

Liebe Leserinnen und Leser,

wir freuen uns, dass Sie sich zum Kauf **unseres eBooks** entschieden haben.

An dieser Stelle möchten wir Sie darauf hinweisen, dass Sie mit dem Kauf eine **Einzellizenz** erworben haben. Die Weitergabe an Dritte ist somit **nicht gestattet**.

Ebenfalls nicht zulässig sind:

- Kopien / Ausdrucke auf Papier
- Digitalisierte Kopien
- Speicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen
- Ablegen im (firmeneigenen) Intranet
- andere für mehrere Personen zugängliche Datenbanken
- Versand per eMail

Die Möglichkeit, mehrere Personen zugreifen zu lassen, bieten bei Bedarf unsere **Mehrplatzlizenz-Lösungen**. Gerne beraten die Mitarbeiter unserer Verlage Sie bei Fragen zu unserer Mehrplatzlizenz-Plattform **[www.scifo.de](http://www.scifo.de)**.

Wir danken Ihnen für Ihr Verständnis und wünschen nun viel Freude mit Ihrem eBook.

Herausgeber:

Stefan-Alexander Arlt, Josef Hofmann, Korbinian Nachtmann

# LNG Liquefied Natural Gas – Baustein einer sicheren Energieversorgung



© AdobeStock, A44W

# **LNG Liquefied Natural Gas – Baustein einer sicheren Energieversorgung**

# Grundlagenwerk zur **MOBILITÄT**

**BUCH  
TIPP**

Herausgeber

Stefan-Alexander Arlt, Gerhard Huppmann,  
Andreas Meinelt, Korbinian Nachtmann

**gwfc** edition

## Antriebssysteme

Vergleichende Ökobilanzen verschiedener  
Antriebskonzepte für Fahrzeuge und stationäre  
Anwendungen



 **Vulkan Verlag**

### Themenschwerpunkte:

- Analyse von Treibhausgas-emissionen
- Vergleich der Ökobilanzen unterschiedlicher Antriebskonzepte
- Ganzheitlicher Blick auf zukünftige Erfordernisse der Mobilität

Hrsg.: Stefan-Alexander Arlt, Gerhard Huppmann,  
Andreas Meinelt, Korbinian Nachtmann

Angaben: 1. Auflage 2022 | Umfang: 456

Broschur: ISBN: 978-3-8356-7463-9 | Artikel-Nr.: 74639

eBook: ISBN: 978-3-8356-7464-6 | Artikel-Nr.: 74646

Preis: 89,00 €

Hier direkt bestellen:  
**[www.vulkan-shop.de](http://www.vulkan-shop.de)**

 **Vulkan Verlag**

Herausgeber:  
Stefan-Alexander Arlt, Josef Hofmann, Korbinian Nachtmann

# LNG Liquefied Natural Gas – Baustein einer sicheren Energieversorgung

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über **www.dnb.de** abrufbar.

LNG Liquefied Natural Gas – Baustein einer sicheren Energieversorgung

Herausgeber: Stefan-Alexander Arlt, Josef Hofmann, Korbinian Nachtmann

1. Auflage 2023

ISBN: 978-3-8356-7475-2 (Print)

ISBN: 978-3-8356-7476-9 (eBook)

© 2023 Vulkan-Verlag GmbH

Friedrich-Ebert-Straße 55, 45127 Essen, Deutschland

Tel.: +49 201 82002-0, Internet: [www.vulkan-verlag.de](http://www.vulkan-verlag.de)

Projektmanagement: Marie-Therese Hanschmann, Vulkan-Verlag GmbH, Essen

Lektorat: Marie-Therese Hanschmann, Vulkan-Verlag GmbH, Essen

Herstellung: Melanie Zöller, Vulkan-Verlag GmbH, Essen

Titelbild: © Adobe Stock, AA+W

Satz: e-Mediateam Michael Franke, Bottrop

Druck: mediaprint solutions GmbH, Paderborn

Das Werk einschließlich aller Abbildungen ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Bearbeitung in elektronischen Systemen. Der Erwerb berechtigt nicht zur Weitergabe des eBooks an Dritte.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Das vorliegende Werk wurde sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler keine Haftung.

## Vorwort

Die Energiemärkte befinden sich in einem tiefgreifenden Wandel. Der russische Angriffskrieg auf die Ukraine hat insbesondere das Geschäft mit Erdgas grundlegend und nachhaltig verändert. Das Ausbleiben vereinbarter Lieferungen und die Sabotage der Nord-Stream-Pipelines haben zu einem weitreichenden Umdenken im europäischen Raum geführt. Um kritische Abhängigkeiten von einzelnen Lieferländern künftig zu vermeiden, ist nun eine Diversifizierung der Bezugsquellen gefragt.

Anstatt auf Pipelines setzen viele Länder daher zunehmend auf den Import von Liquefied Natural Gas, kurz LNG. Heruntergeköhlt auf minus 161 °C wird das Volumen des Erdgases um das 600-Fache verringert. So kann es über die Weltmeere verschifft und gehandelt werden. Damit einher geht eine Öffnung der Märkte und eine stärkere Globalisierung des Gashandels, aber auch ein intensivierter Wettbewerb um das vorhandene Angebot. Tanker, Liefermengen sowie Verflüssigungskapazitäten sind begrenzt, gleichzeitig wächst der LNG-Markt um neue Abnehmer. Im Zuge dieser Neuordnung des internationalen Gasgeschäfts haben sich die USA und Katar binnen kürzester Zeit zu den weltweit größten Exporteuren für Flüssigerdgas entwickelt.

Die Notwendigkeit eigener LNG-Terminals für Deutschland als Antwort auf diesen veränderten Markt steht außer Frage: Die vorhandenen Terminalkapazitäten in Europa sind begrenzt, dazu hat Mitteleuropa nur sehr eingeschränkt Zugang zu den spanischen und italienischen Terminals. Das Wegbleiben des russischen Pipelinegases kann allein mit der bereits vorhandenen europäischen LNG-Infrastruktur nicht kompensiert werden, ohne dessen Resilienz massiv zu gefährden und wiederholt Versorgungsengpässe in Kauf zu nehmen. Nachdem entsprechende Pläne bereits seit Jahrzehnten vorlagen und in der Vergangenheit sowohl an bürokratischen Hürden als auch mangelnder Wirtschaftlichkeit gescheitert sind, ist Deutschland mit der Inbetriebnahme des ersten Terminals in Wilhelmshaven Ende 2022

endlich selbst zum LNG-Importeur geworden. Weitere Terminals sollen im Laufe des Jahrzehnts folgen, um unsere Energieunabhängigkeit zu stärken und unsere Versorgung zu sichern. Doch nicht nur das. Sie markieren auch den Beginn grüner Importe, schließlich kann dort bereits heute klimaneutrales Bio-LNG und synthetisches LNG angelandet werden. Künftig werden die Terminals als Green Energy Hubs für die Transformation unserer Energieinfrastruktur eine zentrale Rolle spielen, denn sie sollen spätestens ab 2043 auch Wasserstoff oder dessen Derivate importieren.

Wer also Antworten auf die Fragen der Zukunft der Energieversorgung sucht, kommt heute an LNG nicht vorbei. Hierzu stellt der vorliegende Band in umfassender Weise alle Facetten dieses faszinierenden Produktes vor. Ich wünsche Ihnen eine anregende Lektüre!

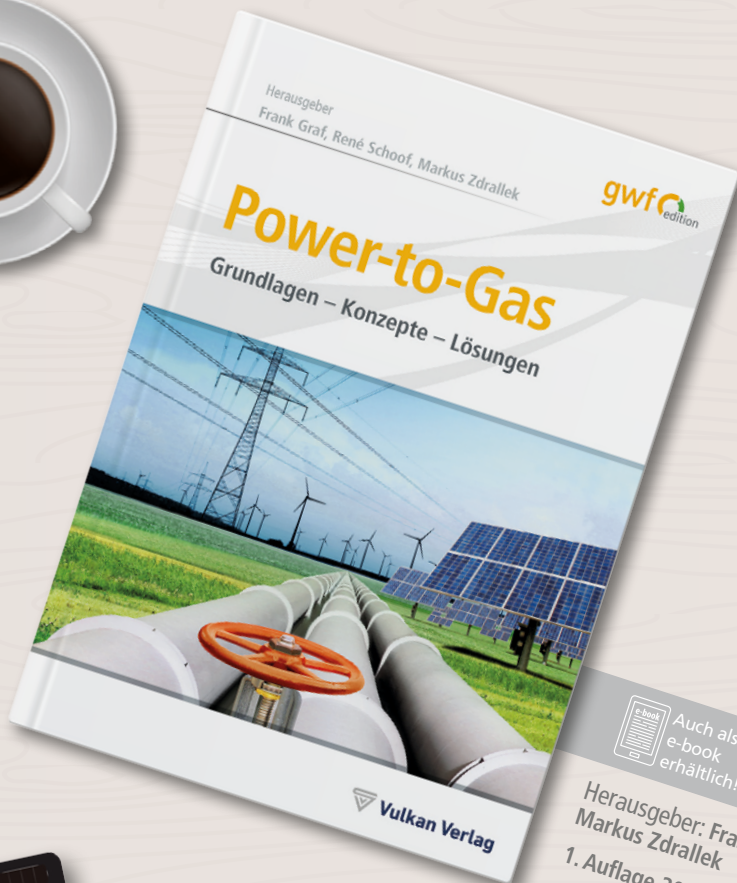


Dr. Timm Kehler  
Zukunft Gas e.V.

BUCH  
TIPP

# POWER-TO-GAS

## KONZEPTE UND LÖSUNGEN



Auch als  
e-book  
erhältlich!

Herausgeber: Frank Graf, René Schoof,  
Markus Zdrallek  
1. Auflage 2021 | 440 Seiten | 119,- €  
Artikelnummer: 74455 | eBook: 74462

### Ihr Mehrwert:

- Handbuch zur gesamten Wertschöpfungskette
- Konzepte, Elektrolyse, Methanisierung
- Integration von Wasserstoff in das Gasnetz

Hier direkt bestellen:  
[www.vulkan-shop.de](http://www.vulkan-shop.de)



# Inhaltsverzeichnis

|                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------|-----------|
| Vorwort .....                                               | 5         |
| <b>1 Einleitung .....</b>                                   | <b>14</b> |
| <b>2 LNG-Herstellung .....</b>                              | <b>17</b> |
| 2.1 Einführung .....                                        | 17        |
| 2.2 Daten und Fakten zu LNG .....                           | 19        |
| 2.2.1 Kenndaten des Ausgangsstoffes .....                   | 19        |
| 2.2.1.1 Erdgas .....                                        | 19        |
| 2.2.1.2 Vergleich von LNG, CNG, Erdgas und Methan .....     | 21        |
| 2.2.2 Menge und Herkunft von LNG .....                      | 22        |
| 2.2.2.1 LNG-Importländer .....                              | 23        |
| 2.2.2.2 LNG-Exportländer .....                              | 25        |
| 2.3 Aufbereitung und Verfahren der Erdgasförderung .....    | 26        |
| 2.3.1 Erdgasförderung .....                                 | 26        |
| 2.3.2 Erdgasaufbereitung .....                              | 29        |
| 2.4 Anlagen und Verfahren der Erdgas-Verflüssigung .....    | 31        |
| 2.4.1 Einsatz von LNG-Anlagen .....                         | 31        |
| 2.4.1.1 Peakshaving .....                                   | 31        |
| 2.4.1.2 Baseload .....                                      | 32        |
| 2.4.1.3 FLNG – Floating LNG .....                           | 32        |
| 2.4.1.4 Allgemeiner Aufbau einer Verflüssigungsanlage ..... | 33        |
| 2.4.2 LNG-Verflüssigungsverfahren .....                     | 33        |
| 2.4.2.1 Offene und geschlossene Zyklen .....                | 34        |
| 2.4.2.2 Kaskaden-Prozess .....                              | 34        |
| 2.4.2.3 Mixed-Refrigerant Cycles Prozess .....              | 37        |
| 2.4.2.4 Stickstoff-Expansionsverfahren .....                | 37        |
| 2.4.2.5 Linde-Verfahren .....                               | 39        |
| 2.4.2.6 Shell-Verfahren .....                               | 40        |
| 2.4.2.7 Claude-Heylandt-Verfahren .....                     | 42        |
| 2.4.3 Energiebilanz .....                                   | 43        |
| 2.4.4 Kostenvergleiche .....                                | 44        |
| 2.5 Umweltauswirkungen .....                                | 45        |
| 2.5.1 Förderung von Erdgas .....                            | 45        |
| 2.5.2 Aufbereitung von Erdgas .....                         | 47        |
| 2.5.3 Herstellung von LNG .....                             | 48        |
| 2.5.4 Transport von LNG .....                               | 48        |
| 2.6 Fazit .....                                             | 49        |

|          |                                                   |           |
|----------|---------------------------------------------------|-----------|
| <b>3</b> | <b>LBM-Herstellung</b>                            | <b>51</b> |
| 3.1      | Einleitung LBM-Herstellung                        | 51        |
| 3.2      | Biogene Gase                                      | 51        |
| 3.2.1    | Definition und Herkunft                           | 51        |
| 3.2.1.1  | Biogas                                            | 53        |
| 3.2.1.2  | Klärgas                                           | 55        |
| 3.2.1.3  | Deponiegas                                        | 57        |
| 3.2.2    | Kenndaten der Ausgangsstoffe                      | 58        |
| 3.2.2.1  | Biogas                                            | 58        |
| 3.2.2.2  | Klärgas                                           | 59        |
| 3.2.2.3  | Deponiegas                                        | 59        |
| 3.3      | Gewinnung                                         | 60        |
| 3.3.1    | Technologien zur Gasreinigung                     | 60        |
| 3.3.1.1  | Entschwefelung                                    | 61        |
| 3.3.1.2  | Wasserabscheidung                                 | 62        |
| 3.3.1.3  | Abscheidung weiterer Bestandteile                 | 62        |
| 3.3.2    | Technologien zur Gasaufbereitung                  | 63        |
| 3.3.2.1  | Adsorptions-Verfahren                             | 64        |
| 3.3.2.2  | Absorptions-Verfahren                             | 65        |
| 3.3.2.3  | Membran-Technologie                               | 66        |
| 3.3.2.4  | Vergleich der Biogasaufbereitungsverfahren        | 68        |
| 3.3.3    | Technologien zur Gasverflüssigung                 | 69        |
| 3.3.3.1  | Standard-Verflüssigungsverfahren                  | 69        |
| 3.3.3.2  | Kryotechnische Verfahren                          | 71        |
| 3.3.4    | Energiebilanz/-bedarf                             | 71        |
| 3.3.5    | Anlagenbeispiele                                  | 71        |
| 3.4      | Umweltauswirkungen                                | 74        |
| 3.4.1    | Gasbereitstellung                                 | 74        |
| 3.4.2    | Reinigung und Verflüssigung                       | 76        |
| 3.5      | Fazit                                             | 76        |
| <b>4</b> | <b>LNG-Distribution</b>                           | <b>77</b> |
| 4.1      | Einleitung                                        | 77        |
| 4.2      | Speicherung                                       | 77        |
| 4.2.1    | Technische Voraussetzungen für die Speicherung    | 77        |
| 4.2.1.1  | Voraussetzungen für die Flüssighaltung von LNG    | 77        |
| 4.2.1.2  | Boil-Off-Gas                                      | 78        |
| 4.2.1.3  | Anforderungen an die Tankbauteile und -werkstoffe | 79        |
| 4.2.2    | Tankbauarten und -systeme                         | 82        |
| 4.2.2.1  | Kugeltanks                                        | 83        |
| 4.2.2.2  | Membrantanks                                      | 84        |
| 4.2.2.3  | Doppelbehälter tanks                              | 87        |
| 4.2.2.4  | Flachbodentanks                                   | 87        |

|          |                                                                         |            |
|----------|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.2.2.5  | Satellitenanlagen .....                                                 | 88         |
| 4.2.3    | Mobile Tanksysteme .....                                                | 89         |
| 4.2.3.1  | Transport-Tanksysteme .....                                             | 89         |
| 4.2.3.2  | Antriebs-Tanksysteme .....                                              | 91         |
| 4.3      | Transfer/Handling .....                                                 | 91         |
| 4.3.1    | Speicher-Speicher-Betankung .....                                       | 91         |
| 4.3.2    | Speicher-Verbraucher-Betankung .....                                    | 93         |
| 4.4      | Sicherheit .....                                                        | 95         |
| 4.4.1    | Gefahren beim Transport .....                                           | 95         |
| 4.4.2    | Gefahrenabwehr beim Transport .....                                     | 97         |
| 4.4.3    | Gefahren beim Tanken .....                                              | 97         |
| 4.4.4    | Gefahrenabwehr beim Tanken .....                                        | 98         |
| 4.4.5    | Maßnahmen für Bedienpersonal und Einsatzkräfte .....                    | 99         |
| 4.4.6    | Normen .....                                                            | 101        |
| 4.5      | LNG-Blue-Corridors-Projekt .....                                        | 101        |
| 4.6      | Fazit .....                                                             | 104        |
| <b>5</b> | <b>LNG-Verwertung .....</b>                                             | <b>105</b> |
| 5.1      | Einführung .....                                                        | 105        |
| 5.2      | Einsatz von LNG im mobilen Sektor .....                                 | 105        |
| 5.2.1    | Schiffsverkehr .....                                                    | 106        |
| 5.2.2    | Straßenverkehr .....                                                    | 107        |
| 5.2.3    | Reduzierung von Emissionen durch LNG-Einsatz .....                      | 111        |
| 5.3      | Kostenvergleich mit anderen Energieträgern .....                        | 113        |
| 5.3.1    | Vergleich zu Schweröl im Schiffverkehr .....                            | 113        |
| 5.4      | Sicherheitsaspekte bei der LNG-Verwertung und Wiederverflüssigung ..... | 115        |
| 5.4.1    | Betankung von Lkw .....                                                 | 116        |
| 5.4.2    | Sicherheit bei der Motorentechnik und Methanschluß .....                | 116        |
| 5.4.3    | Unterweisungen von Fahrzeugnutzern .....                                | 117        |
| 5.5      | Fazit .....                                                             | 117        |
| <b>6</b> | <b>Gashandel und -beschaffung in Deutschland .....</b>                  | <b>119</b> |
| 6.1      | Regulatorische Rahmenbedingungen .....                                  | 120        |
| 6.2      | Marktteilnehmer im Gashandel .....                                      | 123        |
| 6.2.1    | Fördererunternehmen .....                                               | 124        |
| 6.2.2    | Großhandel .....                                                        | 125        |
| 6.2.2.1  | Importeure .....                                                        | 126        |
| 6.2.2.2  | Großhändler .....                                                       | 127        |
| 6.2.2.3  | Exporteure .....                                                        | 129        |
| 6.2.3    | Weiterverteiler .....                                                   | 130        |
| 6.2.4    | Speicherbetreiber .....                                                 | 131        |
| 6.2.5    | Broker .....                                                            | 132        |
| 6.2.6    | Großabnehmer .....                                                      | 133        |

|          |                                                        |            |
|----------|--------------------------------------------------------|------------|
| 6.3      | Handelsprodukte und -plätze .....                      | 135        |
| 6.3.1    | Handelsprodukte .....                                  | 135        |
| 6.3.1.1  | Physischer Gashandel .....                             | 136        |
| 6.3.1.2  | Finanzieller Handel .....                              | 137        |
| 6.3.1.3  | Preissicherungsinstrumente .....                       | 139        |
| 6.3.2    | Handelsplätze .....                                    | 140        |
| 6.3.2.1  | Die Energiebörse EEX .....                             | 141        |
| 6.3.2.2  | Hubs .....                                             | 143        |
| 6.3.2.3  | Elektronische Handelsplätze .....                      | 144        |
| 6.4      | Gaspreise .....                                        | 145        |
| 6.4.1    | Preiskomponenten .....                                 | 146        |
| 6.4.2    | Preisentwicklung .....                                 | 146        |
| 6.5      | Handelshemmnisse .....                                 | 149        |
| 6.5.1    | Marktstruktur .....                                    | 149        |
| 6.5.2    | Langfristige Vertragsbindungen .....                   | 150        |
| 6.5.3    | Marktliquidität .....                                  | 151        |
| 6.5.4    | Lieferabhängigkeiten .....                             | 152        |
| 6.6      | Portfoliomanagement in der Gasbeschaffung .....        | 152        |
| 6.6.1    | Portfoliomanagementstrategie .....                     | 153        |
| 6.6.2    | Portfoliooptimierung .....                             | 153        |
| 6.6.3    | Risikomanagementstrategie im Portfoliomanagement ..... | 154        |
| 6.7      | Handelssysteme .....                                   | 156        |
| 6.7.1    | Anforderungen an ein Handelssystem .....               | 156        |
| 6.7.2    | Darstellung ausgewählter Handelssysteme .....          | 157        |
| 6.7.2.1  | AKTIF®dataService .....                                | 157        |
| 6.7.2.2  | eRISK Gas .....                                        | 157        |
| 6.7.2.3  | DeltaXE .....                                          | 158        |
| 6.8      | Zusammenfassung .....                                  | 158        |
| <b>7</b> | <b>Technologie und Kosten der LNG-Produktion .....</b> | <b>161</b> |
| 7.1      | Energiemarkt .....                                     | 161        |
| 7.1.1    | Energieverbrauch .....                                 | 161        |
| 7.1.2    | Der Erdgas- und LNG-Markt .....                        | 162        |
| 7.1.3    | Export und Import von LNG .....                        | 164        |
| 7.2      | LNG-Wertschöpfungskette .....                          | 167        |
| 7.2.1    | LNG – Liquefied Natural Gas .....                      | 167        |
| 7.2.2    | Wertschöpfungskette .....                              | 168        |
| 7.3      | Gasförderung .....                                     | 168        |
| 7.3.1    | Onshore .....                                          | 168        |
| 7.3.1.1  | Konventionelle Gasförderung .....                      | 169        |
| 7.3.1.2  | Unkonventionelle Gasförderung .....                    | 170        |
| 7.3.2    | Offshore .....                                         | 172        |
| 7.3.3    | Floating Liquefied Natural Gas .....                   | 176        |

|          |                                                                         |            |
|----------|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| 7.4      | Aufbereitung und Verflüssigung .....                                    | 178        |
| 7.4.1    | Verfahren zur Verflüssigung .....                                       | 179        |
| 7.4.1.1  | Klassischer Kaskadenprozess .....                                       | 180        |
| 7.4.1.2  | APC-C3MR-Prozess .....                                                  | 180        |
| 7.4.1.3  | AP-X-Prozess .....                                                      | 181        |
| 7.4.1.4  | Shell Double Mixed Refrigerant Cycle (Sakhalin) .....                   | 181        |
| 7.4.1.5  | ConocoPhillips Optimized Cascade .....                                  | 182        |
| 7.4.1.6  | Linde-Statoil Mixed Fluid Cascade (MFC) – Process (Snøvit) .....        | 184        |
| 7.5      | Lagerung und LNG-Tanksysteme .....                                      | 184        |
| 7.5.1    | Tanksysteme .....                                                       | 185        |
| 7.5.1.1  | Single-Containment-Tank-System .....                                    | 185        |
| 7.5.1.2  | Double-Containment-Tank-System .....                                    | 185        |
| 7.5.1.3  | Full-Containment-Tank-System .....                                      | 187        |
| 7.5.1.4  | Membran-Tank-System .....                                               | 188        |
| 7.5.1.5  | In-Ground-Tank und Underground-Tank .....                               | 189        |
| 7.5.2    | Speicherkapazitäten .....                                               | 191        |
| 7.6      | LNG-Transport .....                                                     | 191        |
| 7.6.1    | Transportmittel .....                                                   | 191        |
| 7.6.1.1  | Schiff .....                                                            | 191        |
| 7.6.1.2  | Truck .....                                                             | 193        |
| 7.6.2    | Boil-off-Gas .....                                                      | 193        |
| 7.7      | Regasifizierung und Einspeisung in Gasnetze .....                       | 193        |
| 7.7.1    | Onshore-Regasifizierung .....                                           | 194        |
| 7.7.2    | Offshore-Regasifizierung (FSRU) .....                                   | 196        |
| 7.8      | Kostenstruktur .....                                                    | 197        |
| 7.8.1    | Komponenten in der LNG-Versorgungskette .....                           | 197        |
| 7.8.2    | Vergleich der Transportkosten: Pipelinesysteme vs. LNG-Lieferkette ..   | 200        |
| 7.9      | Zusammenfassung .....                                                   | 202        |
| <b>8</b> | <b>Perspektiven von LNG im internationalen Gashandelsgeschäft .....</b> | <b>205</b> |
| 8.1      | Einleitung .....                                                        | 205        |
| 8.2      | Einfluss auf die Marktstruktur .....                                    | 205        |
| 8.2.1    | Neue Marktteilnehmer .....                                              | 205        |
| 8.2.2    | Integration regionaler Märkte .....                                     | 206        |
| 8.2.3    | Entwicklung der Marktliquidität .....                                   | 206        |
| 8.2.4    | Entwicklung der Leitungsgebundenheit .....                              | 208        |
| 8.2.5    | Wirkung auf bestehende Handelshemmnisse .....                           | 209        |
| 8.3      | Einfluss auf die Gasbeschaffung .....                                   | 210        |
| 8.3.1    | Wirkung auf langfristige Beschaffungsverträge .....                     | 210        |
| 8.3.2    | Diversifizierung der Gaslieferung .....                                 | 211        |
| 8.4      | Preise für LNG .....                                                    | 212        |
| 8.4.1    | Preiskomponenten .....                                                  | 212        |
| 8.4.2    | Preisentwicklung nach Regionen .....                                    | 213        |
| 8.4.3    | Entwicklung des Handelsvolumens .....                                   | 214        |

|          |                                                        |            |
|----------|--------------------------------------------------------|------------|
| 8.4.4    | Entstehung eines globalen Preisniveaus durch LNG ..... | 215        |
| 8.5      | LNG als Treibstoff .....                               | 216        |
| 8.5.1    | LNG als Treibstoff für Kraftfahrzeuge .....            | 216        |
| 8.5.2    | LNG als Treibstoff für Schiffe .....                   | 218        |
| 8.5.3    | LNG als Treibstoff für Flugzeuge .....                 | 219        |
| 8.6      | Neue Geschäftsfelder für Anlagenbauer .....            | 219        |
| 8.7      | Investitionshemmnisse .....                            | 220        |
| 8.8      | Fazit .....                                            | 221        |
| <b>9</b> | <b>Literatur</b> .....                                 | <b>223</b> |
|          | Autorenverzeichnis .....                               | 251        |

BUCH  
TIPP

# FACHKOMPENDIUM FÜR DAS GASFACH



gwf 

Herausgeber:  
Jörg Leicher, Anne Giese, Harald Petermann

## Gasqualitäten im veränderten Energiemarkt

Herausforderungen und Chancen für die häusliche,  
gewerbliche und industrielle Anwendung  
2. Auflage

 Vulkan Verlag

 Auch als  
e-book  
erhältlich!

Herausgeber: Jörg Leicher, Anne Giese,  
Harald Petermann  
2. Auflage 2021 | 616 Seiten | 80,- €  
Artikelnummer: 74431 | eBook: 74448

### Ihr Mehrwert:

- Überblick über Neuerungen am Energiemarkt
- Relevant für Anwender und Versorger
- Für Ingenieure, Techniker und Studierende

Hier direkt bestellen:  
[www.vulkan-shop.de](http://www.vulkan-shop.de)



# 1 Einleitung

In der Diskussion um alternative Energie- und Versorgungsstrategien wird spätestens seit dem Einfall von Russland in die Ukraine im Frühjahr 2022 auch Liquefied Natural Gas (LNG) als langfristige Alternative zu Pipelinegas gehandelt. Konkrete Erfahrungen damit liegen in Deutschland nur begrenzt vor. Dies wird sich nach der Fertigstellung des ersten bundesweiten Anlegers für flüssiges Erdgas rasch ändern. Dieser wurde nach nur knapp 200 Tagen Bauzeit am 15. November 2022 fertiggestellt und hat Mitte Januar 2023 den Regelbetrieb aufgenommen. Im Vergleich zum weltweiten Gashandel mit einem LNG-Anteil von über 30 % liegt der LNG-Anteil in Europa nur in etwa halb so hoch. In Spanien, Frankreich, Italien und Großbritannien wird LNG zumindest seit einiger Zeit in der Industrie und zur Pipeline-Einspeisung verwendet. Mit LNG eröffnen sich vielfältige neue Perspektiven, und zwar sowohl hinsichtlich einer Erweiterung von Transportmöglichkeiten von Erdgas als auch in Bezug auf den Einsatz als Energieträger wie beispielsweise zur Verwendung als Heizmittel oder Treibstoff. Im Energietransportsystem ist LNG unabhängig von Pipelines und leistet somit einen Beitrag zur Diversifizierung der Bezugsquellen und damit zur Vermeidung einseitiger Abhängigkeiten. Neue, bisher örtlich unzugängliche Bezugsquellen werden erschlossen. Somit lässt sich die Flexibilität bei sich verändernden Rahmenbedingungen für Unternehmen bei der Energieversorgung erhöhen. Gerade für die Verwendung als Treibstoff im Schwerlastverkehr fehlen aber in ganz Europa Versorgungsmöglichkeiten für Industrie und Gewerbe. Auch die Infrastruktur befindet sich noch in einer Entwicklungsphase. Dabei könnten Speditionen und der Schiffsverkehr enorm von dem emissionsarmen LNG profitieren. Die erste großtechnische Anlage für die Gewinnung von LNG aus Biogas ist in Deutschland im Jahr 2022 in Betrieb gegangen. Zudem reduzieren sich die Erdölabhängigkeit und insbesondere auch der Ausstoß an CO<sub>2</sub>. Insgesamt lassen sich durch den verstärkten Einsatz von LNG die Ziele der Bundesregierung zur Reduktion von CO<sub>2</sub> leichter erreichen.



Prof. Stefan-Alexander Arlt

Dieses Buch soll Verantwortlichen und Interessierten, insbesondere in Industrie- und Energieversorgungsunternehmen, Energiehändlern und Technologieherstellern sowie Gasvertriebsgesellschaften und Beratern, eine Art Nachschlagewerk über LNG entlang der gesamten Wertschöpfungskette an die Hand geben.

Dazu wurden große internationale Studien, wie beispielsweise von British Petroleum und von der U.S. Energy Information Administration (EIA), ebenso eingearbeitet wie internationale kleinere Studien von Unternehmen und Behörden sowie diverse internationale Unternehmens- und Verbandsstrategiepapiere, jeweils u. a. aus China, Russland und Australien.

Besonders hervorzuheben ist, dass in unserem Autoren- und Rechercheteam viele Muttersprachler die Daten erfasst, ausgewertet und die Auswahl getroffen haben.

Als Ergebnis lässt sich feststellen, dass, entgegen der derzeit vorherrschenden Auffassung, Erdgas als fossiler Energieträger eine CO<sub>2</sub>-reduzierende alternative Energiequelle für den Verkehrssektor darstellt und dass aufgrund seiner Vielseitigkeit LNG den Gasmarkt weiter globalisieren und den Transport von Erdgas flexibilisieren wird. Gasquellen werden zunehmend zugänglich sein.

Damit auch Europa von dieser Entwicklung profitieren kann, muss jedoch die Infrastruktur in allen Bereichen der Versorgungskette aufgebaut und standardisiert werden. Die Technologien sind bereits verfügbar, jedoch sind noch viele Aktivitäten im Bereich Forschung und Entwicklung umzusetzen, um die noch offenen Fragen klären zu können. Als Beispiel kann der enorme Kostenanstieg der beiden ersten Deutschen LNG-Terminals in Wilhelmshaven und Brunsbüttel angeführt werden. Die ursprünglich geplanten Baukosten von knapp 3 Mrd. € haben sich bereits vor Inbetriebnahme auf ca. 6,5 Mrd. € mehr als verdoppelt. Die Umsetzung der Energiewende sowie zukünftiger Emissionskontrollvorschriften machen LNG zu einem zunehmend attraktiver werdenden Energieträger. Die Verwendung von LNG kann eine wichtige Brückentechnologie für die zukünftige Nutzung der Elektromobilität oder zur Anwendung von Wasserstoff darstellen.



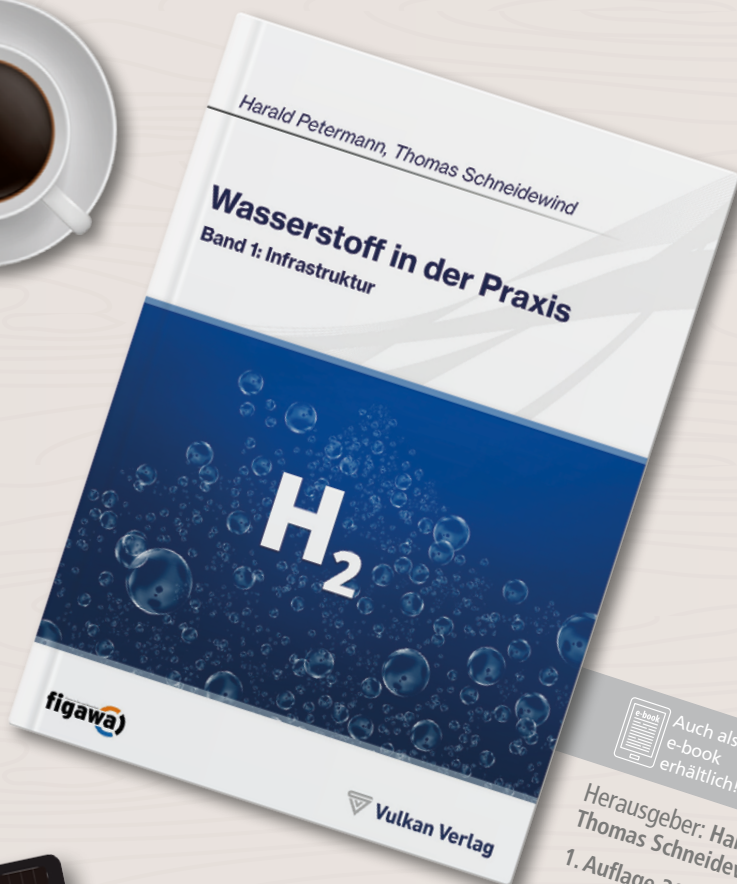
**Prof. Josef Hofmann**



**Korbinian Nachtmann**

BUCH  
TIPP

# Expertenwissen zum Thema Infrastruktur



Auch als  
e-book  
erhältlich!

Herausgeber: Harald Petermann,  
Thomas Schneidewind  
1. Auflage 2021 | 120 Seiten | 39,- €  
Artikelnummer: 74592 | eBook: 74608

## Ihr Mehrwert:

- Herausforderungen für Gasinfrastruktur und Leitungsbau
- Werkstoffe, Komponenten, Betriebserfahrungen
- Hoher Praxisbezug

Hier direkt bestellen:  
[www.vulkan-shop.de](http://www.vulkan-shop.de)

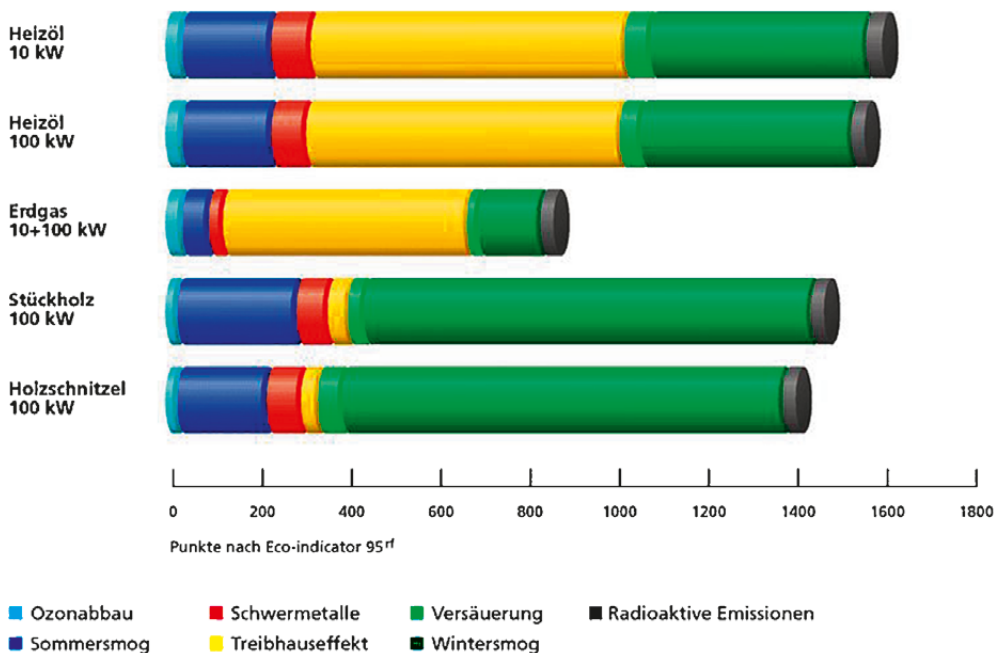


## 2 LNG-Herstellung

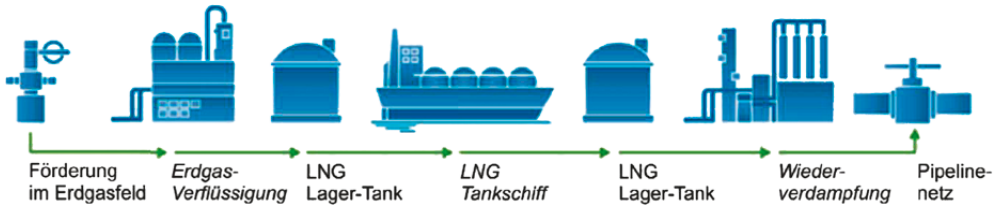
### 2.1 Einführung

Rund ein Drittel der weltweit benötigten Energiemengen werden durch Erdgas gedeckt. Dieser Brennstoff emittiert bei seiner thermischen Nutzung, im Vergleich mit allen anderen fossilen Energieträgern, die mit Abstand geringsten Schadstoffmengen. Wie aus **Bild 2.1** ersichtlich, ist die Klimaschädlichkeit von Erdgas, gegenüber z. B. Heizöl, wesentlich geringer. Besonders die Erzeugung von Wintersmog ist bei Erdgas wesentlich niedriger als bei anderen Brennstoffen [2.52].

Ein Problem stellt jedoch die Versorgung der Verbraucher mit Erdgas dar. Viele Erdgasförderstätten liegen weit entfernt vom Verbrauchsort. Da eine Pipelineanbindung nur bei Entfernungen bis zu maximal 5.000 km [2.1] wirtschaftlich sinnvoll ist, wird Erdgas als Nebenprodukt der Erdölförderung oftmals abgefackelt. Um den Einsatz des Erdgases über diese Entfernung hinaus zu ermöglichen, ist es nötig, eine andere Transportmöglichkeit zu nutzen. Dies geschieht weltweit durch die Verwendung von Flüssigerdgas (LNG, Liquefied Natural Gas). LNG entsteht durch die Abkühlung und Kondensation von Erdgas bei  $-162\text{ °C}$  und reduziert dabei sein Volumen auf ein Sechshundertstel. Im flüssigen Aggregatzustand lässt es sich effizient per



**Bild 2.1:** Klimaschädlichkeit verschiedener Energieträger [2.52]

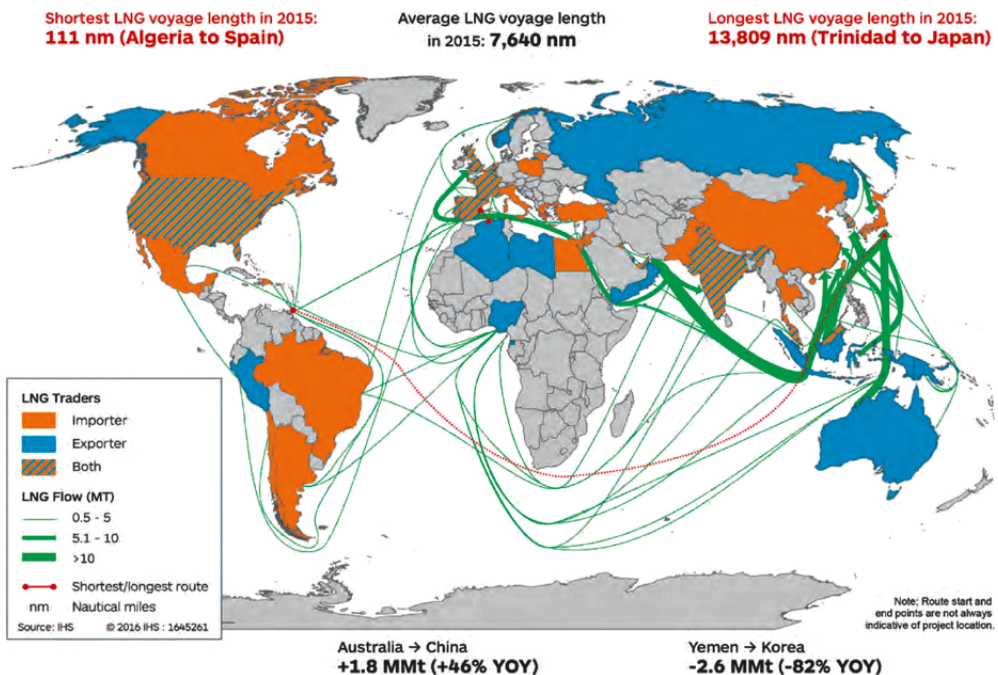


**Bild 2.2:** Schematische Darstellung der Wertschöpfungskette von LNG [2.1]

Lkw, Schiff und Zugverkehr zum jeweiligen Bestimmungsort transportieren oder in kryogenen Tanks einlagern (vgl. **Bild 2.2**).

Eine ähnliche Form der Energiespeicherung stellt die Verflüssigung von biogenen Gasen aus Biogasanlagen, Deponien und Kläranlagen dar. Das flüssige Methan aus diesen Quellen wird als LBM (Liquefied Bio Methane) oder auch als LBG (Liquefied Bio Gas) bezeichnet.

Ziel dieses Kapitels ist es, die technischen Aspekte der Herstellung, Verwendung und des Transports von flüssigem Biomethan und flüssigem Erdgas aufzuzeigen.



**Bild 2.3:** LNG Schiffshandel 2015 (2016 World LNG Report. IGU, Fornebu 2016, S.39)

Erdgas ist einer der weltweit wichtigsten Energieträger. Zudem setzt Erdgas, während der energetischen Verwertung, die potenziell geringste Luftverschmutzung frei. Der heutige Weltenergiebedarf wird zu etwa 25 % mit Erdgas gedeckt. Das Erdgas wird vorwiegend via Pipelines transportiert, was rund 72 % des im Handel befindlichen Erdgases entspricht [2.1].

Allerdings spielt Flüssigerdgas (LNG – Liquefied Natural Gas) seit ca. 50 Jahren eine immer wichtigere Rolle bei der globalen Gasversorgung [2.53].

Etwa 28 % des weltweit gehandelten Erdgases werden in Form von LNG transportiert. In **Bild 2.3** werden die wichtigsten Transportwege für LNG dargestellt. LNG hat in vielen Ländern an Bedeutung gewonnen, da es viele Vorteile aufweist. Einer dieser Vorteile ist die flexible Transportmöglichkeit, da es effizient und ohne eine feste Pipeline-Infrastruktur transportiert werden kann. Ein weiterer Vorteil ergibt sich durch den Einsatz modernster Technik, welche es ermöglicht, viele Personenschiffe und Frachter auf LNG-Betankung umzurüsten, wodurch die Emissionen in der Schifffahrt deutlich verringert werden könnten.

Im folgenden Abschnitt werden die Themen Herkunft von LNG, Kenndaten von Erdgas, technische Herstellungsverfahren, Energiebedarf und die aus dem Herstellungsprozess folgenden Umweltauswirkungen genauer betrachtet.

## 2.2 Daten und Fakten zu LNG

Hier werden die Kenndaten des Ausgangsstoffes vorgestellt. Des Weiteren werden LNG, CNG, Erdgas und Methan miteinander verglichen. Zudem stehen nachfolgend die verschiedenen Import- und Exportländer im Fokus dieses Abschnitts.

### 2.2.1 Kenndaten des Ausgangsstoffes

Um LNG herstellen zu können, wird Erdgas als Ausgangsstoff benötigt. Nachfolgend werden die Entstehung und die Eigenschaften dieses fossilen Brennstoffs untersucht.

#### 2.2.1.1 Erdgas

Erdgas entstand vor mehreren Millionen Jahren, als Plankton und Algen auf den Meeresboden sanken und dort unter Abwesenheit von Sauerstoff zu Faulschlamm umgesetzt wurden. Unter einer Schicht aus feinkörnigem Schutt (Ton, Kalk, Sand) bildete sich aus dem Faulschlamm, unter hohen Temperaturen und Druck das Bitumen heraus. Durch den weiteren Anstieg von Temperatur und Druck entwickelten sich flüssige und gasförmige Kohlenwasserstoffe. Dabei entstanden Erdöl und Erdgas [2.4].

Eine weitere Entstehungsquelle des Erdgases ist die Bildung aus höheren Pflanzen. Hierbei bildet sich kein Bitumen, sondern es entstehen nacheinander Torf, Braunkohle, Steinkohle und Anthrazit. Dieser Entstehungsprozess wird auch als Inkohlung bezeichnet. Während dieses Prozesses spalten sich gasförmige Reaktionsprodukte ab. Das so entstandene Erdgas wird vor allem in den Niederlanden und in der südlichen Nordsee gefördert [2.4]. Nähere Informationen zur Erdgasförderung folgen in Abschnitt 2.1.3.2 Erdgasförderung [2.4].

Basierend auf verschiedensten Schätzungen können die derzeit erschließbaren Erdgasvorkommen den Bedarf noch für etwa 63 Jahre decken. Werden auch schwer zugängliche Vorkommen berücksichtigt, ergeben sich Erdgasreserven für ca. 130 Jahre [2.4].

Die Zusammensetzung von Erdgas ist je nach Förderungsort unterschiedlich. Grundsätzlich wird zwischen L- und H-Erdgas unterschieden.

H-Erdgas (High Caloric Gas) muss gemäß Definition mindestens 87 % Methan enthalten und hat daher auch einen höheren Heizwert (45 MJ/kg) [2.5] als L-Gas (Heizwert 32 MJ/kg), welches einen Methangehalt von 80–87 % Methan aufweist [2.6].

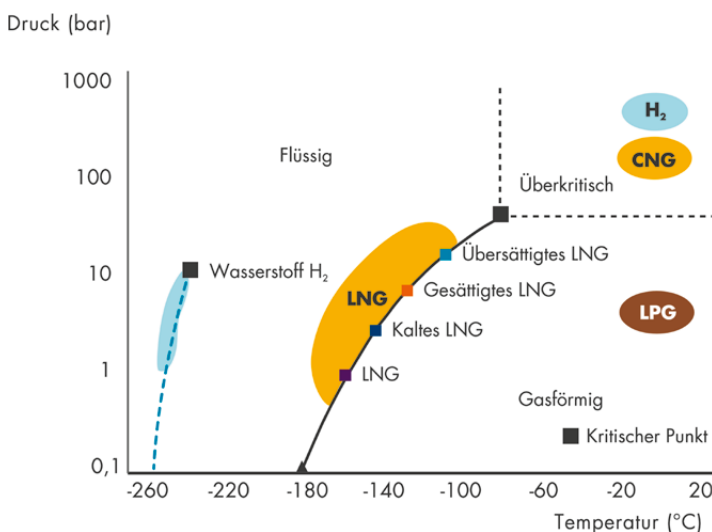
Low Caloric Gas (L-Erdgas) enthält außerdem 4 % höhere Kohlenwasserstoffe (Ethan, Propan, Butan, Pentan) und 11 % Inertgase (Sauerstoff, Stickstoff, Edelgase) [2.7].

H-Erdgas aus der Nordsee besitzt einen Methangehalt von 89 % sowie 8 % höhere Kohlenwasserstoffe und 3 % Inertgase.

Erdgas, welches in den GUS-Staaten [2.8] gefördert wird, weist einen Methananteil von 98 %, 1 % höhere Kohlenwasserstoffe und 1 % Inertgas auf [2.6].

Erdgas, das noch keiner Reinigung oder Aufbereitung unterzogen wurde, wird als „nasses Erdgas“ bezeichnet und kann noch erhebliche Mengen an Wasserdampf, Helium, Schwefelverbindungen und andere Verunreinigungen enthalten. Da Schwefelverbindungen bei der Verbrennung zu klimawirksamen Gasen reagieren, müssen diese vor der Weiterverarbeitung abgeschieden werden.

Als besonders wertvoll gilt Erdgas, welches eine größere Menge an Helium (9–11 %) enthält. In diesem Fall wird das Erdgas zur Heliumgewinnung genutzt [2.5].



**Bild 2.4:** Zusammenhang von Druck und Temperatur bei Methan [2.9]

Es gibt verschiedene Möglichkeiten und Technologien, um das Erdgas zu transportieren:

- Gasförmiger Zustand in Pipelines
- Gasförmiger Zustand unter hohem Druck als CNG (Compressed Natural Gas) in Tanks
- Flüssiger Zustand unter Normaldruck als LNG (Liquefied Natural Gas) in Tanks.

In flüssiger Form kann Erdgas in speziellen Tanks auf dem See- oder Landweg flexibel transportiert werden (vgl. Kap. 4 „LNG-Distribution“).

Zur Verflüssigung von Erdgas werden sehr niedrige Temperaturen ( $-162\text{ °C}$ ) sowie sehr hohe Drücke (207 bar) benötigt. Je höher der Druck wird, desto geringer kann die Temperatur von Erdgas gewählt werden, um es im flüssigen Zustand halten zu können. Der Zusammenhang von Druck und Temperatur wird nochmals in **Bild 2.4** verdeutlicht. Sofern LNG bei Umgebungsdruck von ca. 1 bar verflüssigt wird, darf hierbei eine Temperatur von  $-161\text{ °C}$  nicht überschritten werden [2.9].

Ein aus umwelttechnischer Sicht entscheidender Vorteil des Erdgases gegenüber anderen fossilen Brennstoffen ist darin begründet, dass bei der Verbrennung nur geringe Schadstoffemissionen entstehen. Wird beispielsweise Erdgas anstelle von Heizöl eingesetzt, verringert sich der  $\text{CO}_2$ -Ausstoß um 25 % und die  $\text{NO}_x$ -Emissionen sogar um bis zu 74 % [2.4].

#### 2.2.1.2 Vergleich von LNG, CNG, Erdgas und Methan

In **Tabelle 2.1** werden verschiedene, auf Methan basierende, Energieträger hinsichtlich ihrer Eigenschaften miteinander verglichen:

- Methan unter Normaldruck (1.013 hPa) und Umgebungstemperatur ( $20\text{ °C}$ )
- Erdgas unter Normaldruck und Umgebungstemperatur
- LNG unter Normaldruck und bei  $-162\text{ °C}$
- CNG (Compressed Natural Gas, komprimiertes Erdgas) unter Umgebungstemperatur und ca. 207 bar (3.000 psi) [2.10].

**Tabelle 2.1:** Vergleich verschiedener Eigenschaften Methan basierter Energieträger

|                     | Methan           | Erdgas                 | LNG                       | CNG                |
|---------------------|------------------|------------------------|---------------------------|--------------------|
| Siedepunkt [°C]     | -161,5 [2.11]    | -161 [2.6]             | -161 [2.6]                | -161 [2.6]         |
| Dichte [kg/m³]      | 0,7175 [2.11]    | 0,800–0,830 [2.6]      | 430–470 [2.12, S. 4]      | 0,81–0,82 [2.13]   |
| Brennwert [MJ/kg]   | 55,5 [2.5]       | 36–50 [2.6]            | ca. 50 [2.5]              | 40,68–46,80 [2.13] |
| Zündtemperatur [°C] | 595 [2.11]       | 600 [2.10]             | keine Zündung, da flüssig | 600 [2.10]         |
| Klimaschädlichkeit  | hoch [2.11]      | hoch, wenn unverbrannt | vgl. Erdgas               | vgl. Erdgas        |
| Aggregatzustand     | gasförmig [2.11] | gasförmig              | flüssig                   | gasförmig          |

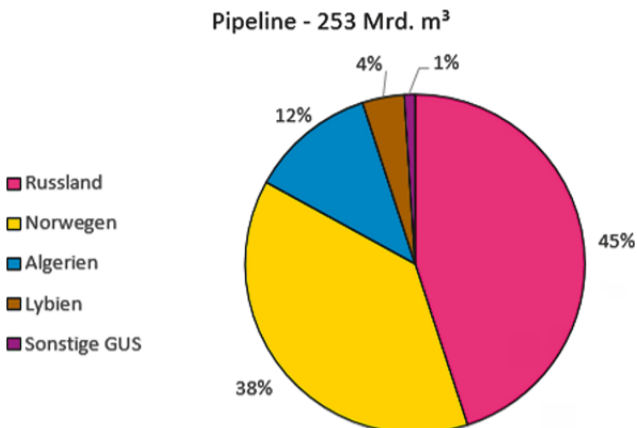
**Tabelle 2.2:** Zusammensetzung von LNG verschiedener Anlagen [2.12] (Quelle: ILEX Energy Consulting, 2003)

| Bestandteil<br>Mol-% | Nigeria<br>LNG | Arun<br>LNG | Brunei<br>LNG | Oman<br>LNG | Atlantic<br>LNG | Kenai<br>LNG |
|----------------------|----------------|-------------|---------------|-------------|-----------------|--------------|
| Methan               | 87,9           | 88,48       | 89,4          | 90          | 95              | 99,8         |
| Ethan                | 5,5            | 8,36        | 6,3           | 6,35        | 4,6             | 0,1          |
| Propan               | 4              | 1,56        | 2,8           | 0,15        | 0,38            | 0            |
| Butan                | 2,5            | 1,56        | 1,3           | 2,5         | 0               | 0            |
| Nitrogen             | 0,1            | 0,04        | 0,2           | 1           | 0,02            | 0,1          |

Die Werte für LNG schwanken im gleichen Maße, wie die chemischen Bestandteile im Erdgas variieren. **Tabelle 2.2** zeigt die Zusammensetzung von LNG aus verschiedenen Verflüssigungsanlagen weltweit.

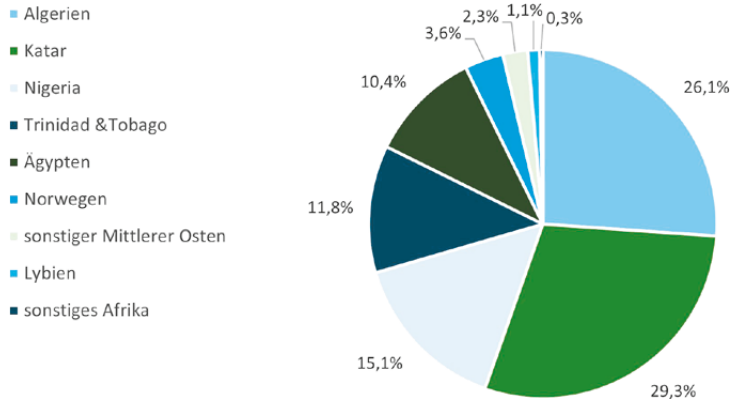
### 2.2.2 Menge und Herkunft von LNG

Erdgas spielt eine entscheidende Rolle im zukünftigen Energiemix der Weltwirtschaft. Statistiken zufolge deckte Erdgas im Jahr 2009 ca. 21 % des globalen Energiebedarfs ab. Rund 72 % des weltweit gehandelten Erdgases wurden via Pipelines und 28 % in Form von LNG, durch spezielle LNG-Tanker, transportiert. LNG ermöglicht die Erschließung neuer Bezugsquellen, welche aufgrund hoher Kosten nicht mit dem Pipelinesnetz verbunden werden können, was wiederum zu Veränderungen auf den internationalen Märkten führt. **Bild 2.5** und **Bild 2.6** zeigen die Erdgasimporte der Europäischen Union via Pipeline oder LNG-Transport aus den Jahren 2015 und 2022. Russland verfügte im Bereich des Pipeline-Transportes über eine dominante Marktstellung. Dagegen war Katar einer der weltweit größten LNG-Produzenten. Zudem befanden sich im Mittleren Osten 27 % der globalen Verflüssigungskapazitäten [2.1]. Aufgrund

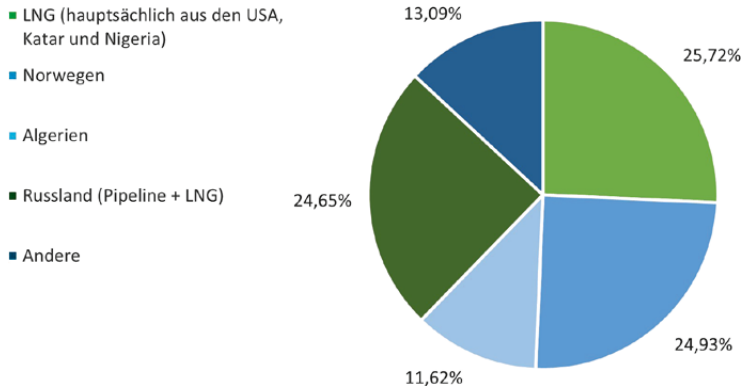


**Bild 2.5a:** Erdgasimporte in die EU via Pipeline-Transport, modifiziert nach [2.1], Stand 2015

**Bild 2.5b:** Erdgasimporte in die EU via LNG-Transport in Prozent, modifiziert nach [2.1], Stand 2015



**Bild 2.6:** Erdgasimporte in die EU von Januar 2022 bis November 2022 (LNG + Pipeline) [2.55]



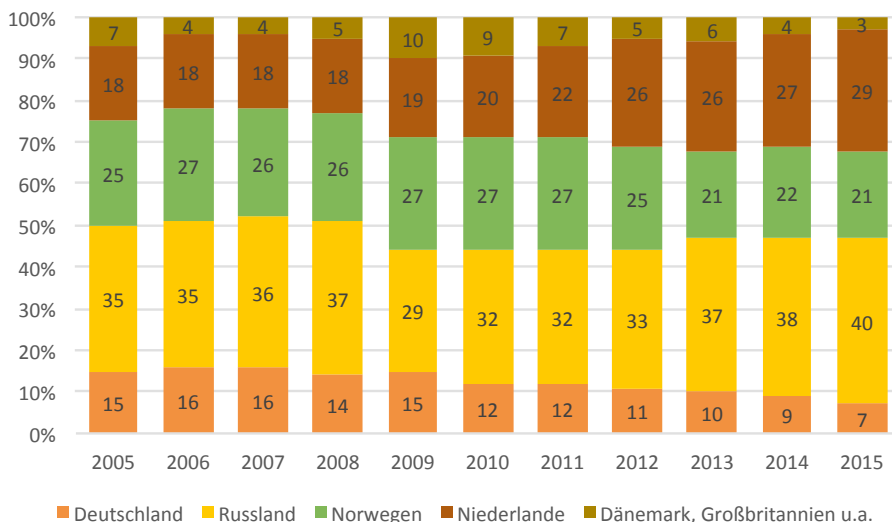
der russischen Invasion in der Ukraine bezog die EU 2022 deutlich weniger Gas aus Russland als zuvor [2.55]. Dafür wurde die Einfuhr von LNG, vor allem aus den USA, hochgefahren [2.55].

### 2.2.2.1 LNG-Importländer

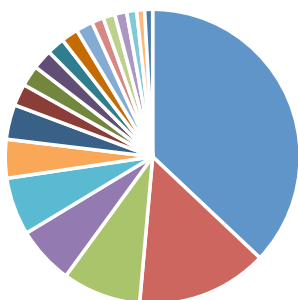
Da die europäische Union kaum über eigene Erdgasreserven verfügt, um ihren Verbrauch selbst decken zu können, zählt sie zu den größten Erdgasimporteuren weltweit. In **Bild 2.7** wird das Erdgasaufkommen in Deutschland diversifiziert nach zwischen 2005 und 2015 dargestellt. Auffällig ist dabei, dass viele Staaten, wie z. B. die Gemeinschaft Unabhängiger Staaten (GUS) sowie Lateinamerika, ihren Verbrauch mit dem im Inland geförderten Erdgas decken können.

Eines der Hauptimportländer im Jahre 2015 war Japan. Es importierte ca. 85,6 Millionen Tonnen LNG (vgl. **Bild 2.8**).

Der Dezember 2022 markierte eine Wende in der deutschen Gaspolitik. Das erste deutsche LNG-Importterminal nahm in Wilhelmshaven den Betrieb auf. Damit entstand zum ersten Mal ein direkter Zugang zum globalen Markt für Flüssiggas-Tanker.



**Bild 2.7:** Deutschlands Erdgasaufkommen nach Herkunftsländern [2.54]



**Bild 2.8:** LNG-Importe und Marktanteile nach Ländern, 1 Mtpa  $\approx$  1,3 Mrd. m<sup>3</sup> Erdgas pro Jahr (Datenquelle: IHS und IGU), Stand 2015

|                       |                     |                      |                   |
|-----------------------|---------------------|----------------------|-------------------|
| Japan, 85.6 Mtpa      | Südkorea, 33.4 Mtpa | China, 19.8 Mtpa     | Indien, 14.7 Mtpa |
| Taiwan, 14.6 Mtpa     | UK, 9.8 Mtpa        | Spanien, 8.9 Mtpa    | Türkei, 5.6 Mtpa  |
| Brasilien, 5.2 Mtpa   | Mexiko, 5.1 Mtpa    | Frankreich, 4.5 Mtpa | Italien, 4.2 Mtpa |
| Argentinien, 4.2 Mtpa | Ägypten, 3.0 Mtpa   | Chile, 3.0 Mtpa      | Kuwait, 2.9 Mtpa  |
| Thailand, 2.6 Mtpa    | VAE, 2.0 Mtpa       | Singapur, 2.0 Mtpa   |                   |

Ende 2021 lagen die Importkapazität der europäischen LNG-Terminals bei 209 bcm/a. Im Jahr 2022 kamen 18 bcm dazu, darunter die Terminals in Eemshaven (NL) und Wilhelmshaven (D). Zum Vergleich: Russland exportierte vor dem Krieg ca. 150 bcm/a nach Europa. Nach den aktuellen Planungen wird die Importkapazität der europäischen LNG-Terminals (EU-27 plus UK) bis Ende 2023 um 55 bcm und bis Ende 2024 um weitere 16 bcm pro Jahr steigen. Das wäre also ein Anstieg um insgesamt etwa ein Drittel in nur zwei Jahren. Außer in Deutschland und in den Niederlanden gibt es Projekte in Estland, Finnland (beide Ende 2023), Frankreich,