



Sachstand

Kohlendioxid für die Getränkeindustrie

Herstellung von lebensmitteltauglichen Kohlendioxid, Quellen und Anforderungen

Kohlendioxid für die Getränkeindustrie

Herstellung von lebensmitteltauglichen Kohlendioxid, Quellen und Anforderungen

Aktenzeichen: WD 8 - 3000 - 080/22
Abschluss der Arbeit: 6. Dezember 2022
Fachbereich: WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung
und Forschung

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----------|---|----------|
| 1. | Einleitung | 4 |
| 2. | Anforderungen an lebensmitteltaugliches Kohlendioxid | 4 |
| 3. | Quellen für lebensmitteltaugliches Kohlendioxid | 5 |
| 4. | Gewinnung von lebensmitteltauglichen Kohlendioxid | 7 |
| 5. | Literatur- und Quellenverzeichnis | 9 |

1. Einleitung

Ammoniak ist das Ausgangsprodukt zur Erzeugung stickstoffhaltiger Düngemittel. Ein Nebenprodukt der Ammoniaksynthese nach dem Haber-Bosch-Verfahren ist Kohlenmonoxid, das nachfolgend zu Kohlendioxid umgewandelt werden kann. Ein bedeutsamer Abnehmer dieses aufgereinigten Kohlendioxids ist die Getränkeindustrie, die damit Softdrinks, Bier und Mineralwasser mit Kohlensäure versetzt, damit den Geschmack der Getränke stabilisiert und Kohlendioxid auch anderweitig in der Herstellung verwendet (zum Spülen und Entkeimen von Flaschen und Tanks). Infolge drastisch gestiegener Energiepreise haben Hersteller von Ammoniak allerdings ihre Produktionskapazitäten eingeschränkt, da die Synthese von Ammoniak aus dem Stickstoff der Luft energieintensiv ist. Die Getränkeindustrie beklagt daher aktuell eine erhebliche Verknappung an lebensmitteltauglichem Kohlendioxid. Es seien nur 30 bis 40 Prozent der nötigen Menge am Markt verfügbar, die Preise entsprechend hoch (Terpitz 2022). Viele mittelständische Brauereien und Abfüller von Erfrischungsgetränken und auch Mineralbrunnen werden laut einer Presseerklärung aktuell nicht mehr mit Kohlensäure beliefert (Bundesverband des Deutschen Getränkefachgroßhandels 2022).

Es sei erwähnt, dass Kohlendioxid im Übrigen auch ein wichtiges „Schutzgas“ für verpackte Lebensmittel ist, damit diese länger haltbar bleiben. Kohlendioxid verdrängt in der geschlossenen Verpackung den Sauerstoff und unterdrückt so Abbau- und Verderbnisvorgänge. Kohlendioxid hemmt auch die Aktivität der meisten Mikroorganismen wie Schimmel und aerober Bakterien, indem es den pH-Wert der Lebensmitteloberfläche herabsetzt. Weiterhin nutzen Schlachtbetriebe lebensmitteltaugliches Kohlendioxid zur Betäubung der Tiere. Kohlendioxid in Form von Trockeneis wird auch zur Kühlung beim Transport von Lebensmitteln verwendet (The Business Research Company 2022).

2. Anforderungen an lebensmitteltaugliches Kohlendioxid

Kohlendioxid entsteht bei Gärprozessen im Zuge der Getränkeherstellung zum einen von selbst: Es tritt als Reaktionsprodukt etwa in Brauereien, Mostereien und Sektkellereien auf. Hier kann es auch aufgefangen und weiterverwendet werden. Daneben werden einige Getränke gezielt mit Kohlendioxid versetzt. Auch zum Spülen von Getränketanks wird Kohlendioxid verwendet, da es Keime wirksam beseitigt. Dabei kann technisch erzeugtes Kohlendioxid zum Einsatz kommen, das zur Verwendung in der Lebensmittelindustrie qualifiziert ist. Dieses lebensmitteltaugliche Gas wird als Zusatzstoff E290 bezeichnet. Es wird als Lebensmittelzusatzstoff und Prozesshilfsstoff sowohl gasförmig, flüssig als auch in fester Form als Trockeneis geliefert und eingesetzt (Industriegaseverband 2022: 4).

E290 sowie die verwendeten Anlagen zu seiner Herstellung müssen spezifischen Anforderungen im Hinblick auf die Lebensmittelsicherheit genügen. Industriegase, die in der Lebensmittelproduktion eingesetzt werden, gelten als Lebensmittelzusatzstoffe. Entsprechend der Verordnung (EG) Nr. 178/2002, Artikel 2, sind Lebensmittelzusatzstoffe wie Lebensmittel zu behandeln. Hersteller und Abfüller der Gase, die als Lebensmittelzusatzstoffe eingesetzt werden, müssen sich deshalb als Herstellbetriebe bei den zuständigen Behörden registrieren lassen.

Zur Kontrolle und Qualitätssicherung müssen die Betriebe gemäß der Verordnung 852/2004/EG über Lebensmittelhygiene das in der Lebensmittelindustrie obligatorische Risikoanalyse-Verfahren auf HACCP-(Hazard Analysis and Critical Control Point)-Grundsätzen umsetzen. Das HACCP-Konzept ist mit umfassenden Dokumentations- und Schulungspflichten verknüpft (Industriegaseverband 2018: 6ff).

Jede Charge CO₂ in Lebensmittelqualität muss über die Produktionskette zurückverfolgt werden können, sodass aufgrund der Informationen zum Produkt (z. B. Gasflasche) klar ist, woher diese kommt. Im Falle von Qualitätsmängeln des Produktes muss ein sofortiger Rückruf möglich sein, was in regelmäßigen Rückruftests zu prüfen ist. Die Testergebnisse müssen dokumentiert werden. Weiterhin sind mit der Lieferung des Gases Zertifikate vorzulegen, die die Eignung des CO₂ in Lebensmittelqualität und als Lebensmittelzusatzstoff (E290) belegen. Darin wird u. a. die Reinheit angegeben.

Vor der Verwendung von lebensmitteltechnischem Kohlendioxid muss dieses bestimmte Qualitätsansprüchen genügen. Insbesondere orientieren sich Hersteller an den Kriterien der International Society of Beverage Technologists-(ISBT)-Richtlinie, die Grenzwerte für verschiedene Schadstoffe und deren analytischen Nachweis im Kohlendioxid festlegt. Die ISBT ist ein Industrieverband mit – eigenen Angaben zufolge – mehr als 800 Mitgliedsunternehmen in 21 Ländern. Die Richtlinie ist wie bei Industriestandards- und -normen üblich nicht rechtsverbindlich, dient Unternehmen aber zur Gewähr gegenüber Kunden, zum Schutz vor Produkthaftung und zur Umsetzung der rechtlich geforderten Sicherheit von Lebensmittelzusatzstoffen. Sie wurde erstmalig im Jahr 2001 erstellt und zuletzt 2021 aktualisiert. Im Rahmen der ISBT-Richtlinie werden Verunreinigungen im Gas erfasst, die die Gesundheit der Verbraucher gefährden oder die Qualität des Endprodukts im Hinblick auf Geschmack, Geruch und Haltbarkeit negativ beeinflussen könnten. Sie legt verbindliche Obergrenzen für mögliche Verunreinigungen, darunter Stickoxide, Ammoniak, flüchtige Kohlenwasserstoffe etc. im Kohlendioxid fest, das in Lebensmitteln zum Einsatz kommt und bestimmt zugleich entsprechende Nachweismethoden für diese potenziellen Schadstoffe. Die Richtlinie entstand auf Initiative der Getränkebranche, nachdem es zum Rückruf mit Schwefelwasserstoff und Benzol verunreinigter Getränke gekommen war. Viele Getränkehersteller nutzen Schnelltests oder quantitative Analyseverfahren, um eine unzulässige Verunreinigung des gelieferten Gases auszuschließen (Ringo 2000, ISBT 2022).

Aus den hier benannten Anforderungen an lebensmitteltaugliches Kohlendioxid ergibt sich, dass Kohlendioxid, das als Treibhausgas in unerwünscht großen Mengen in zahlreichen industriellen Prozessen anfällt, nicht direkt und ohne Weiteres in der Getränkeindustrie verwendet werden kann. Je nach Verunreinigungen muss es aufgereinigt, fortlaufend kontrolliert und darf nur mit entsprechenden Berichts- und Genehmigungspflichten gehandelt werden. Dies bedingt, dass neue Produzenten von lebensmitteltauglichem Kohlendioxid einerseits entsprechende Anlagentechnik installieren und sich andererseits qualifizieren müssen.

3. Quellen für lebensmitteltaugliches Kohlendioxid

Technisch hergestelltes Kohlendioxid wurde bisher vorwiegend aus der **Düngerherstellung, konkreter: der Ammoniaksynthese** als Nebenprodukt gewonnen (siehe Kapitel 1). Es fällt beim zu-

grunde liegenden Haber-Bosch-Verfahren vergleichsweise rein an, weshalb diese Quelle bevorzugt wird, weil die weitere Aufreinigung des Gases mit geringeren finanziellen und technischen Aufwänden verbunden ist (Wheeler 2020).

Auch in Raffinerien fällt Kohlendioxid bei der Erzeugung von Wasserstoff an. Dabei wird Methan mithilfe von Wasserdampf in Wasserstoff und Kohlenmonoxid umgewandelt; dieses Gasgemisch heißt auch Synthesegas. Das zugrunde liegende Verfahren dient der **Produktion von Synthesegas**. Durch Zugabe von Luft kann Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid oxidiert werden. Das so erzeugte Kohlendioxid ist dann mit nicht umgesetztem Kohlenmonoxid, Aromaten, Alkoholen und Schwefelverbindungen verunreinigt, die abgetrennt werden müssen.

Kohlendioxid kann auch aus zahlreichen weiteren Abgasen separiert werden, die dann eine grundsätzlich prozessbedingte unterschiedliche, nachgeschaltete Reinigung erforderlich machen, um unerwünschte Begleitstoffe zu entfernen. Die mögliche Abtrennung von Kohlendioxid ist weniger eine Frage der technischen Machbarkeit, als eine Frage des Aufwands, des sich daraus ergebenden Herstellungspreises und ob dieser am Markt wettbewerbsfähig ist. Etwaig werden in der Fachliteratur auch die Abtrennung von Kohlendioxid für die Getränkeindustrie aus der Vergasung von Kohle, aus der Erzeugung von Ethylenoxid, aus der Verarbeitung von Phosphaten, aus der Gewinnung von Kalk, aus der Geothermie, aus der Neutralisation von Säuren und der Verbrennung im Allgemeinen aufgeführt (ISBT 2022).

Bei der **Verbrennung von fossilen Rohstoffen** wie Erdöl, Kohle und Erdgas entsteht, je nach Brennstoffart, ein Rauchgas mit einem geringen Anteil an Kohlendioxid. Bei konventionellen Kohlekraftwerken handelt es sich dabei etwa um 10 bis 15 Prozent Kohlendioxid, bei Gaskraftwerken sind es 3 bis 6 Prozent. Die Abtrennung aus dem Abgas ist bei diesen Konzentrationen und infolge der zahlreichen Verunreinigungen aufwändig, sodass Abgasquellen mit höheren Gehalten und reinerem Kohlendioxid bevorzugt werden. Das sind neben der **Ammoniaksynthese, die Ethylenoxid- und Synthesegasproduktion** (siehe oben) (Industriegase 2022: 5 f).

Wie bereits erwähnt, fällt auch bei jedem **natürlichen Gärvorgang in Mostereien, Brauereien und Kellereien** Kohlendioxid an. Es enthält aber schwefel- und andere organische Verbindungen, die unter anderem Geruch und Geschmack bestimmter Getränke verfälschen würden, sodass dieses „Gärungskohlendioxid“ im Wesentlichen innerhalb der Betriebe, etwa einer Brauerei wiederverwendet wird, beispielsweise zum Spülen von Behältern.

Als weitere Quelle für technisches Kohlendioxid werden **erloschene und tätige Vulkane** genutzt. Auch dieses Kohlendioxid tritt vergleichsweise rein aus, weshalb sich die Herstellung überhaupt bewährt hat (Industriegase 2022: 5 f).

Dass durchaus weitere und neue Kohlendioxidemittenten zu Kohlendioxidlieferanten werden können, geht ebenfalls aus der Literatur hervor. **Moderne Bioethanolanlagen** erreichen durch eine aufwendige Aufreinigung des Kohlendioxids sehr hohe Reinheiten, sodass das Gas in der Lebensmittelindustrie eingesetzt werden kann (Industriegaseverband 2018: 16). In den Anlagen werden kohlenhydrathaltige Ausgangsstoffe wie Mais und Weizen mithilfe von Mikroorganismen zu Alkohol vergoren.

Vereinzelte haben auch große **Biogasanlagen**, das bei der Vergärung von Mais, Gülle und biologischen Abfällen anfallende Kohlendioxid weiter aufgereinigt und liefern es als lebensmitteltaugliches Gas aus (IEA Energy 2020). Dies erscheint insofern eine praktikable Option, als Biogas infolge der Erzeugung zunächst hohe Anteile an Kohlendioxid von 25 bis 55 Prozent enthält. Das sind deutlich höhere Werte als in Kraftwerksabgasen. Zudem muss der Kohlendioxidgehalt schon vor der weiteren Verwendung des Biogases auf sechs Prozent abgesenkt werden, was mittels Druckwechseladsorption erfolgt (siehe Kapitel 4) (Markewitz 2017: 15 f).

Unter dem Begriff der Kohlendioxidabscheidung und -sequestrierung, kurz: CCS, wird seit ungefähr zwei Jahrzehnten in zahlreichen Forschungsprojekten die Abtrennung und Tiefenlagerung von Kohlendioxid aus fossil befeuerten Kraftwerken und verschiedenen Industrieprozessen erforscht. An verschiedenen Standorten wurde die Technik erprobt, an einzelnen bis heute angewandt. Primäres Ziel der CCS-Technologie ist die Lagerung des klimaaktiven Kohlendioxids in unterirdischen Formationen, sodass das Treibhausgas die Atmosphäre nicht beeinträchtigen kann (Umweltbundesamt 2022).

Neben der Endlagerung des Kohlendioxids werden unter dem Schlagwort „CCS“ auch Technologien mit einer nachgelagerten Verwendung von Kohlendioxid diskutiert. Dies wird in der Forschungsliteratur teils auch als **CCU, Kohlendioxidsequestrierung und -verwendung**, bezeichnet. Etwa kann Kohlendioxid entsprechend aufgereinigt, der Lebensmittel- und Getränkeindustrie zur Verfügung gestellt werden. Kohlendioxid wird auch im Unter-Glas-Anbau eingesetzt, da Pflanzen unter kohlendioxidangereicherter Atmosphäre schneller wachsen. Einer Verwendung von Kohlendioxid, das aus Fabrik- oder Kraftwerksabgasen gewonnen wird, geht die Abtrennung sowie Reinigung und schließlich die Konfektionierung zum lebensmitteltauglichen Produkt voraus, die im folgenden Kapitel kurz umrissen wird. Weniger reines Kohlendioxid wird weltweit auch zur verstärkten Förderung von Erdöl und Erdgas genutzt, wobei das Gas in die Lagerstätte eingepresst und Gegenzug die Förderung der fossilen Rohstoffe intensiviert wird. Diese verbreitete Fördertechnologie beansprucht viel Kohlendioxid und firmiert unter dem Begriff „Enhanced Oil Recovery“ bzw. „Enhanced Gas Recovery“. In Zeiten knappen Prozess-Kohlendioxids kann sie standortbezogen in Nutzungskonkurrenz zur Anwendung im Getränke- und Lebensmittelsektor stehen.

Grundsätzlich gibt es zahlreiche Quellen von Kohlendioxid. Fraglich ist jeweils die Wirtschaftlichkeit der Abtrennung und Gewinnung von lebensmitteltauglichen Kohlendioxid. Und auch, wenn nun höhere Preise am Markt erzielt werden können, setzt der Einsatz einer alternativen Gewinnungsmethode die unternehmerische Entscheidung einer Investition in entsprechende Anlagentechnik voraus.

Als Alternative zu Kohlendioxid nutzt die Getränke- und Lebensmittelindustrie teils auch **Stickstoff** als Industriegas.

4. Gewinnung von lebensmitteltauglichen Kohlendioxid

Die Abtrennung des Kohlendioxids aus unterschiedlich zusammengesetzten Prozessabgasen kann mittels unterschiedlicher Technologien erfolgen. CO₂ kann durch Einlagerung ins Volumen

einer flüssigen oder festen Substanz (Absorption) oder durch Anlagerung an Oberflächen (Adsorption) gebunden werden. Es kann weiterhin mit Hilfe von Membranen aus dem Abgas herausgefiltert oder durch Kühlung und nachfolgende Kondensation aus dem Abgas entfernt werden.

Bei der chemischen oder physikalischen Absorption wird das Kohlendioxid an eine Flüssigkeit, in der Regel an bestimmte Amine oder ionische Flüssigkeiten, die den Absorber darstellen, chemisch gebunden und damit von den übrigen Abgasen separiert. Durch Hitze kann die Bindung an den Absorber später wieder gelöst werden. Der Absorber steht danach erneut zur Verfügung, um weiteres Kohlendioxid aus dem Abgas zu filtern. In der Literatur sind mehrere Absorbersubstanzen beschrieben. Die Abtrennung mit Hilfe von flüssigen Monoethanolaminen (MEA) ist zurzeit das dominierende kommerzielle Verfahren. Es wird seit Ende der siebziger Jahre in verschiedenen chemischen Produktionsprozessen wie der Ammoniak-, Synthesegas- und Ethylenoxidsynthese großtechnisch eingesetzt. MEA wird allerdings durch Verunreinigungen Schwefel- und Stickoxide im Abgas abgebaut, weshalb ständig neues Amin nachgefüllt werden muss. Insgesamt gilt das MEA-Verfahren als ressourcenintensiv. Da das Kohlendioxid erst bei 100 bis 140 Grad Celsius wieder von dem MEA gelöst werden kann, verbraucht die MEA-Technologie zudem vergleichsweise viel Energie. Allerdings ist das Verfahren im Vergleich zu den anderen Techniken auch bei niedrigen CO₂-Gehalten in der Abluft noch sehr wirksam und am weitesten entwickelt.

Alternativ zur Absorption wird die Adsorption von Kohlendioxid an Tonminerale, aktivierte Kohle, metallorganische Netzwerke und andere Verbindungen erforscht und angewandt. Durch Druckerniedrigung oder Temperaturerhöhung kann es daraus wieder freigesetzt werden. Für diesen Prozessschritt muss Energie aufgewendet werden; ansonsten sind die Betriebskosten des Adsorptionsverfahrens jedoch eher gering. Sowohl die Druckwechsel- als auch die Temperaturwechseladsorption werden bereits zur Entfernung von CO₂ aus Roherdgas und zur Abscheidung von Kohlendioxid bei einigen Gas- und Kohlekraftwerken in den USA genutzt. Die Druckwechseladsorption wird auch zur Aufreinigung von Biogas herangezogen (Markewitz 2017). Für stärker verunreinigte Abgase sind die Absorber jedoch teils nicht ausreichend spezifisch und effektiv (Reddy 2021).

Beim Membranverfahren wird Kohlendioxid bei der Passage durch eine Polymermembran abgetrennt. Die Technik kommt bis dato primär in der Aufreinigung von Rohöl und Roh-Erdgas zum Zug, die teils mit hohen Anteilen an Kohlendioxid verunreinigt sind. Ihm wird ein großes Potenzial beigemessen, da die Technologie weniger Energie benötigt als die vorgenannten Verfahren.

Nach der Abtrennung des Kohlendioxids erfolgt die weitere Verarbeitung: Bevor das CO₂ verdichtet werden kann, müssen Verunreinigungen, Luft und Feuchte entfernt werden. Der Wasseranteil wird mittels Abkühlung des feuchtigkeitsgesättigten Rohgases mit nachgeschalteter Wasserabscheidung vermindert.

Das verdichtete CO₂-Gas hat eine Reinheit, die höher als 99 Prozent ist. Die Restgasbestandteile sind neben den Bestandteilen der Luft auch noch Verunreinigungen typischerweise Methan, Kohlenmonoxid, Schwefelwasserstoff und Schwefeloxide, die bei der Vorreinigung nicht zu 100 Prozent entfernt wurden. Geringe Spuren des übelriechenden Schwefelwasserstoffes werden mittels Aktivkohlefilter entfernt.

Vor der Verflüssigung des CO₂ wird es nochmals mithilfe von Molekularsieben getrocknet, die bei Temperaturen von mehr als 180 Grad Celsius regeneriert werden können. Nach der Trocknung schließt sich unter Umständen ein weiterer Aktivkohlefilter zur Vermeidung von Restgasen an.

Bei einem Druck von 14 bis 20 bar und Temperaturen von -40 bis -25 Grad Celsius wird Kohlendioxid in der Regel verflüssigt. Es kann auch gasförmig in Druckgasbehälter abgefüllt oder unter hohen Drucken und einer weiteren Temperaturabsenkung zu Trockeneis gepresst werden (Industriegaseverband 2018).

5. Literatur- und Quellenverzeichnis

Bundesverband des Deutschen Getränkefachgroßhandels (2022). Gemeinsame Erklärung der Verbände der Getränkeiwirtschaft: Handeln, bevor es zu spät ist. Presseerklärung vom 20. September 2022, online abrufbar unter: <https://bv-gfgh.de/gemeinsame-erklaerung-der-verbaende-der-getraenkewirtschaft-handeln-bevor-es-zu-spaet-ist/>

Industriegaseverband (2018). Leitlinien für gute Verfahrenspraxis zur Herstellung, Abfüllung und Distribution von Lebensmittelgasen, online abrufbar unter: <https://www.industriegaseverband.de/download-file/igv-tl-011-rev1leitlinielebensmittelgase02-2018.pdf>

Industriegasverband (2022). Merkblatt zu Gasen als Lebensmittelzusatzstoffe – Herstellung, Lagerung, Abfüllung und Distribution. Online abrufbar unter: <https://www.industriegaseverband.de/download-file/lmgase.pdf>

International Society of Beverage Technologists - ISBT (2022). Guidelines, Best Practices, and White Papers, 2022, online abrufbar unter: <https://www.isbt.com/resources-guidelines-best-practices.asp>

International Energy Agency Bioenergy (2020). Production of food grade sustainable CO₂ from a large biogas facility. GO'CO₂ at The Korskro Biogas Plant, November 2020, online abrufbar unter: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2020/11/Case-Story-CO2-recovery-Denmark-November-2020.pdf>

Reddy, Sai et al. (2021). Carbon dioxide adsorption based on porous materials. In: Royal Society of Chemistry, 11, 12658-12681, online abrufbar unter: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2021/ra/d0ra10902a>

Ringo, Stefanie (2000). International Society of Beverage Technologists Carbon Dioxide Guidelines. 1. Dezember 2000, online abrufbar unter: <https://www.food-safety.com/articles/4422-international-society-of-beverage-technologists-carbon-dioxide-guidelines>

Terpitz, Kerstin (2022). CO₂ wird zur Mangelware – Erste Bierbrauer stellen Produktion. Handelsblatt, 21. September 2022.

The Business Research Company (2022). Carbon Dioxide Global Market Report 2022 – Market Size, Trends, And Global Forecast 2022-2026. Oktober 2022, online abrufbar unter: <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/carbon-dioxide-global-market-report>

Umweltbundesamt (2022). Carbon Capture and Storage, 23. Mai 2022, online abrufbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/gewaesser/grundwasser/nutzung-belastungen/carbon-capture-storage>

Wheeler, Mike (2020). Why CO₂ production is vital to food and beverage industry, 6. April 2020, online abrufbar unter: <https://www.foodmag.com.au/why-co2-production-is-vital-to-food-and-beverage-industry/>

Markewitz, Peter et al. (2017). Technologiebericht. CO₂-Abscheidung und -speicherung (CCS) innerhalb des Forschungsprojekts TF_Energiewende, 15. Dezember 2017, online abrufbar unter: https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/7051/file/7051_CCS.pdf

* * *