

Woher kommt der Kohlenstoff für synthetische Wasserstofffolgeprodukte?



DBFZ
Dr. André Brosowski
andre.brosowski@jenabatteries.de

Dr. Franziska Müller-Langer
franziska.mueller-langer@dbfz.de

Dr. Volker Lenz
volker.lenz@dbfz.de

IZES
Juri Horst
horst@izes.de

KIT
Prof. Dr. Roland Dittmeyer
roland.dittmeyer@kit.edu

Climeworks
Louis Uzor
louis.uzor@climeworks.com

UFZ
Dr. Malgorzata Borchers
malgorzata.borchers@ufz.de

Prof. Dr. Daniela Thrän
daniela.thraen@ufz.de

Wuppertal Institut
PD Dr. Peter Viebahn
peter.viebahn@wupperinst.org

ZSW
Dr. Ulrich Zuberbühler
ulrich.zuberbuehler@zsw-bw.de

Hintergrund

Mit dem Klimaschutzgesetz (KSG 2021) wurden für die kommenden Jahre zulässige Jahresemissionsmengen verbindlich festgelegt. Bis 2045 soll Klimaneutralität erreicht werden. Auf Grundlage der zuletzt verfügbaren Zahlen zur Zielerreichung ergibt sich daraus die Notwendigkeit, dass bis z. B. 2030 über 300 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente eingespart werden müssen (UBA 2021).

Der Einsatz von Wasserstoff bietet zahlreiche Möglichkeiten, diesem Ziel näher zu kommen. Wird Wasserstoff z. B. zu synthetischen Kraftstoffen (Benzin, Diesel, Kerosin, Methanol) oder Grundstoffen für die Chemieindustrie (Methanol, Naphta, Ammoniak) weiterverarbeitet, wird CO₂ bzw. CO für die Syntheseprozesse benötigt.

Nach der KNDE-Studie, die erstmals ein integriertes Szenario zum Erreichen eines „Klimaneutralen Deutschlands 2045“ entwickelt hat (Prognos et al. 2021), werden ab dem Jahr 2045 alleine 34 Mt/a an (klimaneutralem) CO₂ für diese Syntheseprozesse benötigt. Zusätzlich sieht das KSG 2021 erhebliche negative Emissionen ab dem Jahr 2050 vor. Auch wenn die KNDE-Studie davon ausgeht, dass die Kraftstoffe primär nicht in Deutschland hergestellt, sondern aus Ländern mit günstigen Potenzialen für grünen Wasserstoff importiert werden, zeigt diese Menge eine Größenordnung für die nachfolgende Diskussion auf. Die Suche nach alternativen Kohlenstoffquellen, die Entwicklung von technischen Verfahren und die Bewertung von Chancen und Risiken erreichen ein hohes Tempo und sind Bestandteil zahlreicher Debatten. In diesem Beitrag wird zusammengefasst, welche dieser Kohlenstoffquellen besonders interessant sind und welche aktuellen Fragestellungen mit den jeweiligen Themen verbunden sind.

Biogene Rohstoffe

Eine verbindliche, sektorenübergreifende Klassifizierung biogener Rohstoffe existiert bisher nicht. Je nachdem wie bilanziert wird, ergeben sich i. d. R. sehr heterogene Darstellungen. Im Folgenden werden die drei Bereiche „nachwachsende Rohstoffe“, „Rohstoffe aus der Holz- und Forstwirtschaft“ und „biogene Reststoffe, Nebenprodukte und Abfälle“ unterschieden.

Nachwachsende Rohstoffe werden in Deutschland (Stand 2021) auf ca. 2,6 Mio. ha angebaut (rund 20% der Agrarfläche). Über 90% werden energetisch verwendet. Inwiefern sich die Anbaufläche erhöht oder reduziert, wird durch verschiedene politische Rahmenbedingungen (z. B. EEG, RED etc.) beeinflusst. Seit der EEG-Novelle 2014 liegen die Entwicklungen, abgesehen von wetterbedingten Schwankungen, auf einem gleichbleibenden Niveau. Die zahlreichen eingesetzten holzartigen Biomassen werden derzeit jeweils etwa zur Hälfte stofflich und energetisch genutzt. Insbesondere in den letzten drei Jahren hat sich der Schadholzanteil, insbesondere bei Nadelholz, auf über 86% des Einschlags extrem erhöht. Gründe dafür sind Kalamitäten wie z. B. Wasserstress, Windbruch, Borkenkäfer, Brände usw. (► *Abbildung 1*) Inwiefern das dadurch kurzfristig verfügbare Biomasseaufkommen zu langfristig fehlenden Mengen im Markt führen wird, kann nicht mit Bestimmtheit gesagt werden. In den bisherigen Waldmodellen (z. B. WEHAM) kommen solche Extreme bisher nicht vor. Kurzfristig führt das zu erheblichen Holzengpässen im Markt. Langfristig ist mit einem Engpass und hohen Nutzungskonkurrenzen zu rechnen. Etwa die Hälfte der holzartigen Rohstoffe sind Nebenprodukte entlang der Verarbeitungskette.

Werden die Nebenprodukte und Abfälle aus anderen Sektoren (z. B. Landwirtschaft, Siedlungsabfälle, Klärschlämme, industrielle Reststoffe und Reststoffe von sonstigen Flächen) hinzugezählt, können derzeit 77 biogene Reststoffe im Aufkommen und der Nutzung bilanziert werden. Insgesamt befinden sich 65–84% bereits in einer stofflichen oder energetischen Nutzung. (► *Abbildung 2*)

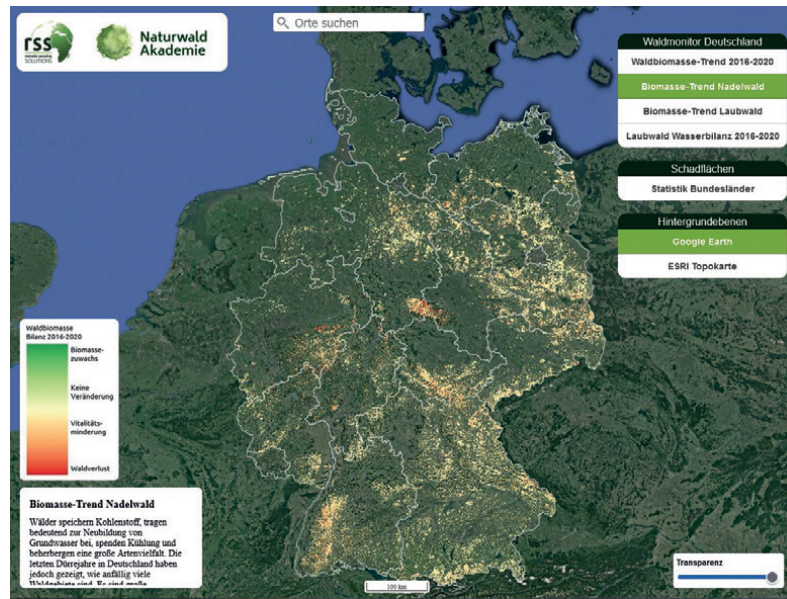


Abbildung 1
Waldmonitor Deutschland 2021:
 Biomassetrend für Nadelwälder

Ohne den Anspruch auf Vollständigkeit und unter Verwendung allgemeiner Kohlenstoffgehalte von 45–50% (Kaltschmitt, Hartman, Hofbauer 2016) ergibt sich über die dargestellten Bereiche eine gebundene Kohlenstoffmenge von etwa 70–100 Millionen Tonnen. Der direkte Einsatz dieser Biomassen in unterschiedlichen Konversionspfaden ist ein Weg, den Kohlenstoff zu nutzen. Auch können C-reiche Verbrennungsrückstände stofflich genutzt werden. Sowohl die Biomasse als auch die nutzbaren Punktquellen (s. u.) sind weit über Deutschland verteilt. Für die Nutzung des erneuerbaren Kohlenstoffs ist darüber hinaus aber auch die räumliche Verteilung der Anlagen zur Nutzung des regenerativen Kohlenstoffs zu beachten.

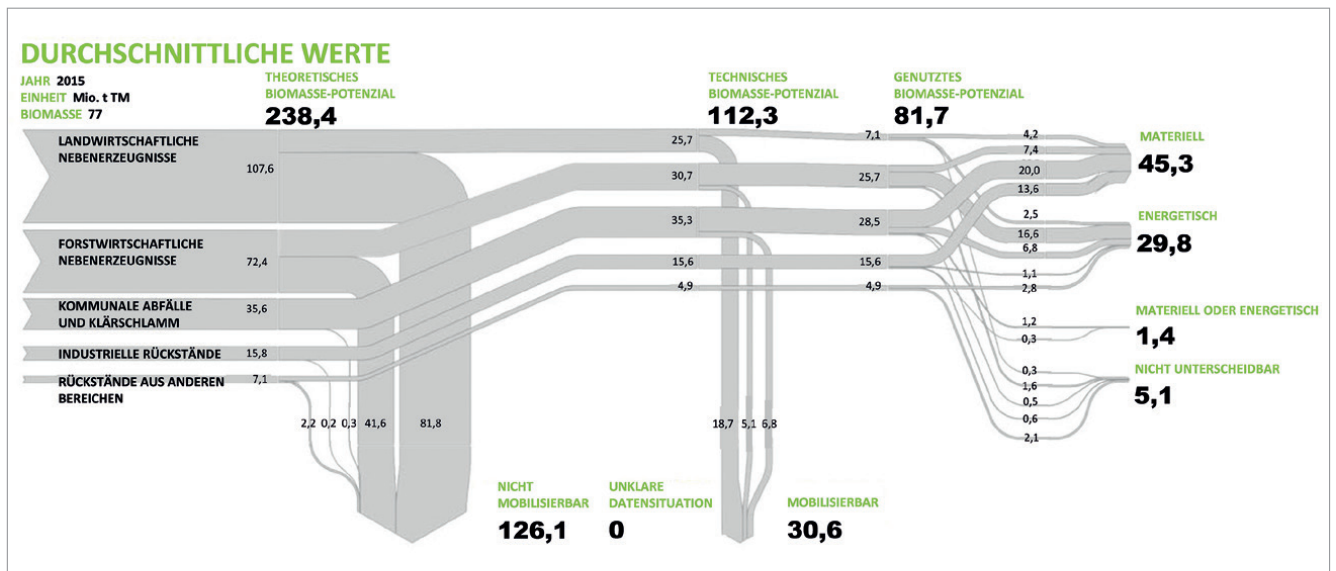
Direct-Air-Capture

DAC-Verfahren bestehen in der Regel aus drei Schritten:

1. Zunächst wird die Umgebungsluft z. B. mittels Ventilatoren zu einem Sorptionsmittel geleitet.
2. Anschließend muss das CO₂ aus der Umgebungsluft durch absorbierende oder adsorbierende Substanzen gebunden werden.
3. Schließlich wird das CO₂ durch Zufuhr von thermischer oder elektrischer Energie wieder vom Sorptionsmittel getrennt, so dass letzteres wieder für einen neuen Zyklus bereitsteht.

Die derzeit gängigen Verfahren und die sie umsetzenden Unternehmen lassen sich in zwei Gruppen, Hochtemperatur- und Niedertemperatur-Verfahren, zusammenfassen (Viebahn et al., 2019).

Abbildung 2
Biomasse-Reststoffpotenziale und ihre derzeitige Nutzung
 (Quelle: DBFZ)



Im Prozess der Absorption und Kalzinierung wird CO₂ mit Kaliumhydroxid (KOH) als wässrige Lösung absorbiert. Das aus der Absorption resultierende wässrige Kaliumkarbonat (K₂CO₃) wird in einem Pelletreaktor mit Calciumhydroxid (Ca(OH)₂) als Calciumcarbonat (CaCO₃) ausgefällt und in einem weiteren Schritt durch Kalzinieren in CO₂ und Calciumoxid (CaO) zerlegt. Letzteres wird nachfolgend zu Calciumhydroxid (Ca(OH)₂) hydrolysiert und steht dann für den nächsten Zyklus wieder zur Verfügung. Die Kalzinierung erfordert sehr hohe Temperaturen (> 800 °C), die das kanadische Unternehmen Carbon Engineering (CE) durch die energetische Nutzung von Erdgas mit gekoppelten Carbon Capture and Storage (CCS) erreicht (sog. DAC_{highTemp}-Verfahren). Neben einer existierenden Demoanlage in Kanada plant CE für das Jahr 2022 in den USA den Bau einer kommerziellen Anlage mit einer CO₂-Entnahme von 1 MtCO₂/Jahr (Mt = Megatonne). Eine weitere Anlage gleicher Größenordnung soll in Schottland gebaut werden und 2026 in Betrieb gehen. Alternative Wärmequellen könnten konzentrierende Solarenergie (CSP) oder Wasserstoff sein. Auch Hochtemperatur-Abwärme aus der Industrie käme in Frage, diese wird aber in der Regel bereits direkt in den Betrieben weitergenutzt.

Das Schweizer Unternehmen Climeworks und das US-amerikanische Unternehmen Global Thermostat (GT) arbeiten mit Adsorption und Desorption-Prozessen (sog. DAC_{lowTemp}-Verfahren). Hierbei wird das CO₂ zunächst über eine organisch-chemische Adsorption an ein Sorptionsmittel gebunden, das dann durch Niedertemperaturwärme (ca. 100 °C) oder Feuchtigkeit unter Vakuum regeneriert wird (Temperaturwechsel-Adsorption, TSA, in Kombination mit Druckwechsel-Adsorption, PSA). Climeworks betreibt, vorwiegend in Europa, über 15 Demonstrationsanlagen und hat im Juni 2021 in Hellisheidi (Island) eine kommerzielle Anlage „Orca“ mit einer Entnahme von 4 ktCO₂/Jahr in Betrieb genommen. Diese speichert zudem das eingefangene CO₂ in Basaltformationen, wo es innerhalb von 2 Jahren zu Carbonatgestein wird. GT betreibt mehrere Demoanlagen und eine kommerzielle Anlage mit 4 ktCO₂/Jahr in den USA. Außerdem ist GT im Projekt HaruOni ab 2022 für die Bereitstellung von CO₂ aus der Atmosphäre zur Herstellung von e-Methanol und davon abgeleiteten synthetischen Kraftstoffen vorgesehen.

Am ZSW gibt es im Bereich DAC_{lowTemp}-Verfahren zwei Entwicklungen, die mit Polyethylenimin (PEI) als Sorptionsmittel arbeiten. Beim CORAL-Verfahren wird PEI als wässrige Lösung in einem Waschprozess eingesetzt. Das Verfahren ist demonstriert und befindet sich in der Skalierungsphase (TRL 5, ca. 2.000 h

Testbetrieb). Beim zweiten Verfahren (CORA), welches sich noch in der Entwicklung befindet, ist das PEI an Gewebepapier gebunden, welches kontinuierlich zwischen Ad- und Desorptionseinrichtung im Kreis geführt wird.

Hinzu kommen weitere Firmen, zum Teil Start-Ups mit eigenen Entwicklungen. Insgesamt werden derzeit weltweit Anlagen mit einer kumulierten Kapazität von mehr als 10 ktCO₂/Jahr als Demo- oder Pilotanlagen betrieben. Die zukünftige Kapazität kommerzieller Anlagen ist theoretisch unbeschränkt. Sie hängt von der Verfügbarkeit von ausreichend Strom und Wärme (bei den gängigen Verfahren etwa im Verhältnis von 20 % zu 80 %), von Flächen und im Fall von DAC_{highTemp} von der Wasserbereitstellung ab. Der Vorteil von DAC_{lowTemp}-Anlagen ist, dass sie modular zu beliebigen Größen zusammengesetzt werden können und neben dem CO₂ auch Wasserdampf aus der Atmosphäre entziehen. Anlagen, die gleichzeitig Wasser abscheiden, können idealerweise den Wasserverbrauch von Elektrolyseuren decken und deren Abwärme (oder die von Syntheseprozessen) aufnehmen.

Punktquellen

Die CO₂-Emissionen der Großindustrie scheinen zunächst eine günstige Quelle für Kohlenstoff zu sein. Durch den klimazielbedingten Wechsel auf alternative, kohlenstofffreie Energieträger wie Elektrizität und Wasserstoff werden diese Mengen aber kontinuierlich zurückgehen, so dass perspektivisch wenige Branchen bestehen bleiben, die, nach heutigen Einschätzungen, auch langfristig prozessbedingt CO₂ emittieren.

Neben dem Einsatz von erneuerbaren bzw. synthetischen Kohlenwasserstoffen als Energieträger, die angesichts von Nachfrage, Potenzialen und Kosten gegenüber heute nur vergleichsweise eingeschränkt zum Einsatz kommen dürften, bieten sich beispielsweise die Zementherstellung sowie Müllverbrennung auch langfristig als große Punktquellen an. Im Rahmen des MENA-Fuels Projekts (BMWK, 03EIV181C) eruierte IZES die heutigen Emissionsmengen aus diesen Quellen in Industrie- und Schwellenländern auf Basis von National Inventory Reports (NIR) und National Communications (NC) an die Vereinten Nationen (UNFCCC 2020). Aufgrund der vergleichsweise hohen Konzentration im Abgasstrom von Zementwerken von je nach Quelle 14 %–33 % (Wilcox 2012) gegenüber dem Anteil in der Umgebungsluft von 0,04 % können die Abscheideverfahren vergleichsweise kostengünstig betrieben werden. Die derzeitigen CO₂-Potenziale belaufen sich in Deutschland auf etwa 9,4 Mt/a bei Müllverbren-

Quelle	Geschätztes Aufkommen	Bereits in Nutzung	Kohlenstoffgehalt	Kohlenstoff
Biogene Rohstoffe (gebundenes C) Nachwachsende Rohstoffe Holz Reststoffe, Nebenprodukte, Abfälle	2,58 Mio. ha 127,2 Mio. m ³ 86-140 Mio. t TM	100 % 100 % 65-84 %	45-50%* (der Trockenmasse)	ca. 80-110 Mio. t <small>Keine Addition!</small>
Luft (CO₂)	Unbegrenzt , aber abh. von verfügbarer Energie, Fläche und teilweise Wasser			
Punktquellen (CO₂) Industrie Biogas/Biomethan Bioethanol Biomasse-HKW	105.948.000 t/a 28.830.000 t/a 71.000 t/a 6.380.000 t/a	teils i.d.R. nein teils nein	unterschiedlich 10-95% 97-98% <20%	ca. ??? Mio. t <small>Keine Addition!</small>
Plastikabfälle für chemisches Recycling (gebundenes C)	3.500.000 t/a	0,2%	80%	ca. 2,8 Mio. t

nungsanlagen und etwa 13,2Mt/a bei der Herstellung von Zement. Es bietet sich allerdings an, die Herstellung von synthetischen Kohlenwasserstoffen in unmittelbarer Nähe der Industrieanlagen und idealerweise in Nähe bereits bestehender Verteil-Infrastrukturen für diese Kraftstoffe zu platzieren. Die in dem Vortrag dargestellten Standorte zeigen lediglich eine Auswahl, die auch aufgrund besserer Darstellung entsprechend verkürzt wiedergegeben wird.

Der in den biogenen Rohstoffen gebundene Kohlenstoff kann über verschiedene Konversionswege als biogenes CO₂ aus sog. Punktquellen (und damit als Kohlenstoffträger) für Wasserstofffolgeprodukte nutzbar gemacht werden. In Deutschland liegen diese in einer Gesamtgrößenordnung von ca. 35 Mio. Tonnen CO₂ (u. a. Meisel et al. 2019, Billig et al., 2019). Deren Mobilisierung hängt von vielerlei Randbedingungen ab. Hierzu gehören je nach weiterer Anwendung vor allem die jeweilige CO₂-Konzentration je Punktquelle (d. h. Anlage) und damit der erforderliche Aufwand der Gaskonditionierung und Abtrennung, die jeweils typische CO₂-Menge und deren zeitliche Verfügbarkeit (kontinuierlich oder diskontinuierlich) sowie Aspekte der CO₂-Speicherung und des Transports. Während beispielsweise in Ethanolanlagen prozessbedingt CO₂ mit vergleichsweise hoher Reinheit und recht großen Mengen je Anlage anfällt, bedarf es bei Biogas-/Biomethanolanlagen immer einer Abscheidung des CO₂ (i. d. R. im Zusammenhang mit der Biomethanaufbereitung) von vergleichsweise kleinen Mengen CO₂ je Anlage. Grundsätzlich ließe sich mit entsprechendem Aufwand ebenso CO₂ aus Abgasen der Biomasseverbrennung (z. B. in Heizkraftwerken) abscheiden. Zunehmend wird ergänzend Augenmerk auf Pyrolyseprozesse oder Vergasungsverfahren gelegt (Borchers et al., eingereicht; Dittmeyer et al., 2021). Bisher sind Anwendungsbeispiele für die Nutzung des CO₂ aus Ethanolanlagen (i. d. R. stofflich in der

Getränkeindustrie) bekannt und teils für die direkte Nutzung des im Rohbiogas enthaltenen CO₂ in SynBioPTx-Anwendungen, bei denen das gesamte Rohbiogas in Produktsynthesen genutzt wird.

Kunststoffrecycling

Kunststoffabfälle und Altkunststoffe, die sich nicht wiederverwenden (primäres Recycling) oder mechanisch recyceln lassen (sekundäres Recycling), sei es weil sie zu sehr vermischt oder zu stark verschmutzt sind, können einem chemischen Recyclingprozess unterworfen werden, bei dem zunächst eine Zerlegung in chemische Grundbausteine erfolgt, aus denen dann wieder neue monomere Grundeinheiten und Polymere aufgebaut werden können. Ist dies technisch nicht möglich oder wegen zu hohem Aufwand unwirtschaftlich, bleibt nur die thermische Verwertung in Müllverbrennungsanlagen, wobei der Kohlenstoff in CO₂ umgewandelt wird.

Müllverbrennungsanlagen stellen industrielle CO₂-Punktquellen dar, die im vorangegangenen Abschnitt behandelt wurden. Beim chemischen Recycling wird in Abhängigkeit vom dem für die Zerlegung realisierten chemischen Prinzip zwischen Hydrolyse, Solvolyse, hydrierender oder katalytischer Spaltung, Pyrolyse und Vergasung unterschieden (Maisels, 2021).

Chemisches Recycling stellt im Sinne des Verpackungsgesetzes zwar keine werkstoffliche Verwertung dar (EUWID, 2018) und wird bislang nur in geringem Umfang praktiziert. PlasticsEurope gibt z. B. für Deutschland im Jahr 2018 eine chemische Recyclingquote von 0,2% an, was bei einem Gesamtaufkommen von 5.3 Mio. t Verpackungskunststoffen 10.600t entspricht. Experten gehen allerdings davon aus, dass diese Quote in Zukunft steigen wird. Beispielsweise erwartet die VCI-Studie „Roadmap Chemie 2050 – Auf dem Weg zu einer klimaneutralen

Tabelle 1
Existierende Kohlenstoffquellen
(Quelle: DBFZ)

chemischen Industrie in Deutschland“ von DECHEMA e.V. und FutureCamp Climate GmbH (VCI, 2019) perspektivisch für 2050 immerhin einen Beitrag des chemischen Kunststoffrecyclings zur gesamten Kohlenstoffversorgung der chemischen Industrie von 11%. Dies entspricht 2.8 Mio. t Kohlenstoff bzw. 3.5 Mio. t zu recycelndem Altkunststoff.

Schlussfolgerungen

Aus den vier vorgestellten Bereichen leiten sich sehr heterogene Anforderungen an die Bilanzierung des Kohlenstoffaufkommens und dessen Nutzung ab. Entlang verschiedener Stoffströme existieren zahlreichen Möglichkeiten, den Kohlenstoff in weiterführende Verwendungen zu überführen. Für die Erschließung der Chancen und Bewertung der Risiken bedarf es u. a. konsistenter Datenquellen entlang der jeweiligen Stoffströme. Zeitlich und räumlich betrachtet, kommen z. B. die Punktquellen, die Erzeugung von erneuerbarer Energie, das Biomasseaufkommen, infrastrukturelle Anforderungen, naturräumliche Gegebenheiten und nicht zuletzt rechtliche Rahmensetzungen nicht immer optimal zusammen. Das CO₂ aus industriellen Punktquellen wird, sofern es fossilen Ursprungs ist, z. B. nur für eine Übergangszeit genutzt werden können, da das fossile CO₂ bei der Verbrennung synthetischer Kraftstoffe wieder freigesetzt wird und somit nicht als klimaneutral gilt. Zudem ist nicht immer deutlich, ob eine technisch mögliche, zusätzliche Nutzung des Kohlenstoffs eine effiziente Sektorenkoppelung oder die Verdrängung einer bestehenden Nutzung darstellt. In diesem Zusammenhang existieren demnach zahlreiche Optionen für einen institutionen-übergreifenden Wissenstransfer und Datenaustausch. (► *Tabelle 1*)

Literatur

- Billig, E., Decker, M., Benzinger, W., Ketelsen, F., Pfeifer, P., Peters, R., Stolten, D., Thrän, D. (2019): Non-fossil CO₂ recycling – The technical potential for the present and future utilization for fuels in Germany, J. CO₂ Util. 30, 130–141.
- Borchers, M., Thrän, D., Chi, Y., Dahmen, N., Dittmeyer, R., Dolch, T., Dold, C., Förster, J., Herbst, M., Heß, D., Kalhori, A., Koop-Jakobsen, K., Li, Z., Mengis, N., Reusch, T.B.H., Rhoden, I., Sachs, T., Schmidt-Hattenberger, C., Stevenson, A., Thoni, T., Wu, J., Yeates, C. (eingereicht). Contribution to Net-Zero-2050 Germany – the portfolio of carbon dioxide removal options. *Frontiers in Climate*.
- VCI-Studie Roadmap Chemie 2050 – Auf dem Weg zu einer klimaneutralen chemischen Industrie in Deutschland, DECHEMA e.V. und FutureCamp Climate GmbH, 2019
- Dittmeyer, R., Dahmen, N., Hess, D., Chi, Y., Monnerie, N., Prats, E., Thrän, D., Borchers, M., Brinkmann, T., Hamedimastanabad, H. (2021): Preferred Technology Options for DAC and BECCS schemes based on results of assessment, M-P2.2, Helmholtz Klima Initiative (HI-CAM), Cluster I: Net-Zero-2050.
- EUWID Recycling und Entsorgung, Nr. 42/2018, S. 25.
- Kaltschmitt, Hartman, Hofbauer (2016): Energie aus Biomasse, Grundlagen, Techniken und Verfahren, Springer-Verlag, Heidelberg.
- KSG – Bundesklimaschutzgesetz (2021): Erstes Gesetz zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes vom 18.08.2021, [https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&start=//*\[@attr_id=%27bgbl121s3905.pdf%27\]#__bgbl__%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl121s3905.pdf%27%5D__1634046985562](https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBl&start=//*[@attr_id=%27bgbl121s3905.pdf%27]#__bgbl__%2F%2F%5B%40attr_id%3D%27bgbl121s3905.pdf%27%5D__1634046985562).
- Meisel, K., Müller-Langer, F., Millinger, M.: Eine globale Roadmap für Powerfuels | Powerfuels' place in the sustainability and recycling debate, URL: https://www.dena-kongress.de/file-admin/Kongress/Bilder/dena-Kongress_2019/Praesentationen/25.11.2019/Session-Raum_4/Roadmap_fuer_Powerfuels/07_dena_Energie-wende_powerfuels_Meisel_2019.pdf
- Maisels, A., Hiller, A., Simon, F.-G., Chemisches Recycling für Kunststoffe: Status und Perspektiven *Chem. Ing. Tech.* 2021, 93, No. 11, 1742–1750.

- *Plastics – the Facts 2020*, An analysis of European plastics production, demand and waste data, PlasticsEurope, Association of Plastics Manufactures, Brussels 2020.
- Prognos, Öko-Institut, Wuppertal Institut (2021): *Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann*. Studie im Auftrag von Agora Energiewende, Agora Verkehrswende und Stiftung Klimaneutralität. Berlin.
- UBA – Umweltbundesamt (2021): *Treibhausgas-minderungsziele Deutschland*, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-minderungsziele-deutschlands>
- UNFCCC (2020): *United Nations Climate Change – National Inventory Submissions 2020*; <https://unfccc.int/ghg-inventories-annex-i-parties/2020>
- Viebahn, Peter; Scholz, Alexander; Zelt, Ole (2019): *The Potential Role of Direct Air Capture in the German Energy Research Program – Results of a Multi-Dimensional Analysis*. *Energies* 12(18)3443.
- Wilcox, J. (2012): *Carbon Capture*, New York: Springer, ISBN 978-1-4939-0125-8