

Regenerativer Strom: Ressource einer neuen Kohlenstoffwirtschaft?

**Thomas Marzi, Görgo Deerberg, Christian Doetsch, Anna Grevé,
Volker Knappertsbusch, Manfred Renner, Eckhard Weidner**

Fraunhofer UMSICHT, Osterfelderstr. 3, D-46047 Oberhausen, ++49(208)8598 1230,
thomas.marzi@umsicht.fraunhofer.de, <https://www.umsicht.fraunhofer.de/>

Kurzfassung: Um das von der Pariser Klimaschutzkonferenz vereinbarte »Zwei-Grad-Ziel« zu erreichen, muss der anthropogene Kohlenstoffeintrag in die Atmosphäre auf einen Betrag begrenzt werden, der nicht größer ist, als die Kohlenstoffmenge, die durch Senken aufgenommen werden kann. 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 eine netto »Nullemission« erreicht werden, ist auch in diesen Industrien ein Systemwechsel erforderlich, der eine fundamental andere Bewirtschaftung kohlenstoffhaltiger Rohstoffe beinhaltet. Hierzu ist regenerative Energie in erheblicher Größenordnung erforderlich.

Keywords: Regenerativer Strom, Kohlendioxid, Stahlindustrie, Chemische Industrie, Zementindustrie

1 Gründe für eine neue Kohlenstoffwirtschaft

Spätestens seit den 1970er Jahren, als der Club of Rome [1] mit seinen »Grenzen des Wachstums« auf die endliche Verfügbarkeit fossiler (Energie-)Rohstoffe 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 CO₂ verantwortlich sind.

Nach den Prognosen des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [2], ist mit drastischen, unumkehrbaren Umweltveränderungen zu rechnen, wenn es nicht gelingt, die Erderwärmung auf unter zwei Grad Celsius im Vergleich zur vorindustriellen Zeit zu begrenzen. Um dieses sogenannte »Zwei-Grad-Ziel« 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; da auch wichtige Industriebereiche Kohlenstoff benötigen um Güter und Produkte herzustellen. Zu nennen sind

hier vor allem die Stahlindustrie, die Chemische Industrie und die Kalk- bzw. Zementindustrie. In der Stahlindustrie wird Kohlenstoff u. a. als Reduktionsmittel im Hochofenprozess eingesetzt, um Eisen-III-oxid zu Eisen zu reduzieren (Gleichung 1). Kohlenstoff reagiert dabei zu CO₂ und Kohlenmonoxid. Die chemische Industrie/Petrochemie greift im Wesentlichen auf Erdöl als Kohlenstoffträger zurück, und die Kalk-/Zementindustrie verwendet Calciumcarbonat als Rohstoff, um gebrannten Kalk zu erzeugen (Gleichung 2).



2 Wie kann ein Produktionssystem ohne fossile Rohstoffe aussehen?

In Abbildung 1 ist ein fiktives Produktionssystem dargestellt, das nahezu keine fossilen Rohstoffe einsetzt und auf Biomassen und CO₂ als Kohlenstoffträger zurückgreift. Da die verfügbare Biomassemenge jedoch u.a. durch die nachhaltig erschließbaren Flächen begrenzt ist, kommt es darauf an, 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 Umfang hauptsächlich Sonne und Wind zur Verfügung. Um den fluktuierenden Charakter dieser Energiequellen auszugleichen, werden Energiespeicher benötigt, oder es müssen Grundlasten bereitgestellt werden. Letzteres kann in einem nicht fossilen und nicht nuklearen System grundsätzlich durch Brennstoffe sichergestellt werden, die mit regenerativem Strom hergestellt wurden oder es muss Biomasse verwendet werden. Regenerative Energieanteile aus Sonne und Wind müssen ebenfalls zu einem großen Teil die energetische Grundlage für den Transportsektor bilden, beispielsweise durch Elektrofahrzeuge [3]. Andere Möglichkeiten bestehen darin Wasserstoff als Treibstoff zu verwenden oder kohlenstoffhaltige Treibstoffe einzusetzen, die mithilfe von regenerativem Strom hergestellt werden.

Damit die Nutzung von Biomasse in Summe klimaneutral erfolgt, ist eine nachhaltige Biomasseproduktion die Voraussetzung. Wie groß die zur Verfügung stehenden Biomassemengen sind, ist umstritten. Die Autoren dieses Beitrags orientieren sich hier an den Angaben des WBGU, der das jährliche nachhaltige Potenzial von Biomasse auf 100 EJ schätzt [4]. Hieraus lässt sich berechnen, dass nachhaltig weltweit ca. 2 500 Mt Kohlenstoff der Biosphäre entnommen und verarbeitet werden können¹.

¹ 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) ([5], S.610).

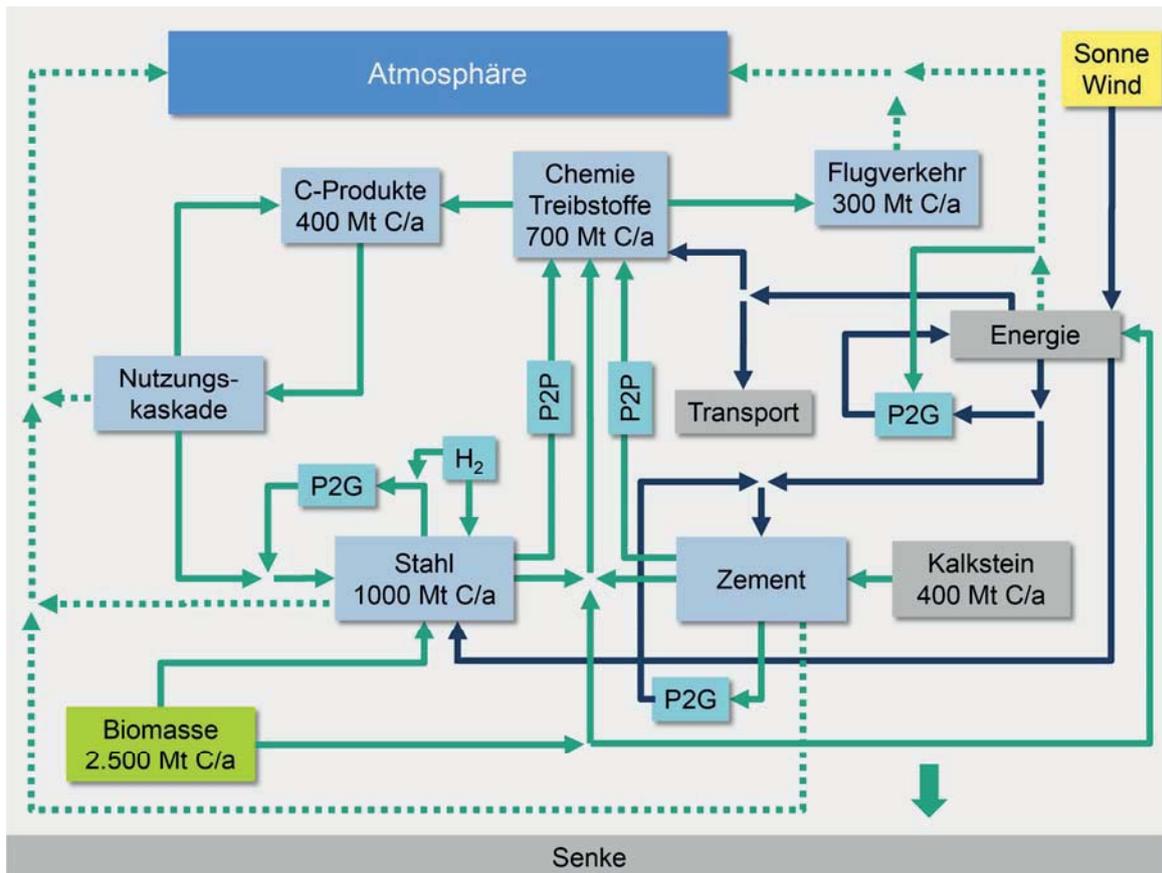


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung einer globalen Kohlenstoffwirtschaft (Vision), die bis auf Kalkstein keine fossilen Kohlenstoffträger mehr einsetzt (Transformationspfade für Kohlenstoff sind als grüne Pfeile, Transformationspfade für Energie als blaue Pfeile, Emissionspfade gestrichelt dargestellt; P2G: Power2Gas, P2P: Power2Products bzw. Power2X). [6]

In der Stahlindustrie werden weltweit etwa 1000 Mt Kohlenstoff² gebraucht, um Eisenerz zu reduzieren. Dieser Betrag muss theoretisch nicht vollständig über Biomasse eingebracht werden, wenn es zukünftig gelingt, bei der Herstellung von Eisen Wasserstoff³ oder – im

² Die Abschätzung erfolgte auf Grundlage der in der Stahlindustrie verwendeten Kohlemengen von weltweit 1200 Mt ([7]). Unter Berücksichtigung des variierenden Kohlenstoffgehalts unterschiedlicher Steinkohlen (75 bis über 91,5% (Anthrazit) ([8])) 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 mitefassen. Die insgesamt benötigte Kohlenstoffmenge ist also eher noch größer.

³ Grundsätzlich lässt sich auch Wasserstoff als Reduktionsmittel im Hochofen einsetzen ([9]), 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

größeren Umfang als bisher⁴ – Methan als Reduktionsmittel einzusetzen. Bei der Verwendung von Methan kann grundsätzlich ein Teil der in Hüttengasen enthaltenen Kohlenstoffverbindungen über Power2Gas-Verfahren wieder zu Methan umgesetzt werden. Letzteres erfolgt über die Reaktion von CO₂ mit Wasserstoff. Das zurückgewonnene Methan kann dann erneut als Reduktionsmittel verwendet werden⁵. 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.

In der Kalk-/Zementindustrie kann Kalkstein nicht durch ein anderes biogenes oder kohlenstoffreies Material ersetzt werden⁶. Hier fließen, ohne energetische Prozesse zu berücksichtigen, 400 Mt fossilen Kohlenstoffs⁷ in den Bilanzraum ein⁸.

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 benötigt werden. Allein für den Flugverkehr wurde auf Basis aktueller Verbrauchszahlen ein

Wasserstoff verwendet wird. So entsteht 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 ([10]).

- ⁴ 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.
- ⁵ Grundsätzlich muss nicht unbedingt eine Kreislaufführung des Kohlenstoffs im Stahlwerk erfolgen. Es können auch andere CO₂-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.
- ⁶ Prinzipiell ist die Freisetzung von Calciumoxid (CaO) auch aus anderen Calciumverbindungen (z. B. Calciumsulfat CaSO₄) möglich. Gegenüber der Carbonatspaltung steigt aber die Calciniertemperatur von 800 °C auf über 1200 °C an. Dabei wird Schwefeldioxid (SO₂) freigesetzt. Setzt man anstelle von CaSO₄ Calciumsilikate ein, liegt nach der Reaktion CaO und Siliziumdioxid (SiO₂) als Feststoffgemisch vor, das getrennt werden müsste. Bei natürlich vorkommenden Calciumsilikaten ist die Trennung aufgrund des Calcium/Siliziumverhältnisses nicht möglich ([11], S.700 und 554).
- ⁷ Nach Angaben des Fachmagazins Worldcement betrug der Zementbedarf im Jahr 2014 weltweit etwa 4200 MT ([12]). Hauptbestandteil von Zement ist Portlandzementklinker, der etwa 77 % CaCO₃ enthält ([13], 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.
- ⁸ 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.

Kohlenstoffbedarf von 300 Mt/a⁹ abgeschätzt. Zur Herstellung von Produkten in der chemischen Industrie ist mit einem Kohlenstoffbedarf von 400 Mt/a¹⁰ zu rechnen, so dass 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.

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 CO₂ eine Alternative zu Biomasse als Rohstoff zu erschließen.

CO₂ wird in technischen Prozessen durch die Oxidation energiereicher Verbindungen wie Kohle oder Kohlenwasserstoffen gebildet. Die relativ große Reaktionsenthalpie, die bei dieser Reaktion 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 CO₂ zu Kohlenwasserstoffen umgesetzt werden soll. Nutzt man hierzu Energie, die durch Verbrennung von Kohle oder Kohlenwasserstoffen freigesetzt wird, entsteht mehr CO₂ durch den Verbrennungsvorgang, als im Produkt gebunden werden kann. Eine sinnvolle Aktivierung von CO₂ kann deshalb nur mit regenerativem Strom erfolgen.

Welchem Kohlenstoffträger in einem zukünftigen System welche Rolle zukommt, lässt sich heute nur schwer abschätzen. Das in Abbildung 1 dargestellte Schema beinhaltet deshalb eine Kombination verschiedener Anwendungen und Rohstoffe. Dargestellt sind potenzielle unterschiedliche Prozesse für die Eisenverhüttung, die Wasserstoff, Methan oder biomassestämmige Materialien¹¹ als Reduktionsmittel verwenden. Dabei wird ein Teil der in den Hüttengasen enthaltenen Kohlenstoffanteile über 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. Hierbei ist wichtig, dass die hergestellten Chemikalien 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

⁹ Beruht auf der Annahme, dass der Luftverkehr etwa 2,5 % Anteil an den weltweiten CO₂-Emissionen hat ([14]). Hieraus ergibt sich bei jährlichen Emissionen von 40 Gt CO₂ eine CO₂-Fracht von 1000 Mt/a, die einem Kohlenstoffumsatz von etwa 300 Mt (270) entspricht.

¹⁰ Naphtha enthält 85 % Kohlenstoff ([15], S.479). Daraus ergibt sich bei einer Weltproduktion von 367 Mt Naphtha im Jahr 2014 ([16]) eine Kohlenstoffmenge von 312 Mt, die die chemische Industrie aus der Naphthafraktion deckt. Berücksichtigt man, dass der Anteil erdölstämmigen Kohlenstoffs in der chemischen Industrie ([17], S.21) etwa 76 % entspricht, ergibt sich ein Wert von 410 Mt (gerundet 400 Mt) Kohlenstoff.

¹¹ Dabei kann es sich um koksartige Materialien oder um Synthesegas handeln. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass dies eine grundlegende Neuentwicklung des Verhüttungsprozesses erfordern würde.

Interesse, wie das vereinfachte Schema einer stromgeführten CO₂-Raffinerie in Abbildung 2 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 [18]) Die Herstellung chemischer Produkte aus Hüttengasen der Stahlindustrie wird aktuell durch das vom BMBF geförderte Projekt Carbon2Chem[®] untersucht [19].

In der Kalk-/ Zementindustrie wird in dem hier betrachteten Szenario regenerative Energie über Power2Gas-Verfahren eingekoppelt und CO₂ zur Herstellung chemischer Produkte und Treibstoffe bereitgestellt. Der in chemischen Produkten gebundene Kohlenstoff gelangt in einen durch weltweite Handelsbeziehungen geprägten Produktkreislauf, der so zu gestalten ist, dass Kohlenstoff kaskadenförmig genutzt werden kann. Ein wiederverwertungsorientiertes Produktdesign, die intelligente Organisation von Produktionsprozessen und die Konzeption einer effektiven Kreislaufwirtschaft verringern die Mengen benötigter Rohstoffe.

Das in Abbildung 1 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 eine mehr als ambitionierte Herausforderung darstellt. Trotzdem würde in diesem fiktiven Produktionssystem immer noch CO₂ in die Atmosphäre emittiert: Die Emissionen erfolgen über den Flugverkehr, Müllverbrennungsanlagen, die Biomassenutzung im Energiesystem sowie über CO₂-Anteile, die aus der Stahl- und Kalk-/Zementindustrie kommen, aber von der chemischen Industrie nicht in Produkte integriert werden können. Die betrachteten Konzepte beruhen wesentlich darauf, dass regenerativ erzeugter Strom eingesetzt wird, um CO₂ in Energieträger oder Produkte umzuwandeln. Ob dieser Strom in den erforderlichen Mengen bereitgestellt werden kann, um CO₂-Emissionen, die auf eine stoffliche Kohlenstoffnutzung in den Grundstoffindustrien zurückgehen, zu vermeiden, ist abschließend noch nicht geklärt.

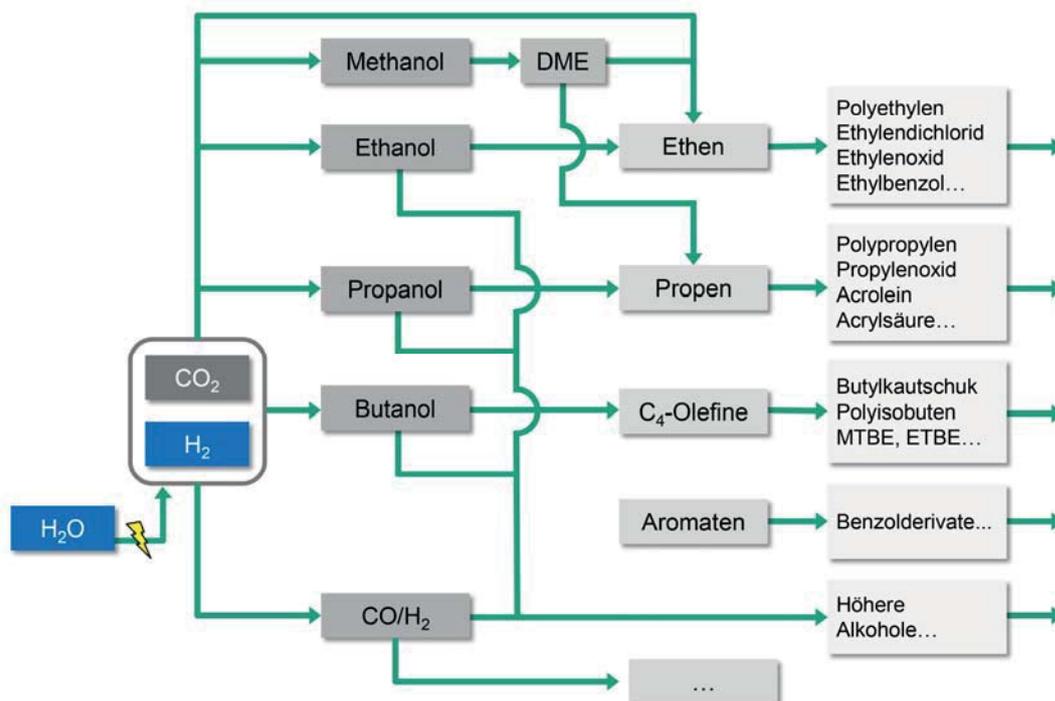


Abbildung 2: Schema Produktstammbaum für chemische Produkte aus Strom und CO₂ [6]

3 Welche Strommengen werden benötigt?

In diesem Abschnitt erfolgt eine orientierende Betrachtung, welche Strommengen zur Herstellung chemischer Produkte aus CO₂ benötigt werden. Hierzu wird angenommen, dass die chemische Produktion in Deutschland komplett auf CO₂ zurückgreift und dass Strom zu 100 % regenerativ bereitgestellt wird, d. h. dass CO₂-Quellen wie fossil betriebene Kraftwerke nicht zur Verfügung stehen und auch aus der Stahl- und Zementindustrie nur die CO₂-Mengen berücksichtigt werden können, die auf die stofflichen Umsätzen zur Reduzierung des Eisenerzes und auf das Brennen des Kalksteins zurückgehen (vgl. Abbildung 3).¹²

Zur Abschätzung des Kohlenstoffbedarfs der Chemischen Industrie in Deutschland lässt sich auf Angaben zur Rohstoffbasis zurückgreifen, die die Enquete-Kommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen in ihrem Abschlussbericht macht [17]. Hieraus ergibt sich, dass die deutsche Chemische Industrie ihren Kohlenstoffbedarf im Jahr 2011 mit 15,3 Mio t Erdöl, 0,2 Mio t Kohle, 3 Mio t Erdgas und 2,7 Mio t Biomasse deckte, was in Summe einer Menge von etwa 17 Mio t Kohlenstoff entspricht. Dem gegenüber stehen CO₂-Emissionen, die auf rohstoffliche Nutzungen zurückgehen. Allein die Kohlenstofffrachten¹³ aus der Stahlindustrie mit 16 Mio t Kohlenstoff [20], [21] und aus der Kalk-/ Zementindustrie mit 5 Mio t Kohlenstoff [22] reichen grundsätzlich aus, um den Kohlenstoffbedarf der chemischen Industrie zu decken.

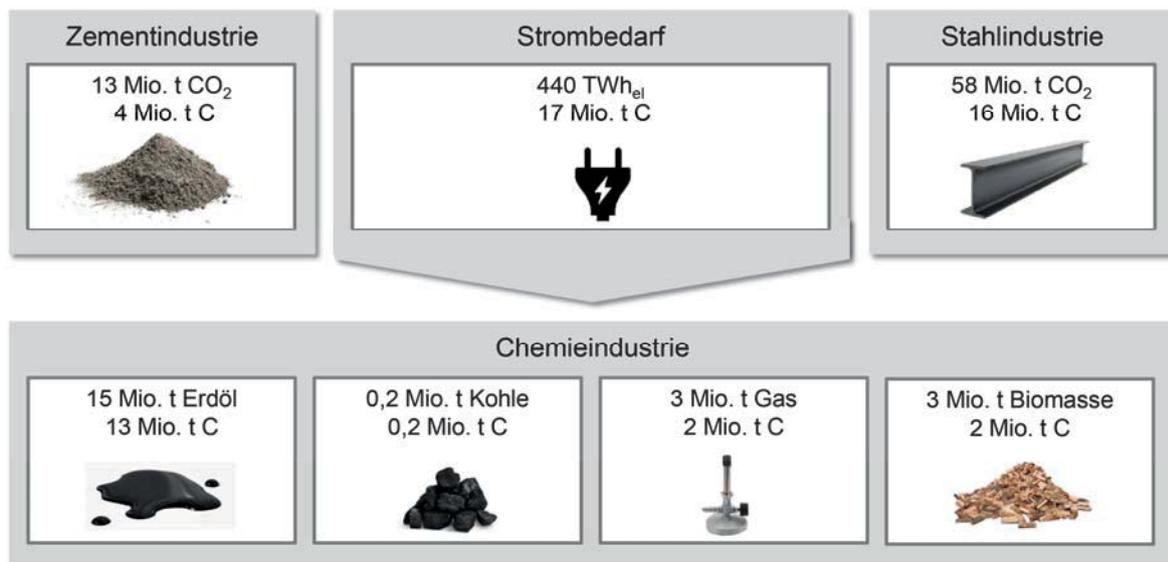


Abbildung 3: Kohlenstoffbedarf der deutschen chemischen Industrie im Vergleich zu relevanten CO₂-Quellen und zum Strombedarf bei einer hypothetischen, rein auf CO₂ basierenden Chemie – Berechnung siehe Text. [6]

Die zur Aktivierung von 17 Mio t Kohlenstoff benötigte elektrische Energie beträgt 440 TWh. Sie berechnet sich aus der elektrolytisch erzeugten Wasserstoffmenge, die benötigt

¹² CO₂ aus Biogasanlagen bleibt an dieser Stelle unberücksichtigt.

¹³ Durch stoffliche Umsätze ohne Energiewandlung.

wird um CO₂ zu organischen Produkten umzusetzen.¹⁴ Diese Strommenge entspricht etwa 80 % des deutschen Nettostromverbrauches im Jahr 2011 (535 TWh/a) [23]. Berücksichtigt man dann noch, dass erneuerbarer Strom auch in andere Sektoren transferiert werden soll/muss, um den CO₂-Ausstoß dieser Sektoren zu verringern, lässt sich erahnen, welche gewaltigen Mengen erneuerbarer Energie benötigt werden. So beschreibt Quaschnig [23] in seiner Studie zur Sektorenkopplung, welche Anforderungen sich aus den Pariser Klimaschutzziele 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/a¹⁵ besteht [24], 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 [25] 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 [25].

4 Resümee

Ausgehend vom »Zwei-Grad-Ziel« der Pariser Klimaschutzkonferenz wurde im vorliegenden Beitrag ein theoretisches Produktionssystem diskutiert, das ohne fossile Rohstoffe auskommt. Hierzu wurden Abschätzungen zur benötigten Kohlenstoffmenge in der Chemischen Industrie sowie in der Stahl- und Zementindustrie vorgenommen und in Relation zur nachhaltig verfügbaren Biomassemenge gesetzt. Die Abschätzungen erfolgten auf globaler Ebene, so dass lokale Faktoren unberücksichtigt bleiben. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit von Biomasse wurde deutlich, dass es sinnvoll ist, eine kaskadenförmige Kohlenstoffnutzung im Produktionssystem vorzusehen, die eine Kopplung verschiedener Branchen erfordert. Wichtige branchenverknüpfende Technologien können dabei Power2X-Verfahren sein, die CO₂ unter Zuhilfenahme regenerativer Energie zu Produkten umsetzen und so eine »Mehrfachnutzung« von Kohlenstoff erlauben. In zukünftigen Produktionskonzepten, die auf kaskadenförmige Kohlenstoffnutzungen setzen, werden dabei die Stahlindustrie, die

¹⁴ Es wurde angenommen, dass zur Herstellung von 1 m³ H₂ 4,6 kWh elektrischer Strom erforderlich sind, und dass Wasserstoff vollständig zu Methanol umgesetzt wird.

¹⁵ Das Umweltbundesamt geht in seinem Bericht »Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050« ([24]) in seinem Szenario davon aus, dass die CO₂-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 ([24], S.9).

Chemische Industrie, die Kalk-/Zementindustrie und die Energiewirtschaft natürliche Partner sein. Eine wesentliche Standortvoraussetzung für diese Industrien wird dabei der Zugang zu Energie und Rohstoffen sein. Welche Größenordnung an regenerativer Energie und welche Kohlenstoffmengen benötigt werden, wurde im vorliegenden Beitrag gezeigt. Obwohl grundsätzlich geeignete Technologien zur Verfügung stehen oder in den nächsten Jahren bzw. Jahrzehnten entwickelt werden können¹⁶, ist unklar, ob es gelingt, diese erforderlichen Energiemengen bereitzustellen. Der Ausbau regenerativer Energien muss deshalb soweit wie möglich vorangetrieben werden, da die vorhandenen Konzepte für eine neue Kohlenstoffwirtschaft ohne ausreichende Mengen an regenerativer Energie wirkungslos bleiben.

5 Literatur

- [1] ClubofRome, *Club of Rome: Homepage*, <https://www.clubofrome.org/> 2017.
- [2] IPCC, *Homepage* 2017, <http://www.ipcc.ch/index.htm> (04.08.2017).
- [3] acatech, *Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050: Stabilität im Zeitalter der erneuerbaren Energien*, Berlin, https://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublicat%20on/2015_12_ESYS_Stellungnahme_Flexibilitaetskonzepte.pdf 2015.
- [4] WBGU, *Welt im Wandel-Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation*, Berlin 2011, http://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu.de/templates/dateien/veroeffentlichungen/hauptgutachten/jg2011/wbgu_jg2011.pdf (30.07.2017).
- [5] *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren* (Eds: Kaltschmitt, M., Hartmann, H., H. Hofbauer), Springer, Heidelberg 2009.
- [6] 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, *Kohlenstoff, Biomasse und Regenerativer Strom-Ressourcen einer neuen Kohlenstoffwirtschaft*, 1st ed., Laufen, K M, Oberhausen, Rheinl 2017.
- [7] Worldcoal, *Coal & Steel Facts 2014*, [http://www.worldcoal.org/file_validate.php?file=coal_steel_facts_2014\(12_09_2014\).pdf](http://www.worldcoal.org/file_validate.php?file=coal_steel_facts_2014(12_09_2014).pdf) 2014.
- [8] Franck, H.-G. *Kohleveredlung*, Springer Vieweg, Heidelberg 1979.
- [9] Kashiwaya, Y., Hasegawa, M. Process image of hydrogen ironmaking in future, *Current Advances in Materials and Processes*, 2013, 26 (2), 524 – 527.
- [10] ULCOS, *ULCOS-Projekt-Homepage*, <http://www.ulcos.org/de/research/electrolysis.php> 2017.
- [11] Hollemann, A., Wiberg, E., *Lehrbuch der anorganischen Chemie*, 81st ed., De Gruyter, Berlin 1976.
- [12] Green, J., *World Cement* 2015.

¹⁶ Einen Überblick gibt die aktuelle Technologie Studie der DECHEMA ([18]).

- [13] 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..
- [14] Statistik-Portal, *Anteil der Verkehrsträger an den weltweiten CO2-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe im Jahr 2013*, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/317683/umfrage/verkehrstraeger-anteil-co2-emissionen-fossile-brennstoffe/2013>.
- [15] Zimmermann, H., Walzl, R., *Ethylen*, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry 2012. DOI: 10.1002/14356007.a10_045.pub3.
- [16] IHSMarkit, *Internetseite IHS Markit*, <http://news.ihsmarkit.com/press-release/chemicals/2020-us-emerge-largest-exporter-light-naphtha-essential-production-gasoline> 2015.
- [17] Landtag NRW, *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 2015.
- [18] Bazzanella, F. Ausfelder, A.; *Technology Study Low carbon energy and feedstock for the European chemical industry*, DECHEMA, Frankfurt 2017.
- [19] FONA, *BMBF-Pressemitteilung 2016*, <https://www.fona.de/de/carbon2chem-21137.html> (28.07.2017).
- [20] RWI, *Die Klimavorsorgeverpflichtung der deutschen Wirtschaft – Monitoringbericht 2011 und 2012*, Essen, http://www.rwi-essen.de/media/content/pages/publikationen/rwi-projektberichte/RWI_PB_Monitoringbericht-2011-und-2012.pdf 2013.
- [21] Ketelaer, T. Vögele, S., *STE Research Report 2014: Situation der Stahlindustrie vor dem Hintergrund der Anwendung von Effizienzmaßnahmen*, http://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Downloads/IEK/IEK-STE/DE/Publikationen/research_reports/2014/report_06_2014.pdf?__blob=publicationFile (28.07.2017).
- [22] VDZ, *Monitoring-Bericht 2008 – 2009 Verminderung der CO2-Emissionen Beitrag der deutschen Zementindustrie* VDZ, Düsseldorf, https://www.vdz-onli-ne.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/UmweltundRessourcen/co2monitoring/Monitoring_Bericht_2009_final.pdf 2010.
- [23] Quaschnig, V., *Sektorkopplung durch die Energiewende – Anforderungen an den Ausbau erneuerbarer Energien zum Erreichen der Pariser Klimaschutzziele unter Berücksichtigung der Sektorkopplung*. Berlin, Berlin, <https://www.volker-quaschnig.de/publis/studien/sektorkopplung/index.php> 2016.

- [24] UBA, *Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050*, Dessau-Roßlau, https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/treibhausgasneutrales_deutschland_im_jahr_2050_langfassung.pdf 2014.
- [25] Kreyenberg, D. *Potenziale und Entwicklungsperspektiven verschiedener erneuerbarer Energieträger und Energieverbrauch der Verkehrsträger: Studie im Rahmen der Wissenschaftlichen Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVI*, Berlin, <http://www.lbst.de/download/2015/mks-kurzstudie-ee-im-verkehr.pdf> 2015.