie.

32 Prinzipiell ist die Freisetzung von Calciumoxid (CaO) auch aus anderen Calciumverbindungen (z. B. Calciumsulfat $CaSO_4$) möglich. Gegenüber der Carbonatspaltung steigt aber die Calcinierungstemperatur von 800 °C auf über 1200 °C an. Dabei wird Schwefeldioxid (SO_2) freigesetzt. Setzt man anstelle von $CaSO_4$ Calciumsilikate ein, liegt nach der Reaktion CaO und Siliziumdioxid (SiO_2) als Feststoffgemisch vor, das getrennt werden müsste. Bei natürlich vorkommenden Calciumsilikaten ist die Trennung aufgrund des Calcium/Siliziumverhältnisses nicht möglich [Hollemann1976, S. 700 und 554].

33 Nach Angaben des Fachmagazins Worldcement betrug der Zementbedarf im Jahr 2014 weltweit etwa 4200 MT [Green2015]. Hauptbestandteil von Zement ist Portlandzementklinker, der etwa 77 % $CaCO_3$ enthält [Beton2014, S. 7]. Hieraus lässt sich eine Jahresmenge von etwa 400 Mt Kohlenstoff (388 Mt) berechnen, der durch die Zementherstellung (ohne zugehörige Energiewandlung) im anthropogenen Bilanzsystem umgesetzt wird.

34 Die kohlenstoffhaltigen Gase des Zementprozesses können auch grundsätzlich dazu genutzt werden, Methan mithilfe des Power2Gas-Verfahrens (P2G) zu erzeugen. Das so hergestellte Methan kann dann für Gasbrenner im Zementprozess verwendet werden.

benötigt werden. Allein für den Flugverkehr wurde auf Basis aktueller Verbrauchszahlen ein Kohlenstoffbedarf von 300 Mt/a[35] abgeschätzt. Zur Herstellung von Produkten in der chemischen Industrie ist mit einem Kohlenstoffbedarf von 400 Mt/a[36] zu rechnen. Hiermit werden insgesamt mindestens 700 Mt Kohlenstoff benötigt, um chemische Produkte und Treibstoffe herzustellen. Hinzu kommen noch Treibstoffe, die im Kraftfahrzeugbereich (LKW) sowie im Schiffsverkehr benötigt werden. Dieser Bedarf kann grundsätzlich aus Biomasse gedeckt werden, indem beispielsweise durch den Vergasungsprozess Biomasse zu Synthesegas[37] umgesetzt wird. Das Synthesegas kann anschließend dazu verwendet werden, Treibstoffe und Basischemikalien herzustellen. Weitere Möglichkeiten ergeben sich durch die Anwendung von Pyrolyseverfahren.

Bei der Integration von Biomasse in die Prozessketten der chemischen Industrie ist in Betracht zu ziehen, dass von den insgesamt 2500 Mt nachhaltig verfügbaren biogenen Kohlenstoffs ein Teil wahrscheinlich in der Stahlerzeugung benötigt wird und ein weiterer Teil zur Bereitstellung von Grundlast und ggf. auch Wärme im Energiesystem erforderlich ist. Berücksichtigt man dann noch, dass Biomasse dezentral anfällt, und der Transport in zentrale Anlagen logistisch, energetisch und wirtschaftlich begrenzt ist, wird klar, dass es sinnvoll ist, mit CO_2 eine Alternative zu Biomasse als Rohstoff zu erschließen.

Das in Abbildung 4 dargestellte Schema sieht deshalb vor, zukünftig Wasserstoff, Methan und biomassestämmige Materialien[38] als Reduktionsmittel für die Eisenverhüttung einzusetzen. Wenn kohlenstoffhaltige Verbindungen als Reduktionsmittel eingesetzt werden, wird ein Teil der in den Hüttengasen enthaltenen Kohlenstoffanteile über

---

[35] Beruht auf der Annahme, dass der Luftverkehr etwa 2,5 % Anteil an den weltweiten CO_2-Emissionen hat [Statistikportal2013]. Hieraus ergibt sich bei jährlichen Emissionen von 40 Gt CO_2 eine CO_2-Fracht von 1000 Mt/a, die einem Kohlenstoffumsatz von etwa 300 Mt (270) entspricht.

[36] Naphtha enthält 85 % Kohlenstoff [Ullmann2012, S. 479]. Daraus ergibt sich bei einer Weltproduktion von 367 Mt Naphtha im Jahr 2014 [IHSMarkit2015] eine Kohlenstoffmenge von 312 Mt, die die chemische Industrie aus der Naphthafraktion deckt. Berücksichtigt man, dass der Anteil erdölstämmigen Kohlenstoffs in der chemischen Industrie [NRW2015, S. 21] etwa 76 % entspricht, ergibt sich ein Wert von 410 Mt (gerundet 400 Mt) Kohlenstoff.

[37] Der Begriff »Synthesegas« bezieht sich im Allgemeinen auf Gasgemische, die zu einer chemischen Synthese eingesetzt werden können, wie zum Beispiel für die Ammoniaksynthese [Bazanella2017, S. 55] Gasgemische aus Stickstoff und Wasserstoff. Meistens werden jedoch Prozessgase als Synthesegase bezeichnet, die Kohlenmonoxid, Wasserstoff und CO_2 als reaktive Komponenten enthalten. Sie können u. a. aus Biomasse und Kohle mithilfe eines Vergasungsprozesses erzeugt werden, in dem die Ausgangsstoffe mit einem Vergasungs- oder Oxidationsmittel (meist Luft, Sauerstoff, Kohlendioxid oder Wasserdampf) bei höherer Temperatur umgesetzt werden. Das gebildete Synthesegas kann entweder energetisch genutzt oder je nach Zusammensetzung zur Synthese chemischer Produkte eingesetzt werden.

[38] Dabei kann es sich um koksartige Materialien oder um Synthesegas handeln. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass dies eine grundlegende Neuentwicklung des Verhüttungsprozesses erfordern würde.

Power2Gas-Verfahren zu Synthesegas oder Methan umgewandelt. Beide können dann erneut als Reduktionsmittel eingesetzt werden. Mit der übrigen Kohlenstoffmenge lassen sich grundsätzlich chemische Produkte und Treibstoffe herstellen (vgl. hierzu »Kapitel 3.1« und »Exkurs I«). In der Kalk-/Zementindustrie kann in dieser Vision regenerative Energie über Power2Gas-Verfahren eingekoppelt werden und ebenfalls CO_2 zur Herstellung chemischer Produkte und Treibstoffe bereitgestellt werden.

Der in chemischen Produkten gebundene Kohlenstoff gelangt in einen durch weltweite Handelsbeziehungen geprägten Produktkreislauf, bei dem es wichtig ist, ihn so zu gestalten, dass Kohlenstoff kaskadenförmig genutzt werden kann. Ein wiederverwertungsorientiertes Produktdesign, die intelligente Organisation von Produktionsprozessen und die Konzeption einer effektiven Kreislaufwirtschaft verringern dabei die Mengen benötigter Rohstoffe. So können Kunststoffe beispielsweise grundsätzlich auch als Kohlenstoffquelle für industrielle Prozesse genutzt werden.

Das in Abbildung 4 dargestellte Konzept geht von der Annahme aus, dass der Eintrag fossiler Stoffe in das Energiesystem sowie in die Stahl- und chemische Industrie komplett vermieden wird; eine Annahme, die in ihrer vollständigen Umsetzung bis 2050 bzw. 2070 eine mehr als ambitionierte Herausforderung darstellt. Trotzdem würde in diesem fiktiven Produktionssystem immer noch CO_2 in die Atmosphäre emittiert: Die Emissionen erfolgen über den Flugverkehr, Müllverbrennungsanlagen, die Biomassenutzung im Energiesystem sowie über CO_2-Anteile, die aus der Stahl- und Kalk-/Zementindustrie kommen, aber von der chemischen Industrie nicht in Produkte integriert werden können.

Das aufgestellte Szenario gibt einen ersten Überblick über Systemzusammenhänge. Die Betrachtung findet zunächst auf einer globalen Ebene statt, die lokale Faktoren, wie die Verfügbarkeit von Biomasse unberücksichtigt lässt. Es wird auch deutlich, dass Prozesse, die CO_2 nutzen, um Treibstoffe und chemische Produkte herzustellen, eine wichtige verknüpfende systemische Funktion haben. Diese Prozesse ermöglichen es, den Rohstoffeinsatz von Biomasse zu minimieren und Kohlenstoff in Kaskaden zu nutzen. Hierdurch ist es grundsätzlich möglich, Wachstumsgrenzen, die sonst aus der nachhaltig nutzbaren Biomassemenge abgeleitet werden können, zu erweitern.

Die betrachteten Konzepte beruhen wesentlich darauf, dass regenerativ erzeugter Strom eingesetzt wird, um CO_2 in Energieträger oder Produkte umzuwandeln. Ob dieser Strom in den erforderlichen Mengen bereitgestellt werden kann, um CO_2-Emissionen, die auf eine stoffliche Kohlenstoffnutzung in den Grundstoffindustrien zurückgehen, zu vermeiden, ist abschließend noch nicht geklärt und aus heutiger Sicht fraglich.

Die Vermeidung industrieller Emissionen ist auch ein Ziel des Klimaschutzplans der deutschen Bundesregierung. Der Klimaschutzplan übersetzt Anforderungen, die sich aus

dem Pariser Klimaschutzabkommen ergeben, in konkrete Emissionsziele für unterschiedliche Wirtschaftsbereiche. Diese Emissionsziele werden im folgenden Kapitel beschrieben.

2.4 Pariser Abkommen, Klimaschutzplan und Energiewende

Das Pariser Klima-Abkommen [Paris2015] gilt als Durchbruch in der internationalen Klimapolitik. Es geht auf die 21. Weltklimakonferenz (Conference of the Parties COP21) zurück, die im Dezember 2015 unter Beteiligung von nahezu 200 Ländern stattfand, um einen Nachfolgevertrag für das 2020 auslaufende Kyoto-Protokoll zu verabschieden. Zentrales Ziel des Abkommens ist es, die durch Treibhausgase verursachte Erderwärmung auf deutlich unter zwei Grad Celsius im Vergleich zur vorindustriellen Zeit zu begrenzen. Das Ziel leitet sich aus der von vielen Wissenschaftlern vertretenen Ansicht ab, dass bei einer Begrenzung des mittleren globalen Temperaturanstiegs auf unter zwei Grad die Veränderungen durch den Klimawandel gerade noch beherrschbar sind. Bei größeren Temperaturanstiegen wird mit drastischen und unumkehrbaren Umweltveränderungen gerechnet.

Um das Zwei- bzw. 1,5-Grad-Ziel zu erreichen, soll der Netto-Ausstoß anthropogener Treibhausgase in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts den Wert Null betragen [Bund2016, S 13]. Es dürfen dann nur noch so viele Treibhausgase ausgestoßen werden wie durch Kohlendioxid-Senken aus der Atmosphäre wieder entfernt werden können. Konkret kann das bedeuten, dass die Verbrennung von Kohle, Öl und Gas zwischen 2050 und 2070 komplett enden muss. Von den beteiligten Ländern müssen Klimaschutzpläne vorgelegt werden, die alle fünf Jahre nachzubessern sind. Die Industrieländer sollen die Entwicklungsländer bei der Umsetzung ihrer Maßnahmen unterstützen. Das Abkommen wurde durch die Europäische Union am 5.10.2016 ratifiziert. Für die EU bedeutet das Klimaschutzabkommen, dass bis 2050 80–95 % weniger CO_2 emittiert werden darf als 1990.

Die Bundesregierung hat die Ziele des Pariser Abkommens in einen Klimaschutzplan eingearbeitet [Bund2016], der sich am EU-Ziel einer weitgehenden Treibhausgasneutralität bis 2050 orientiert. Der Plan entwickelt Leitbilder für 2050, definiert Handlungsfelder und formuliert Zwischenziele für das Jahr 2030. Die Ziele beschränken sich nicht auf ein Gesamtziel für die deutsche Wirtschaft, sondern geben erstmals konkrete Werte für die

Sektoren[39] Energiewirtschaft, Gebäude, Verkehr, Industrie, Landwirtschaft, Landnutzung und Forstwirtschaft vor (Tabelle 1).

Für die Energiewirtschaft wird eine weitgehende »Dekarbonisierung« bis 2050 angestrebt [Bund2016, S. 35]; der Verkehr soll bis dahin nahezu unabhängig von fossilen Kraftstoffen sein [Bund2016, S. 50]. Beim industriellen Sektor, mit dem sich dieser Diskurs vor allem beschäftigt, sprechen die Autoren des Klimaschutzplans bis 2050 von einer »Minderung des Ressourcen- und Energiebedarfs in der Produktion« [Bund2016, S. 58]. Als Maßnahmen werden dabei eine »Hocheffizienzstrategie«, eine Digitalisierung von Produktions- und Wirtschaftsprozessen, eine branchenübergreifende Verschränkungen von Stoffströmen, Materialinnovationen und die Substituierung von fossilen Energieträgern durch »CO_2-freie oder -neutrale Energieträger« genannt. Explizit wird die Einkopplung erneuerbarer Energien (Strom, Biomasse, Wasserstoff) sowie eine Kreislaufführung von CO_2 herausgestellt [Bund2016, S. 58]

Als relevant für den Sektor Industrie betrachtet der Klimaschutzplan Emissionen aus Verbrennungsprozessen und aus Eigenstromversorgungen des verarbeitenden Gewerbes sowie Emissionen aus industriellen Prozessen. Nach den Angaben im Klimaschutzplan ist der Industriesektor mit 181 Mio t CO_2-Äquivalenten (20 %) zweitgrößter Emittent [Bund2016, S. 56]. Von diesen Emissionen gehen 38 % auf Produktionsprozesse zurück [Bund2016, S. 57]. Explizit werden die Kalk-/Zementherstellung, die Stahlherstellung und die Grundstoffchemie genannt. Der Begriff »Dekarbonisierung«, der sowohl im Klimaschutzplan[40] als auch in Veröffentlichungen und in der öffentlichen Diskussion verwen-

[39] Der Begriff Sektor wird in der Literatur bisher nicht einheitlich verwendet. Laut Duden kann bei dem Begriff zwischen einem Bereich bzw. Sachgebiet, einer geometrischen Form oder einer durch Aufteilung eines Gebietes entstandenen Zone unterschieden werden. In den Wirtschaftswissenschaften wird zwischen dem Primärsektor, auch Urproduktion genannt, dem Industriesektor und dem Dienstleistungssektor unterschieden. Diese Aufteilung richtet sich nach den Tätigkeiten der Gesellschaft zur Bereitstellung volkswirtschaftlicher Güter und Dienstleistungen. Ist hingegen von Energieumwandlung oder Energienutzung die Rede, erfolgt häufig die Aufteilung in Strom, Wärme, Verkehr und Gas [Piekenbrock2013], [Fischedick2015]. Im Kontext dieses Beitrags beschreibt der Begriff ein Sachgebiet, das zum einen durch die Nutzung unterschiedlicher Rohstoffe und Energieträger gekennzeichnet ist und zum anderen unterschiedliche Wirtschaftsbereiche berücksichtigt. Im weiteren Verlauf wird die Einteilung in die Sektoren Energiewirtschaft, Gebäude, Verkehr, Industrie, Landwirtschaft, Landnutzung und Forstwirtschaft nach dem Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung zugrunde gelegt.

[40] Auch im Klimaschutzplan wird der Begriff der »Dekarbonisierung« verwendet. Das damit nicht der vollständige Verzicht auf kohlenstoffhaltige Stoffe, sondern nur der Verzicht auf fossile Stoffe gemeint sein kann, lässt sich an verschiedenen Stellen herauslesen. So werden auf S. 45 feste Bioenergieträger genannt, die für die Dekarbonisierung des Wärmebereichs von Bedeutung sind; auf Seite 48 wird die Dekarbonisierung im Gebäudebereich beschrieben und vermerkt, dass darunter die weitgehende Vermeidung von fossilen Brenn- und Rohstoffen zu verstehen ist; Seite 49 nennt Power-to-Liquid-Technologien (diese bauen auf kohlenstoffhaltigen Komponenten auf) als Beitrag zur »Dekarbonisierung«.

det wird, suggeriert dabei, dass ein vollständiger Verzicht auf kohlenstoffhaltige Verbindungen möglich sei. Davon kann jedoch nicht in allen Sektoren die Rede sein, da Kalk-/Zementherstellung, Stahlherstellung und Grundstoffchemie auf Kohlenstoffverbindungen als Rohstoffe angewiesen sind. Der Begriff »Dekarbonisierung« ist in diesem Zusammenhang zumindest unglücklich gewählt. Eine chemische Produktion ohne Kohlenstoffverbindungen wäre nur auf anorganische Verbindungen beschränkt, und auch Zement lässt sich nicht mit vertretbarem Aufwand aus einem anderen Rohstoff gewinnen als aus dem kohlenstoffhaltigen Calciumcarbonat. Selbst eine vollständige Dekarbonisierung des Energiesektors scheint nicht möglich, da Speicheroptionen wie Power2Gas mit Methan als Speichergas (vgl. hierzu Kapitel 3.1) oder Biomasse als Energieträger entfielen, wenn das Energiesystem komplett »kohlenstofffrei« wäre.

Tabelle 1: Emissionen der in die Zieldefinition des Klimaschutzplans einbezogenen Handlungsfelder (Sektoren) [Bund2016, S.33].

Handlungsfeld	1990 [Mio t CO_2-Äq.]	2014 [Mio t CO_2-Äq.]	2030 [Mio t CO_2-Äq.]	2030 (Minderung in % ggü. 1990)
Energiewirtschaft	466	358	175 – 183	62 – 61 %
Gebäude	209	119	70 – 72	67 – 66 %
Verkehr	163	160	95 – 98	42 – 40 %
Industrie	283	181	140 – 143	51 – 49 %
Landwirtschaft	88	72	58 – 61	34 – 31 %
Sonstige	39	12	5	87 %
Gesamtsumme	1248	902	543 – 562	56 – 55 %

Als Maßnahmen für das Erreichen seiner ambitionierten Ziele nennt der Klimaschutzplan mit erster Priorität Effizienzmaßnahmen, um den Energiebedarf in allen Sektoren zu verringern, und mit zweiter Priorität die direkte Nutzung erneuerbarer Energien. Welche Schwierigkeiten mit der zweiten Priorität verbunden sind, zeigten die bisherigen Umsetzungen der Klimaschutzziele in Deutschland und der Verlauf der Energiewende.

Abbildung 5 zeigt die Entwicklung des Anteils erneuerbarer Energien im Strom-, Wärme- und Mobilitätssektor. Während im Stromsektor der Trend eine Übererfüllung der bisherigen Ziele erwarten lässt, ist im Wärme- und Verkehrssektor davon auszugehen, dass die Entwicklung nicht ausreicht, um die Ziele für das gesamte Energiesystem zu erreichen. Der Ausbau regenerativer Energien im Strombereich ist dabei keineswegs nur ein deutsches Phänomen; auch in anderen Teilen der Welt, insbesondere in China werden große Kapazitäten errichtet [Vulturius2017]. Allerdings erfolgt dieser Ausbau zurzeit noch parallel zu einem Zubau fossiler Kraftwerke.

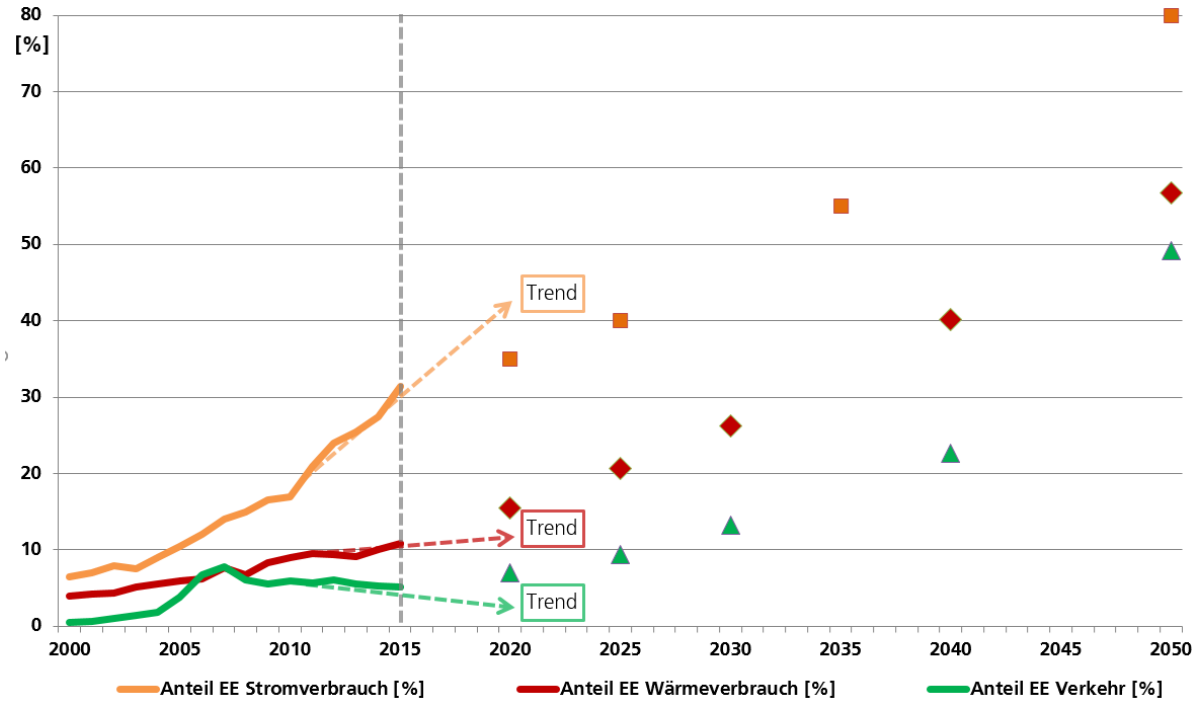


Abbildung 5: Anteil erneuerbarer Energien (EE) am Strom-, Wärme und Mobilitätssektor (Ziele der Bundesregierung für Strom; Ziele für Wärme und Verkehr aus dem Szenario SZEN-15-100 [Nitsch2015]; Trends extrapoliert anhand der Entwicklung in den letzten Jahren).

Der Klimaschutzplan geht davon aus, dass es notwendig sein wird, Strom aus erneuerbaren Energien in andere Sektoren zu transferieren, um dort den Anteil fossiler Rohstoffe und Energieträger zu verringern. Er formuliert die Erwartung, dass sich der Strombedarf durch Sektorenkopplung insgesamt erhöhen wird. Denkbar ist ein Szenario, das Energie- und Produktionssystem verbindet, wie in Abbildung 6 qualitativ dargestellt. In dieser Abbildung wird der Verbrauch im Wärme- und Verkehrssektor durch Effizienzmaßnahmen geringer, und regenerativer Strom wird in den Wärmesektor (Power2Heat), den Verkehrssektor (Power2Fuel, E-Mobility) und die industrielle Produktion (Power2Product bzw. Power2X) transferiert. Der Stromsektor wächst in etwa um die transferierten Beträge.

Welche Voraussetzungen für die Aktivierung von CO_2 mit regenerativer Energie gegeben sein müssen, wird in Kapitel 3 untersucht. Zunächst erfolgt in Kapitel 3.1 eine Betrachtung ausgewählter Aspekte, die aus der deutschen Energiewende für eine Kohlenstoffwirtschaft ohne fossile Kohlenstoffträger abgeleitet werden können. Die benötigten Strommengen sind Thema in Kapitel 3.3.

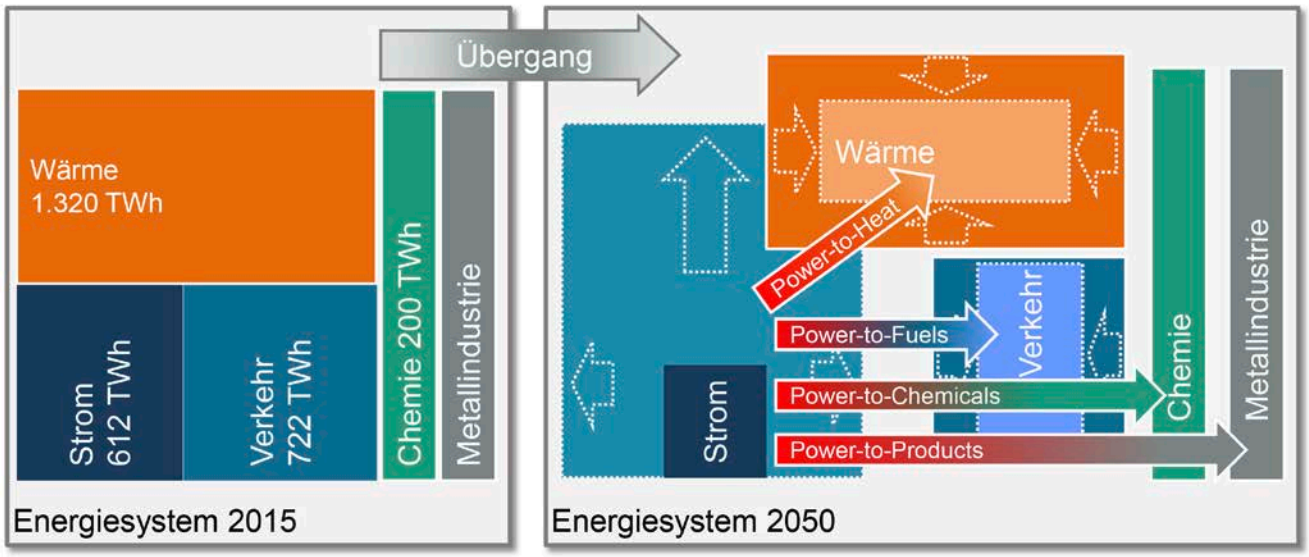


Abbildung 6: Voraussichtliche Entwicklung des Energie- und Produktionssystems (qualitative Darstellung).

3 CO_2 als Rohstoff für chemische Produkte und Treibstoffe

3

3.1 Die Energiewende – Ausgangspunkt für Technologien, die CO_2 in chemische Produkte und Energieträger umwandeln?

Wie in Kapitel 2.3 dargestellt, haben Prozesse, die CO_2 nutzen, um Treibstoffe und chemische Produkte herzustellen, eine wichtige verknüpfende systemische Funktion, die es ermöglicht, den Rohstoffeinsatz von Biomasse zu minimieren und Kohlenstoff in Kaskaden zu nutzen. Wie in Kapitel 3.2 noch ausgeführt wird, ist eine Umsetzung von CO_2 zu chemischen Produkten jedoch nur sinnvoll, wenn die Energie, die für die Umsetzung erforderlich ist, aus Energiewandlungsprozessen stammt, die nicht selbst auch CO_2 produzieren. Mit der deutschen Energiewende [Bund2017a], die vorsieht, ein fossil und nuklear ausgerichtetes Stromsystem auf eine nahezu vollständig regenerative Basis umzustellen, liegen in Deutschland erstmals Rahmenbedingungen vor, die es erlauben, über CO_2 als Rohstoff nachzudenken und die Ansätze eines Wirtschaftens ohne fossile Kohlenstoffträger vorwegnehmen. Die Energiewende bietet dabei ein Entwicklungsumfeld, das wissenschaftliche, technologische, ökologische, soziale und ökonomische Innovationen initiieren kann.

Die Entwicklung im Stromsystem führt weg von klassischen Grundlastkraftwerken wie Kohle- oder Atomkraftwerken zu fluktuierenden Stromproduzenten. Diese variieren sowohl in ihrer Leistung als auch in ihrer zeitlichen Verfügbarkeit. So führen Fluktuationen bei Wind und Sonne zu einem zeitlich und regional schwankenden Angebot an Solar- und Windstrom, was zu extremen Herausforderungen an das elektrische Energieversorgungsnetz führt, in dem Erzeugung und Verbrauch zu jedem Zeitpunkt ausgeglichen sein müssen. Ein Energieausgleichsbedarf besteht immer dann, wenn der Kraftwerkspark aus technischen oder ökonomischen Gründen nicht der Lastkurve folgen kann, also entweder mehr oder weniger Energie bereitsteht als nachgefragt wird. An der Strombörse zeigt sich dies durch besonders hohe (Strommangel) oder niedrige bis negative Preise (Stromüberschuss). Diese Extrema haben – aufgrund des Umbaus des Stromsystems in Deutschland – in den letzten Jahren immer weiter zugenommen. Bisher wird dieser Effekt bei Strommangel durch Spitzenlastkraftwerke bzw. Stromimporte, durch vorhandene Pumpspeicherkraftwerke oder – bei Stromüberschuss – durch kurzfristiges Abregeln und Stromexporte kompensiert. Dieser Effekt, der sich bisher noch mit der

vorhandenen Infrastruktur lösen lässt, wird deutlich zunehmen und eine neue Infrastruktur erforderlich machen. Hierzu gehören kurzfristig der Netzausbau und die Integration von Energiespeichern, um einen besseren zeitlichen Ausgleich zu gewährleisten. Langfristig können Maßnahmen sinnvoll sein, die den Strom dauerhaft aus dem Stromsystem »ausschleusen« und anderen Nutzungspfaden zuführen, da der bilanzielle Überschuss deutlich zunehmen wird.

Anfang 2017 stehen 106 GW konventioneller Erzeugung bereits ca. 100 GW installierte Leistung regenerativer Energien gegenüber [BNetzA2017]. Schon heute ergeben sich dadurch regionale Verschiebungen, die dazu führen, dass große Strommengen dort anfallen, wo der Bedarf geringer ist und die Verteilnetze noch ausgebaut werden müssen. Die potenziellen Stromerzeugungskapazitäten, die über die vorhandene Nachfrage hinausgehen, wurden in den vergangenen Jahren als »Überschussstrom« bezeichnet, ein Begriff, der nicht ganz glücklich gewählt ist. Besser ist es vielleicht, hier von »nicht genutzten Stromerzeugungskapazitäten« oder kürzer »Überschusskapazitäten«, zu sprechen. Sobald diese nicht genutzten Kapazitäten in gewissen Mindeststundenzahlen im Jahr vorliegen, macht es ökonomisch Sinn, neue Verbrauchsoptionen dafür zu schaffen. Eine im Auftrag des BMWi durchgeführte Fraunhofer-Metastudie [Grevé2014], die vorhandene Studien zu dieser Thematik ausgewertet und miteinander verglichen hat, macht deutlich, dass die Überschusskapazitäten, die in den einzelnen Studien prognostiziert werden, eine sehr große Bandbreite haben (siehe Abbildung 7). Die Ergebnisse sind abhängig von den getroffenen Annahmen, die z. B. den Netzausbau und die Stromexport- und die Stromimportbedingungen betreffen. Es lässt sich jedoch feststellen, dass ab einem Anteil von 40 % regenerativer Energie die Überschusskapazitäten deutlich ansteigen. Bis 2030 werden in Abhängigkeit vom Netzausbau als überschüssig installierte, potenzielle Erzeugungsleistung jährlich zwischen 1 und 25 TWh erwartet. Bei Umsetzung der im Netzentwicklungsplan beschriebenen Maßnahmen kann näherungsweise von einer Größenordnung im 20 TWh-Bereich ausgegangen werden [Grevé2014, S. 38].

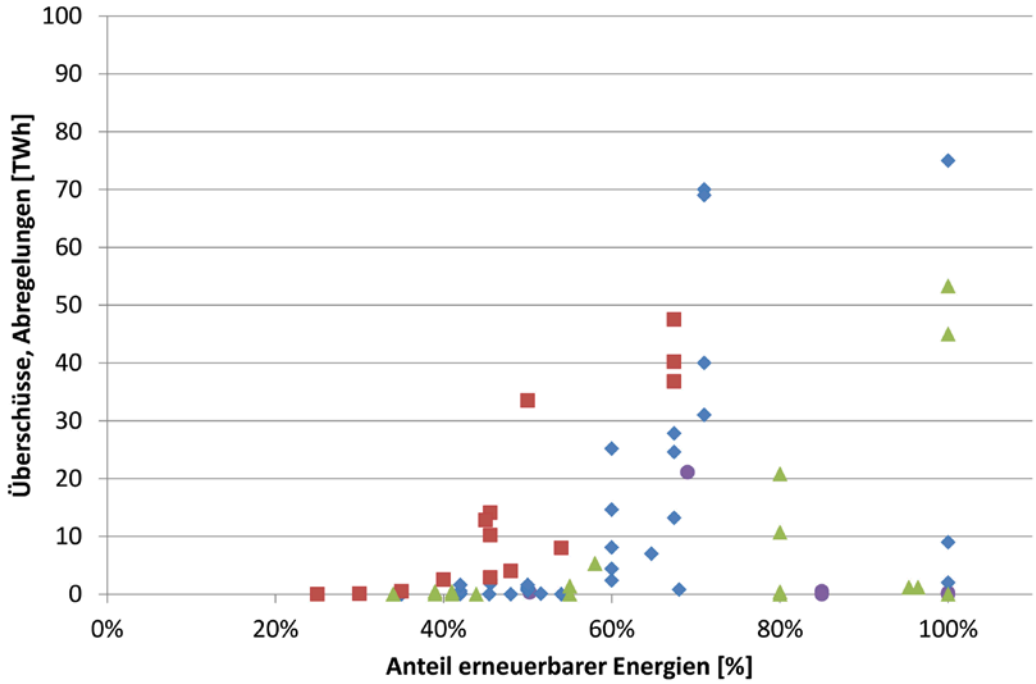


Abbildung 7: Stromüberschusskapazitäten in Deutschland in Abhängigkeit vom Ausbau der erneuerbaren Energien [Grevé2014, S. 34]. Die Symbole beziehen sich auf verschiedene Studien mit unterschiedlichen Annahmen:

- Studien, die von einem optimalen Ausbau von Kraftwerken, erneuerbaren Energien, Stromnetzen und Speichern mit einer europaweit weitestgehend uneingeschränkten Verteilung der Kapazitäten ausgehen.
- Studien, die eine europaweit kosteneffiziente Nutzung von Kraftwerken und Übertragungsnetzen sowie ein rechtzeitig und ausreichend ausgebautes Stromnetz annehmen.
- Studien, die eine europaweit kosteneffiziente Nutzung von Kraftwerken und Übertragungsnetzen annehmen, den Netzausbau aber mit deutlichen Verzögerungen abbilden.
- Deutschlandspezifische Lösung der Energieversorgung; eine Berücksichtigung der Stromnetze sowie des Verbrauchs und der Stromerzeugung im europäischen Ausland findet nicht statt. Importe und Exporte werden eingeschränkt oder nur im Austausch mit (Speicher-) Kapazitäten im Ausland zugelassen.

Die Überschusskapazitäten können beispielsweise dazu verwendet werden, Wärme (Power2Heat) oder einen speicherbaren gasförmigen Energieträger (Power2Gas) zu erzeugen. Beim Power2Heat-Konzept [Eller2015] wird Wärme mithilfe von Strom erzeugt (Gleichung 3). Dies kann über herkömmliche Elektroheizungen oder effizienter über Wärmepumpenheizungen erfolgen.

Power2Heat: Strom → Wärme Gleichung 3

Das Power2Gas-Konzept [Regett2014] beruht darauf, dass in Situationen, in denen mehr regenerative Energie zur Verfügung steht als nachgefragt wird, Strom dazu verwendet wird, Wasser (H_2O) elektrolytisch in die Elemente Wasserstoff (H_2) und Sauerstoff (O_2) zu zerlegen (Gleichung 4). Ein Teil der elektrischen Energie wird so in Form von Wasserstoff

chemisch gespeichert. Dieser Wasserstoff kann dann als Energieträger, in eine noch zu schaffende Wasserstoffinfrastruktur eingespeist, im begrenzten Umfang dem Erdgas über das Gasnetz zugegeben oder für die Herstellung von Produkten verwendet werden. Das Power2Gas-Konzept sieht auch eine katalytische Umsetzung des Wasserstoffs mit CO_2 zu Methan (CH_4) vor (Gleichung 5), das dann als Energieträger über das vorhandene Erdgasnetz verteilt und als Energiespeicher genutzt werden kann. Eine Möglichkeit besteht darin, das regenerativ erzeugte Methan zur »Rückverstromung« in Strommangelsituationen zu verwenden; eine andere Option ist die Verwendung als Treibstoff in Erdgasfahrzeugen. Wie in Kapitel 2.3 gezeigt wurde, können Power2Gas-Verfahren auch grundsätzlich zum Aufbau von Kohlenstoffkreisläufen in der Eisen-/Stahl- und Kalk-/Zementindustrie genutzt werden.

Power2Gas $\quad \text{Strom} + 4H_2O \rightarrow 4H_2 + 2O_2$ Gleichung 4

$4H_2 + CO_2 \leftrightharpoons CH_4 + 2H_2O$ (optional) Gleichung 5

Die Nutzung von Stromüberschusskapazitäten in der Produktion wird als »Power2X«– oder auch -»Power2Products«-Konzept bezeichnet. Dabei kommen verschiedene Ansätze in Frage, die in dem in Abbildung 8 dargestellten »3-Säulen-Konzept« gezeigt werden. Die erste Säule umfasst die direkte Verwendung von Strom für energieintensive Prozesse. Voraussetzung hierfür ist, dass der Betrieb der Prozesse flexibel erfolgen kann. Konkret bedeutet dies, dass die Verfahren bei Vorliegen von Überschusskapazitäten in Volllast und zu anderen Zeiten entweder abgestellt oder in Teillast bzw. bivalent (bspw. Wechsel zwischen Gas und Strom bei der Wärmebereitstellung) betrieben werden. Die zweite Säule umfasst Verfahren, mit denen Ressourcen erschlossen werden können, deren Aufarbeitung bisher nicht wirtschaftlich war. Dabei kann es sich beispielsweise um geologische Lagerstätten mit vergleichsweise geringem Gehalt an Seltenen Erden, Metallschlacken oder um Abfälle handeln, die bisher nicht als Rohstoffquelle genutzt wurden, da ihre Aufarbeitung einen zu hohen Energieaufwand erforderte.

Die dritte Säule beinhaltet »Carbon-Capture-and-Utilisation-(CCU)-Verfahren«, die mithilfe von elektrischem Strom Wasserstoff erzeugen und diesen mit CO_2 zu chemischen Grundstoffen oder Treibstoffen umsetzen (siehe auch »Kapitel 3.2«). Somit führt die dritte Säule zur These zu Beginn dieses Kapitels zurück, dass die Energiewende Rahmenbedingungen bereitstellt, die die Entwicklung von Technologien für eine neue Kohlenstoffwirtschaft ermöglichen. Diese Rahmenbedingungen ergeben sich aus den speziellen Eigenschaften des regenerativen, auf fluktuierende Energiewandler setzenden Stromsystems, die möglicherweise zu Situationen führen, in denen regenerativer Strom extrem günstig verfügbar ist. Dieser Strom kann grundsätzlich die energetische Grundlage zur CO_2-Aktivierung und CO_2-Umwandlung bilden, was Thema von Kapitel 3.2 ist.

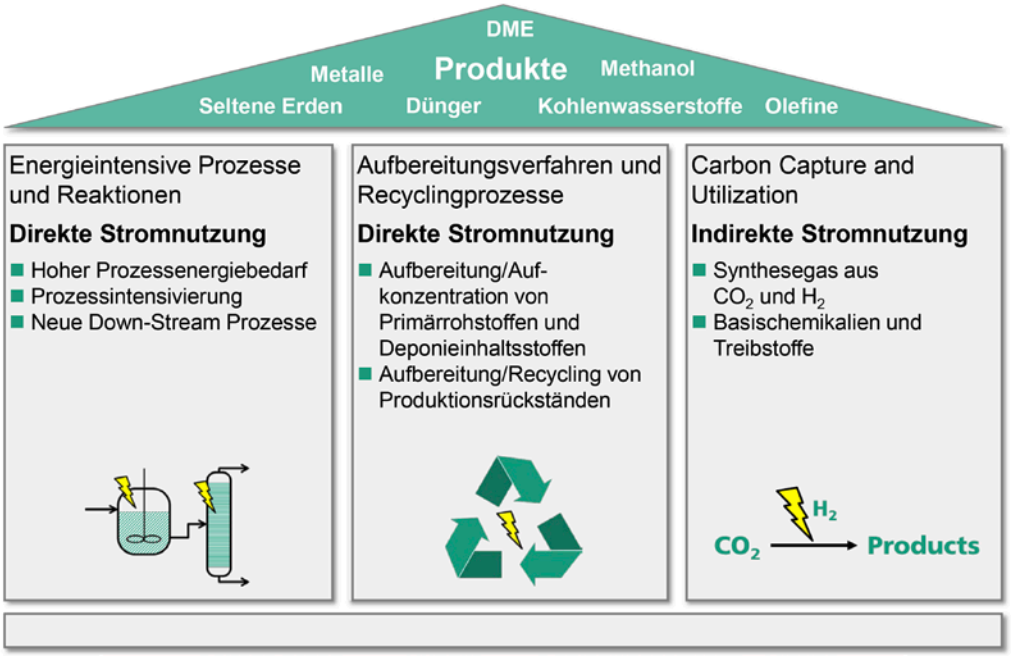


Abbildung 8: Die drei Säulen des Power2Products-Konzepts.

3.2 Chemische Produkte aus CO_2 herstellen? – Eine Pfadanalyse

Reaktivität von CO_2

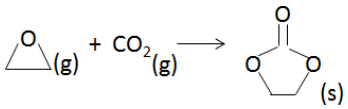
Unter den zum Ende von Kapitel 3.1 eingeführten CCU-Verfahren werden Verfahren verstanden, die in der Regel eine Abtrennung von CO_2 aus stationären Punktquellen[41] wie Kalk-/Zementanlagen, Stahlwerken, Biogasanlagen sowie ggf. Kraftwerken vorsehen und das abgeschiedene CO_2 anschließend zu Produkten verarbeiten. Dabei sind unterschiedliche CO_2-Konzentrationen und Gasreinheiten zu beachten. CCU-Verfahren grenzen sich zu Carbon-Capture-and-Storage-(CCS)-Verfahren ab, indem sie abgetrenntes CO_2 verwerten und es nicht wie CCS-Verfahren in geologischen oder maritimen Systemen deponieren. Beiden Verfahren gemeinsam sind die Abscheidetechniken für CO_2. CCU-Technologien sind als »Verknüpfungstechnologien« eine relevante Zukunftsoption für ein Produktionssystem, das Kohlenstoff nach Nutzung in einer Primäranwendung erneut für weitere Nutzungsformen erschließt. Sie können grundsätzlich einen wichtigen Beitrag leisten, stoffliche Energieträger mit hoher Energiedichte herzustellen [Schlögl2015].

[41] Abscheideverfahren für CO_2 aus der Luft sind hier aufgrund der geringen Konzentration nicht berücksichtigt; eine Übersicht zu möglichen CO_2-Quellen gibt [Bazanella2017, S. 98ff.]

Wie in Kapitel 3 dargestellt, ist CO_2 kein idealer Ausgangsstoff, um Basischemikalien herzustellen. Gründe hierfür sind der hohe Sauerstoffanteil im Molekül und die Energie, die für die meisten Reaktionen mit CO_2 benötigt wird. CO_2 ist eine thermodynamisch sehr stabile Verbindung mit einer Standardbildungsenthalpie ($\Delta_f H^0$) von -394 kJ/mol und einer freien Standardbildungsenthalpie ($\Delta_f G^0$) von -395 kJ/mol [Styring2015, S. 8]. Ob eine chemische Reaktion stattfindet – genauer gesagt, wo das Gleichgewicht zwischen Produkten und Edukten liegt – hängt von der freien Reaktionsenthalpie (Gleichung 6) ab, die sich aus der Differenz der Summen aus den freien Reaktionsenthalpien von Produkten und Edukten berechnet. Ist diese Differenz negativ, ist aus thermodynamischer Sicht von einer Gleichgewichtslage auf der Seite der Produkte auszugehen. Ein Beispiel für eine solche Reaktion ist die Umsetzung von Ethylenoxid mit CO_2 zu Ethylencarbonat (Gleichung 7).

Freie Enthalpie: $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$ Gleichung 6

(mit ΔG: freie Reaktionsenthalpie,
T: Temperatur in K und ΔS: Entropieänderung



Gleichung 7

Ethylenoxid + $CO_2 \rightarrow$ Ethylencarbonat

ΔH = -144 kJ/mol, ΔG = -56 kJ/mol
[Styring2015, S. 9]

Die Reaktion hat eine negative freie Reaktionsenthalpie von ΔG = -56 kJ/mol, so dass aus thermodynamischer Sicht unter Standardbedingungen Ethylenoxid und CO_2 eigentlich zu Ethylencarbonat reagieren sollten. Im genannten Beispiel steht dem Ablauf der Reaktion jedoch im Wege, dass zunächst eine relativ hohe Aktivierungsenergie aufgebracht werden muss. Die Aktivierungsenergie ist erforderlich, um die Eduktmoleküle in einen Übergangszustand zu transferieren, der sie befähigt, die vorgesehene Reaktion einzugehen. Normalerweise kann eine solche Aktivierung durch eine Temperaturerhöhung erreicht werden, da bei höherer Temperatur statistisch ein größerer Anteil der Moleküle die für den Übergangszustand erforderliche Energie aufweist. Das durch das Gleichgewicht beschriebene Konzentrationsverhältnis zwischen Produkten und Edukten wird so in kürzerer Zeit erreicht. Bei niedriger Temperatur ist der Anteil energiereicher Moleküle ggf. zu gering, so dass die Reaktion – makroskopisch betrachtet – »nicht stattfindet«.

Im vorliegenden Fall führt eine Temperaturerhöhung jedoch nicht zum gewünschten Ergebnis. Sie führt hier dazu, dass der Entropieterm ($-T\Delta S$) im Ausdruck für ΔG anwächst. Bei Reaktionen mit gasförmigem CO_2, bei denen als Produkte Flüssigkeiten oder Feststoffe entstehen, ist die Entropieänderung (ΔS) meist negativ, so dass der Entropieterm ($-T\Delta S$) insgesamt einen positiven Wert annimmt. Dies führt dazu, dass ein ΔG, das bei Standardbedingungen noch einen negativen Wert hat, bei Temperaturerhöhung einen positiven Wert annehmen kann; das Gleichgewicht liegt dann nahezu vollständig auf der Seite der Edukte.

Eine wichtige Eigenschaft des CO_2-Moleküls ist deshalb seine Fähigkeit, koordinative Bindungen zu Metallen einzugehen. Hierdurch verändern sich die Ladungsverteilung, die Molekülgeometrie und die chemische Reaktivität. Die entsprechenden Metalle wirken so ggf. als Katalysatoren und setzen die Aktivierungsenergie für eine Reaktion herab. Reaktionen wie die oben erwähnte Reaktion von Ethylenoxid mit CO_2 zu Ethylencarbonat werden durch Einsatz eines Katalysators ermöglicht. Bei anderen Reaktionen erlauben Katalysatoren eine Durchführung der Reaktion bei geringeren Temperaturen und verbessern die Selektivität zu bestimmten Produkten. Katalysatoren und katalytische Verfahren haben deshalb eine entscheidende Rolle bei CCU-Verfahren.

Welche Produkte können aus CO_2 hergestellt werden?

In technischen Prozessen entsteht CO_2 in der Regel durch die als Oxidation oder Verbrennung bezeichnete chemische Reaktion von Sauerstoff mit energiereichen Verbindungen wie Kohle oder Kohlenwasserstoffen. Die relativ große Reaktionsenthalpie, die bei dieser Reaktion als Wärme frei wird, ist der Grund dafür, dass Kohle und Kohlenwasserstoffe bis heute die wesentlichen Energierohstoffe sind. Das bedeutet jedoch im Umkehrschluss, dass Energie aufgewendet werden muss, wenn CO_2 zu Kohlenwasserstoffen umgesetzt werden soll. Nutzt man hierzu Energie, die durch Verbrennung von Kohle oder Kohlenwasserstoffen freigesetzt wird, entsteht mehr CO_2 durch den Verbrennungsvorgang, als im Produkt gebunden werden kann. CCU-Verfahren können deshalb nur sinnvoll sein, wenn die Energie, die zur Umsetzung des CO_2 benötigt wird, regenerativ ist und keine bzw. nur geringe CO_2-Emissionen verursacht.

Die folgenden Gleichungen skizzieren die grundsätzliche Vorgehensweise, die heute bei sogenannten Power2X-Konzepten verfolgt wird, um aus CO_2 die Basischemikalie und den potenziellen Treibstoffzusatz Methanol (CH_3OH) herzustellen.

$$\text{Strom} + 3H_2O \rightarrow 3H_2 + 1{,}5\ O_2 \qquad \text{Gleichung 8}$$

$$3H_2 + CO_2 \rightleftharpoons CH_3OH + H_2O \qquad \text{Gleichung 9}$$

Auf den ersten Blick gleicht die Vorgehensweise dem in Kapitel 3.1 beschriebenen Power2Gas-Konzept, da zunächst durch Elektrolyse Wasserstoff erzeugt wird, der anschließend in einem chemisch-katalytischen Schritt statt zu Methan zu Methanol umgesetzt wird. Ziel des Power2Gas-Konzeptes ist es jedoch, regenerative Energie zu speichern, während Power2X-Konzepte auch das Ziel haben können, eine vermarktbare Basischemikalie herzustellen. Die ökonomische Bewertung des Umwandlungsschritts von Wasserstoff zu Methan orientiert sich deshalb hauptsächlich am Wert der gespeicherten Energie und ist direkt an energetische Umwandlungsverluste gekoppelt. Bei der Herstellung von Basischemikalien können diese Umwandlungsverluste jedoch ggf. wirtschaftlich kompensiert werden, wenn ein Produkt hergestellt wird, das einen höheren Marktpreis erzielt als Wasserstoff.

In Abbildung 2 ist schematisch ein Produktstammbaum der chemischen Industrie dargestellt. Will man CO_2 als Rohstoff in die dargestellten Prozessketten integrieren, ist es wichtig, dass die mit CO_2 hergestellten Basischemikalien in die erdölbasierten Produktionsstrukturen der chemischen Industrie integrierbar sind und nicht vollkommen neue Synthesestammbäume, Produktionskapazitäten und Endprodukte erfordern. Vor diesem Hintergrund ist die Herstellung von Alkoholen von besonderem Interesse, wie das vereinfachte Schema einer stromgeführten CO_2-Raffinerie in Abbildung 9 zeigt. So lässt sich Ethen, eine der wichtigsten Basischemikalien, grundsätzlich sowohl über eine Route mit Methanol als auch mit Ethanol als Zwischenprodukt herstellen. (Vgl. hierzu auch [Bazanella2017, S 62ff.])

Methanolroute zu Ethen:

Elektrolyse:	$\text{Strom} + 3H_2O \rightarrow 3H_2 + 1{,}5\ O_2$	Gleichung 10
Methanolsynthese:	$3H_2 + CO_2 \leftrightharpoons CH_3OH + H_2O$	Gleichung 11
Dimethylether-(DME)-Synthese:	$2\ CH_3OH \leftrightharpoons H_3COCH_3 + H_2O$	Gleichung 12
Dehydratation zu Ethen:	$H_3COCH_3 \leftrightharpoons CH_2{=}CH_2 + H_2O$	Gleichung 13

Ethanolroute zu Ethen:

Elektrolyse:	$\text{Strom} + 6H_2O \rightarrow 6H_2 + 3O_2$	Gleichung 14
Ethanolsynthese:	$6H_2 + 2CO_2 \leftrightharpoons C_2H_5OH + 3H_2O$	Gleichung 15
Dehydratation zu Ethen:	$C_2H_5OH \leftrightharpoons CH_2{=}CH_2 + H_2O$	Gleichung 16

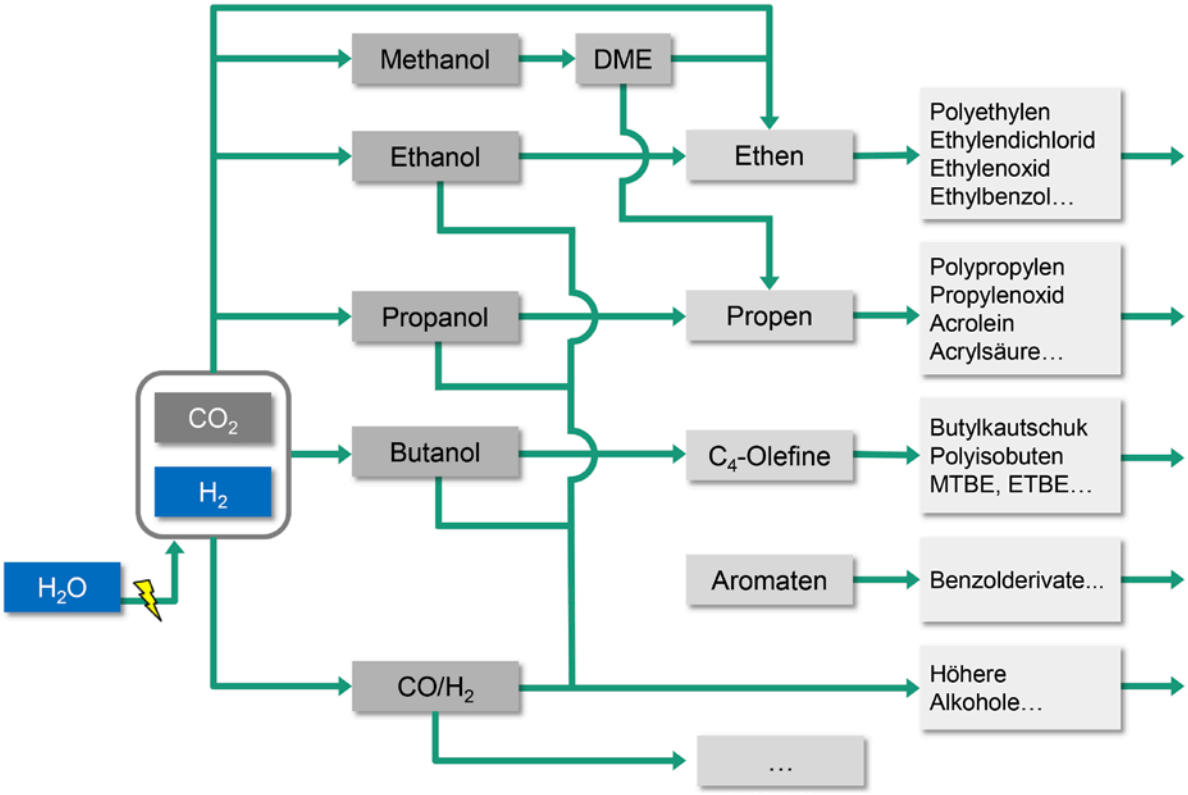


Abbildung 9: Schema Produktstammbaum für chemische Produkte aus Strom und CO_2 (vgl. hierzu Abbildung 2).

Die technische Herstellung von Methanol erfolgt heute durch katalytische Umsetzung von Synthesegas (CO_2/CO/H_2), das durch Kohlevergasung oder Erdgasreformierung erzeugt wird. Eine ausführliche Beschreibung zum Mechanismus der Reaktion findet sich bei Muhler [Muhler2014]. Der Stand der Technik ist in einer aktuellen Studie der DECHEMA dargestellt [Bazanella2017, S 62ff.]. Die Synthese von Methanol kann grundsätzlich über drei miteinander gekoppelte Reaktionen beschrieben werden:

Hydrierung von Kohlenmonoxid:	$CO + 2H_2 \leftrightharpoons CH_3OH$	Gleichung 17
Hydrierung von Kohlendioxid:	$CO_2 + 3H_2 \leftrightharpoons CH_3OH + H_2O$	Gleichung 18
CO-Konvertierung:	$CO + H_2O \leftrightharpoons CO_2 + H_2$	Gleichung 19

Es konnte festgestellt werden, dass nicht CO, sondern das auch im Synthesegas enthaltene CO_2 die bevorzugte Kohlenstoffkomponente zur Bildung von Methanol ist. So haben kinetische Untersuchungen gezeigt, dass die Hydrierung von CO_2 schneller verläuft als die Hydrierung von CO. Nach der von Muhler [Muhler2014] ausgewerteten Literatur führen aus thermodynamischen Gründen jedoch zu hohe CO_2-Konzentrationen zu ungünstigeren Gleichgewichtslagen und damit zu niedrigeren Methanolausbeuten. In der

industriellen Praxis werden deshalb meist Synthesegase mit einem hohen CO-Anteil eingesetzt.

Im Gegensatz zu Methanol wurde die Herstellung von Ethanol, Propanol und Butanol aus Synthesegas noch nicht industriell durchgeführt. Ethanol wird heute hauptsächlich durch Fermentation von Biomasse erzeugt, die auch zur Nahrungsmittelproduktion verwendet werden kann. Da Synthesegas grundsätzlich auch aus lignozellulosehaltigen Biomassen (Stroh, Holzreste, Grünschnitt usw.) hergestellt werden kann, die nicht in Konkurrenz zur Lebensmittelherstellung stehen, bietet die katalytische Umsetzung von Synthesegas zu Ethanol und höheren Alkoholen eine interessante Alternative zur Vergärung. Der Stand der Forschung und die Wirkungsweise unterschiedlicher Katalysatoren für die Ethanolsynthese werden ebenfalls bei Muhler beschrieben [Muhler2014]. Im Gegensatz zur hochselektiven Methanolsynthese ist bei der synthesegasbasierten Herstellung von Alkoholen, die mehr als ein Kohlenstoffatom enthalten, mit Nebenprodukten wie Methanol, Methan und höheren Kohlenwasserstoffen zu rechnen. Die Herstellung von Ethanol aus biomassebasiertem Synthesegas war deshalb Ziel eines mit Mitteln der Europäischen Union und des Europäischen Fonds für eine regionale Entwicklung geförderten nordrhein-westfälischen Projekts [FzJ2009]. Die dort durchgeführten Arbeiten zur Entwicklung von Kupfer/Kobalt-basierten Katalysatorsystemen werden von Anton beschrieben [Anton2016] und aktuell fortgeführt [FONA2016]. Abbildung 10 zeigt, dass es bereits gelungen ist, die Selektivität zu Ethanol von 6 auf 18 % und die Selektivität zu linearen C2-C4-Alkoholen (Ethanol, Propanol und Butanol) von 8 auf 27 % zu erhöhen [Anton2016]. Ziel der fortführenden Arbeiten ist eine weitere Erhöhung der Selektivität zu C2-C4-Alkoholen. C2-C4-Alkohole lassen sich durch eine einfache Dehydratisierung in Olefine wie Ethen umsetzen. Olefine sind wichtige Polymerbausteine für die Herstellung von Kunststoffen und können direkt in die bestehenden Prozessketten integriert werden. Kürzerkettige Alkohole lassen sich auch zu Alkoholen mit längeren Kettenlängen umsetzen. So kann aus Ethanol ein Gemisch höherer Alkohole hergestellt werden, das große Anteile Butanol enthält. Butanol kann dann durch Dehydratation zu dem für die Kautschukindustrie wichtigen Rohstoff Butadien weiterverarbeitet werden [Kraft2017].

Im Folgenden werden weitere Aspekte, die für die Weiterverarbeitung von CO_2 zu chemischen Produkten von Relevanz sind, dargestellt. Diese Aspekte wurden im Rahmen einer Power2X-Pfadanalyse[42] [Stießel2016] erarbeitet, die ökonomische und infrastrukturelle Überlegungen aufgreift und verschiedene Produkte, die sich aus CO_2 und Wasserstoff herstellen lassen, vergleicht.

[42] Die Pfadanalyse wurde im Rahmen des »Virtuelles Institut Strom zu Gas und Wärme« erarbeitet [Virtuell2016].

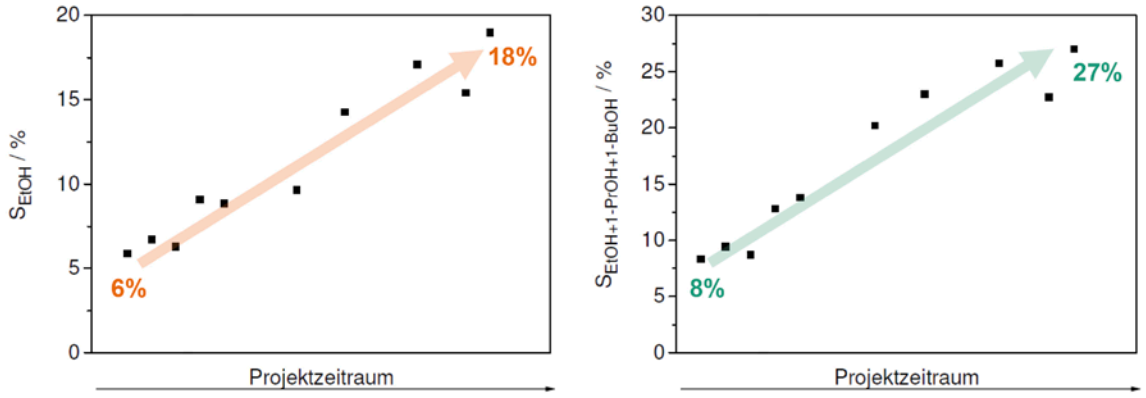


Abbildung 10: Bisherige Entwicklung der Selektivität zu Ethanol sowie zu linearen C2-C4-Alkoholen. Daten stammen von Anton [Anton2016]. Jeder »Messpunkt« repräsentiert eine Katalysatorrezeptur.

Tabelle 2 zeigt mögliche Produktrouten mit Primär- und Folgeprodukten. Die folgenden Betrachtungen orientieren sich beispielhaft an der Ethanolroute, für die mögliche Produkte mit Marktpreisen in Abbildung 11 dargestellt sind. So lässt sich durch Wasserabspaltung aus Ethanol Ethen herstellen und durch Wasserabspaltung und Oxidation Ethanal. Ebenfalls möglich ist die Konversion zu Diethylether. Durch die Verknüpfung von zwei Ethanolmolekülen kann Ethanol zu Butanolen umgesetzt werden [Kraft2017]. Mit bereits bekannten Verfahren, die zwischenzeitlich ihre Bedeutung verloren hatten, können aus den Butanolen simultan verschiedene Butene erzeugt werden, die dann u. a. auch unter Mitverwendung von Ethanol zur Herstellung von Ethyl-tert-Butylether (ETBE) eingesetzt werden können.

Tabelle 2: Produktlinien, Primär- und Folgeprodukte für CO_2 und Wasserstoff nach [Stießel2016].

Produktroute	**Primärprodukt**	**Folgeprodukte**
Ethanol	Ethanol	Butanole, Butene, Ethanal, Ethen
Methanol	Methanol	Dimethylether (DME), Benzin, Methylal, 1-Buten, Propen
Ammoniak	Ammoniak	Harnstoff, Salpetersäure
Fischer-Tropsch	Produktspektrum: Benzin, Diesel, Kerosin, Butan, Paraffinwachse, Petrolether, Propen	

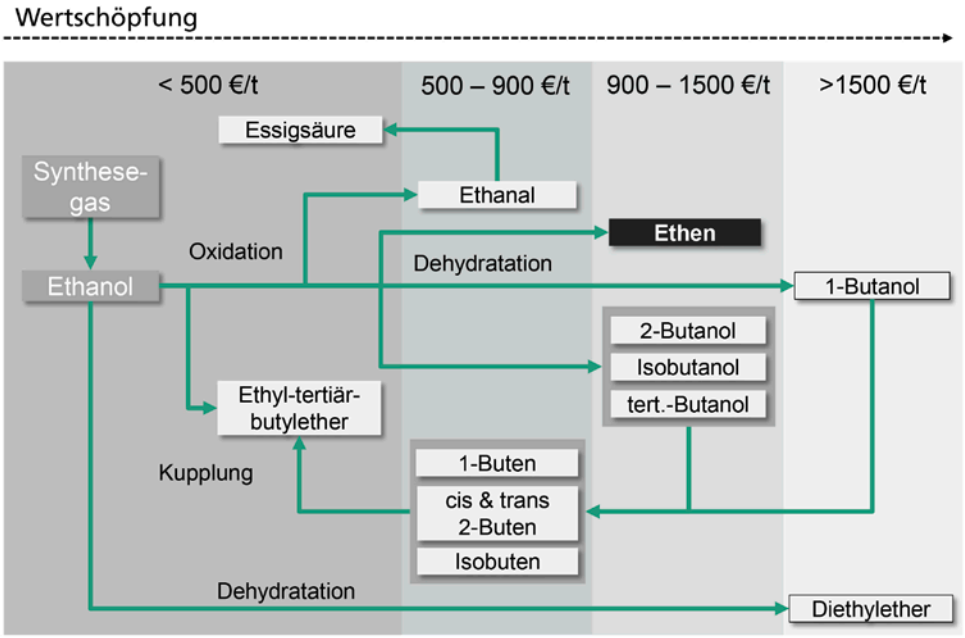


Abbildung 11: Wertschöpfungskette durch mögliche Weiterverarbeitung von Ethanol mit Marktpreisen für ausgewählte Produkte [Stießel2016].

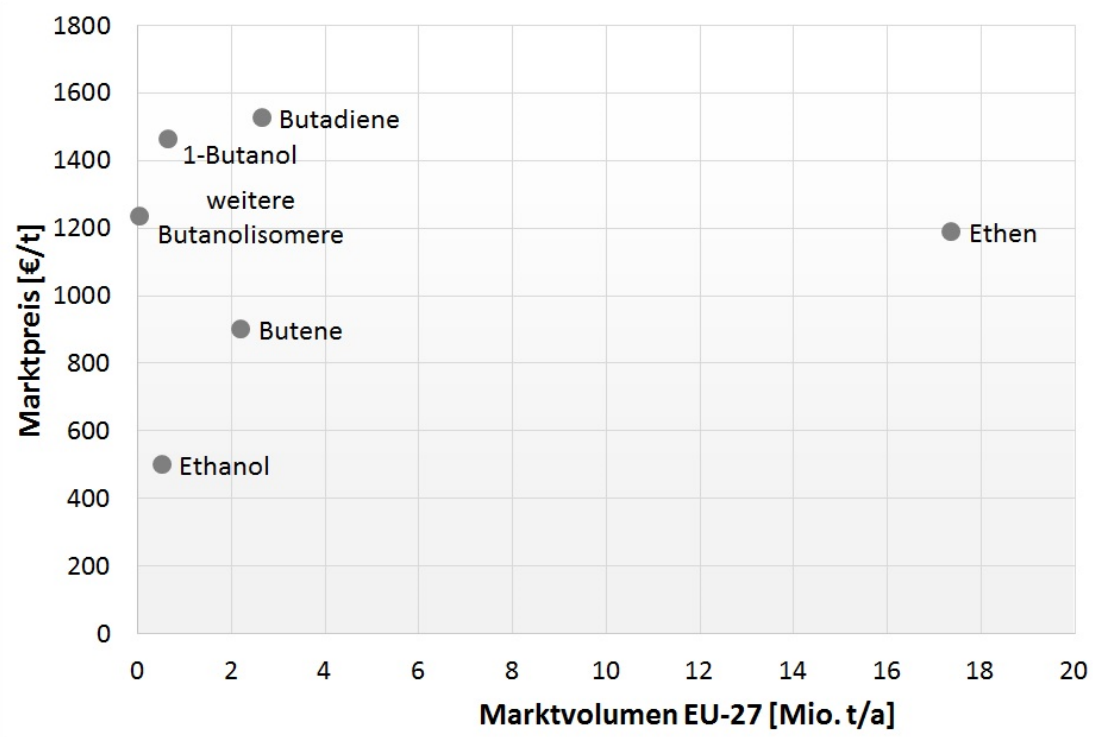


Abbildung 12: Preis-Marktvolumen für ausgewählte Produkte der Ethanolroute; Daten aus: [ProdCom2011].

Unter den heutigen Marktbedingungen ist zu berücksichtigen, dass bei einem Produkt wie 1-Butanol – das derzeit zwar einen hohen Marktpreis hat, aber nur in geringen Mengen produziert wird – der Marktpreis ungünstig beeinflusst werden kann, wenn es in größeren Mengen auf den Markt kommt. In Abbildung 12 ist deshalb der Zusammenhang zwischen Marktpreis und Marktvolumen für Produkte der Ethanolroute dargestellt. Es wird deutlich, dass Ethen unter den heutigen Marktbedingungen ein sehr interessantes Produkt darstellt, da sowohl Marktpreis als auch Markvolumen vergleichsweise hoch sind. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass sich die Nachfrage nach Butanol zukünftig verändern kann, wenn die Rohstoffgrundlage der chemischen Industrie nicht mehr erdölgebunden wäre. Gegebenenfalls steigt in einem solchen Fall die Nachfrage nach Butanol, weil es Zugang zu Butadien und damit auch zu Kautschuk bietet.

Thonemann [Thonemann2017] und Stießel [Stießel2016] untersuchten im Rahmen ihrer Arbeiten auch mögliche CO_2-Punktquellen, die in Deutschland bzw. in Nordrhein-Westfalen zur Verfügung stehen. Abbildung 13 zeigt mögliche Quellen in Deutschland. Dabei wird zwischen Quellen mit verschiedenen CO_2-Anteilen im Gas unterschieden. Stießel setzte in seiner Arbeit Art und Lage von CO_2-Quellen in Zusammenhang mit Potenzialen erneuerbarer Energien, geplanten Stromtrassenführungen sowie einer Transport- und Abnehmerinfrastruktur für mögliche Produkte. Für die Verteilung von Ethen steht in Deutschland grundsätzlich eine Pipelinestruktur bereits zur Verfügung. Die Pipeline verläuft vom Hafen in Rotterdam über Antwerpen und die Chemieregion bei Köln bis nach Ludwigshafen [ARG2016]. Die nach Norden verlaufende Leitung versorgt Betriebe in den Regionen Rheinberg, Oberhausen und Marl mit Ethen. Der in Richtung Süden verlaufende Abschnitt erschließt die Chemie- und Kunststoffbetriebe bei Frankfurt und Ludwigshafen. Eine südliche Erweiterung der Pipeline verbindet Ludwigshafen und Münchsmünster. Die größten Ethen-Produzenten in Deutschland sind die Unternehmen INEOS Olefins mit jährlich 1,165 Mio Tonnen Ethen, die BP Gelsenkirchen mit rund 1,05 Mio Tonnen und das Unternehmen LyondellBasell in Wesseling mit ca. 1,04 Mio Tonnen Ethen [NRW2015 S. 64, Petrochemicals2015].

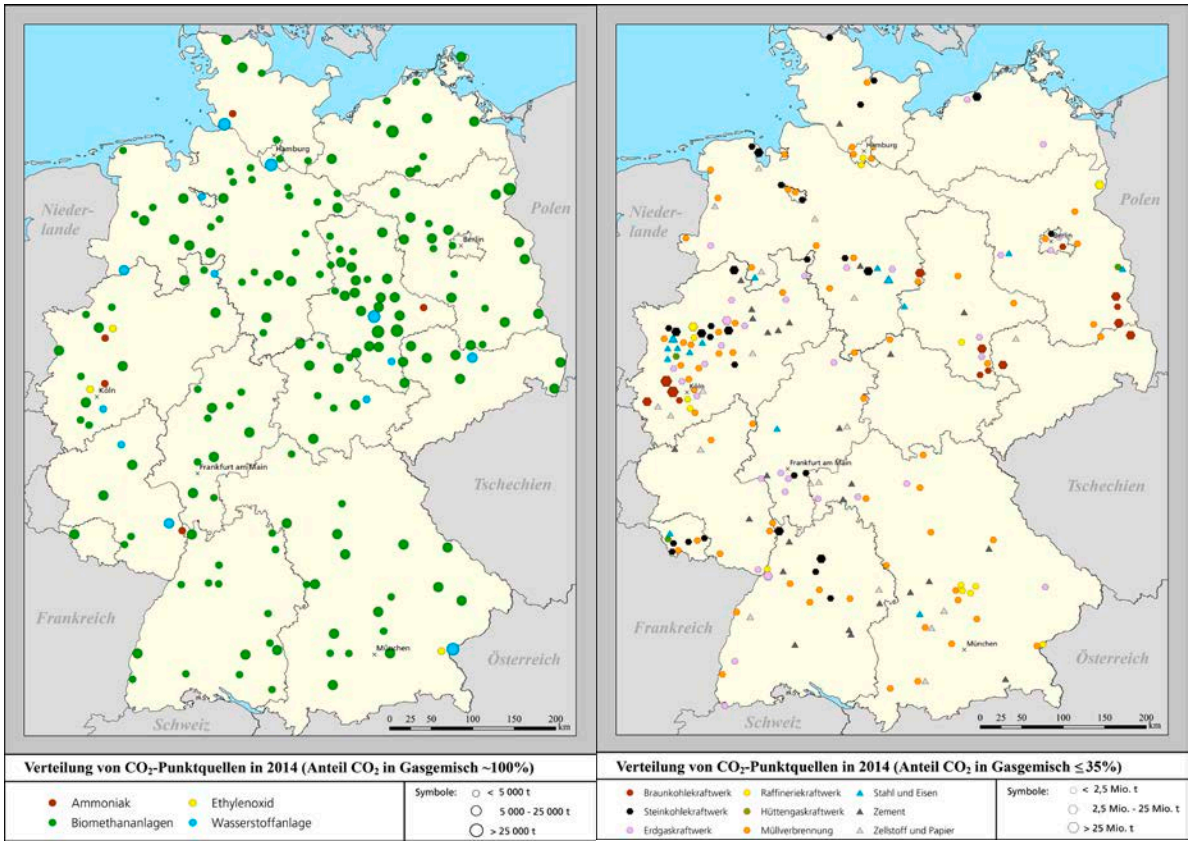


Abbildung 13: Potenziell nutzbare CO_2-Quellen in Deutschland [Thonemann2017]. Im linken Teil der Grafik sind CO_2-Quellen mit nahezu hundertprozentiger CO_2-Konzentration im Gas dargestellt. Im rechten Teil sind CO_2 Quellen aufgeführt, die geringere CO_2-Anteile im Gas aufweisen.

Die in diesem Abschnitt dargestellte Pfadanalyse zeigt, dass die Herstellung von Ethanol aus CO_2-haltigen Gasen und die Weiterverarbeitung von Ethanol zu Ethen eine aussichtsreiche Möglichkeit sein kann, um Power2X-Technologien zu etablieren und Kohlenstoff nach seiner Umwandlung zu CO_2 einer sekundären Nutzung zuzuführen. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, mit welchen Rohstoffkosten die Herstellung von Ethen über die Ausgangsstoffe CO_2 und Wasser verbunden ist. Abbildung 14 vergleicht deshalb die Rohstoffkosten für unterschiedliche Prozessrouten zur Herstellung von Ethen[43]. Investitions- und sonstige Betriebskosten werden in der vorliegenden Betrachtung nicht berücksichtigt.

Marktdaten [IKB2017] ist zu entnehmen, dass der Preis für die Naphthafraktion zwischen den Jahren 2009 und 2015 Schwankungsbreiten von 250–800 €/t hatte. Der Naphthapreis ist vom Erdölpreis abhängig, der im gleichen Zeitraum zwischen 50 und

[43] Es ist zu berücksichtigen, dass es sich bei der dargestellten Betrachtung nicht um eine Kostenkalkulation im eigentlichen Sinne handelt. Vielmehr soll deutlich werden, wie sich die Rohstoffkosten bei den beschriebenen Prozessrouten zueinander verhalten.

120 US$/bbl schwankte. Der Preis für Ethen variierte im gleichen Zeitraum zwischen 400 und 1200 €/t.[44]

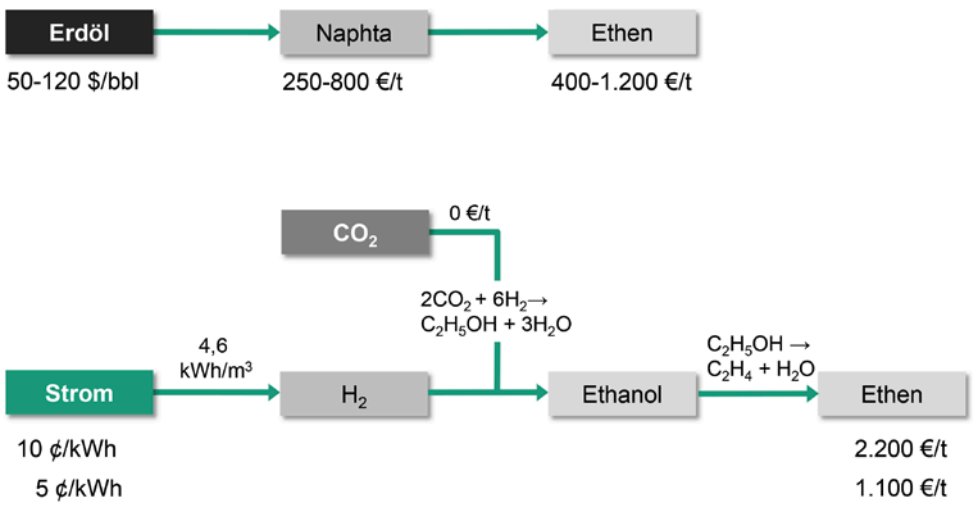


Abbildung 14: Vergleich unterschiedlicher Prozessrouten zur Herstellung von Ethen in Bezug auf die Rohstoffkosten; Investitions- und sonstige Betriebskosten werden in der vorliegenden Betrachtung nicht berücksichtigt, Berechnungsgrundlage s. [45].

Für die stromgeführte CO_2-Route wurde angenommen, dass Ethen über den in Gleichung 14 bis 16 beschriebenen Pfad hergestellt wird. Bei der durchgeführten Rechnung wurde vernachlässigt, dass neben Ethanol auch andere Produkte – wie Methanol, Propanol, Methan und höhere Kohlenwasserstoffe – entstehen. Diese Produkte beinhalten jedoch eine relevante Wertschöpfung, und ein Vergleich mit der Naphtharoute ist nicht abwegig, da auch Naphtha nicht vollständig zu Ethen, sondern ebenfalls zu anderen Produkten weiterverarbeitet wird. Weiterhin wurde vorausgesetzt, dass CO_2 kostenlos zur Verfügung gestellt wird. Für den verwendeten Wasserstoff wurde angenommen, dass er mithilfe einer alkalischen Wasserelektrolyse bereitgestellt wird, wofür 4,6 kWh Strom pro Normkubikmeter Wasserstoff angesetzt wurden [Tamme2002]. Bei einem Strompreis von 0,1 €/kWh ergeben sich so Stromkosten von 2200 €/t Ethen[45], was etwa

[44] Der Literatur [CHEManager2013] ist zu entnehmen, dass Ethen günstiger aus Schiefergas als aus Erdöl herzustellen ist, wenn der Ölpreis über 100 US$/bbl steigt.

[45] 1 mol Ethen = 1 mol Ethanol = 6 mol H_2/ → 28 t Ethen = 12 t H_2 (6000 kmol H_2)/
→ 1 t Ethen = 0,43 t H_2 (214 kmol H_2)/ 1 kmol H_2 = 22,4 Nm^3/
→ 1 t Ethen = 0,43 t H_2 = 214 kmol H_2 = 4800 Nm^3
1 m^3 H_2 = 4,6 kWh
→ 1 t Ethen = 0,43 t H_2 = 214 kmol H_2 = 4800 Nm^3 = 22 080 kWh
10 Cent /kWh
→ 1 t Ethen = 0,43 t H_2 = 214 kmol H_2 = 4800 Nm^3 = 22 080 kWh = 220 800 Cent = 2208 €/t
5 Cent /kWh → 1108 €/t.

dem Dreifachen des oben angegebenen Naphthapreises entspricht. Bei einem Strompreis von 0,05 €/kWh halbieren sich die Stromkosten auf 1100 €/t Ethen, dem 1,4-Fachen des oben angegebenen maximalen Naphthapreises von 800 €/t. Die angenommenen Strompreise bewegen sich im Rahmen von Strompreisen für Industrie und Gewerbe in NRW, die der Literatur zu entnehmen sind [Energieagentur2016]. Die Preise betragen hier zwischen 0,03 und 0,12 €/kWh. Großverbraucher mit jährlichem Stromverbrauch deutlich über 1000 MWh bezahlen Preise im Bereich von 0,04 €/kWh [Energieagentur2016].

Aus den Berechnungen wird deutlich, dass die Prozessroute aus CO_2 und Strom zur Herstellung von Ethen zum jetzigen Zeitpunkt wirtschaftlich nicht mit der Erdölroute konkurrieren kann. Die Preisdifferenz ist jedoch nicht allzu groß, so dass sich die wirtschaftliche Bewertung zukünftig noch ändern kann. Forschung und Entwicklung sollten deshalb in diesem Bereich weiter vorangetrieben werden. Damit die Verfahren konkurrenzfähig werden, sind günstigere Strompreise als heute, Emissionszertifikate für CCU-Anwendungen, steigende Erdölpreise sowie technische Innovationen, die die Investitionskosten und die Effizienz der Wasserelektrolyse verbessern, notwendig. Die Überlegungen zeigen, dass die Ethanolroute ein hohes Potenzial beinhaltet und dass es sinnvoll ist, die oben beschriebenen Arbeiten, die die Entwicklung von Katalysatoren und katalytischen Verfahren zur Synthese von linearen C2-C4-Alkoholen zum Ziel haben, zu intensivieren. Unter anderem diese Forschungs- und Entwicklungsaufgabe wird deshalb im Rahmen des Carbon2Chem®-Projekts weiterverfolgt, das im Exkurs I beschrieben wird. Das ambitionierte Ziel dieses Projekts ist es, über die Eisen-/Stahlindustrie eine Kohlenstoffkaskade zur chemischen Industrie aufzubauen. In Kapitel 3.3 wird untersucht, welche Ressourcen in Deutschland zur Erschließung von CO_2 als Rohstoff zur Verfügung stehen.

3.3 Wie viel Strom wird zur CO_2-Aktivierung benötigt? – Eine orientierende Betrachtung der Situation in Deutschland

Im vorliegenden Kapitel werden verschiedene Aspekte des vorliegenden Diskurses noch einmal aufgenommen und auf die Situation in Deutschland übertragen. Als Gedankenexperiment wird dabei angenommen, dass die chemische Produktion in Deutschland komplett auf CO_2 zurückgreift, wobei sich die grundsätzliche Frage stellt, wie viel CO_2 in einem solchen Fall zur Verfügung steht und wie viel Strom aus regenerativen Quellen benötigt wird, um die erforderliche CO_2-Menge zu erschließen. Als Hintergrundszenario wird angenommen, dass Strom zu 100 % regenerativ bereitgestellt wird, d. h. dass CO_2-Quellen wie fossil betriebene Kraftwerke stehen nicht zur Verfügung und auch aus der

Stahl- und Zementindustrie nur die CO_2-Mengen berücksichtigt, die auf den stofflichen Umsätzen zur Reduzierung des Eisenerzes und auf dem Brennen des Kalksteins beruhen (vgl. Abbildung 15).[46]

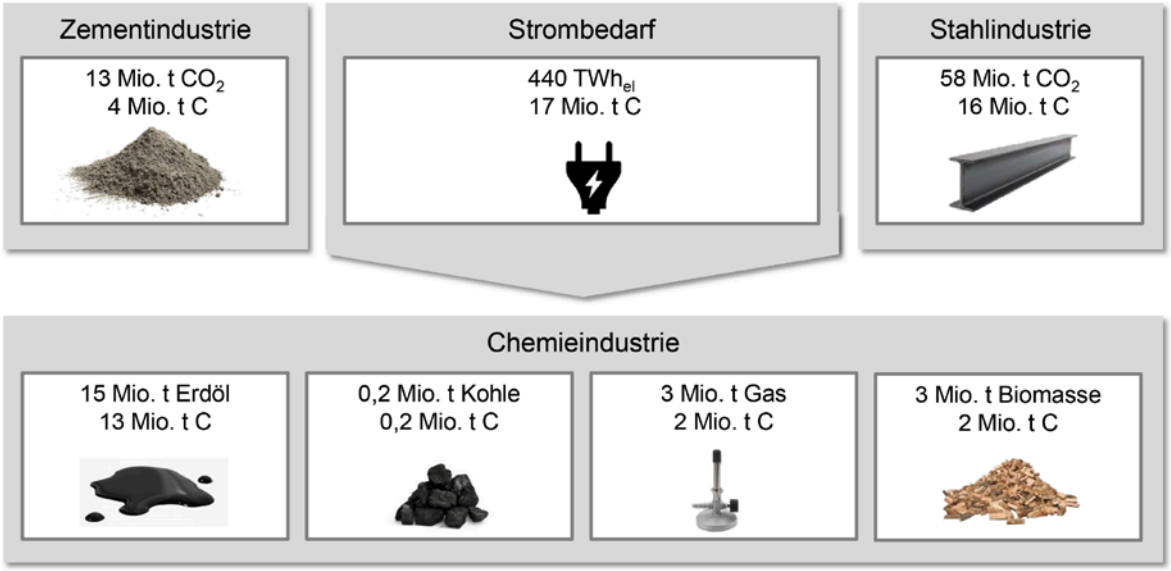


Abbildung 15: Kohlenstoffbedarf der deutschen chemischen Industrie im Vergleich zu relevanten CO_2-Quellen und zum Strombedarf bei einer hypothetischen, rein auf CO_2 basierenden Chemie – Berechnung siehe Text.

Für die Betrachtung lässt sich auf Angaben zur Rohstoffbasis zurückgreifen, die die Enquete-Kommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen in ihrem Abschlussbericht nennt [NRW2015, S. 21]. Demzufolge deckte die deutsche chemische Industrie im Jahr 2011 ihren Kohlenstoffbedarf mit 15,3 Mio t Erdöl, 0,2 Mio t Kohle, 3 Mio t Erdgas und 2,7 Mio t Biomasse, was in Summe einer Menge von etwa 17 Mio t Kohlenstoff entspricht. Dem gegenüber stehen CO_2-Emissionen, die auf rohstoffliche Nutzungen zurückgehen. Allein die Kohlenstofffracht[47] aus der Stahlindustrie mit 16 Mio t Kohlenstoff [RWI2013, S. 173], [Ketelaer2014, S. 4] und aus der Kalk-/Zementindustrie mit 5 Mio t Kohlenstoff [VDZ2010, S. 18] reicht grundsätzlich aus, um den Kohlenstoffbedarf der chemischen Industrie zu decken.

Die zur Aktivierung von 17 Mio t Kohlenstoff benötigte elektrische Energie beträgt 440 TWh. Sie berechnet sich aus der Wasserstoffmenge, die mithilfe einer Wasserelektrolyse erzeugt und eingesetzt werden muss, um CO_2 zu organischen Produkten umzusetzen.[48] Diese Strommenge entspricht etwa 80 % des deutschen Nettostromverbrau-

[46] CO_2 aus Biogasanlagen bleibt an dieser Stelle unberücksichtigt.

[47] Durch stoffliche Umsätze ohne Energiewandlung.

[48] Es wurde angenommen, dass zur Herstellung von 1 m^3 H_2 4,6 kWh elektrischer Strom erforderlich sind, und dass Wasserstoff vollständig zu Methanol umgesetzt wird.

ches im Jahr 2011 (535 TWh/a) [Quaschning2016]. Hieraus lässt sich ableiten, dass die diskutierten Stromüberschusspotenziale, die sich aus dem fluktuierenden Charakter der erneuerbaren Energien ergeben, bei weitem nicht ausreichen, um eine wirklich relevante Produktionskapazität für die Aktivierung von CO_2 zu erzielen. Berücksichtigt man dann noch, dass erneuerbarer Strom auch in andere Sektoren transferiert werden soll/muss, um den CO_2-Ausstoß dieser Sektoren zu verringern, lässt sich erahnen, welche gewaltigen Mengen erneuerbarer Energie benötigt werden. So beschreibt Quaschning [Quaschning2016] in seiner Studie zur Sektorenkopplung, welche Anforderungen sich aus den Pariser Klimaschutzzielen im Hinblick auf den Ausbau der erneuerbaren Energien ergeben. Er geht dabei davon aus, dass für herkömmlichen Stromverbrauch, Raumwärme und Warmwasser, Industrieprozesswärme, Verkehr sowie Speicher- und Übertragungsverluste ein Strombedarf von insgesamt 3000 TWh/a[49] besteht [UBA2014, S. 9], der mithilfe ambitionierter Effizienzmaßnahmen ggf. auf 1300 TWh/a gesenkt werden kann. Dem gegenüber stehen die theoretisch unter nachhaltigen Gesichtspunkten aus regenerativen Energien erreichbaren Ausbaupotenziale, die in einer DLR-Studie von Kreyenberg [Kreyenberg2015] untersucht wurden. Der Autor wertet unterschiedliche Studien aus und erhält – abhängig von den in den Studien getroffenen technischen Annahmen – für Deutschland ein langfristig technisch erzeugbares Strompotenzial von 400–4.000 TWh/a. Kreyenberg selbst schätzt das verfügbare Potenzial konservativ auf 1.000 TWh/a [Kreyenberg2015, S. 14].

[49] Das Umweltbundesamt geht in seinem Bericht »Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050« [UBA2014] in seinem Szenario davon aus, dass die CO_2-Emissionen bis 2050 auf nahe Null sinken. Als Voraussetzungen dafür werden eine vollständige Umstellung auf erneuerbare Energien und die Ausschöpfung von Effizienzpotenzialen genannt. »Die Folge davon ist ein sehr stark ansteigender Stromverbrauch um alle Sektoren zu versorgen: Der langfristige Endenergiebedarf an Strom in einem treibhausgasneutralen Deutschland wurde mit ca. 466 TWh/a, an Brennstoffen mit 305 TWh/a, an Kraftstoffen mit 552 TWh/a und an regenerativen Einsatzstoffen für die chemische Industrie mit 282 TWh/a abgeschätzt«. Hinzu kommt noch der Bedarf im Verkehr. »Werden diverse Verluste bei Bereitstellung und Transport der Endenergieträger berücksichtigt, ergibt sich in einer groben Näherung eine notwendige Nettostromerzeugung von rund 3.000 TWh/a.« Das UBA geht dabei davon aus, dass ein Teil dieses Stroms im Ausland produziert werden muss [UBA2014, S. 9].

Exkurs I: Hüttenwerke als Kohlenstoffquelle

Außer Kraftwerken[50] und Ammoniakanlagen[51] kommen als Kohlenstoffquellen grundsätzlich Kalk-/Zementanlagen, Stahlwerke und Biogasanlagen in Frage. Von besonderem Interesse sind Stahlwerke, da sie sehr große Kohlenstoffmengen zur Reduktion der Eisenerze umsetzen und die Hüttengase neben CO_2 auch das reaktivere Kohlenmonoxid enthalten.

Im Jahr 2016 wurden in den Stahlwerken in Deutschland 18 Mio t kohlenstoffhaltige Rohstoffe[52] zur Verarbeitung von 41,4 Mio Tonnen Eisenerz verwendet [Stahl2017, S. 9]. Der in diesen Rohstoffen enthaltene Kohlenstoff findet sich prozessbedingt als CO_2 und CO in den unterschiedlichen Prozessgasen eines Hüttenwerks wieder. Da neben CO_2, CO und Methan auch Wasserstoff in Teilströmen der Hüttengase enthalten ist, lässt sich grundsätzlich aus Hüttengasen auch ohne zusätzlichen Wasserstoff ein Synthesegas erzeugen, wie es bereits heute zur Herstellung von Methanol verwendet wird. Hüttengase enthalten gewaltige Kohlenstoffmengen. Rechnet man die in Deutschland eingesetzten 18 Mio Tonnen kohlenstoffhaltigen Verbindungen [Stahl2017, S. 9] auf der Basis eines Marktanteils von 2,6 % an der Weltrohstahlproduktion hoch, beträgt allein die in der Stahlindustrie weltweit umgesetzte Kohlenstoffmenge etwa ein Viertel bis ein Drittel der Kohlenstoffmenge, die sich global aus nachhaltig angebauter Biomasse gewinnen lässt[26] (vgl. hierzu Kapitel 2.3). Hüttengase stellen somit eine interessante Rohstoffbasis für chemische Produkte dar.

Der Verhüttungsprozess über die Hochofenprozessroute ist komplex und erfordert das Zusammenwirken unterschiedlicher Produktionseinheiten wie Sinter- und Pelletierungsanlagen, Hochöfen, Oxygenkonvertern sowie Guss- und Walzwerken. Hinzu kommen meist noch standorteigene Kraftwerke sowie Kokereien. In einer Kokerei wird Hochofenkoks hergestellt, indem die in der Kohle enthaltenen flüchtigen Bestandteile wie Teer, Benzol, Schwefelwasserstoff und Ammoniak unter Luftabschluss durch Erhitzen aus der Kohle ausgetrieben werden. Die Energie- und Materialflüsse der einzelnen Produktionsanlagen sind in einem Hüttenwerk auf komplexe Weise mit-

[50] Bei Kraftwerken ist unklar, welche Kapazitäten nach 2050 benötigt werden.

[51] Ammoniak wird aus Wasserstoff und Stickstoff hergestellt, wobei der Wasserstoff heute durch Reformierung von Erdgas bereitgestellt wird. Bei diesem Prozess fällt hochreines CO_2 an, das grundsätzlich für chemische Synthesen genutzt werden kann. Dieser Herstellungsweg ist jedoch aufgrund des Erdgaseinsatzes nur in einer fossilen Kohlenstoffwirtschaft von Bedeutung. Als Alternative kommt die Wasserstoffbereitstellung durch Elektrolyse in Frage. Dabei fällt kein CO_2 an.

[52] Diese setzen sich aus 11,7 Mio t Kokskohle, 1,0 Mio t Petrolkoks, 4,6 Mio t Einblaskohle und 0,6 Mio t Fremdkoks zusammen [Stahl2017, S.9].

einander verschaltet und voneinander abhängig, so dass man einen solchen Industriestandort auch als »integriertes Hüttenwerk« bezeichnet [Remus2013, S. 9].

Eines der weltweit größten integrierten Hüttenwerke ist der Anlagenverbund von thyssenkrupp Steel Europe in Duisburg. Der Standort erstreckt sich mit einer Fläche von 10 km² über die Duisburger Stadteile Beek, Beekerwerth, Marxloh/Schwelgern, Bruckhausen und Hamborn. Mit seinen vier Hochöfen kann das integrierte Hüttenwerk insgesamt 30 000 t Roheisen pro Tag[53] erzeugen und zwei Konverterstahlwerke versorgen. Das Hochofengas wird zum Teil als Mischgas zum Beheizen der Kokerei und von Walzwerköfen oder im betriebseigenen Kraftwerk zur Stromerzeugung genutzt. Annähernd der gesamte Prozessdampf- und Strombedarf des Standorts wird aus Prozessgasen (Hütten- oder Kuppelgase) gedeckt, die im integrierten Hüttenwerk anfallen. Auch interne und kommunale Wärmenetze werden so mit Wärme versorgt [Thyssen2009].

Die durchschnittlichen CO_2-Emissionen europäischer Hochöfen liegen bei 1630 kg CO_2 pro Tonne Roheisen, der Durchschnitt der besten Hochöfen (10 %) bei 1475 kg CO_2 pro Tonne [Oles2015]. Als Zielwert für den Hochofen (der mit etwa 71 % zu den CO_2-Emissionen im Stahlprozess beiträgt) werden durch die Europäische Union 1328 kg CO_2 pro Tonne Roheisen vorgegeben [Oles2015]. Dieser Wert liegt unterhalb des Wertes, der sich aus der chemisch erforderlichen Kohlenstoffmenge berechnen lässt, die zur Reduktion des Eisenerzes benötigt wird (1519 kg CO_2/t Roheisen [Oles2015]), so dass neue Technologieansätze erforderlich sind, die entweder andere Reduktionsmittel[54] verwenden oder eine nachgeschaltete Abscheidung und Nutzung des Kohlenstoffs beinhalten. Ansätze und Entwicklungen, die neben dem Recycling von Stahlschrott (vgl. hierzu [BDSV2016]) grundsätzlich zur weiteren Vermeidung von CO_2-Emissionen in Betracht gezogen werden können, sind im JRC Reference Report des Joint Research Centre der Europäischen Union [Remus2013, S. 538ff.] sowie im Bericht der IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEAGHG) [Santos2013, S. 6ff.] beschrieben.

Die Verringerung von CO_2-Emissionen in der Stahlindustrie ist auch Gegenstand des vom BMBF geförderten Projekts Carbon2Chem® [FONA2016]. Ziel dieses Projekts ist es, einen möglichst großen Teil der Hüttengase als Ausgangsstoff für chemische Produkte zu nutzen. Im Unterschied zu anderen Projekten, in denen beispielsweise CO_2 aus

[53] Konjunkturabhängig unterscheiden sich die produzierten Mengen von diesen Angaben.

[54] Die Verwendung von Wasserstoff als Reduktionsmittel für den Hochofenprozess wird u. a. im europäisch geförderten Projekt GrInHy (Green Industrial Hydrogen) untersucht, an dem acht Partner aus fünf EU Staaten beteiligt sind; darunter die Salzgitter AG [Salzgitter2016], [GrInHy2016]. Zentrales Element von GrInHy ist ein Hochtemperaturelektrolyseur, der auf dem Produktionsgelände der Salzgitter Flachstahl GmbH betrieben werden soll.

Kraftwerken oder aus Hochofengasen [FResMe2017] abgeschieden und zu Methanol umgesetzt werden soll, werden bei Carbon2Chem® alle Hüttengase (Hochofen-, Koksofen- und Konvertergas) mit ihren unterschiedlichen CO_2-, CO- und H_2-Anteilen betrachtet (vgl. hierzu Abbildung 16 und Tabelle 3).

Ein weiterer Schwerpunkt ist die Systemintegration von Strom aus erneuerbaren Energien. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Interaktionen der verschiedenen Prozesse in einem integrierten Hüttenwerk ein komplexes System bilden, dessen Optimierung auf vielen Jahren Betriebserfahrung aufbaut. Greift man in dieses System ein, sind viele Aspekte zu berücksichtigen: So muss beispielsweise die Energie, die in dem zu Chemieprodukten umgesetzten Hüttengas enthalten war und die zur Produktion von Wärme oder zur Herstellung von elektrischem Strom in standorteigenen Anlagen benötigt wird, durch die Einkopplung regenerativer Energie ersetzt werden. Weiterhin wird für die Wasserstoffbereitstellung mit Elektrolyse elektrischer Strom benötigt. Hier ist zu prüfen, welche Energiemengen unter Annahme bestimmter Szenarien zur Verfügung stehen und wo das Optimum für CO_2-Einsparung und Wirtschaftlichkeit liegt. Auch die Kopplung von typischerweise kontinuierlich arbeitenden Prozessen wie der chemischen Katalyse mit Prozessen wie der Elektrolyse und der Hüttengasproduktion, die aufgrund des fluktuierenden Charakters von Sonne und Windenergie und den variablen Produktionsbedingungen im Stahlwerk diskontinuierlich arbeiten, ist zu betrachten.

Tabelle 3: Zusammensetzung von Kokerei-, Hochofen- und Konvertergas in einem integrierten Hüttenwerk nach Angaben der thyssenkrupp AG [BMBF2016].

	Kokereigas	**Hochofengas**	**Konvertergas**
Stickstoff (N_2)	5 %	49 %	**14 %**
Wasserstoff (H_2)	61 %	4 %	**4 %**
Kohlenmonoxid (CO)	6 %	25 %	**65 %**
Kohlendioxid (CO_2)	2 %	23 %	**17 %**

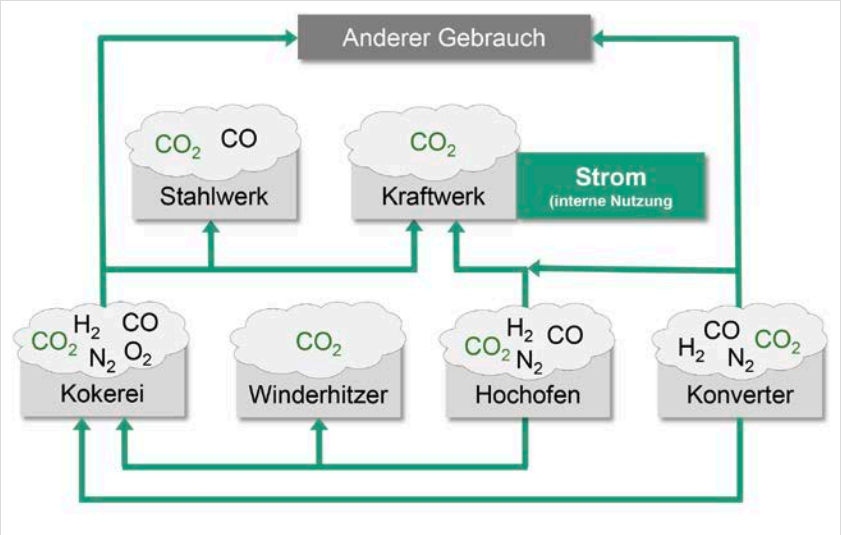


Abbildung 16: Hüttengasanfall und Komponenten in einem integrierten Stahlwerk.

Die systemischen Fragen betreffen jedoch nicht nur den Betrieb im Hüttenwerk selbst. Von großer Bedeutung sind auch Aspekte, die die Interaktion des integrierten Hüttenwerks mit dem Stromnetz betreffen. Eine weitere relevante Fragestellung ist, wie die CO_2-Mengen, mit denen chemische Produkte hergestellt werden, zukünftig im Rahmen des Emissionshandels und durch die Erneuerbare-Energie-Richtlinie der Europäischen Union bewertet werden. Die aktuellen Regelungen unterstützen die Einbindung von CO_2 in chemische Produkte nicht. Da aber durch die Herstellung chemischer Produkte aus CO_2 fossiler Kohlenstoff substituiert werden kann, halten die Autoren eine veränderte Bewertung an dieser Stelle für sachgerecht. Werden CO_2-Einsparungen erzielt, stellt sich die Frage, welche Geschäftsmodelle es geben wird, in denen Stahlindustrie und chemische Industrie Power2X-Verfahren betreiben und wie CO_2-Gutschriften verrechnet werden.

Exkurs II: Chemische Produkte in einem Prozessschritt direkt aus Wasser und CO_2 herstellen? – Gibt es eine Renaissance der Elektrochemie?

Die bisher beschriebenen Power2X-Verfahren speichern regenerative elektrische Energie als chemische Energie in organischen Kohlenstoffverbindungen. Dies erfolgt, indem zunächst energiereicher molekularer Wasserstoff erzeugt wird. Nach Reaktion des Wasserstoffs mit CO_2 ist ein Teil der ursprünglich eingesetzten Energie in einem organischen Stoff chemisch gebunden. Dieses Schema ist grundsätzlich an der Vorgehensweise orientiert, die, wie bereits Schlögl in seiner Veröffentlichung »Von der Natur lernen – Chemische CO_2-Reduktion« [Schlögl2015] herausstellt, bei der Photosynthese stattfindet. Allerdings sind bei der Photosynthese Zucker und Zuckerpolymere ($\{C_6H_{12}O_6\}$) die Energiespeicherstoffe, während technologisch Kohlenwasserstoffe, Alkohole und Ether die wesentlichen Stoffklassen zur Energiespeicherung bilden. Ein weiteres Merkmal der technischen Prozessroute besteht in der Mehrstufigkeit, die dazu führt, dass mit Wasserstoff ein Zwischenprodukt vorliegt, für das separate technische und ggf. infrastrukturelle Rahmenbedingungen zu beachten sind.

Photosynthese: $H_2O + CO_2 + \text{Energie} \rightarrow 1/6\ \{C_6H_{12}O_6\} + O_2$ Gleichung 20

Zweistufige Methanolsynthese:

Elektrolyse: $3H_2O + \text{Energie} \rightarrow 3H_2 + 1{,}5O_2$ Gleichung 21

Katalyse: $3H_2 + CO_2 \rightarrow CH_3OH + H_2O$ Gleichung 22

Dementsprechend gibt es in der Grundlagenforschung Bestrebungen, ein sogenanntes »künstliches Blatt« zu entwickeln, mit dem, vergleichbar zur Photosynthese, ein Energieträger direkt aus Sonne und Wasser in einer einzigen technischen Struktur erzeugt wird, ohne dass eine Wasserelektrolyse und ein katalytisches Verfahren über das Zwischenprodukt Wasserstoff systemisch miteinander verknüpft werden müssen. Das Prinzip ist bei Schlögl [Schlögl2015] mit Verweis auf die Primärquellen [Lewis2006], [Hu2013], [McKone2013], [Santori2014] beschrieben. Eine weitere grundsätzliche Möglichkeit, Sonnenenergie mithilfe einer einzigen technischen Struktur in energiereichen chemischen Stoffen zu speichern, bieten auch photokatalytische Verfahren. Zwar ist es Ziel der meisten Entwicklungsarbeiten, Wasser mithilfe von Sonnenlicht und photokatalytisch aktiven Verbindungen in Wasserstoff und Sauerstoff zu zersetzen, jedoch ist grundsätzlich auch eine direkte CO_2-Reduktion möglich. Das bisher am häufigsten untersuchte photokatalytische System ist Titanoxid [Bazanella2017, S. 54]. Damit derarti-

ge Systeme mit der Verfahrenskombination Photovoltaik/Elektrolyse konkurrieren können, müssen jedoch Gesamtenergieausbeuten von über 10 % erreicht werden, was im UV-Bereich bereits möglich ist [Dechema2009], [Zeitler2009]. Im Bereich des sichtbaren Lichts liegen die Systeme zurzeit noch deutlich unter diesem Wert. Um die Zielausbeute zu erreichen, ist es u. a. erforderlich, das Absorptionsmaximum des Photokatalysators in den sichtbaren Bereich des Lichts zu verschieben, was beispielsweise durch Dotierung des Katalysatorkristallgitters mit Fremdstoffen erfolgen kann. Nach Angaben der Dechema [Dechema2015] ist für eine technische Anwendbarkeit noch eine deutliche Verbesserung der Systemeffizienz erforderlich, was wahrscheinlich nur langfristig möglich ist. Eine direkte photokatalytische CO_2-Reduktion ist noch weiter von einer Anwendung entfernt als eine photokatalytische Herstellung von Wasserstoff.

Um in kürzerer Zeit zur Entwicklung von einstufigen Verfahren zu kommen, scheint es aussichtsreicher zu sein, elektrochemische Verfahren zu entwickeln, die Basischemikalien wie Methanol, Ethanol und/oder Ethen in einem Prozessschritt direkt aus CO_2 und Wasser erzeugen.

Elektrochemische Verfahren kommen derzeit nur für eine Reihe spezifischer Reaktionen großtechnisch zum Einsatz, da sie gegenüber chemischen Verfahren, die Wärme als Energieform einsetzen, vergleichsweise hohe Investitions- und Betriebskosten erfordern [Schmidt2003, S. 353ff.]. Hierin liegt einer der Gründe, warum elektrochemische Verfahren in Deutschland in den letzten 20 Jahren kaum weiterentwickelt und die akademische Lehre und Forschung sogar kontinuierlich reduziert wurde [GDCh2010]. Eine Abkehr von fossilen Kohlenstoffträgern und die Rahmenbedingungen der Energiewende führen möglicherweise dazu, dass kostengünstiger »CO_2-freier« Strom zur Verfügung steht. Hierdurch verändern sich auch die wirtschaftlichen und ökologischen Rahmenbedingungen für elektrochemische Verfahren.

Die theoretischen Grundlagen der Elektrochemie sind gut untersucht und werden zur mathematischen Modellierung von Reaktionen sowie zur Auslegung der Anlagen angewandt. Forschungsbedarf besteht bei der technischen Anwendung der Elektrochemie für neue Synthesewege. Weiterhin ist es wichtig, durch integrierte Forschung an Katalysatoren und Anlagentechnik neue Verfahrenskonzepte für effiziente kleine, z. B. modulare Produktionsbetriebe zu entwickeln [Dechema2015]. Elektrochemische Verfahren werden von vielen Protagonisten als sogenannte »enabling technologies« angesehen [Botte2014], also als Technologien, die das Potenzial haben, bedeutende Leistungssprünge zu erzielen. Es sind deshalb zurzeit verschiedene Aktivitäten zu beobachten, Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet der Elektrosynthese zunächst wiederzubeleben und anschließend weiter voranzutreiben[55]. So wurde innerhalb der

[55] Elektrochemie ist z. B. auch ein Schwerpunkt am DECHEMA-Forschungsinstitut www.dechema-dfi.de.

Fraunhofer-Gesellschaft ein internes Forschungsvorhaben unter Beteiligung von zehn ihrer Forschungsinstitute[56] initiiert, das die Entwicklung bzw. Weiterentwicklung elektrochemischer Prozesse zum Ziel hat. Ein wesentlicher Schwerpunkt[57] des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung von Elektrosynthesen, die in einem Verfahrensschritt CO_2 und Wasser zu Basischemikalien umsetzen. Ziel ist es u. a., Ethen mit Gasdiffusionselektroden[58] und C_1 bis C_4-Alkohole mit einem Hochdruck-Elektrosynthese-Reaktor[59] (Abbildung 17) herzustellen. Ausgewählte Aspekte zur Hochdruckelektrosynthese werden im Folgenden beschrieben.

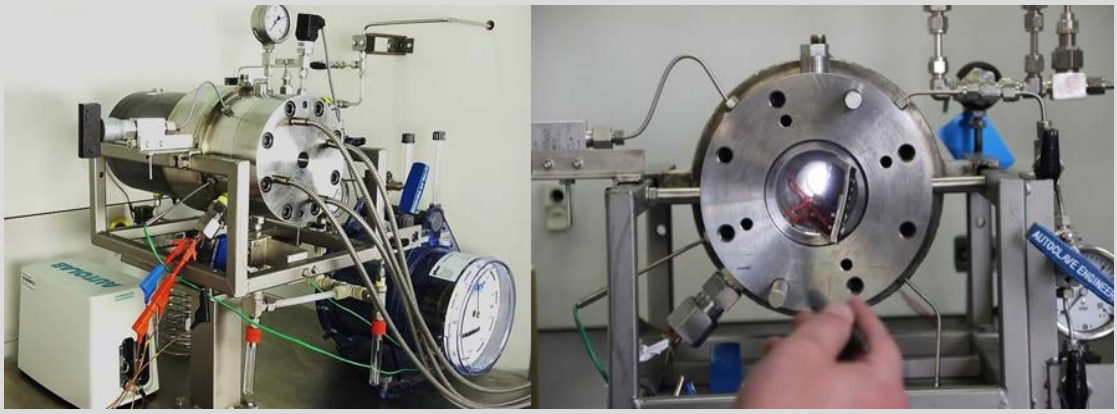


Abbildung 17: Hochdruckreaktor (Technische Daten: Volumen: 300 ml, variables Volumen: 150 ml, max. Druck: 150 bar, max. Temperatur: 200 °C).

CO_2 kann elektrochemisch zu Kohlenwasserstoffen, Alkoholen und organischen Säuren umgesetzt werden; ein großtechnisches Verfahren existiert hierzu jedoch noch nicht. Die Verfahren, die in der Literatur beschrieben werden, beruhen zumeist auf grundlegenden Laboruntersuchungen, die unter Umgebungsdruck und -temperatur arbeiten und in Wasser gelöstes CO_2 umsetzen. Nachteilig bei dieser Vorgehensweise ist, dass relativ hohe Überspannungen für die Aktivierung des CO_2 benötigt werden, so dass die mit der CO_2-Umsetzung konkurrierende Bildung von Wasserstoff dominiert, und der Prozess wenig selektiv für organische Produkte ist [Qiao2014]. Weiterhin führen geringe Konzentrationen des gelösten CO_2 zu geringen Umsatzraten und niedrigen Faraday-Effizienzen [Abbott 2000]. Die Selektivität und Effizienz des Prozesses

[56] Fraunhofer UMSICHT, Fraunhofer ITWM, Fraunhofer IVV, Fraunhofer IST, Fraunhofer ISC, Fraunhofer IKTS, Fraunhofer IGB, Fraunhofer ICT, Fraunhofer IAP, Fraunhofer WKI.

[57] Weitere Schwerpunkte sind die elektrochemische Wasserstoffperoxid-Herstellung, die Weiterentwicklung der Hochtemperaturelektrolyse und deren Kopplung mit der Fischer-Tropsch-Synthese, Prozessmodellierung, die Entwicklung elektrochemisch aktiver Membranen und Elektroden, die ökonomische und ökologische Verfahrensbewertung sowie die Entwicklung von Verwertungskonzepten.

[58] Fraunhofer IGB.

[59] Fraunhofer UMSICHT.

kann grundsätzlich verbessert werden, wenn der CO_2-Partialdruck erhöht wird, um die Konzentration von gelöstem CO_2 in Wasser zu vergrößern. Die höhere Konzentration von gelöstem CO_2 an der Elektrode führt zu höheren Stromdichten und zu einer größeren Umsetzung von CO_2.

Der beschriebene Effekt lässt sich grundsätzlich noch weiter verbessern, indem der Druck weiter erhöht und die Elektrosynthese unter überkritischen Bedingungen durchgeführt wird. Überkritische Bedingungen werden in CO_2 bei 73 bar und 31 °C erreicht. Im überkritischen Zustand zeigt CO_2 gleichzeitig die Eigenschaften einer Flüssigkeit (hohe Dichte) und eines Gases (geringe Viskosität)[60]. Führt man elektrochemische Synthesen in CO_2 mit geringen Mengen gelösten Wassers durch, verschiebt sich die Selektivität des Prozesses von der Bildung von Wasserstoff zur Bildung organischer Produkte. Veröffentlichungen zu Elektrosynthesen in überkritischem CO_2 sind selten. Eine Übersicht über den Stand der Forschung gibt hier Melchaeva [Melchaeva2017]. Die meisten Arbeiten betrachten die Verbesserung der Leitfähigkeit, da die Leitfähigkeit eines Elektrolyten, der nur aus überkritischem CO_2 mit darin gelöstem Wasser besteht, zu gering ist, um Elektrosynthesen durchzuführen [Bartlett2010], [Abbott1999]. Obwohl elektrochemische Verfahren grundsätzlich das Potenzial haben, nach dem Vorbild der Photosynthese CO_2 und Wasser in einem einzigen Prozessschritt zu Basischemikalien umzusetzen, liegen nur wenige verfügbare Publikationen zur elektrochemischen Umsetzung von überkritischem CO_2 vor [Abbott 2000], [Zhao2004], [Bandi1993]. Bis zu einer industriellen Umsetzung sind noch umfangreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten erforderlich.

[60] Überkritisches CO_2 kann auch als Lösemittel eingesetzt werden; bekannt ist vor allem die Entkoffeinierung von Kaffee [Sims1990].

4 Resümee

Um die Auswirkungen des Klimawandels zu begrenzen, hat die internationale Staatengemeinschaft im Pariser Abkommen das Ziel festgeschrieben, eine globale Temperaturerhöhung von zwei Grad Celsius zu unterschreiten. Dabei strebt sie konkret ein Maximum von 1,5 Grad als ihrer Einschätzung nach gerade noch erreichbare Größe an. Das bedeutet, dass in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts nur noch so viele Treibhausgase ausgestoßen werden dürfen, wie durch Kohlendioxid-Senken aus der Atmosphäre wieder entfernt werden können. Die Zusammenarbeit der Staaten beim Pariser Abkommen, die steigende Bedeutung erneuerbarer Energien und die grundsätzliche Möglichkeit, neue, nicht-fossile Rohstoffe in industrielle Verfahren zu integrieren, sind Faktoren, die Hoffnung machen, das Ziel zu erreichen. Mit der Entwicklung von Technologien, mit denen aus CO_2 chemische Produkte hergestellt werden können, kann es grundsätzlich auch gelingen, visionäre Konzepte für eine chemische Industrie zu entwickeln, die ohne fossile Rohstoffe auskommt. Dem gegenüber stehen jedoch gravierende Hemmnisse, die sich vor allem aus der sehr kurzen zur Verfügung stehenden Zeitspanne und der Größenordnung der zu lösenden Aufgaben ergeben. So stehen, wenn man die Kernaussagen der wissenschaftlich anerkannten Modelle des IPCC als gegeben voraussetzt, für die erforderliche Transformation lediglich wenig mehr als 30 Jahre zur Verfügung. Ein Zeitraum, der in Relation zu den vom WBGU [WBGU2011] als Vergleich herangezogenen großen Transformationen Neolithische und Industrielle Revolution äußerst kurz ist. Hinzu kommt, dass diese Transformationen sich evolutionär und historisch »ereigneten«, während die aktuelle Transformation gestaltet und geplant werden muss.

In den vorhergehenden Betrachtungen (Kapitel 2.3 und 3.3 sowie Abbildung 4) wurde gezeigt, welche Größenordnungen regenerativer Energien und welche Kohlenstoffmengen benötigt werden. Unklar ist, ob es gelingt, die erforderlichen Energiemengen insgesamt und Biomassen als Kohlenstoffquelle in der erforderlichen regionalen Verteilung bereitzustellen. Wie lange und in welchem Umfang fossile Stoffe noch benötigt werden, hängt u. a. von diesen Faktoren ab. Zu berücksichtigen ist auch, dass die Entwicklung der Weltbevölkerung vor dem Hintergrund des heutigen Wirtschaftsmodells eher einen zunehmenden Ressourcenverbrauch erforderlich machen würde. So gehen Szenarien davon aus, dass die Weltbevölkerung von aktuell sieben Milliarden Menschen bis zur Mitte des Jahrhunderts noch auf etwa neun Milliarden Menschen anwachsen wird [WBGU2011, S. 132f.]. Treffen Erwartungen zu, die von einer Verringerung der Geburtenrate bis Mitte des Jahrhunderts ausgehen, ist ab 2050 eine Stabilisierung der Weltbevöl-

kerungszahl bzw. ein leichter Rückgang möglich[61]. Mindestens bis dahin muss jedoch eine wachsende Zahl von Menschen mit Lebensmitteln, Gütern und Energie versorgt werden. Dass vor diesem Hintergrund weltweit eine gerechte Angleichung von Wohlstandniveaus erfolgt und der individuelle Konsum in den wohlhabenden Teilen der Welt auf dem heutigen Niveau bleiben kann, ist in Zweifel zu ziehen. Es gilt jedoch, gefährliche Risiken, die den Bestand menschlicher Gesellschaften betreffen und die sich wesentlich aus dem fehlenden Zugang von Menschen zu bezahlbarer Nahrung und bezahlbarer Energie ergeben, zu vermeiden [SRU2016, S. 103ff.], [WBGU2011, S. 92]. Die Begrenzung des Klimawandels erfordert deshalb die Berücksichtigung und Gestaltung globaler Zusammenhänge, was nur durch internationale Zusammenarbeit erfolgreich geschehen kann. Die Beschlüsse von Paris verweisen hier auf einen möglichen Weg, der auch berücksichtigt, dass soziale Faktoren und Gerechtigkeitsfragen zwischen Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländern von entscheidender Bedeutung sind.

Angesichts der Größe und Einzigartigkeit der bestehenden Aufgabe sowie der komplexen Zusammenhänge, die durch die Interaktion technischer und naturwissenschaftlicher, sozialer und kultureller sowie politischer und wirtschaftlicher Faktoren gegeben sind, ist es nicht möglich, alle Schritte der anstehenden Transformation vorherzusehen und zu planen. Weiteres Abwarten würde jedoch bedeuten, die Atmosphäre weiter mit Treibhausgasen anzureichern und die menschlichen Lebensgrundlagen zu gefährden. Handlungen müssen jetzt und in naher Zukunft erfolgen, obwohl noch nicht endgültig klar ist, welche Technologien sich als zielführend erweisen, welche (Energie-)Rohstoffe in welchem Maße und an welcher Stelle zur Anwendung kommen und wie internationale gesellschaftliche Prozesse gestaltet werden können, um das Ziel zu erreichen. Das bedeutet nichts anderes, als eingeschlagene Pfade gegebenenfalls zu korrigieren und Zeiträume, die normalerweise für Investitionszyklen angesetzt werden, zu verkürzen. Von Bedeutung ist dabei auch die Entwicklung international abgestimmter, ökologisch wirksamer Rahmenbedingungen für Märkte sowie von geeigneten Finanzierungsinstrumenten.

Auch wenn sie unter den heutigen Randbedingungen wirtschaftlich zu einem großen Teil nicht mit fossil-basierten Verfahren konkurrieren können, stehen grundsätzlich Technologien zur Verfügung oder können in den nächsten Jahren bzw. Jahrzehnten entwickelt werden[62], die es ermöglichen, Biomasse und CO_2 in die Produktionsstrukturen der Grundstoffindustrie zu integrieren. Da nachhaltig erzeugte Biomasseressourcen begrenzt sind, bietet es sich an, Anwendungen zu entwickeln, die eine kaskadenförmige

[61] Aktuelle Prognosen der UNO gehen jedoch eher von einem weiteren Anstieg aus. Hiernach steigt die Zahl der Menschen bis 2050 auf 9,7 Milliarden und bis 2100 auf 11,2 Milliarden an [UN2017, S.1]. Grund hierfür ist, dass die Geburtenrate wahrscheinlich nicht so schnell sinkt wie bisher angenommen wurde.

[62] Einen Überblick gibt die aktuelle Technologie Studie der DECHEMA [Bazanella2017].

Nutzung des Kohlenstoffs erlauben. In diesem Fall lässt sich durch geschickte Verschaltung von Prozessen der in Biomasse enthaltene Kohlenstoff grundsätzlich konsekutiv nutzen, indem CO oder CO_2, die beispielsweise bei einer Primärnutzung in der Stahlindustrie gebildet werden, in einem nachgeschalteten Prozess zu Produkten weiterverarbeitet werden. Da noch unklar ist, zu welchen Anteilen Biomasse, CO_2 und/oder Hüttengase zur Herstellung von Basischemikalien und Treibstoffen zukünftig verwendet werden und mit welchen Verfahren dies geschieht, müssen miteinander konkurrierende Verfahren parallel und im Wettbewerb zueinander entwickelt werden. Flexible Optionen bieten dabei Verfahren, die grundsätzlich auf mehrere Kohlenstoffträger anwendbar sind. So können beispielsweise biotechnische und chemisch-katalytische Verfahren eingesetzt werden, um aus Gasen, die CO, CO_2 und Wasserstoff enthalten, chemische Produkte herzustellen. Als Prozessmedien können Hüttengase und Synthesegase aus der Biomassevergasung verwendet werden. Die Verfahren lassen sich grundsätzlich auch auf CO_2-haltige Gase aus industriellen Anwendungen übertragen, wenn mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff ein geeigneter Reaktionspartner zur Verfügung gestellt wird. Gasreinigungs- und Gasaufbereitungsverfahren kommen dabei eine wichtige Rolle zu.

Insbesondere die Umwandlung von CO_2 erfordert große Energiemengen, die nahezu ohne CO_2-Emissionen bereitgestellt werden müssen. Eine Rohstoffwende ist deshalb unmittelbar mit einer Energiewende, die ausreichend Energie für die Kopplung mit dem Produktionssektor bereitstellt, verknüpft. Da eine Energieversorgung aus Kernfusionsprozessen vorläufig nicht möglich sein wird, muss der Ausbau regenerativer Energien soweit wie möglich vorangetrieben werden. Ohne ausreichende Mengen an regenerativer Energie bleiben viele Konzepte wirkungslos.

Um die Transformation zu einer neuen Kohlenstoffwirtschaft nachhaltig zu gestalten, ist die Neuausrichtung von Industriestandorten eine wichtige, die ganze Gesellschaft betreffende Aufgabe. Für Deutschland, als Land, das im hohen Maße vom Technologieexport lebt, bedeutet dies, dass die Entwicklung neuer Verfahren eine Schlüsselkompetenz ist, die es zu erhalten gilt. Die Technologieentwicklung muss sich jedoch unter den Randbedingungen einer veränderten Kohlenstoffwirtschaft neu aufstellen. Hierzu braucht es auch am Standort Deutschland eine florierende Grundstoffindustrie, mit der zusammen neue Konzepte und Verfahren entwickelt, erprobt und demonstriert werden können, die auch in anderen Ländern Anwendung finden. Vor allem Stahlindustrie, chemische Industrie, Kalk-/Zementindustrie und Energiewirtschaft sind hier natürliche Partner, da das Element Kohlenstoff sie verbindet. Es gilt deshalb sicherzustellen, dass zukünftig in Deutschland auch für diese industriellen Bereiche gute Standortvoraussetzungen vorliegen.

Eine wesentliche Standortvoraussetzung für die Grundstoffindustrie ist der Zugang zu Energie und Rohstoffen. Blickt man beispielsweise in die Geschichte der deutschen

Stahlindustrie, so hat es seinen guten Grund, dass sich der größte Teil der deutschen Stahlproduktion im Ruhrgebiet entwickelt hat. Mit Kohle gab es dort in unmittelbarer Nähe zur Stahlproduktion einen Rohstoff mit hoher Energiedichte, und über die Binnenschifffahrt auf dem Rhein konnte der zweite benötigte Rohstoff, das Eisenerz, herangeschafft werden. Hieraus lässt sich schließen, dass eine gewisse Wahrscheinlichkeit besteht, dass die Produktion von Stahl auch zukünftig an Standorten erfolgt, an denen Reduktionsmittel und/oder Energie günstig in großer Menge verfügbar sind. In Bezug auf regenerative Energien gibt es hier Standorte, die aufgrund ihrer geographischen Lage, höhere Energiepotenziale als Deutschland haben. Zu nennen sind beispielsweise die Küsten Afrikas, Arabiens oder Südamerikas, wo es ein sehr großes Potenzial an Sonnenenergie und/oder Biomasse gibt und Seehäfen beste logistische Voraussetzungen bieten, um Erze und Biomasse heranzuschaffen.

Sollte sich weltweit eine Kohlenstoffwirtschaft entwickeln, die ohne fossile Rohstoffe auskommt, wird es, um Deutschland als Industriestandort zu erhalten, wichtig sein, die vorhandenen Standortvorteile auszuschöpfen und an die Randbedingungen einer veränderten Kohlenstoffwirtschaft anzupassen. Hierzu gehören der möglichst rasche Aufbau eines leistungsfähigen, regenerativen Energiesystems und die Optimierung der Infrastruktur. Vor dem Hintergrund der in diesem Beitrag diskutierten Szenarien können die einzelnen Industrien nicht separat betrachtet werden. Die Zusammenhänge zwischen Chemie-, Stahl- und Kalk/Zement-produzierender Industrie wurden bereits erwähnt; zu berücksichtigen sind jedoch auch die Interaktionen von Grundstoffindustrien mit dem Anlagenbau und den materialkonsumierenden Branchen wie der Automobilindustrie.

Zum Abschluss dieses Diskurses wird noch einmal auf die in der Einführung beschriebenen Randbedingungen für die bisherigen großen Transformationen Neolithische und Industrielle Revolution eingegangen. Ein besonderes Merkmal dieser Transformationen war es, dass Menschen in ihrer Versorgung zunächst von direkten Natureinflüssen und den damit verbundenen Unwägbarkeiten unabhängiger wurden. Mit dem Ersatz fossiler Stoffe durch fluktuierende regenerative Energien, die ihrem Wesen nach nicht exakt vorhersehbar und kalkulierbar sind, entstehen ggf. neue Abhängigkeiten. Das Merkmal einer neuen Transformation (oder Transformationswelle) muss deshalb sein, Lösungen zu entwickeln, die trotz dieser Abhängigkeiten eine stabile Versorgung von Menschen mit Lebensmitteln, Gütern und Energie sicherstellen.

Unsere Einstellung der Zukunft gegenüber muß sein: Wir sind jetzt verantwortlich für das, was in der Zukunft geschieht.[63]

Karl Raimund Popper (1902–1994), Philosoph.

[63] [Ihlau1993]

5 Dank

Wir bedanken uns bei den Fördergebern der in diesem Diskurs genannten Projekte. Dabei handelt es sich um die Europäische Union und den Europäischen Fond für eine regionale Entwicklung, das Bundesministerium für Bildung und Forschung, das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, das Land Nordrhein-Westfalen und die Fraunhofer-Gesellschaft.

6 Anhang

6.1 Literaturverzeichnis

[Abbott1999]: Abbott, A. P.; Eardley, C. A.: Double Layer Structure in a Supercritical Fluid. J. Phys. Chem. B 103 (30), pp. 6157–6159. DOI: 10.1021/jp991706m, 1999.

[Abbott 2000]: Abbott, A. P.; Eardley, C. A.: Electrochemical Reduction of CO2 in a Mixed Supercritical Fluid. J. Phys. Chem. B 104 (4), pp. 775–779. DOI: 10.1021/jp9932867, 2000.

[acatech2015a]: Deutsche Akademie der Technikwissenschaften – acatech (Hrsg.): Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050 – Stabilität im Zeitalter der erneuerbaren Energien, Berlin, November 2015. https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublicat-on/2015_12_ESYS_Stellungnahme_Flexibilitaetskonzepte.pdf, letzter Zugriff am 27.07.2017.

[acatech2015b]: Deutsche Akademie der Technikwissenschaften – acatech (Hrsg.): Aspekte der Energiewende aus sozialwissenschaftlicher Perspektive, Analyse aus der Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft, München, 2015. https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2015_11_Analyse_Energiewende.pdf, letzter Zugriff am 27.07.2017.

[Anton2016]: Anton, J.; Nebel, J.; Göbel, C.; Gabrysch, T.; Song, H.; Froese, C.; Ruland, H.; Muhler, M.; Kaluza, S.: CO hydrogenation to higher alcohols over Cu-Co-based catalysts derived from hydrotalcite-type precursors. Top. Catal. 59, 1361-1370.

[Anzenbacher2002]: Anzenbacher, A., Einführung in die Philosophie, Freiburg: Herder 2010

[ARG2016]: Facts and Figures,. In: ARG mbH & Co.KG, Fraunhofer UMSICHT (Hrsg): Power to Chemicals Meeting, Duisburg.

[Bandi1993]: Bandi, A.; Maier, C.; Bloss, W.: Verfahren zur elektrolytischen Herstellung von Methanol und Methan durch Reduktion von Kohlendioxid. App. no. DE19914126349. Patent no. DE4126349 C2.

[Bartlett2010]: Bartlett, P. N.; Cook, D. C.; George, M. W.; Ke, J.; Levason, W.; Reid, G.: Phase behaviour and conductivity study on multi-component mixtures for electrodeposition in supercritical fluids. Physical Chemistry Chemical Physics, 12 (2), pp. 492–501. DOI: 10.1039/b918981e.

[Bazanella2017]: Bazzanella, A.; Ausfelder, F.; DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V. (Hrsg.): Technology Study Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry, ISBN 978-3-89746-196-2, Frankfurt: DECHEMA. http://dechema.de/dechema_media/Technology_study_Low_carbon_energy_and_feedstock_for_the_European_chemical_industry-p-20002750.pdf, letzter Zugriff am 04.08.2017

[BDSV2016]: BDSV Bundesvereinigung Deutscher Stahlrecycling- und Entsorgungsunternehmen e. V. (Hrsg.): Zukunft Stahlschrott, Ergebnisse der Fraunhofer UMSICHT-Studie zur Zukunft des Stahlschrotts – eine Untersuchung für die BDSV. http://www.bdsv.org/downloads/zukunft_stahlschrott.pdf, letzter Zugriff am 27.07.2017.

[Beton2014]: InformationsZentrum Beton GmbH (Hrsg.): Zement-Merkblatt Betontechnik B1 – Zemente und ihre Herstellung http://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Service/Zementmerkbl%C3%A4tter/B1.pdf, letzter Zugriff am 08.03.17.

[BMBF2016]: Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.): Herausforderung »Carbon2Chem« – Was macht die Forschung? Berlin, FONA Mediathek. https://www.fona.de/mediathek/pdf/ForschungsfragenCarbon2Chem.pdf, letzter Zugriff am 27.07.2017.

[BNetzA2017] : Bundesnetzagentur (Hrsg.): Marktdaten auf der Internetplattform. www.smard.de, https://www.smard.de/blueprint/servlet/page/home/strommarkt-aktuell/Alle%20Artikel/444, letzter Zugriff am 26.07.2017.

[Bottke2016]: Bottke, N.: Energy efficient Processes in Practice - Challenges of today and tomorrow - Putting Energy into Chemistry and Making Chemistry from Energy. In: Acatech-Themennetzwerksitzung Energie und Ressourcen, Berlin.

[Botte2014]: Botte, G. G.: Electrochemical Manufacturing in the Chemical Industry. The Electrochemical Society Interface, S. 49-55. http://www.electrochem.org/dl/interface/fal/fal14/fal14_p049_055.pdf, letzter Zugriff am 3. 14.09.2017.

[Branch2015]: Branch, J. A.; Bartlett, P. N.: Electrochemistry in supercritical fluids. Phil. Trans. R. Soc. A 373 (2057), p. 20150007. DOI: 10.1098/rsta.2015.0007.

[Bund2016] Klimaschutzplan 2050 – Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung. Bundesregierung (Hrsg.) Berlin. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf, letzter Zugriff am 27.07.2017.

[Bund2017a]: Energiewende im Überblick. Bundesregierung (Hrsg.) Berlin. https://www.bundesregierung.de/Content/DE/StatischeSeiten/Breg/Energiekonzept/0-Buehne/ma%C3%9Fnahmen-im-ueber-blick.html;jsessionid=F565248D8A35E7A9F1C8EC17E0441A60.s2t2, letzter Zugriff am 27.07.2017.

[Bund2017b]: Nationale Nachhaltigkeitsstrategie – Neuauflage 2016. Bundesregierung (Hrsg.) Berlin.

[Burckhardt2009]: Burckhardt, J.: Weltgeschichtliche Betrachtungen, Wiesbaden: Marix Verlag ISBN 978-3-86539-184-1, Wiesbaden 2009, revidiert nach der Ausgabe von Spemann, Berlin, Stuttgart 1909. http://gutenberg.spiegel.de/buch/weltgeschichtliche-betrachtungen-4968/4, letzter Zugriff am 30.07.2017.

[ClubofRome2017]: Club of Rome: Homepage. https://www.clubofrome.org/, letzter Zugriff 27.07.2017.

[CHEManager2013]: Wie Shale Gas die europäische Chemieindustrie verändert. In: CHEManager. 19.07.2013 http://www.chemanager-online.com/news-opinions/nachrichten/wie-shale-gas-die-europaeische-chemieindustrie-veraendert, letzter Zugriff am 26.07.2017.

[Dechema2009]: Rübberdt, K.: Herstellung von Wasserstoff – Photokatalyse. In: Medien der Dechema. http://dechema-dfi.de/dechema_media/Photokatalyse.pdf, letzter Zugriff am 27.07.2017.

[Dechema2015]: Elektrifizierung chemischer Prozesse: Diskussionspapier. In: DECHEMA (Hrsg.), Frankfurt. https://dechema.de/dechema_media/Dechema_DiskPap_Elektrifizierung_2015-p-5905.pdf, letzter Zugriff 27.07.2017.

[Eller2015]: Eller, D.: Integration erneuerbarer Energien mit Power-to-heat in Deutschland Potenziale zur Nutzung von Stromüberschüssen in Fernwärmenetzen. Heidelberg: Springer Vieweg, ISBN 978-3-658-10560-0.

[ESRL2017]: Earth System Research Laboratory (ESRL), Global Monitoring Division (GMD): Homepage. https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html, letzter Zugriff 27.07.2017.

[Energieagentur2016]: Energiepreisspiegel 2016. In: Energieagentur NRW (Hrsg.). https://energietools.ea-nrw.de/tools/marktspiegel/01.asp?id=&site=ea&region=&jahr=2016, letzter Zugriff am 28.07.2017.

[EU2009]: Richtlinie 2009/28/EG des europäischen Parlaments und Rates vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG. https://www.bmwfw.gv.at/EnergieUndBergbau/Energieversorgung/Documents/de_EE%20RL_2009_28_EG.pdf, letzter Zugriff 28.07.2017.

[Fischedick2015]: Fischedick, M., Görner, K., Thomeczek, M. (Hrsg.): CO_2: Abtrennung, Speicherung, Nutzung - Ganzheitliche Bewertung im Bereich von Energiewirtschaft und Industrie, Heidelberg: Springer Vieweg, ISBN 978-3-642-19528-0.

[Fischer1997]: Fischer-Kowalski, M., Haberl, H.: Stoffwechsel und Kolonisierung: Konzepte zur Beschreibung des Verhältnisses von Gesellschaft und Natur. In: Fischer-Kowalski, M. et al. (Hrsg.): Gesellschaftlicher Stoffwechsel und Kolonisierung von Natur. Ein Versuch in Sozialer Ökologie, Amsterdam: Gordon & Breach Fakultas, 3–12.

[FONA2016]: BMBF-Pressemitteilung: FONA Forschung für Nachhaltige Entwicklung (Hrsg.) https://www.fona.de/de/carbon2chem-21137.html, letzter Zugriff am 28.07.2017.

[Franck1979]: Franck, H.-G. et al.: Kohleveredlung S. 16. Heidelberg: Springer Vieweg, ISBN 978-3-642-67419-8.

[FResMe2017]: Projekt-Homepage. From Residual Steel Gases to Methanol (FResMe). www.fresme.eu, letzter Zugriff am 04.07.2017.

[FzJ2009]: Projektinformation: BETSY – Ethanol aus Synthesegas der Biomassevergasung – Nachhaltige Kraftstoffversorgung für Europa, Energie.NRW 2009, NRW Ziel-2-Programm 2007–2013 (EFRE). Forschungszentrum Jülich (Hrsg.) http://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Downloads/ETN/DE/EnergieII.NRW/EN2004.pdf?__blob=publicationFile, letzter Zugriff am 28.07.2017.

[GDCh2010]: Elektrochemie: Herausforderungen an die Lehre in der Chemikerausbildung: Positionspapier. GDCh, VCI, DBG, DECHEMA und GfKORR (Hrsg.): Frankfurt, DECHEMA. https://dechema.de/dechema_media/PapElektrochemie-view_image-1-called_by-dechema-original_site-dechema_eV-original_page-124930.pdf, letzter Zugriff am 28.07.2017.

[Gebhard2013]: Gebhardt, H.: Ressourcenkonflikte und nachhaltige Entwicklung – Perspektiven im 21. Jahrhundert. In: Mitteilungen der Fränkischen Geographischen Gesellschaft, Band 59, S. 11–22. http://fgg-erlangen.de/fgg/ojs/index.php/mfgg/article/view/259, letzter Zugriff am 28.07.2017.

[Global2016]: Global Carbon Budget 2016 - presentation. In: Carbon Projekt (Hrsg.): Homepage. http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/16/files/GCP_CarbonBudget_2016.pdf, letzter Zugriff 28.08.2017

[Goethe1907]: Goethe, W.: Maximen und Reflexionen. Aphorismen und Aufzeichnungen. Nach den Handschriften des Goethe- und Schiller-Archivs. Max Hecker (Hrsg.): Aus dem Nachlass. Über Literatur und Leben. Weimar: Verlag der Goethe-Gesellschaft. http://www.zeno.org/Literatur/M/Goethe,+Johann+Wolfgang/Aphorismen+und+Aufzeichnungen/Maximen+und+Reflexionen/Aus+dem+Nachla%C3%9F/%C3%9Cber+Literatur+und+Leben letzter Zugriff am 30.07.2017.

[Green2015]: Global demand for cement to reach 5.2 billion t. In: Green, J. (Hrsg.): World Cement, 27 August 2015. https://www.worldcement.com/europe-cis/27082015/global-demand-cement-billion-tons-449/, letzter Zugriff am 06.02.2017.

[Grevé2014]: Grevé, A.; Doetsch, D., Rohrig, K.: Abschlussbericht Metastudie »Energiespeicher«, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/pressemitteilungen/2015/Abschlussbericht-Metastudie-Energiespeicher.pdf, letzter Zugriff am 30.06.2017.

[GrInHy2016]: GrInHy Green Industrial Hydrogen: Project Overview, 2016 http://www.green-industrial-hydrogen.com/home/, letzter Zugriff am 30.06.2017.

[Haas2009]: Haas, H.-D.: Globaler Rohstoffhandel in Zeiten der Krise. Geographische Rundschau 61(11), 4–10.

[Haas2015]: Haas, W. et al.: How Circular is the Global Economy?Journal of Industrial Ecology, 19 (5), pp. 765– 777. http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jiec.12244/epdf, letzter Zugriff am 28.07.2017.

[Haneld2016]: Haneld, R.: Religionskritik: Die Erbschaft der Aufklärung, Vortrag aus dem Nachlass, 2016.

[Hiller2013]: Hiller, C. von, Carlowitz, Hans C. von: Er hat die Nachhaltigkeit erfunden. Frankfurter Allgemeine Zeitung, 01.03.2014, http://www.faz.net/aktuell/finanzen/hans-carl-von-carlowitz-er-hat-die-nachhaltigkeit-erfunden-12826006.html, letzter Zugriff am 30.06.2017.

[Hollemann1976] : Hollemann-Wiberg: Lehrbuch der anorganischen Chemie, 81.-90. Auflage, Berlin: De Gruyter, ISBN 3-11-005962-2.

[Hu2013]: Hu, S. (Hrsg.): An analysis of the optimal band gaps of light absorbers in integrated tandem photoelectrochemical water-splitting systems. Energy & Environmental Science 6, 2984-2993.

[Ihlau1993]: Ihlau, O.: Kriege führen für den Frieden, Interview mit Karl Popper. In: Der Spiegel,13,1992. http://magazin.spiegel.de/EpubDelivery/spiegel/pdf/13682439, letzter Zugriff am 30.07.2017.

[IHSMarkit2015]: Internetseite IHS Markit, http://news.ihsmarkit.com/press-release/chemicals/2020-us-emerge-largest-exporter-light-naphtha-essential-production-gasoline, letzter Zugriff am 24.02.2017.

[IKB2017]: IKB Rohstoffinformation 2015, https://www.ikb.de/MediaLibrary/b1c69505-3247-4315-842e-02e64fb0e1af/150305_Rohstoffpreis-Info_Q1.pdf, letzter Zugriff am 28.07.2017.

[IPCC2007Climate Change 2007 – The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC, ISBN 978 0521 88009-1. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter7.pdf, letzter Zugriff am 10.08.2017.

[IPCC2015]: Climate Change 2014: Synthesis Report, Intergovernmental Panel on Climate Change, ISBN 978-92-9169-143-2, 2015. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf, letzter Zugriff am 28.07.2017.

[IPCC2017]: IPCC Homepage http://www.ipcc.ch/index.htm, letzter Zugriff am 4.8.2017

[Kashiwaya2013]: Kashiwaya, Y., Hasegawa, M.: Process image of hydrogen ironmaking in future. Current Advances in Materials and Processes (CAMP-ISIJ) 26 (2), 524-527.

[Kaltschmitt2009]: Kaltschmitt, M., Hartmann, H.; Hofbauer, H.: Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren.Heidelberg: Springer, ISBN 978-3-540 85094-6.

[Kates1996]: Kates, R. W.: Population, technology, and the human environment: a thread through time. Daedalus 125 (3), 38. https://www.nap.edu/read/4767/chapter/4#34, letzter Zugriff 01.08.2017

[Ketelaer2014]: Ketelaer, T.; Vögele, S.: STE Research Report 2014, Situation der Stahlindustrie vor dem Hintergrund der Anwendung von Effizienzmaßnahmen. Institut für Energie- und Klimaforschung, Systemforschung und Technologische Entwicklung (IEK-STE) (Hrsg.). http://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Downloads/IEK/IEK-STE/DE/Publikationen/research_reports/2014/report_06_2014.pdf?__blob=publicationFile, letzter Zugriff am 28.07.2017.

[Kneißel2013]: Kneißel, B.: Wie Shale Gas die europäische Chemieindustrie verändert – Ethylen-Derivate aus Nordamerika und dem Nahen Osten drängen in den europäischen Markt. http://www.chemanager-online.com/news-opinions/nachrichten/wie-shale-gas-die-europaeische-chemieindustrie-veraendert, letzter Zugriff am 28.07.2017.

[Kraft2017]: Kraft, A.; Menne, A.: Katalytische Konversion von Alkoholen und Aldehyden, veröffentlicht am 12.07.2017, EP000002582650B1.

[Kreyenberg2015]: Kreyenberg, D. et al.: Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger. Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI, Berlin, 10. März 2015. http://www.lbst.de/download/2015/mks-kurzstudie-ee-im-verkehr.pdf, letzter Zugriff am 28.07.2017.

[Kümmel1990]: Kümmel, R.; Papp, S.: Umweltchemie – Eine Einführung. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 2. Auflage, ISBN 3-342-00313-8

[Lange2016]: Lange, S.; Santarius, T.: Drei Fragen zum transformativen Potenzial der Digitalisierung - Wolf oder Wollmilchsau? Ökologisches Wirtschaften 2 (31). http://www.santarius.de/wp-content/uploads/2016/10/Artikel-Digitalisierung-für-Ökologisch-Wirtschaften-2016.pdf, letzter Zugriff am 28.07.2017.

[Lewis2006]: Lewis, N. S.; Nocera, D. G.: Powering the planet: chemical challenges in solar energy utilization. In: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 103, 15729-15735. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17043226, letzter Zugriff am 28.07.2017.

[Lovelock1988]: Lovelock, J.: Das Gaia-Prinzip – Die Biographie eines Planeten. Zürich: Artemis und Winkler, ISBN: 9783760810508.

[Martens2016]: Martens, J.; Obenland, W.: Die 2030-Agenda – Globale Zukunftsziele für nachhaltige Entwicklung. Global Policy Forum und terre des hommes (Hrsg.), Bonn, Osnabrück, Februar 2016. http://weltkirche.katholisch.de/Portals/0/Dokumente/Global_Policy_Forum_tdh_Agenda_2030_online.pdf, letzter Zugriff am 28.07.2017.

[Mauritsen2017]: Mauritsen; T. Pincus, R.: Committed warming inferred from observations, Nature Climate Change DOI:10.1038/nclimate3357, 2017.

[McKone2013] : McKone, J.; Lewis, N.: Structured Materials for Photoelectrochemical Water Splitting 52-82. In: Photoelectrochemical Water Splitting: Materials, Processes and Architectures, Lewerenz, H.J., Peter, L. (Hrsg.)

[Melchaeva2017]: Melchaeva, O. et al.: Electrochemical Reduction of Supercritical CO_2 on Copper Catalyst: Effect of Pressure and Protic Solutions,. In: Chemicals & Sustainability ChemSusChem., 10, 1–12 2017 DOI: 10.1002/cssc.201701205

[Muhler2014]: Muhler, M.; Kaluza, S.: Syngas to Methanol and Ethanol169-192. Jacinto Sa (Hrsg.): Fuel Production with Heterogenous Catalysis., CRC Press Boca Raton, ISBN 9781482203714.

[Nitsch2015]: Nitsch, J.: SZEN-15 Aktuelle Szenarien der deutschen Energieversorgung unter Berücksichtigung der Eckdaten des Jahres 2014, Kurzexpertise für den Bundesverband Erneuerbare Energien e.V. Stuttgart, 2015. https://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/20150419-Szenarien_SZEN-15.pdf, letzter Zugriff am 31.07.2017.

[NRW2015]: Landtag Nordrhein-Westfalen, Enquete-Kommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen im Hinblick auf nachhaltige Rohstoffbasen, Produkte und Produktionsverfahren. Düsseldorf. https://www.landtag.nrw.de/portal/WWW/GB_I/I.1/EK/16.WP/EK_II/MMD16-8500_Bericht.pdf, letzter Zugriff am 30.07.2017.

[Oles2015]: Oles, M.: Stahlwerke als chemische Fabrik. In: Fraunhofer UMSICHT Oberhausen (Hrsg.), Fachtagung: Energie im Wandel, 2015.

[Paris2015]: BMBU (Hrsg): Pariser Klimaschutzabkommen 2015. http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/paris_abkommen_bf.pdf, letzter Zugriff am 30.07.2017.

[Petrochemicals2015]: Petrochemicals Europe (Hrsg): Facts and Figures, Crackers Capacities http://www.petrochemistry.eu/about-petrochemistry/facts-and-figures/crackers-capacities.html, letzter Zugriff am 04.07.2017.

[Piekenbrock2013]: Piekenbrock, D.; Hennig, A.: Einführung in die Volkswirtschaftslehre und Mikroökonomie. Heidelberg: Springer, ISBN 978-3-7908-2892-4.

[Podbregar2017]: Podbregar, N.: Klimaschutz: Ist das Zwei-Grad-Ziel zu halten? Bild der Wissenschaft online, 2017 http://www.wissenschaft.de/home/-/journal_content/56/12054/19011612/he/, letzter Zugriff am 04.08.2017

[ProdCom2017]: ProdCom Datenbank: Verkaufte Produktion, Exporte und Importe je ProdCom-Liste – Jährliche Daten. http://ec.europa.eu/eurostat/web/prodcom/data/excel-files-nace-rev.2, letzter Zugriff am 04.07.2017.

[Qiao2014]: Qiao, J.; Liu, Y.; Hong, F.; Zhang, J.: A review of catalysts for the electroreduction of carbon dioxide to produce low-carbon fuels. Chem. Soc. Rev. 43 (2), pp. 631–675. DOI: 10.1039/c3cs60323g.

[Quaschning2016]: Quaschning, V.: Sektorkopplung durch die Energiewende – Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung. Berlin: Hochschule für Technik und Wirtschaft HTW Berlin. https://www.volker-quaschning.de/publis/studien/sektorkopplung/index.php, letzter Zugriff am 30.07.2017.

[Raftery2017]: Raftery, A. E. et al.: Less than 2 °C warming by 2100 unlikely. Nature Climate Change, 7, 637–643. DOI:10.1038/nclimate3352 http://www.nature.com/nclimate/journal/vaop/ncurrent/pdf/nclimate3352.pdf, letzter Zugriff am 04.08.2017.

[Regett2014]: Regett, A.; Pellinger, C.; Eller, S.: Power2Gas – Hype oder Schlüssel zur Energiewende? Energiewirtschaftliche Tagesfragen 64, 10. https://www.ffe.de/download/article/522/Artikel_et_10-2014.pdf, letzter Zugriff am 30.07.2017.

[Remus2013]: Remus, R. et al: JRC Reference report: Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production, Industrial Emission directive 2010 (Integrated Pollution Prevention and Control). Sevilla: JRC 69967 European Commission Joint Research Centre. http://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference/BREF/IS_Adopted_03_2012.pdf, letzter Zugriff am 30.07.2017.

[RWI2013]: Die Klimavorsorgeverpflichtung der deutschen Wirtschaft – Monitoringbericht 2011 und 2012. Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung (Hrsg). Essen. http://www.rwi-essen.de/media/content/pages/publikationen/rwi-projektberichte/RWI_PB_Monitoringbericht-2011-und-2012.pdf, letzter Zugriff am 30.07.2017.

[Salzgitter2016]: Projekt »GrInHy« – Green Industrial Hydrogen, Pressemeldung der Salzgitter AG, 05.09.16 https://www.salzgitter-ag.com/de/medien/pressemeldungen/pressemeldung-der-salzgitter-ag/2016-09-05/projekt-grinhy-green-industrial-hydrogen.html, letzter Zugriff am 30.06.2017.

[Santori2014]: Santori, E. A et al.: Operation of lightly doped Si microwires under high-level injection conditions. Energy & Environmental Science, 7, 2329-2338.

[Santos2013]: Iron and Steel Industry Overview of the current state and development of CO_2 capture technologies in ironmaking processes. ieagh (Hrsg.): TR3. http://www.ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/2013-TR3.pdf, letzter Zugriff am 30.07.2017.

[Schlögl2015]: Schlögl, R.: Von der Natur lernen – Chemische CO_2-Reduktion 167-181. In: Marotzke, J.; Stratmann, M. (Hrsg.): Die Zukunft des Klimas – Neue Erkenntnisse, neue Herausforderungen. München: C.H.Beck, ISBN 978-3-406-66967-5. http://www.solarify.eu/2015/03/09/368-von-der-natur-lernen/, letzter Zugriff am 30.07.2017.

[Schmidt2003]: Schmidt, V.: Elektrochemische Verfahrenstechnik – Grundlagen, Reaktionstechnik, Prozeßoptimierung, WILEY-VCH Verlag GmbH & KGaA, Weinheim 2003, ISBN 3-527-29958-0

[Schwab2016]: Schwab, E.: Energy efficient Processes in Practice - Challenges of today and tomorrow. DGMK/acatech – Workshop Stoffliche Nutzung von Braunkohlen und Biomassen und deren Rolle bei der Ausgestaltung der Energiewende, Berlin 19. Oktober 2016.

[Sims1990]: Sims, M.: Decaffeinating with Carbon Dioxide. Coffee and Tea Trade Journal 162, 8-10.

[SRU2012]: Sachverständigenrat für Umweltfragen SRU (Hrsg.): Umweltgutachten 2012 – Verantwortung in einer begrenzten Welt, Berlin. http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2012_06_04_Umweltgutachten_HD.html, letzter Zugriff am 30.07.2017.

[SRU2016]: Sachverständigenrat für Umweltfragen SRU (Hrsg.): Umweltgutachten 2016 – Impulse für eine integrative Umweltpolitik, Berlin, Mai 2016 http://www.umweltrat.de/SharedDocs/Downloads/DE/01_Umweltgutachten/2016_Umweltgutachten_HD.html, letzter Zugriff am 30.07.2017.

[Stahl2017]: Wirtschaftsvereinigung Stahl (Hrsg.), Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland, Düsseldorf.. http://www.stahl-online.de/wp-content/uploads/2013/12/Fakten_Stahlindustrie_2016_V2.pdf, letzter Zugriff 27.07.2017.

[Statistikportal2013]: Das Statistik-Portal: Anteil der Verkehrsträger an den weltweiten CO_2-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe im Jahr 2013. https://de.statista.com/statistik/daten/studie/317683/umfrage/verkehrsttraeger-anteil-co2-emissionen-fossile-brennstoffe/, letzter Zugriff am 30.07.2017.

[Steenblock2011]: Steenblock, V.: Die großen Themen der Philosophie, 2. Auflage, Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft. ISBN 978-3-534-23886-6.

[Stießel2016]: Stießel, S.: Techno-ökonomische Potenzialanalyse zur Integration CO_2-basierter Synthesen in konventionelle Wertschöpfungsketten durch cross-industrielle Kooperationen – ein Ansatz zur Bewertung regionaler Synergien am Beispiel von NRW. Masterthesis Universität Duisburg Essen, Fraunhofer UMSICHT, 2016.

[Styring2015]: Styring, P.: Carbon Dioxide Utilisation – Closing the Carbon Cycle. Elsevier, Amsterdam, 2015. ISBN 978-0-444-62746-9.

[Tamme2002]: Tamme, R.; Sattler, C.; Jörissen, L.: Solarer Wasserstoff – Innovative Techniken zur Erzeugung. FVS Themen 2002, http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Themenhefte/th2002/th2002_06_01.pdf, letzter Zugriff am 30.07.2017.

[Thonemann2017]: Thonemann, N.; Maga, D.; Hiebel, M.; Stießel, S.; Dresen, B.; Hunstock, B.: Standortplanung für die CO_2-basierte Chemikalienproduktion unter Berücksichtigung von ökologischen Kriterien, Veröffentlichung in Vorbereitung.

[Thyssen2009]: Werke und Produktionsanlagen, Die Anlagenwelt von Thyssen Krupp Steel, Broschüre Thyssen Krupp Steel Europe, 2009 http://karriere.thyssenkrupp-steel-europe.com/uploads/tx_tkmedia/WuP.pdf, letzter Zugriff am 30.07.2017.

[UBA2014]: Umweltbundesamt UBA (Hrsg.): Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050, Dessau-Roßlau, April 2014 https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/treibhausgasneutrales_deutschland_im_jahr_2050_langfassung.pdf, letzter Zugriff am 30.07.2017.

[ULCOS]: ULCOS-Projekt-Homepage. http://www.ulcos.org/de/research/electrolysis.php, letzter Zugriff am 26.07.2017.

[Ullmann2012]: Zimmermann, H.; Walzl, R.; Ethylene; In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Weinheim: Wiley-VCH. DOI: 10.1002/14356007.a10_045.pub3, 2012.

[UN2015]: United Nations (Hrsg.): Transforming our world – The 2030 Agenda for Sustainable Development, New York, 2015 https://sustainabledevelopment.un.org/post2015/transformingourworld, letzter Zugriff am 30.07.2017.

[UN2017]: United Nations (Hrsg.): The 2017 Revision, Key Findings and Advance, Working Paper No. ESA/P/WP/248, 2017 https://esa.un.org/unpd/wpp/Publications/Files/WPP2017_KeyFindings.pdf, letzter Zugriff am 26.07.2017.

[VDI2016]: Verein Deutscher Ingenieure VDI (Hrsg.): Klassifikation und Gütekriterien für Bioraffinerien, VDI-Richtlinie 6310, Berlin: Beuth-Verlag.

[VDZ2010]: Monitoring-Bericht 2008 – 2009 Verminderung der CO2-Emissionen Beitrag der deutschen Zementindustrie VDZ, Düsseldorf, Juni 2010, https://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/UmweltundRessourcen/co2monitoring/Monitoring_Bericht_2009_final.pdf, letzter Zugriff am 30.07.2017.

[Virtuell2016]: Virtuelles Institut Strom zu Gas und Wärme: Homepage. http://strom-zu-gas-und-waerme.de/, letzter Zugriff am 30.07.2017.

[Vulturius2017]: Vulturius, G.: Lass die Sonne rein – Deutschland ist gerade dabei, seine Vorreiterrolle in Sachen erneuerbare Energien an China und Indien zu verlieren. In: Die Zeit, 11 2017. http://www.zeit.de/2017/11/erneuerbare-energien-deutschland-china-indien-investitionen, letzter Zugriff am 23.06.2017.

[WBGU2009]: WBGU Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (Hrsg): Kassensturz für den Weltklimavertrag–Der Budgetansatz. Berlin, ISBN 978-3-936191-26-4. http://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu.de/templates/dateien/veroeffentlichungen/sondergutachten/sn2009/wbgu_sn2009.pdf, letzter Zugriff am 30.07.2017.

[WBGU2011]: WBGU Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (Hrsg): Welt im Wandel – Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation. Berlin, ISBN 978-3-936191-38-7. http://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu.de/templates/dateien/veroeffentlichungen/hauptgutachten/jg2011/wbgu_jg2011.pdf, letzter Zugriff am 30.07.2017.

[WBGU2016]: WBGU Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (Hrsg): Entwicklung und Gerechtigkeit durch Transformation – Die vier großen I. Berlin , ISBN 978-3-946830-00-9. http://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu.de/templates/dateien/veroeffentlichungen/sondergutachten/sg2016/wbgu_sg2016.pdf, letzter Zugriff am 30.07.2017.

[Worldcoal2014]: World Coal Association: Coal & Steel Statistics 2014. http://www.worldcoal.org/file_validate.php?file=coal_steel_facts_2014(12_09_2014).pdf, letzter Zugriff am 27.02.2017.

[Zeitler2009]: Zeitler, K.: Photoredox Catalysis with Visible Light. Angewandte Chemie. Int. Ed., 48, 9785–9789.

[Zhao2004]: Zhao, G. et al.: Electrochemical reduction of supercritical carbon dioxide in ionic liquid 1-n-butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate. The Journal of Supercritical Fluids 32 (1–3), 287–291. DOI: 10.1016/j.supflu.2003.12.015.

6.2 Abkürzungsverzeichnis

acatech	Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.
CCS	Carbon Capture and Storage
CCU	Carbon Capture and Utilisation
EU	Europäische Union
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IuK	Informations- und Kommunikationstechnologien
LKW	Lastkraftwagen
P2G	Power2Gas
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
UN	United Nations
WBGU	Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen

6.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Emissionen der in die Zieldefinition des Klimaschutzplans einbezogenen Handlungsfelder (Sektoren)..... 30

Tabelle 2: Produktlinien, Primär- und Folgeprodukte für CO_2 und Wasserstoff nach..43

Tabelle 3: Zusammensetzung von Kokerei-, Hochofen- und Konvertergas in einem integrierten Hüttenwerk.....53

6.4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Entwicklung der Weltbevölkerung bei den Übergängen »Neolithische Revolution« und »Industrielle Revolution« im Vergleich zur Zunahme des Energieeinsatzes 12

Abbildung 2: Schema eines Produktstammbaums für chemische Produkte aus Erdö .. 16

Abbildung 3: Ternäres Diagramm, das den molaren Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Sauerstoffgehalt für unterschiedliche chemische Produkte und potenzielle Rohstoffe beschreibt 17

Abbildung 4: Vereinfachte Darstellung einer Kohlenstoffwirtschaft (Vision), die bis auf Kalkstein keine fossilen Kohlenstoffträger mehr einsetzt 23

Abbildung 5: Anteil erneuerbarer Energien (EE) am Strom-, Wärme und Mobilitätssektor 31

Abbildung 6: Voraussichtliche Entwicklung des Energie- und Produktionssystems..... 32

Abbildung 7: Stromüberschusskapazitäten in Deutschland in Abhängigkeit vom Ausbau der erneuerbaren Energien 35

Abbildung 8: Die drei Säulen des Power2Products-Konzepts 37

Abbildung 9: Schema Produktstammbaum für chemische Produkte aus Strom und CO_2 41

Abbildung 10: Entwicklung der Selektivität zu Ethanol sowie zu linearen C2-C4-Alkoholen 43

Abbildung 11: Wertschöpfungskette durch mögliche Weiterverarbeitung von Ethanol mit Marktpreisen für ausgewählte Produkte 44

Abbildung 12: Preis-Marktvolumen für ausgewählte Produkte der Ethanolroute..... 44

Abbildung 13: Potenziell nutzbare CO_2-Quellen in Deutschland 46

Abbildung 14: Vergleich unterschiedlicher Prozessrouten zur Herstellung von Ethen.. 47

Abbildung 15: Kohlenstoffbedarf der deutschen chemischen Industrie 49

Abbildung 16: Hüttengasanfall und Komponenten in einem integrierten Stahlwerk .. 54

Abbildung 17: Hochdruckreaktor 57

Verlag Karl Maria Laufen
ISBN **978-3-87468-358-6**