

VEREIN  
DEUTSCHER  
INGENIEURE

Power-to-X  
CO<sub>2</sub>-Bereitstellung  
Power-to-X  
CO<sub>2</sub> supply

VDI 4635  
Blatt 3.2 / Part 3.2  
Ausg. deutsch/englisch  
Issue German/English

Die deutsche Version dieser Richtlinie ist verbindlich.

The German version of this standard shall be taken as authoritative. No guarantee can be given with respect to the English translation.

Inhalt	Seite	Contents	Page
Vorbemerkung.....	2	Preliminary note .....	2
Einleitung.....	2	Introduction .....	2
<b>1 Anwendungsbereich.....</b>	<b>3</b>	<b>1 Scope.....</b>	<b>3</b>
<b>2 Normative Verweise.....</b>	<b>3</b>	<b>2 Normative references .....</b>	<b>3</b>
<b>3 Begriffe.....</b>	<b>4</b>	<b>3 Terms and definitions.....</b>	<b>4</b>
<b>4 Formelzeichen, Abkürzungen und Indizes.....</b>	<b>11</b>	<b>4 Symbols, abbreviations, and indices.....</b>	<b>11</b>
<b>5 Systemgrenzen und Systemparameter der CO<sub>2</sub>-Bereitstellung.....</b>	<b>14</b>	<b>5 System boundaries and system parameters of CO<sub>2</sub> supply.....</b>	<b>14</b>
<b>6 Quellgase für CO<sub>2</sub>.....</b>	<b>16</b>	<b>6 Source gases for CO<sub>2</sub>.....</b>	<b>16</b>
6.1 Beurteilung von Quellgasen.....	16	6.1 Assessment of source gases.....	16
6.2 Zusammensetzung des Quellgases.....	17	6.2 Composition of the source gas.....	17
6.3 Gruppierung und Relevanz von Quellgasen.....	18	6.3 Grouping and relevance of source gases.....	18
<b>7 Subsystem CO<sub>2</sub>-Bereitstellung.....</b>	<b>26</b>	<b>7 CO<sub>2</sub> supply subsystem.....</b>	<b>26</b>
7.1 Aufbereitung der Eduktströme.....	26	7.1 Treatment of the reactant streams.....	26
7.2 Prozessschritt CO <sub>2</sub> -Abtrennung.....	26	7.2 Process step CO <sub>2</sub> separation.....	26
7.3 Aufbereitung der Produktströme.....	51	7.3 Preparation of product flows.....	51
7.4 Gestaltungsbeispiele und Wirkungsgrade des Subsystems CO <sub>2</sub> -Bereitstellung.....	56	7.4 Design examples and efficiencies of the CO <sub>2</sub> supply subsystem.....	56
<b>8 Lagerung und Transport.....</b>	<b>61</b>	<b>8 Storage and transport.....</b>	<b>61</b>
8.1 Verflüssigung, Lagerung und Verdampfung.....	62	8.1 Liquefaction, storage, and vaporisation.....	62
8.2 Transport von CO <sub>2</sub> .....	63	8.2 Transport of CO <sub>2</sub> .....	63
<b>9 Regulativer Rahmen.....</b>	<b>64</b>	<b>9 Regulatory framework.....</b>	<b>64</b>
9.1 Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG).....	64	9.1 Federal Immission Control Act (BImSchG).....	64
9.2 Treibhausgas-Emissionshandelsgesetz (TEHG).....	67	9.2 Greenhouse Gas Emissions Trading Act (TEHG).....	67
9.3 Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG).....	67	9.3 Fuel Emissions Trading Act (BEHG).....	67
9.4 Erneuerbare-Energien-Richtlinie.....	67	9.4 Renewable Energies Directive.....	67
<b>10 Besonderheiten bei der Bewertung der Wirtschaftlichkeit der CO<sub>2</sub>-Bereitstellung.....</b>	<b>69</b>	<b>10 Special features in the assessment of the economic efficiency of CO<sub>2</sub> supply.....</b>	<b>69</b>
<b>Anhang</b> Typische Charakteristika von Gasen (Tabelle A1 bis Tabelle A3).....	<b>70</b>	<b>Annex</b> Typical characteristics of gases (Table A1 to Table A3).....	<b>72</b>
Schrifttum.....	74	Bibliography.....	74
Benennungsindex englisch-deutsch.....	79	Term index English-German.....	79

VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (GEU)  
Fachbereich Energie- und Umwelttechnik

VDI-Handbuch Energietechnik  
VDI-Handbuch Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, Band 5: Spezielle Verfahrenstechniken

## Vorbemerkung

Der Inhalt dieser Richtlinie ist entstanden unter Beachtung der Vorgaben und Empfehlungen der Richtlinie VDI 1000.

Alle Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, der Fotokopie, der elektronischen Verwendung und der Übersetzung, jeweils auszugsweise oder vollständig, sind vorbehalten.

Die Nutzung dieser Richtlinie ist unter Wahrung des Urheberrechts und unter Beachtung der Lizenzbedingungen ([www.vdi.de/richtlinien](http://www.vdi.de/richtlinien)), die in den VDI-Merkblättern geregelt sind, möglich.

Allen, die ehrenamtlich an der Erarbeitung dieser Richtlinie mitgewirkt haben, sei gedankt.

Eine Liste der aktuell verfügbaren und in Bearbeitung befindlichen Blätter dieser Richtlinienreihe sowie gegebenenfalls zusätzliche Informationen sind im Internet abrufbar unter [www.vdi.de/4635](http://www.vdi.de/4635).

## Einleitung

Der größte Teil der chemischen Produkte (z.B. Kunststoffe, Farben, Lösungsmittel, Arzneimittel usw.) sowie auch in Zukunft weiterhin benötigte Kraftstoffe (z.B. Kerosin, Dieselmotortreibstoff, Methan) enthalten Kohlenstoff. Der geplante Ersatz fossiler Rohstoffströme für Energie und Materialien erfordert daher zusätzliche Quellen für den Kohlenstoff. Neben z.B. Biomasse bietet sich als eine solche Quelle CO<sub>2</sub> an. Diese Richtlinie beschreibt den Stand der Technik für die Gewinnung von CO<sub>2</sub> aus Abluftströmen unterschiedlicher industrieller Prozesse sowie aus der Umgebungsluft. Hierbei werden diese sogenannten „CO<sub>2</sub>-Quellgase“ hinsichtlich ihres Potenzials zur CO<sub>2</sub>-Bereitstellung diskutiert. Verschiedene Abtrennungsverfahren werden vorgestellt und hinsichtlich ihres Anwendungsgebiets gegenübergestellt. Verfahren, deren Ziel die Herstellung von hauptsächlich Kohlenstoffmonoxid (CO) ist, z.B. Synthesegaserzeugung, werden nicht im Detail diskutiert. Der allergrößte Teil der CO<sub>2</sub>-Abtrennungsverfahren wurde jedoch entwickelt und dazu eingesetzt, um aus einem Produktstrom, der CO<sub>2</sub> als „Verunreinigung“ enthält, das CO<sub>2</sub> abzutrennen und zu entfernen. Insofern war das Interesse auf die Reinheit des CO<sub>2</sub>-freien Produktstroms gerichtet und nicht auf die Qualität des abgetrennten CO<sub>2</sub>. Daher werden in diesem Blatt zusätzlich Reinigungsverfahren für den CO<sub>2</sub>-Produktstrom vorgeschlagen. Anhand zweier Praxisbeispiele wird der spezifische Energiebedarf zur CO<sub>2</sub>-Bereitstellung vorgestellt. Zuletzt werden regulatorische Besonderheiten, wie ein beispielhaftes Verfahren zur Emissionsberechnung/-normierung im Rahmen des

## Preliminary note

The content of this standard has been developed in strict accordance with the requirements and recommendations of the standard VDI 1000.

All rights are reserved, including those of reprinting, reproduction (photocopying, micro copying), storage in data processing systems and translation, either of the full text or of extracts.

The use of this standard without infringement of copyright is permitted subject to the licensing conditions ([www.vdi.de/richtlinien](http://www.vdi.de/richtlinien)) specified in the VDI Notices.

We wish to express our gratitude to all honorary contributors to this standard.

A catalogue of all available parts of this series of standards and those in preparation as well as further information, if applicable, can be accessed on the Internet at [www.vdi.de/4635](http://www.vdi.de/4635).

## Introduction

The majority of chemical products (e.g., plastics, paints, solvents, pharmaceuticals, etc.) and fuels that will continue to be needed in the future (e.g., paraffin, diesel fuel, methane) contain carbon. The planned replacement of fossil raw material flows for energy and materials therefore requires additional sources of carbon. In addition to, e.g., biomass, CO<sub>2</sub> is one such source. This standard describes the state of the art for the extraction of CO<sub>2</sub> from exhaust air streams from various industrial processes and from ambient air. These so-called “CO<sub>2</sub> source gases” are discussed with regard to their potential for CO<sub>2</sub> supply. Various separation processes are presented and compared with regard to their field of application. Processes that primarily aim to produce carbon monoxide (CO), e.g., synthesis gas production, are not discussed in detail. However, the vast majority of CO<sub>2</sub> separation processes have been developed and used to separate and remove CO<sub>2</sub> from a product stream that contains CO<sub>2</sub> as an “impurity”. In this respect, the interest was focussed on the purity of the CO<sub>2</sub>-free product stream and not on the quality of the separated CO<sub>2</sub>. This Part therefore also proposes purification processes for the CO<sub>2</sub> product stream. The specific energy requirement for CO<sub>2</sub> supply is presented using two practical examples. Finally, special regulatory features, such as an exemplary procedure for calculating/standardising emissions within the framework of the Federal Immission Control Act and the application of the Fuel Emissions Trading Act and the Greenhouse Gas Emissions Trading Act, are discussed.

Bundes-Immissionsschutzgesetzes sowie der Anwendung des Brennstoffemissionshandelsgesetzes und des Treibhausgas-Emissionshandelsgesetzes, diskutiert.

## 1 Anwendungsbereich

Diese Richtlinie beschreibt den Stand der Technik bei der Gewinnung und Abtrennung von CO<sub>2</sub> aus anderen Stoffen in technisch-industriellen Anlagen. Außerdem wird der Stand der Technik bei der Speicherung und für den Transport von CO<sub>2</sub> beschrieben. Gewinnung, Abtrennung, Speicherung und Transport von CO<sub>2</sub> kann dabei folgenden Zwecken dienen:

- Erzeugung von CO<sub>2</sub> zur direkten Verwendung (z.B. als Inertgas)
- Erzeugung von CO<sub>2</sub> zum Einsatz in einer Synthese (Power-to-X-Verfahren, CCU – Carbon Capture and Utilization)
- Abtrennung von CO<sub>2</sub> aus einem Produktstrom, der in die Atmosphäre geleitet wird und nachfolgende unterirdische Einlagerung des CO<sub>2</sub> (CCS – Carbon Capture and Storage)
- Abtrennung des CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre mit dem Ziel, die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre zu reduzieren (DAC – Direct Air Capture) oder mit dem Ziel, CO<sub>2</sub> stofflich zu nutzen

Einige chemische Synthesen für kohlenstoffhaltige Produkte können nur mit CO und nicht mit CO<sub>2</sub> durchgeführt werden. Hierzu gehören z.B. die Fischer-Tropsch-Synthese und die Oxochemie. Technisch ist CO über die Reverse-Water-Gas-Shift-Reaktion aus CO<sub>2</sub> erhältlich. CO wird in dieser Richtlinie nur beschrieben, wenn es als Nebenprodukt zu CO<sub>2</sub> auftritt; die Erzeugung von reinem CO wird nicht behandelt.

Speicherung und Transport von CO<sub>2</sub> wird verwendet, um das CO<sub>2</sub> vom Ort der Gewinnung zum Ort der Verwendung zu transportieren und um unterschiedliche Massenströme im System auszugleichen und zu puffern.

## 1 Scope

This standard describes the state of the art in the extraction and separation of CO<sub>2</sub> from other substances in technical-industrial plants. It also describes the state of the art in the storage and transport of CO<sub>2</sub>. The extraction, separation, storage and transport of CO<sub>2</sub> can serve the following purposes:

- production of CO<sub>2</sub> for direct use (e.g., as inert gas)
- generation of CO<sub>2</sub> for use in a synthesis (power-to-X process, CCU – Carbon Capture and Utilization)
- separation of CO<sub>2</sub> from a product stream that is released into the atmosphere and subsequent underground storage of the CO<sub>2</sub> (CCS – Carbon Capture and Storage)
- separation of CO<sub>2</sub> from the atmosphere with the aim of reducing the CO<sub>2</sub> concentration in the atmosphere (DAC – Direct Air Capture) or with the aim of utilising CO<sub>2</sub> as a material

Some chemical syntheses for carbon-containing products can only be carried out with CO and not with CO<sub>2</sub>. These include, e.g., the Fischer-Tropsch synthesis and oxochemistry. Technically, CO can be obtained from CO<sub>2</sub> via the reverse water-gas shift reaction. CO is only described in this standard if it occurs as a by-product of CO<sub>2</sub>; the production of pure CO is not covered.

Storage and transport of CO<sub>2</sub> is used to transport the CO<sub>2</sub> from the point of extraction to the point of use and to equalise and buffer different mass flows in the system.