



Manfred Kircher  
Thomas Schwarz *Hrsg.*

# CO<sub>2</sub> und CO – Nachhaltige Kohlenstoffquellen für die Kreislauf- wirtschaft

 Springer Spektrum

CO<sub>2</sub> und CO – Nachhaltige Kohlenstoffquellen für die Kreislaufwirtschaft

Manfred Kircher  
Thomas Schwarz  
(Hrsg.)

# **CO<sub>2</sub> und CO – Nachhaltige Kohlenstoffquellen für die Kreislauf- wirtschaft**

Hrsg.  
**Manfred Kircher**  
Frankfurt, Deutschland

**Thomas Schwarz**  
Köln, Deutschland



ISBN 978-3-662-60648-3      ISBN 978-3-662-60649-0 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-60649-0>

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

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2020

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Stephanie Preuss

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

## Vorwort

---

Steigende Temperaturen und Trockenheit sensibilisieren breite Bevölkerungsschichten für den Klimawandel. Weltweit fordert die Jugend mit der „Fridays for future“-Bewegung Klimaschutz und die Abkehr von fossilen Rohstoffen. Auch politisch gewinnt der Klimawandel an Gewicht. Die Bundesregierung hat im September 2019 Eckpunkte für das Klimaschutzprogramm 2030 beschlossen, die u. a. eine zunehmende Belastung der Emission von Kohlendioxid vorsehen, um den Rohstoffwandel weg von Öl, Kohle und Erdgas zu beschleunigen. Damit sind der Klimawandel und seine Ursachen heute zu einem der wichtigsten Treiber für den Technologiewandel und die Umsetzung neuer Nachhaltigkeitskonzepte geworden.

Im Fokus steht dabei die Energiewirtschaft, die tatsächlich der bei Weitem größte Verbraucher fossiler Rohstoffe ist. Von ihr wird die „Dekarbonisierung“, also die Abkehr von fossilen Kohlenstoffquellen, gefordert. Auch die Chemieindustrie, deren Rohstoffspektrum heute in Deutschland zu 87 % fossilbasiert ist, ist betroffen. Dabei gibt es hier einen großen Unterschied zur Energiewirtschaft: Pharmazeutika, kosmetische Wirkstoffe, Wasch- und Reinigungsmittel, Schmiermittel, Kunststoffe und die vielen weiteren Produkte der Organischen Chemie enthalten definitionsgemäß Kohlenstoff und dieses Element kann auch nicht durch ein anderes ersetzt werden. Für die Chemie ist „Dekarbonisierung“ deshalb gar nicht möglich; das Erschließen anderer, erneuerbarer Kohlenstoffquellen ist die einzige Alternative. Dabei ist die Abkehr vom Öl für die Chemie nicht nur eine Frage des Klimaschutzes und der Nachhaltigkeit. Weil der wichtigste Rohstoff Naphtha eigentlich ein Nebenprodukt von Ölraffinerien ist, ist die Chemie auch von laufenden Raffinerien abhängig. Mit sinkendem Verbrauch von fossilen Energieträgern werden Raffinerien aber Kapazitäten abbauen, und damit wird auch Naphtha vom Markt verschwinden. Damit muss sich die Chemie zwangsläufig darauf vorbereiten, rohstoffseitig die Abhängigkeit von Ölraffinerien zu verringern.

Eine mögliche Alternative ist der Umstieg auf Biomasse, also vor allem auf pflanzliche Rohstoffe, die land- und forstwirtschaftlich angebaut werden. Damit eröffnet sich allerdings ein neues Konfliktfeld, denn hier drängt die Chemieindustrie in Märkte, die bereits vor allem die Nahrungs- und Futtermittelindustrie bedienen. Auch diese Verbrauchsfelder werden von der Öffentlichkeit sensibel beobachtet, und die Politik hat die Ernährung zur höchsten Priorität der Landwirtschaft erklärt. Für die Chemie ist es deshalb nicht nur ratsam, sondern langfristig unverzichtbar, eher auf nicht für die Ernährung geeignete Kohlenstoffquellen auszuweichen. Hier kommen Nebenprodukte aus Produktionsketten und Abfällen, die in Prozesse der Chemieindustrie eingespeist und so recycelt werden können, infrage. Beispiele sind organische Fraktionen von Industrie- und Siedlungsabfällen, land- und forstwirtschaftliche Abfälle, städtischer Grünschnitt, Klärschlamm, Lebensmittelabfälle und – nicht zu vergessen – die Kohlenmonoxid- und Kohlendioxidemission. Die genannten Abfälle sind komplex und deshalb für Industrieprozesse zunächst wenig geeignet. Durch Gasifizierung lassen sie sich aber standardisieren und bieten dann mit Kohlenmonoxid eine für die Chemie geeignete Kohlenstoffquelle. Gasförmige Kohlenstoffquellen mit nur einem Kohlenstoffatom (C1-Moleküle) sind deshalb das Thema dieses Buches.

Siebzehn Kapitel präsentieren den Stand der Technik der Nutzung von C1-Kohlenstoffquellen sowie Forschungsentwicklungen und diskutieren das industrielle Potenzial, die Rahmenbedingungen und den möglichen Beitrag zur Regionalentwicklung. Pioniere auf dem Gebiet der C1-Kohlenstoffnutzung beschreiben in dem Buch ihre technologischen Ansätze, ihre wissenschaftlichen Entwicklungen und die ersten industriellen Umsetzungsprojekte mit Referenzcharakter. Entscheidungsträger in Wirtschaft und Politik sowie interessierte, betroffene und nach neuen Lösungensuchende Bürger sollen in gut verständlicher Darstellung und Erklärung auf Wege zur Nutzung von aus Emissionen und Abfällen generierbaren Kohlenstoffquellen aufmerksam gemacht werden. Diese Möglichkeiten zur stofflichen Kreislaufschließung wurden bislang häufig übersehen und sind einer breiten Öffentlichkeit nicht so präsent, wie es wünschenswert wäre. Die Kreislaufnutzung dieser Kohlenstoffe wird zukünftig einen wichtigen Beitrag zur nachhaltigen Rohstoffversorgung der Chemieindustrie leisten und wesentlich zum erforderlichen Technologiewandel hin zu einer nachhaltigen Wirtschaft beitragen. Dieses Buch soll dazu inspirieren, den erforderlichen Technologiewandel auf dem Gebiet der stofflichen C1-Kohlenstoffnutzung in allen gesellschaftlichen Bereichen dynamisch voranzutreiben.

**Dr. Manfred Kircher**  
**Dr. Thomas Schwarz**  
Frankfurt und Köln  
September 2019

# Inhaltsverzeichnis

---

1	<b>CO<sub>2</sub> und CO: nachhaltige Kohlenstoffquellen für die zirkuläre Wertschöpfung</b> .....	1
	<i>Manfred Kircher, Cornelia Bähr, Dennis Herzberg und Thomas Schwarz</i>	
2	<b>CO und CO<sub>2</sub></b> .....	9
	<i>Dennis Krämer und Katy Armstrong</i>	
3	<b>Konventionelle Verfahren zur Wasserstoffherstellung</b> .....	17
	<i>Jose Antonio Medrano, Emma Palo und Fausto Gallucci</i>	
4	<b>Alternative biologische und biotechnologische Verfahren zur Wasserstoffherstellung</b> .....	39
	<i>Christina Marx und Thomas Happe</i>	
5	<b>Herstellung von Synthesegas</b> .....	59
	<i>Johannes Booz, Dominik Höhner und Stefan Burmester</i>	
6	<b>Chemisch-katalytische Konversion</b> .....	77
	<i>Robert Schlögl</i>	
7	<b>Biokatalytische Konversion</b> .....	99
	<i>Frank R. Bengelsdorf und Peter Dürre</i>	
8	<b>Mikrobielle Verfahren zur Umsetzung von CO<sub>2</sub> und CO</b> .....	121
	<i>Dirk Weuster-Botz, Frank Kensy, Heleen De Wever und Linsey Garcia-Gonzalez</i>	
9	<b>Herausforderungen bei der Produktaufarbeitung</b> .....	151
	<i>Bettina Sayder, Kerstin Schwarze-Benning, Hans-Jürgen Körner und Ute Merrettig-Bruns</i>	
10	<b>Möglichkeiten der Integration in bestehende industrielle Anlagen mit relevanten C1-Gasströmen</b> .....	169
	<i>Görge Deerberg, Michael Hensmann, Marten Sprecher, Helmut Hoppe, Jens Hannes, Ute Merrettig-Bruns, Bettina Sayder, Kerstin Schwarze-Benning und Hans-Jürgen Körner</i>	
11	<b>Möglichkeiten der Integration von Reststoffen in industrielle Anlagen mit relevanten C1-Gasströmen</b> .....	219
	<i>Thomas Bayer, Michael Binder, Johannes Booz und Stefan Burmester</i>	
12	<b>CO<sub>2</sub> als Systemkomponente für Energiespeicher und Rohstoff für Basischemikalien</b> .....	245
	<i>Thomas Marzi und Görge Deerberg</i>	

13	<b>CO- und CO<sub>2</sub>-Nutzung und Nachhaltigkeit</b> .....	267
	<i>Michael Carus</i>	
14	<b>Regionalentwicklung</b> .....	277
	<i>Dennis Herzberg und Manfred Kircher</i>	
15	<b>Regulatorische Rahmenbedingungen für die stoffliche Nutzung von CO<sub>2</sub></b> .....	287
	<i>Jörg Rothermel, Dennis Krämer, Tilman Benzing und Tina Buchholz</i>	
16	<b>Industriebeispiele und Anwendungsbereiche</b> .....	293
	<i>Thomas Schwarz, Christoph Gürtler, Torsten Müller, Christophe Mihalcea, Freya Burton, Robert Conrado, Sean Simpson, Biniam T. Maru, Pradeep C. Munasinghe, Shawn W. Jones, Bryan P. Tracy, Ronnie Machielsen, Ross Gordon, Deepak Pant, Metin Bulut, Heleen De Wever, Frank Kensy, Stefan Verseck und Christian Janke</i>	
17	<b>Abschließende Bewertung und Zusammenfassung</b> .....	341
	<i>Manfred Kircher</i>	
	<b>Serviceteil</b>	
	Stichwortverzeichnis.....	353

# Herausgeber- und Autorenverzeichnis

---

## Über die Herausgeber

---



### Dr. Manfred Kircher

Die Motivation von Dr. Manfred Kircher für dieses Buch speist sich aus der Erkenntnis, dass der Rohstoffwandel von fossilen zu bio-basierten Kohlenstoffquellen vorangetrieben werden muss, aber eine allein auf Biomasse setzende Bioökonomie an planetare Grenzen stoßen wird. Der Kohlenstoffkreislauf muss deshalb möglichst auch technisch geschlossen werden und dafür sind C1-Kohlenstoffquellen besonders geeignet.

Dr. Manfred Kircher kann auf umfangreiche Erfahrung in biotechnologischer Forschung und Entwicklung (Degussa AG, Deutschland), Produktion (Fermas s. r. o.; Slowakei), Venture Capital (Burrill & Company; USA) und Partnering and Branding (Evonik Industries AG; Deutschland) zurückgreifen. 2007 hat er die Konzeptentwicklung für den Cluster Industrieller Biotechnologie erfolgreich koordiniert und war als Delegierter der Evonik bis 2012 Vorsitzender des Vorstands des Cluster Industrielle Biotechnologie 2021 e. V. (CLIB). Seit 2014 ist er Vorsitzender des Beirats von CLIB (► [www.clib-cluster.de](http://www.clib-cluster.de)). 2014 hat er das Beratungsunternehmen KADIB – Kircher Advice in Bioeconomy gegründet und unter anderem 2018 die Konzeptentwicklung für den Innovationsraum BioBall (Bioökonomie im Ballungsraum) erfolgreich koordiniert. Seit 2019 ist er Mitglied des Vorstands des Vereins „BioBall – Bioökonomie im Ballungsraum e. V.“.

Dr. Manfred Kircher wurde in Steuerungsgremien internationaler Bioökonomie-Programme berufen und ist ein von der EU-Kommission zertifizierter Experte. Ausgebildet ist er als Mikrobiologie (Goethe-Universität, Frankfurt am Main).



### Dr. Thomas Schwarz

ist seit Juli 2019 als CSO/CTO Mitglied der Geschäftsleitung der bitop AG. Zuvor war er von 1993–2009 bereits leitender Mitarbeiter der bitop AG, zuletzt als Sprecher des Vorstands. 1993 hat er mit weiteren Forschern der Universität Witten/Herdecke die bitop gegründet. Von 2009 bis 2015 war er Geschäftsführer der instrAction GmbH in Mannheim. Im Zeitraum 2016–2019 war er an der Gründung verschiedener Unternehmen der Biotechnologie beteiligt, u. a. der b.value AG, der SenseUp GmbH, der CropEvolution GmbH und der b.fab GmbH. Dr. Schwarz studierte zunächst Biologie an der RWTH Aachen und der Universität zu Köln, bevor er sein Studium an der Privaten Universität Witten/Herdecke fortführte, wo er 1993 in Biochemie promovierte. Sein fachlicher Schwerpunkt liegt in den Bereichen angewandten Mikrobiologie, der Enzymtechnologie und Downstream-Processing. Die Gründung und Entwicklung von Unternehmen im Bereich der Biotechnologie und der Chemie und die hierfür erforderliche Netzwerkarbeit stand immer im Fokus seiner Tätigkeit. Im Jahr 2000 gewann er den Innovationspreis Ruhrgebiet

für die Entwicklung des Wirkstoffs Ectoin. Dr. Schwarz ist Mitbegründer und war von 2007–2019 Mitglied des geschäftsführenden Vorstandes des CLIB in Düsseldorf, zuletzt als Vorsitzender des Vorstands.

Als mehrfacher Gründer und Leiter von Unternehmen der Biotechnologie und Chemie ist Herr Dr. Schwarz davon überzeugt, dass die zwingende Notwendigkeit zukünftig schonend und nachhaltig mit den begrenzten Ressourcen der Erde umgehen zu müssen, zugleich ein sehr starker Innovationstreiber ist und viele Chancen bietet. Gerade die mögliche stoffliche Nutzung von C1-Gasen und die Kreislaufnutzung von Stoffströmen unter Einbindung regenerativer Energien bietet hier enormes Potential und exzellente Chancen für Neugründungen. Dies hat ihn u. a. dazu bewogen, die Gründung der b.fab GmbH mit zu initiieren, welche ein biotechnisches Verfahren zur Nutzung von Formiat als Speicherstoff von CO<sub>2</sub> und Wasserstoff entwickelt.



### **Dr. Cornelia Bähr**

ist Bioverfahrenstechnikerin und bringt mehr als 10 Jahre Erfahrung in der Bioprozessentwicklung mit. Von 2013 bis 2018 war sie als wissenschaftliche Beraterin im Cluster- und Verbandsumfeld der industriellen Biotechnologie und Chemie (CLIB und VCI.NRW) aktiv, wo sie sich mit Entwicklungs- und Vermarktungsmöglichkeiten von biotechnologischen Prozessen und deren Produkten beschäftigt hat. In diesem Kontext galt ihr besonderes Interesse den biotechnologischen und chemischen Verwertungsoptionen von C1-haltigen Prozessgasen sowie den damit verbundenen Chancen und Herausforderungen zu deren Nutzung als nachhaltige Kohlenstoffquellen. Bei CLIB war Dr. Cornelia Bähr von 2015 bis 2018 als Projektkoordinatorin grenzüberschreitender Verbundprojekte in diesem Themenfeld zuständig. Ihre technische Expertise und Erfahrungen im internationalen Projektmanagement bringt sie seit August 2017 als Projektmanagerin und Interimsleiterin von Gründungsprojekten in die b.value AG ein, einer Beteiligungsgesellschaft mit dem Investitionsschwerpunkt der industriellen Biotechnologie.



### **Dr. Lena Kröninger**

studierte von 2009 bis 2012 Biowissenschaften (Bachelor) in Frankfurt am Main. Bereits zu dieser Zeit setzte sie sich vor allem mit mikrobiologischen Themen auseinander und konzentrierte sich während ihrer Abschlussarbeit auf Mechanismen zur Salzresistenz bei Bakterien. Danach wechselte Lena Kröninger zur Universität Bonn und studierte Mikrobiologie (Master) zwischen 2012 und 2014. Der Fokus ihrer Forschung lag auf der Untersuchung von Schlüsselenzymen der Methanogenese von methanogenen Organismen, die beispielsweise in der Biogasanlage vorkommen. Im Anschluss an das Masterstudium führte sie ihre Forschungstätigkeiten zur Methanproduktion während der Promotion (2014 bis 2018) weiter und untersuchte einen methanogenen Organismus, der im menschlichen Darm vorkommt. Nach der erfolgreichen Promotion begann sie als Projektmanagerin bei CLIB und war dort bis August 2019 tätig.



### **Dr. Sarah Refai**

studierte von 2006 bis 2012 Biologie (Diplom) an der Universität Bonn. Bereits zu dieser Zeit setzte sie sich vor allem mit mikrobiologischen Themen zur C1 Konversion auseinander. Der Fokus ihrer Forschung in der Diplomarbeit lag auf der Untersuchung von Schlüsselenzymen des zentralen Metabolismus von methanogenen Organismen, die beispielsweise in Biogasanlagen vorkommen. Im Anschluss führte sie umfangreiche, anwendungsbezogene Forschungstätigkeiten zur mikrobiellen Biogasproduktion während ihrer Promotion (2014 bis 2018) durch und entwickelte effiziente und wirkungsvolle Werkzeuge den Biogasprozess zu überwachen und zu verbessern. Nach der erfolgreichen Promotion und der zusätzlichen Ausbildung zur zertifizierten Projektmanagerin begann sie im April 2018 ihre Tätigkeit bei CLIB. Dort unterstützt Dr. Sarah Refai seitdem mit ihrem Wissen zur Bioprozessentwicklung und ihren wissenschaftlichen Hintergründen in der Biochemie und der angewandten Biotechnologie den Bereich der C1-Biokonversion in regionalen, nationalen und internationalen Projekten. Mit ihren umfangreichen Erfahrungen in der Projekt- und Prozessentwicklung koordiniert sie F & E-Projekte, konzentriert sich auf Förderberatung und die Bildung von Konsortien und Kooperationen von Partnern und Mitgliedern des Clusters.

## **Autorenverzeichnis**

---

### **Katy Armstrong, B.Eng.**

The University of Sheffield  
Sheffield, UK

### **Dr. Michael Binder**

Evonik Nutrition & Care GmbH  
Hanau-Wolfgang, Deutschland

### **Dr. Cornelia Bähr**

b.value, Deutsche Biotechnologie Beteiligungs  
AG, Düsseldorf, Deutschland

### **Johannes Booz, M.Sc.**

Concord Blue Engineering GmbH  
Herten, Deutschland

### **Prof. Dr. Thomas Bayer**

Provadis, School of International Management  
and Technology AG, Industriepark Höchst  
Frankfurt am Main, Deutschland

### **Dr. Tina Buchholz**

Verband der Chemischen Industrie e.V.  
Frankfurt a. M., Deutschland

### **Dr. Frank R. Bengelsdorf**

Institut für Mikrobiologie und Biotechnologie  
Universität Ulm  
Ulm, Deutschland

### **Metin Bulut, Ph.D.**

Separation and Conversion Technology  
Flemish Institute for Technological Research  
(VITO)  
Mol, Belgien

### **Dipl.-Kfm. Tilman Benzing**

Verband der Chemischen Industrie e.V.  
Frankfurt a. M., Deutschland

### **Dipl.-Ök. Stefan Burmester**

Concord Blue Engineering GmbH  
Herten, Deutschland

**Freya Burton, M.A.**

LanzaTech  
Skokie, USA

**Dipl.-Phys. Michael Carus**

nova-Institut für Politische und Ökologische  
Innovation GmbH  
Hürth, Deutschland

**Robert Conrado, Ph.D.**

LanzaTech  
Skokie, USA

**Prof. Dr.-Ing. Gorge Deerberg**

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-  
und Energietechnik UMSICHT  
Oberhausen, Deutschland

**Heleen De Wever, Ph.D.**

Separation and Conversion Technology  
Flemish Institute for Technological Research  
(VITO)  
Mol, Belgien

**Prof. Dr. Peter Dürre**

Institut für Mikrobiologie und Biotechnologie  
Universität Ulm  
Ulm, Deutschland

**Prof. Dr. Fausto Gallucci**

Department of Chemical Engineering and  
Chemistry  
Eindhoven University of Technology  
Eindhoven, Niederlande

**Linsey Garcia-Gonzalez, Ph.D.**

Separation and Conversion Technology  
Flemish Institute for Technological Research  
(VITO)  
Mol, Belgien

**Ross Gordon, M.Eng., M.Sc., MBA**

Photanol B.V.  
Amsterdam, Niederlande

**Dr. Christoph Gürtler**

Covestro Deutschland AG  
Leverkusen, Deutschland

**Dr. Jens Hannes**

RWE Power AG  
Essen, Deutschland

**Prof. Dr. Thomas Happe**

Fakultät für Biologie und Biotechnologie,  
Lehrstuhl für Biochemie der Pflanzen  
Ruhr-Universität Bochum  
Bochum, Deutschland

**Dipl.-Ing. Michael Hensmann**

VDEh Betriebsforschungsinstitut  
Düsseldorf, Deutschland

**Dennis Herzberg, M.Sc.**

CLIB – Cluster Industrielle Biotechnologie  
Düsseldorf, Deutschland

**Dr.-Ing. Dominik Höhner**

Concord Blue Engineering GmbH  
Herten, Deutschland

**Dr. Helmut Hoppe**

VDZ gGmbH  
Düsseldorf, Deutschland

**Dr. Christian Janke**

Fraunhofer-Institut für Molekularbiologie und  
Angewandte Oekologie IME  
Aachen, Deutschland

**Shawn W. Jones, Ph.D.**

White Dog Labs, Inc.  
New Castle, USA

**Dr.-Ing. Frank Kensy**

b.fab GmbH  
Dortmund, Deutschland

**Dr. Manfred Kircher**

CLIB – Cluster Industrielle Biotechnologie  
Düsseldorf, Deutschland

KADIB – Kircher Advice in Bioeconomy  
Frankfurt a. M., Deutschland

[kircher@clib-cluster.de](mailto:kircher@clib-cluster.de)

[kircher@kadib.de](mailto:kircher@kadib.de)

**Dipl.-Ing. Hans-Jürgen Körner**

Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits-  
und Energietechnik UMSICHT  
Oberhausen, Deutschland

**Dipl.-Ing. Dennis Krämer**

DECHEMA e. V.  
Frankfurt a. M., Deutschland

**Ronnie Machielsen, Ph.D.**

Photanol B.V.  
Amsterdam, Niederlande

**Biniam T. Maru, Ph.D.**

White Dog Labs, Inc.  
New Castle, USA

**Dr. Christina Marx**

SolarBioproducts Ruhr, WFG Herne mbH  
Herne, Deutschland

**Dr. Thomas Marzi**

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-  
und Energietechnik UMSICHT  
Oberhausen, Deutschland

**Dr. Jose Antonio Medrano**

Department of Chemical Engineering and  
Chemistry  
Eindhoven University of Technology  
Eindhoven, Niederlande

**Dr. Ute Merrettig-Bruns**

Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits-  
und Energietechnik UMSICHT  
Oberhausen, Deutschland

**Christophe Mihalcea, Ph.D.**

LanzaTech  
Skokie, USA

**Dr.-Ing. Torsten Müller**

Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits-  
und Energietechnik UMSICHT  
Oberhausen, Deutschland

**Pradeep C. Munasinghe, Ph.D.**

White Dog Labs, Inc.  
New Castle, USA

**Emma Palo, Ph.D.**

KT – Kinetics Technology S.p.A.  
Rom, Italien

**Deepak Pant, Ph.D.**

Separation and Conversion Technology  
Flemish Institute for Technological  
Research (VITO)  
Mol, Belgien

**Dr. Jörg Rothermel**

Verband der Chemischen Industrie e.V.  
Frankfurt a. M., Deutschland

**Dipl.-Ing. Bettina Sayder**

Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits-  
und Energietechnik UMSICHT  
Oberhausen, Deutschland

**Prof. Dr. Robert Schlögl**

Max-Planck-Institut für Chemische  
Energiekonversion  
Mülheim an der Ruhr, Deutschland

**Dr. Thomas Schwarz**

CLIB – Cluster Industrielle Biotechnologie  
Düsseldorf, Deutschland  
[schwarz@clib-cluster.de](mailto:schwarz@clib-cluster.de)

**Dipl.-Ing. Kerstin Schwarze-Benning**

Fraunhofer-Institut für Umwelt, Sicherheits-  
und Energietechnik UMSICHT  
Oberhausen, Deutschland

**Sean Simpson, Ph.D.**

LanzaTech  
Skokie, USA

**Marten Sprecher**

Düsseldorf, Deutschland

**Bryan P. Tracy, Ph.D.**

White Dog Labs, Inc.  
New Castle, USA

**Dr. Stefan Verseck**

Hilden, Deutschland

**Prof. Dr. Dirk Weuster-Botz**

Lehrstuhl für Bioverfahrenstechnik  
Technische Universität München  
Garching, Deutschland



# CO<sub>2</sub> und CO: nachhaltige Kohlenstoffquellen für die zirkuläre Wertschöpfung

*Manfred Kircher, Cornelia Bähr, Dennis Herzberg und  
Thomas Schwarz*

## Inhaltsverzeichnis

- 1.1 Einleitung – 2
- 1.2 Problemstellung – 2
- 1.3 Konzept der zirkulären Wertschöpfung – 3
- 1.4 Ziele des Buches – 5
- 1.5 Gliederung des Buches – 5
- Literatur – 8

## 1.1 Einleitung

Derzeit wird intensiv nach Möglichkeiten zur Reduktion von Kohlenstoffemissionen – besonders in Branchen wie Energie und Stahl und weiteren energieintensiven Industrien – gesucht. Gleichzeitig bereitet sich die chemische Industrie auf die „*post-oil*“-Ära vor und erschließt alternative Kohlenstoffquellen. Die stoffliche Nutzung von (industriellen) Abgasströmen zur Herstellung von Treibstoffen und Chemikalien bietet für beide Herausforderungen großes Lösungspotenzial. Denn sie reduziert Emissionen und verringert zugleich den Verbrauch primärer fossiler Rohstoffe. Da kohlenstoffhaltige Industrieabgase in großen Volumina in Europa vorhanden sind und nicht mit der Ernährung konkurrieren, können sie einen großen Beitrag zur zuverlässigen und nachhaltigen Rohstoffversorgung leisten und helfen, Kreisläufe zu schließen.

## 1.2 Problemstellung

Energie- und Prozessindustrien brauchen eine zuverlässig lieferbare und ökonomisch wettbewerbsfähige Rohstoffbasis. Heute werden weltweit und auch in Deutschland Strom, Wärme, Treibstoffe und Chemikalien ganz überwiegend auf Basis fossiler Rohstoffe produziert. Gas und Kohle sind die dominierenden Quellen für Wärme und Strom. Treibstoffe (Benzin, Diesel, Kerosin) sind ganz überwiegend Produkte der Raffination von Erdöl, und in der Chemieindustrie ist der volumenmäßig bedeutendste Rohstoff die Erdölfraktion Naphtha. Dabei gehen weltweit mehr als 95 % des fossilen Kohlenstoffs in den Energiesektor (jährlich 11 Mrd. Tonnen Kohlenstoff aus Kohle, Gas, Öl). Die stoffliche Verwertung zu Chemikalien beansprucht rund 300 Mio. Tonnen Kohlenstoff (8 % des Erdöls und einen geringen Anteil von Gas und Kohle). Seit vielen Jahrzehnten hat sich eine auf diese zuverlässig in großen

Mengen verfügbaren und leicht transportierbaren Rohstoffe abgestimmte Infrastruktur (Logistik, Industriestandorte etc.) entwickelt.

Trotzdem ist die Erschließung von Alternativen für die Industrie seit Langem ein Thema. Haupttreiber war zunächst die **Endlichkeit der fossilen Ressourcen** (statische Reichweite für Öl 42, für Gas 63 und für Kohle 340 Jahre [1]). In den letzten Jahren sind allerdings der Klimawandel und die damit verbundene Forderung nach einer **Reduktion der Treibhausgasemission** in den Vordergrund getreten. Sowohl die energetische als auch die stoffliche Nutzung fossiler Rohstoffe führen zur Freisetzung von CO<sub>2</sub>, denn die energetische Nutzung (Strom, Wärme, Treibstoff) verursacht mit der Energiefreisetzung CO<sub>2</sub>-Emission, und auch die stoffliche Nutzung in Form von Chemikalien (Kunststoffe, Lacke, Textilien etc.) setzt CO<sub>2</sub> in der Produktion und nach Gebrauch der Produkte, z. B. im Zuge der energetischen Verwertung in Müllverbrennungsanlagen, frei. Die Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre gilt als eine der Hauptursachen für den Klimawandel.

Emissionsfreie Energien und der Rohstoffwechsel zu biobasierten Kohlenstoffquellen werden deshalb als wichtige Beiträge zum **Pariser Klimavertrag** (2015) gesehen. Dieses Abkommen sieht vor, die Erderwärmung unter 2 °C zu halten und auf 1,5 °C zu beschränken. Sobald wie möglich sollen Treibhausgasemissionen ihren Scheitelpunkt erreichen und danach drastisch reduziert werden. Für die zweite Hälfte unseres Jahrhunderts wird „ein Gleichgewicht zwischen den anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen aus Quellen und dem Abbau solcher Gase durch Senken“ [2] gefordert. Am 04.11.2016 ist das Abkommen in Kraft getreten, und bis Mai 2018 haben 90 % der Staaten der Weltklimakonferenz das Abkommen ratifiziert. Es löst damit das Kyoto-Protokoll von 1997 ab, das 2020 ausgelaufen wäre. Schon auf der Basis dieses Protokolls hatte sich die EU vorgenommen, bis 2030 mindestens 40 % weniger Treibhausgase als 1990 zu emittieren. Im

Pariser Abkommen ist vereinbart, bis 2050 Treibhausgasemissionen gegenüber 1990 um mindestens 95 % zu reduzieren. Dementsprechend verändert der Gesetzgeber zunehmend die **Rahmenbedingungen**. Beispiele sind die Bevorzugung erneuerbarer Energien (EEG), Beimischungsquoten für biobasierte Treibstoffe (Bioethanol, Biodiesel) oder die Einführung von Emissionszertifikaten.

Für die Energieerzeugung wird zunehmend in kohlenstofffreie Alternativen (Wasser- und Windkraft, Solarenergie, Geothermie, in vielen Ländern auch in Kernkraft) investiert, weshalb verallgemeinernd von einer „**Dekarbonisierung der Wirtschaft**“ gesprochen wird. Allerdings ist dieser gängige Begriff stark verkürzend, denn die stoffliche Verwertung zu Produkten der Organischen Chemie ist und bleibt von Kohlenstoff abhängig. Auch für Schwerlast- und Langstreckentreibstoffe (Lkw, Schiffe, Flugzeuge) sind mittelfristig keine kohlenstofffreien Alternativen absehbar. Trotzdem kann deren Kohlenstoff-Fußabdruck durch einen Rohstoffwechsel zu biobasierten Kohlenstoffquellen abgeschwächt werden. Insbesondere pflanzliche, aber auch tierische und marine **Biomasse** wird bereits im Energiesektor (z. B. Wärme aus Holz, Treibstoff aus Zucker und Rapsöl, Strom aus Biogas) genutzt, und auch biobasierte Chemieprodukte sind auf dem Markt. Deren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck ist reduziert, weil das in die Atmosphäre freigesetzte CO<sub>2</sub> aus dem Kohlenstoff der Biomasse stammt und über den **natürlichen Kohlenstoffkreislauf** photosynthetisch wieder in pflanzliche Biomasse zurückgeführt wird. Die Kohlenstoffbilanz bleibt so (theoretisch) neutral. Theoretisch deshalb, weil auch die Kultivierung, Ernte, Logistik und Verarbeitung von Biomasse Treibhausgase freisetzt. Ein solches auf Biomasse basierendes Wirtschaftsmodell wird als **Bioökonomie** bezeichnet und inzwischen von mehr als 40 Nationen, auch der EU, angestrebt. In Deutschland hat die Bundesregierung dafür den Bioökonomierat berufen. Heute sind erneuerbare biobasierte

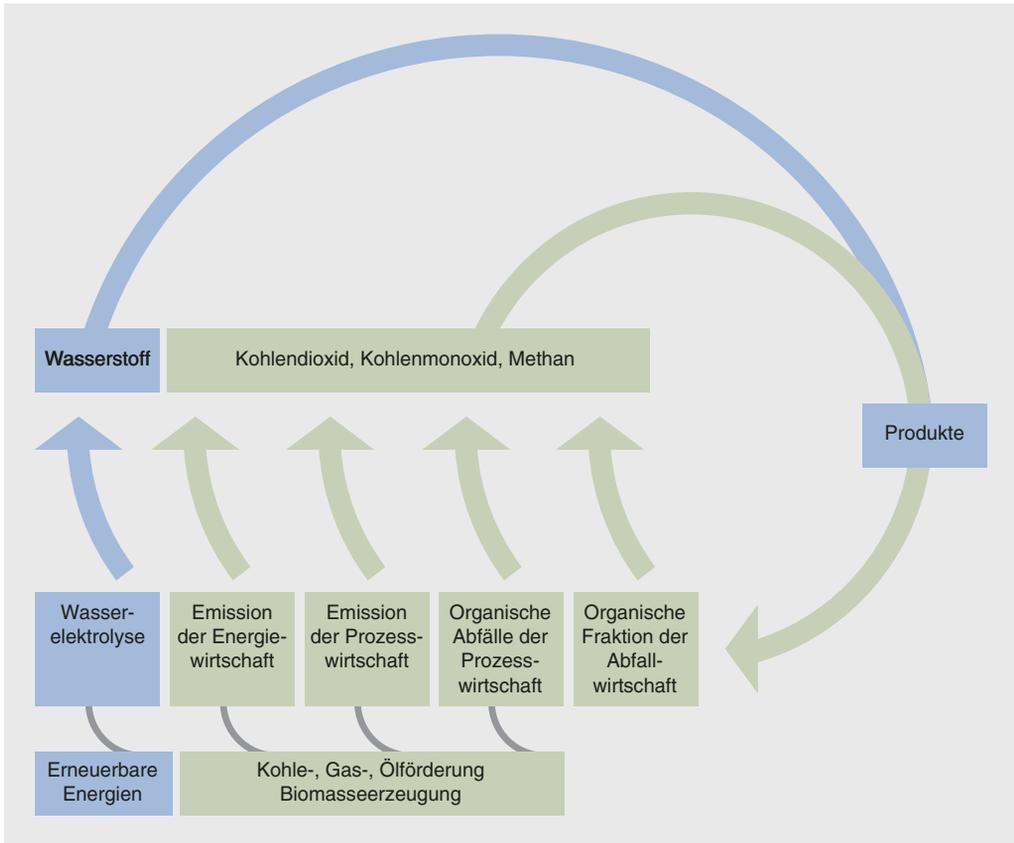
Kohlenstoffquellen in allen Sektoren mit einem zwar überschaubaren, aber wachsenden Anteil etabliert (in Deutschland 7,4 % des Primärenergieverbrauchs [3], 4,8 % der Treibstoffe [4] und 13 % der Chemie-Kohlenstoffquellen [5]).

Für die Prozessindustrie, die weiterhin auf kohlenstoffhaltige Rohstoffe angewiesen bleiben wird, haben diese Entwicklungen außerordentliche Auswirkungen. Rein technisch gesehen können biobasierte Kohlenstoffquellen tatsächlich fossile Rohstoffe ersetzen. Auch was das Angebot betrifft, kommen zahlreiche Studien [6, 7] zu dem Ergebnis, dass die weltweite Agrarwirtschaft die Ernährung sichern und zusammen mit der Forstwirtschaft die Industrie mit Rohstoffen versorgen kann. Trotzdem muss betont werden, dass agrar- und forstwirtschaftliche Flächen begrenzt sind, die Landwirtschaft ein bedeutender Emittent von Treibhausgasen ist, der Erhalt der Biodiversität Flächenschonung verlangt und die wachsende Weltbevölkerung eine Verdoppelung der Nahrungsmittelproduktion bis 2050 erfordert. Insgesamt ist es ratsam, biobasierte Kohlenstoffquellen als nur begrenzt verfügbaren Rohstoff zu betrachten.

### 1.3 Konzept der zirkulären Wertschöpfung

---

Um den erforderliche Kohlenstoffbedarf ausreichend und nachhaltig zu decken, muss deshalb die **Rohstoffeffizienz** erhöht werden. Dabei ist es naheliegend, die bisher als Kohlenstoffquelle vernachlässigten Kohlenstoffströme der **CO- und CO<sub>2</sub>-Emission** zu beachten, d. h. den in technischen Verfahren als Reststoff anfallenden gasförmigen Kohlenstoff in einen weiteren Prozess als Rohstoff einzuspeisen. Die Emission in die Atmosphäre wird dabei vermieden. Neben Emissionsgasen kann auch **Synthesegas**, das aus beliebigen organischen Stoffen wie beispielsweise Siedlungsabfällen hergestellt werden kann, verwendet werden. CO- und CO<sub>2</sub>-verarbeitende Verfahren sind deshalb



▣ **Abb. 1.1** Der technische Kohlenstoffkreislauf für Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) aus Emissionsgasen der Energie- und Prozesswirtschaft und für Kohlenstoffmonoxid ( $\text{CO}$ ) aus organischen Abfällen und Seitenströmen der Prozess- und Abfallwirtschaft. Der für die Reduktion von  $\text{CO}_2$  und  $\text{CO}$  benötigte Wasserstoff wird durch Wasserelektrolyse mittels erneuerbarer Energien bereitgestellt

Kohlenstoffsinken, wie sie das Pariser Klimaabkommen fordert. Dabei ist es unerheblich, ob die Kohlenstoffquelle biobasiert oder bis zum Vollzug des Rohstoffwandels noch fossilen Ursprungs ist. Gerade deshalb haben die hier diskutierten Prozesse für die jetzige Zeit des Rohstoffwandels besonderes Potenzial. Dies gilt auch für die Bereitstellung des als Reduktionsmittel notwendigen Wasserstoffs, denn Wasserelektrolyse ist eine Nutzungsoption für die mit dem Ausbau **volatiler Energien** (Wind, Photovoltaik) einhergehenden Stromspitzen. Durch den so ermöglichten **technischen Kohlenstoffkreislauf** kann ein System der **zirkulären**

**Wertschöpfung** geschaffen werden, das eine Weiterentwicklung des aktuell vorherrschenden Prinzips der linearen Wertschöpfung darstellt (▣ **Abb. 1.1**).

Insbesondere in Deutschland und Europa sind  $\text{CO}$ - und  $\text{CO}_2$ -haltige Gasströme in großen Volumina verfügbar. Gerade für traditionelle Industriestandorte hoher Kohlenstoffemission bietet deren Nutzung große Chancen. Kohlenstoffhaltige Gase werden zu heimischen Rohstoffen, die in die bestehende Infrastruktur integriert werden können und dazu beitragen, die Zukunft hiesiger Industrieregionen zu sichern. Dies wird nicht zuletzt die **gesellschaftliche**

**Akzeptanz** der erforderlichen Technologien unterstützen.

Das vorliegende Buch fokussiert auf derartige Prozessgasströme zur Herstellung von Chemikalien und Treibstoffen. Diese Gasströme fallen beispielsweise bei der Energieerzeugung und Stahlherstellung an, wobei der entsprechende Kohlenstoff aus fossilen Quellen stammt, in Biogasanlagen, die biogenen Kohlenstoff bieten, oder bei der Zementherstellung und Erzgewinnung, bei denen der Kohlenstoff mineralischen Ursprungs ist. Bei der Auswahl der geeigneten Quellen sollte weniger die Herkunft des Kohlenstoffs im Mittelpunkt stehen als vielmehr die Effizienz und Nachhaltigkeit der entsprechenden Konversionsverfahren und der jeweiligen Prozesskette. Neben CO und CO<sub>2</sub> stellt auch Methan (CH<sub>4</sub>) eine wichtige C1-Gasquelle dar, die in diesem Buch jedoch nur am Rande betrachtet wird.

Um die skizzierte zirkuläre Wertschöpfung zu realisieren, werden Unternehmen der produzierenden Industriesektoren oder der Energiewirtschaft künftig zugleich zu Rohstofflieferanten und treten zu Unternehmen anderer Branchen in ganz neue Geschäftsbeziehungen. Es ist leicht vorstellbar, dass sich dadurch vollkommen neue bilaterale Geschäftsmodelle eröffnen, aber auch weit- aus komplexere Beziehungen entstehen. Für den Aufbau und die Ausgestaltung dieser branchenübergreifenden Beziehungen braucht es innovative Lösungen in technischer sowie ökonomischer Hinsicht. Diese reichen bis zu einer Kopplung ganzer Sektoren wie der Energiewirtschaft und der Prozessindustrie. Man spricht deshalb auch von **sektorenübergreifenden Systemlösungen**.

## 1.4 Ziele des Buches

---

Dieses Buch möchte auf die mit der Nutzung von kohlenstoffhaltigen (Prozess-)Gasen verbundenen Chancen und Limitierungen aufmerksam machen. Bislang wird insbesondere CO<sub>2</sub> außerhalb der Fachwelt oftmals nur als

Klimakiller, nicht aber als potenzielle Kohlenstoffquelle wahrgenommen. Zur Umsetzung der skizzierten zirkulären Wertschöpfung müssen verschiedene technische und nicht-technische Fragestellungen beleuchtet und beantwortet werden. Hierzu möchte das vorliegende Buch beitragen und dabei fachlich fundiert auf die Potenziale, aber auch auf die Grenzen der stofflichen Nutzung kohlenstoffhaltiger Gasströme mittels chemischer und biotechnologischer Verfahren und die sich daraus erschließenden Optionen eingehen. Es soll auf diese Weise nicht nur Fachleuten, sondern auch interessierten Laien einen Einstieg in die Thematik bieten und eine fundierte Meinungsbildung zu Chancen und Risiken ermöglichen.

## 1.5 Gliederung des Buches

---

Nach einer **Einführung in die Möglichkeiten der chemischen und biotechnologischen Konversion von C1-Gasen** zur stofflichen und energetischen Nutzung durch ► Kap. 1 beleuchten die ► Kap. 2 bis 4 die derzeitige **Rohstoffsituation**. So beschreibt ► Kap. 2 qualitativ und quantitativ die derzeitige industrielle Nutzung von **CO- und CO<sub>2</sub>-haltigen Gasströmen** und gibt Informationen zu eingesetzten Volumina, Verfahren, aus denen die Gasströme stammen können, Ursprung des Kohlenstoffs und derzeitige Anwendungen. CO und CO<sub>2</sub> besitzen ein hohes Sauerstoff-zu-Kohlenstoff-Verhältnis und müssen für ihre Anwendung als Chemikalie oder Treibstoff zu Kohlenwasserstoffen umgewandelt werden. Aus diesem Grund und wegen seines hohen Energiegehalts spielt Wasserstoff eine elementare Rolle für die Konversion von C1-Gasen – insbesondere von CO<sub>2</sub>. ► Kap. 3 und 4 beleuchtet deshalb, aus welchen Quellen der benötigte **Wasserstoff** stammen kann und ob ausreichende Mengen für die C1-Gas-Nutzung, insbesondere zur Herstellung von großvolumigen Produkten wie Grundstoffchemikalien und Energieträgern, zur Verfügung gestellt werden

können. Dabei betrachtet ► Kap. 3 den Stand der Technik (elektro-)chemischer Verfahren sowie deren zukünftiges technisches Potenzial und ► Kap. 4 den Stand biotechnologischer Verfahren. Liegt ein Gasgemisch aus Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff sowie weiteren Gasen wie CO<sub>2</sub> oder Sauerstoff vor, spricht man von **Synthesegas**. Es besitzt durch seine Zusammensetzung einen relativ hohen Energiegehalt und kann deshalb gut zur Synthese von chemischen Grundstoffen eingesetzt werden. ► Kap. 5 beschreibt den aktuellen technischen Stand zur Herstellung solcher Gasgemische und geht hierfür neben den Verfahren auf die eingesetzten Rohstoffe, die hergestellten Mengen sowie die typischen Gaszusammensetzungen in Abhängigkeit von den eingesetzten Verfahren und Rohstoffen ein.

Die ► Kap. 6 bis 9 stellen aktuelle **Umsetzungstechnologien** der chemischen Katalyse und Biotechnologie vor. Hierzu gibt ► Kap. 6 einen grundlegenden Überblick über die Standardverfahren der **chemisch-katalytischen Konversion** von CO und CO<sub>2</sub>, insbesondere der Fischer-Tropsch-Synthese, welche die Messlatte für neue (biotechnologische) Verfahren darstellt. Informationen zu Größenordnungen der Anlagen und Produktionskapazitäten geben einen Eindruck von der Bedeutung der angewendeten Verfahren. Darüber hinaus werden Vorteile, aber auch die generellen Herausforderungen und Entwicklungsbedarfe beschrieben. Im Mittelpunkt stehen neben den eingesetzten und potenziellen Rohstoffen die aktuellen Wertschöpfungsketten sowie die prozessseitig zum Einsatz kommenden Katalysatoren, Verfahrensbedingungen und jeweiligen Herausforderungen. ► Kap. 7 gibt gemeinsam mit ► Kap. 8 einen grundlegenden Überblick über die Möglichkeiten der **biotechnologischen C1-Gas-Verwertung** als Alternative zu chemisch-katalytischen Verfahren. Die beiden Kapitel beschreiben den aktuellen Stand der Technik und erläutern, wo für die verschiedenen Biokatalysatorenklassen besondere Anwendungspotenziale bestehen und wo die biotechnologische Konversion

Vorteile gegenüber den chemischen Verfahren, insbesondere der Fischer-Tropsch-Synthese, bietet. ► Kap. 7 fokussiert in diesem Kontext auf die verschiedenen **Biokatalysatoren** (Enzyme und Ganzzellkatalyse), stellt die verschiedenen infrage kommenden Mikroorganismen(klassen) vor und vergleicht deren Anwendungsmöglichkeiten. Während sogenannte photoautotrophe Organismen ihren Energiebedarf für die Nutzung von CO und CO<sub>2</sub> mittels Photosynthese aus Lichtenergie beziehen, nutzen Chemoautotrophe energiereiche chemische Verbindungen, die sie zur Energiegewinnung verstoffwechseln. Am Rande wird auch auf die Möglichkeiten der Methanverwertung eingegangen. Anhand der Organismengruppen Clostridien als chemoautotrophe Produzenten sowie Algen und Cyanobakterien als Photoautotrophe werden die spezifischen Eigenschaften und Grundlagen der jeweiligen C1-Gas-assimilierenden Stoffwechselwege beschrieben. Während sich chemoautotrophe Organismen eher für die Herstellung großvolumiger Chemikalien und Treibstoffe eignen, ist das Produktionsvolumen beim Einsatz von Photoautotrophen aufgrund der lichtabhängigen Reaktion begrenzt. Sie erlauben andererseits den Zugang zu komplexeren Molekülen, die als höherpreisige, aber kleinvolumigere Spezialchemikalien genutzt werden können. ► Kap. 8 erläutert den aktuellen **Stand der Verfahrenstechnik** hinsichtlich möglicher Verfahrenskonzepte, der Kultivierung von Chemo- und Photoautotrophen und der notwendigen Mess- und Regeltechnik. Dabei wird auch auf die Herausforderungen der Prozesse für die Produktion großvolumiger Chemikalien und Treibstoffe sowie auf die Chancen und Beschränkungen gegenüber chemischen Verfahren eingegangen. Abgerundet wird das Kapitel durch einen Überblick über den derzeitigen Entwicklungsstand und neue Reaktorkonzepte. ► Kap. 9 zeigt die Herausforderungen bei der **Produktaufarbeitung** aus chemischen und biotechnologischen Konversionsprozessen auf. Diese ergeben sich nicht zuletzt aus der Tatsache, dass chemische

Konversionen zumeist in der Gasphase ablaufen, während Bioprozesse in der Regel Flüssigreaktionen sind. Hierdurch ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die anzuwendenden Trennverfahren, wobei Bioprozesse besondere Herausforderungen aufweisen, z. B. durch die im Vergleich geringen Produktkonzentrationen.

Die ► Kap. 10 bis 12 beleuchten die **konkreten Anwendungsmöglichkeiten für eine zirkuläre Wertschöpfung auf Basis von CO- und CO<sub>2</sub>-haltigen Gasen**. Hierzu stellt ► Kap. 10 **mögliche Quellen für gasförmige Rohstoffe aus unterschiedlichen bestehenden Industrieprozessen** vor. Betrachtet werden hierbei die Stahl- und Zementherstellung, Kraftwerke, chemische und Bioprozesse (inkl. Biogasanlagen), (Müll-)Verbrennungsanlagen (MVA), Gasifizierungsprozesse und die Massentierhaltung. Dabei werden die verschiedenen gasliefernden Prozesse vorgestellt und Integrationsmöglichkeiten von chemischen und biotechnologischen Konversionsprozessen auf Basis realistischer Mengenpotenziale und der jeweiligen Rahmenbedingungen beleuchtet. ► Kap. 11 nimmt **Siedlungs- und Industriereststoffe** unter die Lupe, durch deren Gasifizierung sich das Rohstoffspektrum erweitern lässt. Weiterhin stellt das Kapitel entsprechende Gasifizierungstechnologien vor. ► Kap. 12 beschreibt einen **Systemlösungsansatz am Beispiel der Energiespeicherung durch CO<sub>2</sub>-Nutzung**. Volatile Energien erfordern neue Formen der Energiespeicherung. Mittels Wasserelektrolyse kann Wasserstoff zwar mithilfe erneuerbarer Energie ohne fossile Rohstoffe hergestellt werden, dessen Speicherung als Energieträger ist aber anspruchsvoll. Gleichzeitig besteht für die Nutzung insbesondere von CO<sub>2</sub> ein großer Bedarf an Wasserstoff. In diesem Spannungsfeld stellt die Konversion von CO<sub>2</sub> und regenerativ gewonnenem H<sub>2</sub> in kurzzeitige Kohlenstoffverbindungen einen lager- und transportfähigen Energieträger zur Verfügung, der sich vielfältig als Treibstoff und/oder (Grundstoff-)

Chemikalie einsetzen lässt. Auf diese Weise entstehen neue Geschäftsmodelle an der Schnittstelle zwischen Energie, Mobilität und Chemie.

Neben den genannten technischen Fragestellungen widmen sich die ► Kap. 13 bis 16 schließlich verschiedenen **Nachhaltigkeitsaspekten**. So beleuchtet ► Kap. 13 **ökologische Aspekte** wie den Fußabdruck der chemischen und biotechnologischen Konversion von C1-Gasen zu Chemikalien und Energieträgern/Treibstoffen sowie mögliche Beiträge zum Emissionsschutz. Dabei wird auf die Herausforderungen und Grenzen gängiger Bilanzierungsansätze eingegangen. Hieran schließt ► Kap. 14 mit der Untersuchung der **sozialen Dimension** an. Es wird aufgezeigt, welche Bedeutung C1-Gase als relevante heimische Rohstoffquelle für die Regionalentwicklung, insbesondere für die Schaffung und Sicherung von Arbeitsplätzen, haben können. Anhand von NRW als einer der national und europäisch führenden Regionen für Energie, Chemie und Schwerindustrie, wie der Stahl- und Zementindustrie, soll die politische Dimension der Thematik dargestellt werden – insbesondere auch vor dem Hintergrund des Strukturwandels im rheinischen Braunkohlerevier. Ein weiteres Augenmerk liegt auf der gesellschaftlichen Akzeptanz. Diese soll in groben Zügen für die betrachteten Technologieansätze, Wertschöpfungsketten und Produkte sowie die beschriebenen Systemlösungen analysiert werden. ► Kap. 15 und 16 schließen die Nachhaltigkeitsbetrachtungen mit einer **ökonomischen Potenzialabschätzung** ab. Dabei untersucht ► Kap. 16 den Einfluss der **regulatorischen Rahmenbedingungen** auf die Etablierung neuer Verfahren und Wertschöpfungsketten sowie deren Wettbewerbsfähigkeit. Zu den beleuchteten Aspekten gehören: Fördermöglichkeiten, Bedeutung von Pilot- und Demonstrationsprojekten, Anreize und Hürden durch den ordnungspolitischen Rahmen und die Gesetzgebung. ► Kap. 16 veranschaulicht anhand konkreter **Anwendungs-, Projekt- und Industriebei-**

**spiele** die vielfältigen Möglichkeiten einer zirkulären Wertschöpfung durch (elektro-) chemische Konversionstechnologien sowie biotechnologische Ansätze. Für die verschiedenen Beispiele werden das jeweilige Verfahrenskonzept, der aktuelle Entwicklungsstatus sowie die Zukunftspotenziale beschrieben.

Das Buch endet in ► Kap. 17 mit einer **abschließenden Bewertung und Zusammenfassung**. Hierzu werden die verschiedenen Aspekte und Sichtweisen der einzelnen Kapitel zusammengefasst, und es wird eine Einschätzung gegeben, welchen Beitrag chemische und biotechnologische Konversionstechnologien im Sinne einer zirkulären Wertschöpfung in den drei Dimensionen Ökonomie, Ökologie und Gesellschaft leisten können. Darüber hinaus wird das Potenzial von C1-Gasen als alternative Rohstoffe mit anderen Kohlenstoffquellen wie Biomasse verglichen.

### Zusammenfassung

Das vorliegende Buch stellt in 16 Kapiteln das heute zur Verfügung stehende Volumen von C1-Gasströmen vor. Die meisten Konversionsverfahren benötigen Wasserstoff, weshalb auch dessen Bereitstellung diskutiert wird. Bezüglich der Konversionsverfahren werden sowohl chemo-katalytische als auch biotechnologische Methoden und Beispiele aus der industriellen Praxis vorgestellt. Auch die Integration in ein zukünftiges Energiesystem und der

mögliche Beitrag der C1-Nutzung zur Weiterentwicklung industrialisierter Regionen sowie ökologische Aspekte und die Rahmenbedingungen werden thematisiert. Abschließend werden in einem Fazit der Stand der Technik und das industrielle Potenzial zusammengefasst.

## Literatur

1. BGR (2010) Reserven, Ressourcen und Verfügbarkeit von Energierohstoffen. ► [https://www.wiwi.uni-muenster.de/vwt/Veranstaltungen/Ausgewaehlte\\_Kapitel\\_der\\_Energiewirtschaft/WS1112/02a\\_globale-energiemrkte.pdf](https://www.wiwi.uni-muenster.de/vwt/Veranstaltungen/Ausgewaehlte_Kapitel_der_Energiewirtschaft/WS1112/02a_globale-energiemrkte.pdf). Zugegriffen: 8. Sept. 2017
2. BMUB (2015) Übereinkommen von Paris. ► [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/paris\\_abkommen\\_bf.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/paris_abkommen_bf.pdf). Zugegriffen: 8. Sept 2017
3. BMWi (2017) Primärenergieverbrauch in Deutschland 2016. ► [http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/energiedaten-gesamt-pdf-grafiken.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=18](http://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energiedaten/energiedaten-gesamt-pdf-grafiken.pdf?__blob=publicationFile&v=18). Zugegriffen: 8. Sept. 2017
4. FNR (2016) Kraftstoffabsatz in Deutschland 2015. ► <http://biokraftstoffe.fnr.de/kraftstoffe/aktuelle-marktsituation/>. Zugegriffen: 8. Sept. 2017
5. VCI (2017) Rohstoffbasis der chemischen Industrie. ► <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/top-thema/daten-fakten-rohstoffbasis-der-chemischen-industrie-de.pdf>. Zugegriffen: 8. Sept. 2017
6. Souza GM, Victoria RL, Joly C, Verdade L (2015) Bioenergy & sustainability: bridging the gaps. SCOPE, Paris
7. Carus M, Piotrowski S (2009) Land use for bioplastics. Bioplastics Mag 4:46–49



# CO und CO<sub>2</sub>

*Dennis Krämer und Katy Armstrong*

## Inhaltsverzeichnis

- 2.1 Einleitung – 10**
- 2.2 Erfassung von CO<sub>2</sub>-Quellen (Datenerhebung) – 10**
  - 2.2.1 CO<sub>2</sub>-Quellen in Europa – 11
  - 2.2.2 Auswertung – 11
- 2.3 Prognosen zu den Entwicklungen der vier „wichtigsten“ CO<sub>2</sub>-Quellen – 13**
  - 2.3.1 Wasserstofferzeugung – 13
  - 2.3.2 Erdgasfördermarkt – 14
  - 2.3.3 Ethylenoxidproduktion – 15
  - 2.3.4 Ammoniakproduktion – 15
- 2.4 Fazit – 16**
  - Literatur – 16**

## 2.1 Einleitung

CO<sub>2</sub>-Emissionen entstehen in der Industrie hauptsächlich durch die Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Materialien. Aktuell sind dies vor allem fossile Rohstoffe wie Erdöl, Erdgas und Kohle. Durch die anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen ist seit Beginn der industriellen Revolution die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre von ca. 280 ppm auf 400 ppm angestiegen. Die Klimaforscher des zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Change*) sind sich sicher und haben die Weltgemeinschaft davon überzeugt, dass die erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre mit den aktuellen Klimaveränderungen eng verknüpft ist. Um einen weiteren Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre zu verhindern, hat sich Deutschland das Ziel gesetzt, bis 2050 nahezu klimaneutral zu werden. Dies kann in der Industrie nur gelingen, indem auf die Verbrennung von fossilen Rohstoffen verzichtet wird – also eine „Dekarbonisierung“ der Industrie erreicht wird. Doch die chemische Industrie lässt sich im Wortsinn nicht dekarbonisieren, da Kohlenstoff – in der Chemie mit C abgekürzt – am Anfang vieler Wertschöpfungsketten steht. Um die Rohstoffbasis dieser Wertschöpfungsketten in der chemischen Industrie zu erweitern, wird aktuell stark daran geforscht, CO<sub>2</sub> als Kohlenstoffquelle nutzbar zu machen. Zum einen müssen dafür CO<sub>2</sub>-Nutzungspfade entwickelt werden, zum anderen CO<sub>2</sub>-Quellen identifiziert und evaluiert werden, die als Kohlenstoffquellen für diese Prozesse infrage kommen. CO<sub>2</sub>-haltige Emissionen aus Punktquellen, die Industrieprozessen zugeschrieben werden können, und die Luft aus der Atmosphäre sind die möglichen Kohlenstoffquellen.

Im Rahmen des EU-geförderten Horizon2020-Projekts „CarbonNext – The Next Generation of Carbon for the Process Industry“ wurde von 2016 bis 2018 untersucht, welche alternativen Kohlenstoffquellen für die Prozessindustrie in Europa prinzipiell zur Verfügung stehen und wie hoch das Potenzial ist,

diese Kohlenstoffquellen letztendlich auch für die Prozessindustrie erschließen zu können. Der Fokus lag dabei auf der stofflichen Nutzung von CO<sub>2</sub>. Ziel des Projekts war es, die gesamte Wertschöpfungskette von Prozessen aufzuzeigen, die ein hohes Mengenpotenzial für die stoffliche Nutzung von CO<sub>2</sub> aufweisen, um somit fossile Rohstoffe zu substituieren. Das Ergebnis des Projekts ist eine Darstellung von verschiedenen CO<sub>2</sub>-Nutzungspfaden, die wirtschaftlich und ökologisch als besonders überzeugend bewertet wurden. Des Weiteren wurden innerhalb des Projekts Wertschöpfungsketten verschiedener Prozesse zwischen unterschiedlichen Industriebranchen (Chemie, Zement, Stahl usw.) identifiziert. Durch das Projekt sollen Entscheidungsträger aus der Industrie und Politik über die möglichen Chancen und über das Potenzial der alternativen Kohlenstoffquellen informiert und für Handlungsoptionen sensibilisiert werden.

Im ersten Arbeitspaket des Projekts wurden CO<sub>2</sub>-Punktquellen in Europa identifiziert und analysiert, die als Kohlenstoffquellen für die Prozessindustrie infrage kommen. Die Ergebnisse dieses Reports werden im folgenden Text dargestellt.

## 2.2 Erfassung von CO<sub>2</sub>-Quellen (Datenerhebung)

Um herauszufinden, wo und in welchem Umfang CO<sub>2</sub>-Punktquellen in Europa vorhanden sind, war im ersten Schritt eine Datenerhebung essenziell. Die Daten zu den alternativen Kohlenstoffquellen wurden genutzt, um eine Kartierung der entsprechenden Quellen vorzunehmen. Hierzu wurden Daten zu CO<sub>2</sub>-Emissionen des Jahres 2014 aus der *European Pollutant Release Database* der *European Environmental Agency* herangezogen und in eine dreidimensionale Karte eingearbeitet. Das *European Pollutant and Release Transfer Register* (E-PRTR) der *European Environmental Agency* (EEA) erfasst alle Punktquellen von CO<sub>2</sub>, die mindestens

■ **Tab. 2.1** CO<sub>2</sub>-Emissionen in der EU, kategorisiert nach Sektor, angepasst vom E-PRTP [1]

Sektor	CO <sub>2</sub> -Emissionen in 2014 [Mt]
Energie	1065,5
Chemie	245,1
Metall (inkl. Eisen- und Stahlindustrie)	166,0
Bauwirtschaft (inkl. Zementherstellung)	144,1
Papierherzeugung	77,1
Abfall	55,5
Bergbauindustrie	7,1
Lebensmittel- und Agrarindustrie	5,9
Andere	13,1

0,1 Mt CO<sub>2</sub> im Jahr emittieren [1]. Die Weitergabe der Daten an die EEA ist für die entsprechenden Emittenten verpflichtend. Die Daten werden von den einzelnen Einrichtungen den Behörden in den jeweiligen Ländern gemeldet, die dann die Daten auf Qualität prüfen, bevor sie der Europäischen Kommission und der EEA gemeldet werden. Das Register enthält Daten von 30.000 industriellen Anlagen aus neun Industriesektoren, die 65 ökonomische Aktivitäten abdecken. Mit Hilfe der interaktiven Karte ist es möglich, die Emissionen hinsichtlich der unterschiedlichen industriellen Sektoren aufzuschlüsseln. Des Weiteren erlaubt sie die Betrachtung der Quellen einzelner Länder oder Regionen. Über die interaktive Karte können somit quantitative Aussagen über CO<sub>2</sub>- und CO-Emissionen in Europa selektiv generiert werden [1].

### 2.2.1 CO<sub>2</sub>-Quellen in Europa

Insgesamt wurden im Jahr 2014 in Europa 1779 Mt CO<sub>2</sub> aus 2000 industriellen Punktquellen in die Atmosphäre emittiert. Die Quellen lassen sich in die folgenden

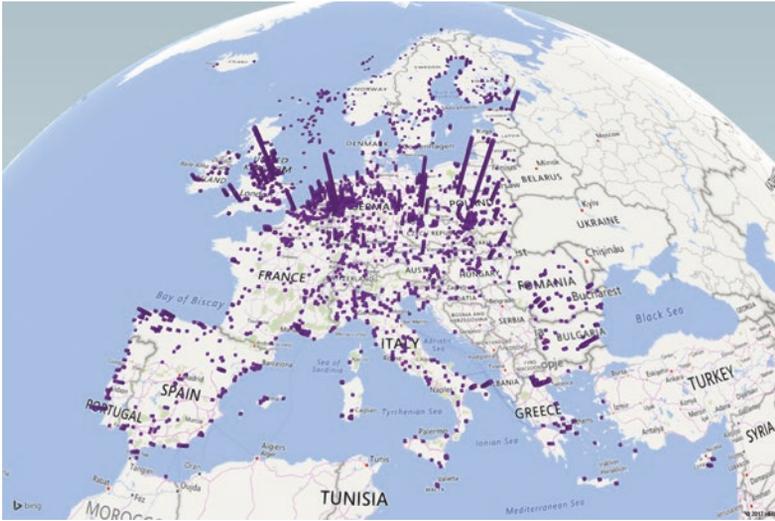
Industriesektoren aufteilen: Chemie, Bauwesen, Stromerzeugung, Agrikultur, Metall, Papier, Abfall und andere. In ■ **Tab. 2.1** werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen kumuliert nach den einzelnen Sektoren aufgezeigt.

■ **Abb. 2.1** zeigt die einzelnen Punktquellen in Europa. Anhand der Verteilung wird ersichtlich, dass CO<sub>2</sub>-Quellen über ganz Europa verteilt sind. Die größten Quellen liegen in Deutschland, den Benelux-Ländern, Großbritannien und Polen. Kohlekraftwerke sind die größten CO<sub>2</sub>-Emittenten, wobei zu beachten ist, dass die Daten aus 2014 stammen und einige der Kohlekraftwerke mittlerweile nicht mehr in Betrieb sind. Des Weiteren fallen große Mengen an CO<sub>2</sub> in der Chemieindustrie, im Metallsektor, in der Bauwirtschaft und in der Papierherzeugung an.

Die Menge an CO<sub>2</sub>, die zur Herstellung von Produkten verwendet werden könnte, wird bis 2030 in optimistischen Szenarien auf bis zu 7 Gt weltweit geschätzt (*Global CO<sub>2</sub> Initiative*, 2016), jedoch sind andere Szenarien und Schätzungen von etwa 1 Gt weiter verbreitet. Diese Einschätzung verdeutlicht, dass die Erwartungshaltung an die stoffliche Nutzung von CO<sub>2</sub> zumindest in naher Zukunft nicht zwingend auf die großen CO<sub>2</sub>-Emittenten als Rohstofflieferanten abzielen muss, da zur heutigen Zeit kein Engpass bei der Versorgung der chemischen Industrie mit CO<sub>2</sub> zu befürchten ist. Selbst wenn alle Kohlekraftwerke heruntergefahren sind, wäre immer noch genug CO<sub>2</sub> für „*large-scale*“-Szenarien vorhanden. Aus diesem Grund kann eine Hierarchie abgeleitet werden, welche CO<sub>2</sub>-Punktquellen aus ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten am ehesten geeignet sind, um für die Prozessindustrie genutzt werden zu können.

### 2.2.2 Auswertung

Bei der Bewertung von CO<sub>2</sub>-Quellen kommt es zu einem großen Anteil darauf an, wie hoch die Konzentration von CO<sub>2</sub> im entsprechenden Rauchgas ist. Je höher



■ **Abb. 2.1** CO<sub>2</sub>-Punktquellen in der EU, angepasst von E-PRTR [1]

die Konzentration, desto geringer ist der energetische Aufwand bei der Abscheidung, weil kleinere Mengen an emittiertem Gas verarbeitet werden müssen, um die gleiche Menge an gereinigtem CO<sub>2</sub> im Vergleich zu stärker verdünnten Quellen zu erhalten. Des Weiteren bestehen unterschiedliche Ansprüche an die Gaszusammensetzung für verschiedene CO<sub>2</sub>-Nutzungstechnologien und somit an den Aufbereitungsprozess. Diese Faktoren wirken sich auf die Kosten, den Energieaufwand und die Umwelt aus. Folglich ist möglichst reines CO<sub>2</sub> am attraktivsten, da infolgedessen weniger Energie für die Abtrennung von CO<sub>2</sub> benötigt wird und dies wiederum mit einem im Vergleich niedrigen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck einhergeht.

Die Emissionen aus dem Energiesektor – weltweit stammen rund 76 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verbrennung von Kohle und Gas zur Stromerzeugung – werden im Sinne der stofflichen Nutzung von CO<sub>2</sub> vernachlässigt. Dies liegt einerseits darin begründet, dass die CO<sub>2</sub>-Konzentration im Rauchgas nicht besonders hoch ist (12–14 %), und andererseits darin, dass die Kohlekraftwerke, bedingt durch die aktuelle

Klimapolitik, bis 2100 deutlich heruntergefahren werden sollen.

■ **Tab. 2.2** fasst die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, die Emissionsmengen pro Jahr und die geschätzten Abscheidungskosten pro Tonne CO<sub>2</sub> aus einer Reihe von CO<sub>2</sub>-Emittenten zusammen. Die Daten der Tabelle bestätigen, dass die niedrigsten Abscheidungskosten die am stärksten konzentrierten CO<sub>2</sub>-Quellen betreffen. Die folgenden Quellen weisen die höchsten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen auf: Wasserstoffherzeugung, Erdgasveredlung, Ethylenoxidherstellung und Ammoniakproduktion.

In zwei vor Kurzem veröffentlichten wissenschaftlichen Publikationen wurde die Bewertung von CO<sub>2</sub>-Quellen diskutiert. Die Arbeiten nutzen unterschiedliche Methoden, um die Quellen mit dem größten wirtschaftlichen Potenzial zu ermitteln. In „Economics of carbon dioxide capture and utilisation – a supply and demand perspective“ [2] wird in erster Linie die Wirtschaftlichkeit als stärkstes Kriterium herangezogen. In der Veröffentlichung „Selecting CO<sub>2</sub> sources of CO<sub>2</sub> utilization by environmental-merit-order curves“ [3] werden die CO<sub>2</sub>-Quellen hauptsächlich nach Umweltaspekten bewertet. Beide Studien beruhen auf einer intensiven

■ **Tab. 2.2** Potenzielle CO<sub>2</sub>-Quellen in Europa (>0,1 Mt CO<sub>2</sub>/Jahr), angepasst von E-PRTR [1] und Naims (2016; [2])

CO <sub>2</sub> -Quelle	CO <sub>2</sub> -Konzentration [%]	Emissionen pro Jahr [Mt CO <sub>2</sub> /Jahr]	Kosten [€/t CO <sub>2</sub> ]	Anzahl von Punktquellen über 0,1 Mt/Jahr Emissionen
Wasserstoffproduktion	70–100	5,3	30	15
Natural Gas Production	5–70	5,0	30	10
Ethylenoxidherstellung	100	17,7	30	6
Ammoniakproduktion	100	22,6	33	27
Papierherstellung	7–20	31,4	58	35
Coal to Power (IGCC)	3–15	3,7	34	3
Eisen und Stahl	17–35	151,3	40	93
Zement	14–33	119,4	68	212
<b>Gesamt</b>		<b>356,4</b>		

Literaturrecherche. Naims [2] vergleicht die Kosten für die CO<sub>2</sub>-Abtrennung mit den Kosten, die vermieden werden. Von der Assen et al. [3] vergleichen Umweltauswirkungen basierend auf vergleichender Ökobilanzierung. Es gibt zwar Überschneidungen zwischen den Studien; allerdings werden nicht die gleichen Quellen und Abscheidetechnologien betrachtet. Auch kommen beide Studien zu dem Ergebnis, dass die reinsten Quellen zuerst betrachtet werden sollten.

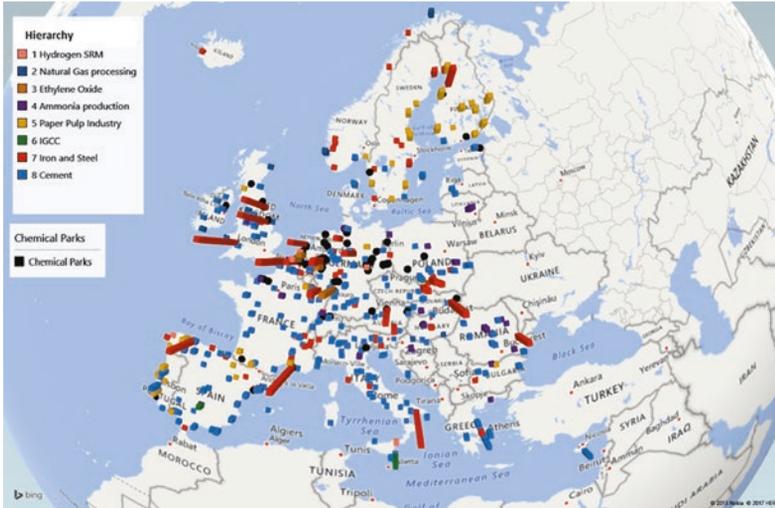
Des Weiteren entstehen große CO<sub>2</sub>-Ströme bei der Eisen- und Stahlproduktion sowie in der Zementindustrie, wobei die Rauchgase hierbei geringere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen enthalten. Sofern sich die CO<sub>2</sub>-Abscheidetechnologien weiterentwickeln, werden auch solche CO<sub>2</sub>-Quellen attraktiv. In ■ Abb. 2.2 werden CO<sub>2</sub>-Quellen für die stoffliche Nutzung aufgeführt, die nach ihrer Reinheit sortiert wurden. Je höher die CO<sub>2</sub>-Reinheit einer Quelle ist, desto ein-

facher gestalten sich die Abtrennung und Aufbereitung.

## 2.3 Prognosen zu den Entwicklungen der vier „wichtigsten“ CO<sub>2</sub>-Quellen

### 2.3.1 Wasserstoffherzeugung

Gegenwärtig teilt sich der H<sub>2</sub>-Verbrauch zu etwa gleichen Teilen auf Hydrobehandlung/Hydrocracking durch Raffinerien und die Produktion von Düngemitteln auf Ammoniak-/Stickstoffbasis durch die chemische Industrie auf [2]. Der globale H<sub>2</sub>-Markt wird im Zeitraum 2017 bis 2021 voraussichtlich mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate (CAGR) von 5,99 % wachsen, was vor allem auf eine steigende Nachfrage nach Düngemitteln zurückzuführen ist [4]. Für den europäischen



■ **Abb. 2.2** Hierarchie der CO<sub>2</sub>-Quellen in Europa, angepasst von E-PRTR [1]

Markt wird ein jährliches Wachstum des H<sub>2</sub>-Marktes von 3,5 % bis 2025 bei einem Inlandsverbrauch von 7 Mio. Tonnen im Jahr 2015 erwartet [5]. Rund 96 % der weltweiten H<sub>2</sub>-Produktion stammen aus der Dampfreformierung von Methan (SRM), sind ölbasiert oder gehen aus der Kohlevergasung hervor. In Europa gibt es 16 SRM-Anlagen, die jeweils zwischen 0,136 und 0,805 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr emittieren [6]. Darüber hinaus befinden sich viele dieser Anlagen in unmittelbarer Nähe zu großen europäischen Chemieparks. Die Emissionen werden voraussichtlich proportional zum Wachstum des H<sub>2</sub>-Marktes steigen.

Ohne technologische Fortschritte ist es wahrscheinlich, dass die zukünftige Produktion von H<sub>2</sub> durch die Reformierung von Erdgas und durch die Elektrolyse, betrieben mit dem Strommix, der teilweise auch aus Kohlekraftwerken stammt, abgedeckt wird.

Eine Umstellung auf die Elektrolyse von Wasser ausschließlich mit erneuerbaren Energien wird jedoch dazu führen, dass die CO<sub>2</sub>-Verfügbarkeit aus dieser Quelle deutlich abnimmt.

### 2.3.2 Erdgasfördermarkt

Die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Erdgasaufbereitung reichen von 0,1 bis 1 Mio. Tonnen pro Jahr und Anlage. Verantwortlich für die Emissionen sind zehn europäische Anlagen. Einige der größten Erdgasaufbereitungsanlagen befinden sich in Großbritannien sowie in unmittelbarer Nähe zu großen Chemieparks in Belgien, den Niederlanden und Deutschland. Das Roherdgas enthält je nach Herkunft des Gases unterschiedliche Konzentrationen an CO<sub>2</sub>, jedoch wird es zur Erreichung der Pipelinequalität häufig durch ein CO<sub>2</sub>-Abtrennungsverfahren aufbereitet [7]. Erdgasveredelung gilt als eine der wichtigsten hochreinen CO<sub>2</sub>-Quellen, die keine zusätzlichen Reinigungskosten bei der Kohlenstoffabscheidung erfordern. Die Erdgasaufbereitung (und damit die CO<sub>2</sub>-Verfügbarkeit aus dieser Quelle) wird mittelfristig voraussichtlich zunehmen, da die Stromerzeugung aus Kohle und Erdgas zum Ausgleich der intermittierenden regenerativen Erzeugung weiterhin genutzt wird.

### 2.3.3 Ethylenoxidproduktion

---

Ethylenoxid wird als Zwischenprodukt zur Herstellung zahlreicher Industriechemikalien wie Polymere und Ethylenglykole verwendet. Ethylenoxid selbst wird als Begasungsmittel, Desinfektionsmittel und Sterilisationsmittel für medizinische Zwecke verwendet. Sechs Ethylenoxidanlagen, die mehr als 0,1 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr und Anlage produzieren, sind im E-PRTR gelistet und erzeugen zusammen einen Ausstoß von 17,7 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr [8]. Die Ethylenoxidproduktionsanlagen in Europa befinden sich in Belgien, den Niederlanden und Deutschland; diese Länder verfügen ebenfalls über große Chemieparks, die CO<sub>2</sub> als Rohstoff nutzen könnten. Laut Marktberichten wird bis 2022 eine hohe Nachfrage nach Ethylenoxid erwartet [9].

### 2.3.4 Ammoniakproduktion

---

Für den europäischen Düngemittelmarkt wird für den Prognosezeitraum 2017 bis 2022 eine konstante CAGR von 2,5 % erwartet [9]. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Ammoniakproduktion in Europa beliefen sich im Jahr 2014 auf 22,6 Mio. Tonnen, die von 27 Anlagen mit Emissionen von 0,1 bis 3,2 Mio. Tonnen pro Jahr und Anlage stammen. Einige dieser Anlagen befinden sich in der Nähe von Chemieparks. Ammoniak wird überwiegend als Düngemittel eingesetzt und nach dem Haber-Bosch-Verfahren hergestellt. CO<sub>2</sub> entsteht bei der Herstellung von Wasserstoff, der mit Stickstoff zu Ammoniak kombiniert wird. Ein Bericht der *International Fertiliser Association* zeigt, dass rund 36 % des bei der Reinigung aus dem Synthesegas entfernten CO<sub>2</sub> von der Industrie genutzt werden. Rund 33 % des CO<sub>2</sub> werden für die Harnstoffproduktion verwendet, während das restliche CO<sub>2</sub> für andere Zwecke verkauft wird [9]. Daher könnte die Verfügbarkeit von CCU im Falle von Ammoniak begrenzt sein, da es eine Konkurrenz zu den derzeitigen CO<sub>2</sub>-Nutzungen für die Harnstoffproduktion geben würde.

Auch wenn langfristig der Einsatz von Erdgas (und damit die Verfügbarkeit von CO<sub>2</sub> aus der Reinigung) oder die dampfreformierte Wasserstoffproduktion abnehmen wird, geht man davon aus, dass die Mengen aus diesen vier CO<sub>2</sub>-Quellen bis 2030 die attraktivsten bleiben werden. Außerdem wird erwartet, dass sie volumenmäßig groß genug sind, um den CCU-Bedarf zu decken.

Wie beschrieben, ist die Reinheit des CO<sub>2</sub> ein essenzieller Faktor. Höhere Reinheit bedeutet höhere CO<sub>2</sub>-Konzentrationen pro gleiches Volumen und damit geringere Kosten. Die Reinheit hat auch Auswirkungen auf die Kompatibilität mit bestimmten Transport- und Lagerungsanwendungen, da Verunreinigungen Schäden an Rohrleitungen verursachen können.

Ein weiteres Kriterium bei der Auswahl von CO<sub>2</sub>-Quellen ist die Distanz zum potenziellen CO<sub>2</sub>-Abnehmer. Die Transportkosten hängen von der zu transportierenden Entfernung ab (was sich auf die Art des Transports auswirkt, d. h. Transport per Lkw, lokale oder Fernleitungen). Beim Pipelinetransport variieren die Kosten weiter in Abhängigkeit von der Länge und dem Durchmesser der Pipeline, dem verwendeten Baumaterial und dem Verlauf der Pipeline. Ein gemeinsames CO<sub>2</sub>-Transportnetz kann auch Reinheitsprobleme lindern, indem es eine Mischung von Quellen erlaubt, um eine geeignete CO<sub>2</sub>-Qualität zum Endabnehmer zu liefern. Somit sind CO<sub>2</sub>-Quellen besonders attraktiv, die sich in der Nähe von potenziellen Abnehmern befinden. Im Idealfall kann das CO<sub>2</sub> in einer Pipeline transportiert werden. Mit steigender Distanz werden die Kosten – und auch der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck – höher.

Gegebene Infrastrukturen und kurze Distanzen sind folglich zu bevorzugen. Da aber viele CO<sub>2</sub>-Nutzungstechnologien noch nicht im Großmaßstab verfügbar sind, kann derzeit nur vom naheliegenden Szenario ausgegangen werden, dass neue Anlagen in bereits vorhandene industrielle Umgebungen wie Chemieparks integriert werden. Die großen europäischen Chemieparks wurden

somit als Top-Standorte mit vorhandener Infrastruktur für CCU-Anwendungen identifiziert.

2

## 2.4 Fazit

Es steht eine große Auswahl an CO<sub>2</sub>-Quellen zur Verfügung, die das technische Potenzial haben, in der nahen Zukunft alle Optionen zur stofflichen Nutzung von CO<sub>2</sub> in der Prozessindustrie decken zu können. Primär sollten Quellen genutzt werden, die hohe CO<sub>2</sub>-Konzentrationen aufweisen, da die Abscheidung von CO<sub>2</sub> energieintensiv und mit hohen Kosten verbunden ist. Große CO<sub>2</sub>-Ströme entstehen bei der Eisen-, Zement- und Stahlproduktion. Diese Quellen können zu einem späteren Zeitpunkt sehr interessant werden, insbesondere da diese Branchen nach Möglichkeiten suchen, ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen zu senken und daher intensiv neue, effizientere Abscheidetechnologien erforschen.

Die interaktiven Karten können dazu dienen, geeignete Standorte zu identifizieren, an denen industrielle Anlagen zur stofflichen Nutzung von CO<sub>2</sub> bevorzugt entstehen könnten. Im Sinne der industriellen Symbiose sollten CO<sub>2</sub>-Quellen von Chemieparcs direkt vor Ort stofflich genutzt werden.

### Zusammenfassung

Das Kapitel präsentiert industrielle CO<sub>2</sub>-Emissionsorte in Europa, sogenannte Punktquellen, mit einem Volumen von mehr als 0,1 Mt CO<sub>2</sub>. Unter diesen stellen Anlagen der Herstellung von Ethylenoxid, Ammoniak und Wasserstoff sehr reine CO<sub>2</sub>-Ströme zur Verfügung, die entsprechend kostengünstig abgeschieden werden können. Im Sinne der industriellen Symbiose bietet es sich an, derartige in Chemieparcs lokalisierte CO<sub>2</sub>-Quellen vor Ort stofflich zu nutzen. Allerdings ist die Zahl und damit das CO<sub>2</sub>-Angebot dieser Anlagen in Europa im Vergleich zu Quellen großer Kohlekraftwerke, der

Stahlproduktion und der Herstellung von Zement relativ gering. Letztere weisen zwar Emissionsströme geringerer CO<sub>2</sub>-Konzentration und damit höherer Abscheidungskosten auf, sind aber mit mehr Großanlagen über Europa verteilt und können damit bezüglich der Transportkosten zu zukünftigen Abnehmern Kostenvorteile ermöglichen. Insgesamt steht eine große Zahl an CO<sub>2</sub>-Quellen mit dem technischen Potenzial der stofflichen Nutzung zur Verfügung.

## Literatur

1. European Pollutant Release and Transfer Register (2019). ► <http://prtr.ec.europa.eu/#/home>. Zugegriffen: 18. März 2019
2. Naims H (2016) Economics of carbon dioxide capture and utilization – a supply and demand perspective. *Environ Sci Pollut Res* 23(22):22226–22241
3. von der Assen N, Müller LJ, Steingrube A, Voll P, Bardow A (2016) Selecting CO<sub>2</sub> sources for CO<sub>2</sub> utilization by environmental-merit-order curves. *Environ Sci Technol* 50(3):1093–1101
4. TechNavio (Infinity Research Ltd.) (2017) Global hydrogen generation market 2017–2021
5. Certiffly (2015) Overview of the market segmentation for hydrogen across potential customer groups, based on key application areas. ► [http://www.certiffly.eu/images/D1\\_2\\_Overview\\_of\\_the\\_market\\_segmentation\\_Final\\_22\\_June\\_low-res.pdf](http://www.certiffly.eu/images/D1_2_Overview_of_the_market_segmentation_Final_22_June_low-res.pdf). Zugegriffen 7. Febr. 2017
6. International Energy Agency (IEA) (2012) Energy technology perspectives 2012
7. Baker RW, Lohhandwala K (2008) Natural gas processing with membranes: an overview. *Ind Eng Chem Res* 47:2109–2121
8. ICIS (2013). ► <https://www.icis.com/resources/news/2013/04/13/9658385/chemical-profile-europe-ethylene-oxide/>. Zugegriffen: 18. März 2019
9. Mordor Intelligence (2017) ► [https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/europe-fertilizers-market?gclid=Cj0KCQjwqM3VBRCwARIsAKceb2UeWMFz5758xh80N\\_17i20nRrKe00ASR0KH0Y6kVqGqOeIJMrA4wQaAju-EALw\\_wcB](https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/europe-fertilizers-market?gclid=Cj0KCQjwqM3VBRCwARIsAKceb2UeWMFz5758xh80N_17i20nRrKe00ASR0KH0Y6kVqGqOeIJMrA4wQaAju-EALw_wcB). Zugegriffen: 18. März 2019